ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПОЛИТЕХ
Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли

В. В. Глухов
Л. Б. Гущина

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ОТРАСЛЕЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ

Учебное пособие

ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли

В. В. Глухов Л. Б. Гущина

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ОТРАСЛЕЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ

Учебное пособие

2-е издание, стереотипное

ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2025

УДК 669+621.7/9(075.8)
ББК 65.5я73
Г55

Р е ц е н з е н т ы:
Доктор химических наук, профессор,
декан факультета технологий и исследования материалов СПбГПУ
С. Е. Александров
Член-корреспондент РАН, директор ЦНИИ РТК
В. А. Лопота

Глухов В. В. **Основы технологий отраслей национальной экономики** : учеб. пособие / В. В. Глухов, Л. Б. Гущина. – 2-е изд., стереотипное. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – 466 с.

Пособие соответствует авторскому курсу дисциплины «Производственный менеджмент» направлений подготовки бакалавров 38.03.01 «Экономика» и 38.03.02 «Менеджмент».

Изложены основы технологий материального производства (черной и цветной металлургии, термической обработки металлов, прокатного и литейного производства, обработки металлов давлением и др.). Рассмотрены высокие технологии: порошковая и космическая металлургия, лазерная технология. Приведена характеристика состояния и показаны роль металлургической отрасли в национальной экономике и перспективы ее развития.

Предназначено для студентов, аспирантов и практикующих специалистов в области экономики и управления, заинтересованных в изучении современных тенденций развития технологий отраслей национальной экономики.

Ил. 118. Табл. 33. Библиогр.: 78 назв.

Печатается по решению
Совета по издательской деятельности Ученого совета
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

© Глухов В. В., Гущина Л. Б., 2025
© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025

ISBN 978-5-7422-8805-3

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 6

1. Понятие технологии и производства 8

1.1. Основные термины и понятия 8
1.2. Эволюция технологий 23
1.3. Классификация металлов и материалов 32
1.4. Классификация производственных процессов на металлургических предприятиях 37

2. Черная металлургия 41

2.1. Состояние отрасли 43
2.2. Производство чугуна 51
2.2.1. Основные материалы доменного процесса 53
2.2.2. Схема доменного процесса 68
2.3. Продукты доменной плавки 77
2.3.1. Структура, свойства и назначение чугуна 79
2.3.2. Технико-экономические показатели доменного процесса 84
2.3.3. Способы экономии топлива 85
2.4. Способы прямого получения железа 89
2.4.1. Процессы твердофазного восстановления 93
2.4.2. Процессы жидкофазного восстановления 102
2.5. Производство стали 106
2.5.1. Общие положения 107
2.5.2. Шихтовые материалы 110
2.5.3. Конверторное производство стали 115
2.5.4. Мартеновское производство стали 125
2.5.5. Электросталеплавильное производство 134
2.5.6. Разливка стали 150
2.5.7. Внепечная обработка стали 155
2.5.8. Индукционные печи 162
2.5.9. Специальные методы электрометаллургии 163
2.5.10. Классификация стали 172

3. Обработка металлов давлением 176
3.1. Прокатное производство 176
3.2. Схема и сущность прокатки 179
3.3. Типы прокатных станов 181
3.4. Листопрокатное производство 188
3.5. Сортопрокатное производство 193
3.6. Трубопрокатное производство 195
3.7. Гнутые профили проката и прокат с защитными покрытиями 205
3.8. Кузнечно-штамповочное производство 210
3.8.1. Классификация кузнечно-штамповочных машин 210
3.8.2. Краткая характеристика кузнечно-штамповочных процессов 224
3.9. Волочильное производство 253

4. Литейное производство **257**
4.1. Общие сведения 257
4.2. Литье в песчаные формы 259
4.2.1. Технология изготовления отливок в песчаные формы 259
4.2.2. Приготовление формовочных и стержневых смесей 261
4.2.3. Способы изготовления форм 266
4.3. Специальные способы литья 272
4.3.1. Способы литья в специальные формы 272
4.3.2. Способы литья с применением внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл 277
4.3.3. Капельные технологии 279

5. Термическая обработка металлов 281
5.1. Причины изменения свойств сплавов при термической обработке 281
5.2. Виды термической обработки 287

6. Цветная металлургия 298
6.1. Свойства и области применения некоторых цветных металлов 300
6.2. Краткий обзор состояния отрасли 308
6.3. Производство алюминия 313
6.4. Производство меди 326
6.5. Производство титана 338

7. Порошковая металлургия 361
7.1. Продукция порошковой металлургии 361
7.2. Производство порошков 366

7.3. Формование металлических порошков 370
7.4. Спекание 375
7.5. Дополнительные операции 378
7.6. Пористые материалы 381

8. Коррозия металлов 386

8.1. Общие сведения 386
8.2. Основы теории коррозии металлов 392
8.3. Локальные виды коррозии 400
8.4. Коррозия металлов в природных и технологических средах ... 404
8.5. Защита металла от коррозии 409

9. Новые материалы и технологии будущего 419

9.1. Новые конструкционные материалы 420
9.2. Композиционные материалы 422
9.3. Аморфные и тиксотропные материалы 425
9.4. Космическая металлургия 429
9.5. Электрохимическая энергетика 432

10. Основы лазерной технологии 435

10.1. Краткий обзор состояния отрасли 438
10.2. Принцип действия лазера 441
10.3. Процессы лазерной технологии 445
10.4. Лазерные технологические комплексы 452

Краткие сведения об основателях современной металлургии 455

Библиографический список 461

ВВЕДЕНИЕ

Роль технологии в истории и становлении человечества трудно переоценить. Медный век, бронзовый, железный — важнейшие этапы в развитии человеческой цивилизации. Рождение и развитие металлургии — первого технологического производственного процесса в истории человечества — коренным образом изменило условия жизни. Без металла не обошлось ни одно из выдающихся достижений современного общества.

Начавшийся в конце средних веков интенсивный рост городов, развитие ремесел, торговли и связанный с этим экономический подъем привели к повышенному спросу на конструкционные материалы. Быстрое развитие машиностроения, возрастающие требования к военной технике, появление совершенно новых отраслей промышленности требовали увеличения производства черных и цветных металлов и сплавов.

Вторая половина XX в. была ознаменована созданием и массовым использованием ранее неизвестных, можно сказать, фантастических, материалов. Но главным конструкционным материалом XXI в. остается сталь.

Металлургическое производство является стратегическим национальным ресурсом. Конкурентоспособность его продукции, создаваемой на основе высоких технологий, достаточный объем инвестиций и другие факторы смогут обеспечить в широких масштабах занятость высококвалифицированных специалистов и в конечном счете рост национального богатства.

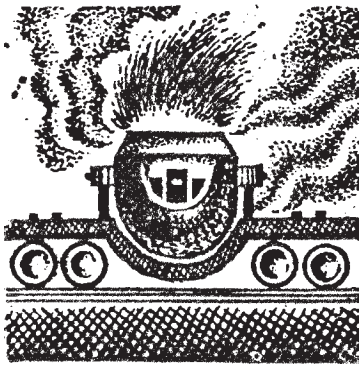
Цель данного пособия — дать характеристику технологии современного производства, его особенностей, базовых и высо-

ких технологий, классификацию основных материалов. В доступной форме изложены базовые принципы и организационные основы технологических процессов. Не ставится задача освоения химических, термодинамических, тепловых основ и закономерностей процессов.

За рамками книги остались вопросы, связанные с историей развития и становления рассматриваемых производств. Те, кого они заинтересуют, смогут найти множество романтических, а порой и трагических, интересных фактов в соответствующей научно-популярной литературе.

При написании пособия использовано издание, подготовленное коллективом преподавателей кафедры экономики и менеджмента технологий и материалов.

Во второй части пособия будут рассмотрены вопросы, связанные с технологией и выпуском продукции машиностроения, производством стекла, пластмасс, изделий из дерева.



1. ПОНЯТИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

В техническом прогрессе участвуют три основных элемента: знания, энергия и материал.

Дж. Томсон

Профессии, связанные с обработкой металла в XVI в. в Москве: литцы, ярыги, самопальщики, пушкари, латники, оковщики, брольщики, ножевники, оловянщики, подковщики, словолитцы, колокольники, паникадильщики, трубники, паяльщики, пряжники, решеточники, мисники, скобельщики.

На побережье Финского залива в начале XVI в. железоделательное производство тоже получило широкое развитие. Здесь действовали 204 домницы и 75 кузниц. Значительно большее число домниц по сравнению с кузницами свидетельствовало, что получаемый металл в немалом количестве шел на внешний рынок. Первые русские цари понимали, что для увеличения могущества страны нужно всячески помогать развитию различных отраслей промышленности и прежде всего металлургии.

1.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

Как известно, вещества и поля составляют материю (в общем смысле), при этом вещества могут быть в различных состояниях: твердом, жидком, сыпучем, газообразном, плазменном. Классическое деление физических полей следующее: гравитационное, электрическое, магнитное, электромагнитное, ядерное.

Частными (условно дополнительными) являются механическое, тепловое, акустическое, биологическое и другие поля.

Все вещества и поля находятся в постоянном взаимодействии друг с другом, образуя пространство возможных технологий. Взаимодействия, не зависящие от воли человека, называются природными, а зависящие — технологическими. Множество технологий содержит около 5000 простейших (элементарных) технологий, что касается сложных (комбинированных), то их количество не ограничено.

По характеру изменения в некотором заданном объеме пространства в обобщенном виде все технологии (а также природные процессы) можно разделить на четыре класса:

I — технологии, приводящие к уменьшению материи в некотором заранее заданном (рассматриваемом) объеме пространства;

II — технологии, приводящие к росту материи;

III — технологии, приводящие к преобразованию материи без существенного изменения ее количества;

IV — технологии, обеспечивающие перенос (транспортирование) и сохранение (складирование) материи.

При этом под материей в широком смысле понимаются как вещества, так и поля, т. е. масса, энергия, информация и т. д.

В переводе *технология* — наука о производстве, т. е. о способах переработки сырья и материалов в средства производства и предметы потребления. Справочные издания определяют технологию как совокупность способов и приемов добычи, обработки сырья, материалов, полуфабрикатов, как искусство реализации промышленных процессов, как набор закономерностей, заимствованных из различных наук с целью реализации производства. Развитие и совершенствование производства расширило это понятие, и в современном понимании технология — наука о наиболее экономичных способах и процессах производства сырья, материалов и изделий.

Уровень технологии в любой отрасли производства оказывает решающее влияние на его экономические показатели. Чтобы управлять современным производством, обеспечивать связь его подразделений, надо иметь конкретное представление о самом производстве, его структуре, технологических процессах, на которых оно основано.

Система технологий должна иметь определенную организационную форму, характеризуемую как комплексами машин, оборудования, линий, цехов, предприятий, так и организационными формами осуществления технологических процессов (на уровне бригад, участков, предприятий, отраслей).

Технология характеризуется: номенклатурой и качеством производимой продукции, используемыми топливо- и энергоресурсами, основными и вспомогательными материалами, составом оборудования, продолжительностью производственного цикла. Для экономики предприятия при производстве продукции определенного сортамента и качества важное значение имеют:

- расход материальных и топливно-энергетических ресурсов на единицу производимой продукции;
- удельный расход затрат живого труда;
- продолжительность отдельных технологических операций;
- степень использования оборудования и производственных площадей;
- образование и возможность утилизации отходов;
- воздействие технологии на окружающую среду.

Выбор технологии и используемых в технологическом процессе сырья, материалов и других ресурсов определяется назначением и качеством конечного продукта.

Технологии могут быть классифицированы:

- по историческим стадиям развития;
- по цели применения (использование, преобразование или создание вещества природы);
- по виду получаемого продукта (технологии материального производства, выработки энергии, переработки информации);
- по выраженности теоретических основ (эмпирические, теоретические, смешанные);
- по характеру применяемых процессов (механические, физические, химические, биологические);
- по виду используемой энергии (физическая, тепловая, электрическая, солнечная, ветровая, геотермальная и т. д.);
- по степени изменения окружающей среды (безотходные, загрязняющие, улучшающие);
- по степени автоматизации (ручной труд, механизированные, человеко-машинные, автоматизированные, интеллектуальные).

На протяжении многих веков преобладающей была технология применения вещества природы (древесины, камня, углеводородного сырья и т. п.) в натуральной форме. Из природных возобновляемых источников энергии первыми стали масштабно применяться установки на основе силы ветра и воды (ветряные и водяные мельницы). XX в. был периодом сначала "паровых" технологий, а затем электрических, периодом активного использования природного углеводородного ресурса, масштабной переработки природных запасов металлов. В XX в. человечество создало уникальные по масштабам доменные печи, линии передач высокого и супервысокого напряжения, супертанкеры и авиалайнеры, электрические двигатели и генераторы, турбины, сверхвысокие телебашни и здания-небоскребы, компьютеры и роботы.

В дальнейшем получили развитие технологии, связанные с преобразованием и изменением не только механических, но и физико-технических, биологических свойств материалов. Сравнительно недавно стали применяться технологии создания таких материалов, которые в природе не существуют (электронно-чистые вещества, синтезированные элементы и соединения, источники излучений и т. д.).

Раз в полвека утверждаются новые *технологические уклады* (формируется новый технологический способ производства). В настоящее время завершается развитие механического технологического уклада и начинается большой технологический сдвиг. Формирующийся технологический уклад опирается на компьютерные и телекоммуникационные системы, робототехнику, биогенетику, биоинженерию, возобновляемые природные источники энергии. Трехсотлетний период наращивания скоростей, температур, масштабов, давлений сменяется энерго- и материалосберегающей технологией, управлением на базе информационных потоков. Увеличивается "глубина" воздействия на материалы, создаются миниатюрные машины и агрегаты, внедряются биологические методы, наращивается интеллектуальный потенциал процессов, повышается разнообразие производимых продуктов.

Современные технологии становятся инновационными. *Инновация* — идея, доведенная до практического применения. Международный стандарт определяет инновацию как конечный ре-

зультат инновационной деятельности, получивший воплощение в виде нового или усовершенствованного продукта, внедренного на рынке, нового или усовершенствованного технологического процесса, используемого в практической деятельности либо в новом подходе к социальным услугам. Термин "*нововведение*" часто применяют по отношению к изобретениям, иногда им обозначают новые способы и методы работы, изменение распределения ресурсов и фондов в организации. Общепринятая точка зрения рассматривает нововведение как процесс внедрения новых продуктов, услуг и производственных процессов. Специфическое содержание инноваций составляют изменения, а главная функция инновационной деятельности — функция изменения. Нововведения "толкают" развитие предприятий, отраслей, экономики страны. Предприятия с высоким темпом внедрения процветают, прочие — прозябают и разоряются. В настоящее время конкуренция в новизне и скорости, с которой новое внедряется и "выбрасывается" на рынок нововведений, так же остра, как и конкуренция в области рыночных цен. Новая техника, передовой производственный опыт, ноу-хау — основа успеха предпринимательской деятельности.

Новая техника — новые, более совершенные орудия труда. *Передовой производственный опыт* — совокупность новых и прогрессивных знаний и навыков, воплощенных в технические конструкции, технологии, организацию производства, применение которых в других областях может дать положительный результат. *Ноу-хау* — не защищенные охранными документами и не опубликованные знания или опыт научного, технического, управленческого или иного характера (незапатентованные изобретения, технологические режимы, материалы, методы контроля, способы организации производства).

Инновационный научно-технический проект — научное исследование или разработка, направленная на решение конкретной научно-технической задачи, в результате выполнения которой создается наукоемкая продукция.

Инновационная научно-техническая программа — форма организации исследований и разработок, проводимых по приоритетным направлениям науки и техники.

Интеллектуальная собственность — права на литературные, художественные и научные произведения, открытия, изобретения, промышленные образцы, базы данных, ноу-хау, экспертные системы, товарные знаки.

Промышленная собственность — часть интеллектуальной собственности, используемой в промышленности в виде изобретений, полезных моделей, промышленных образцов, товарных знаков, знаков обслуживания и наименований мест происхождения.

Высокие технологии — это наукоемкие в разработке технологии, характеризующиеся использованием новейших материалов и способов производства; обеспечением скачкообразного улучшения результатов; высокой долей затрат на НИОКР; коротким жизненным циклом (ЖЦ) продукции; высокими темпами морального старения и обновления продукции; высоким риском. К высоким технологиям в настоящее время относятся технологии в аэрокосмической и фармацевтической промышленности, электронике, компьютерные и лазерные технологии, биотехнология.

Наукоемкие прогрессивные технологии являются важнейшими факторами интенсификации производства, так как позволяют создать конкурентоспособный товар с высокими потребительскими свойствами.

Продукцию высоких технологий характеризует конечный результат. Причины и факторы, обеспечивающие качество этой продукции: научно-исследовательский потенциал в стране; скорость освоения научно-технических достижений; наличие и уровень подготовки научных кадров, инженеров, рабочих; патентная деятельность; эффективность использования ресурсов в производстве; динамичность и емкость внутреннего рынка; инвестиционная ситуация; уровень налогов и заработной платы, номенклатура продукции, условия поставок, организация сервиса.

Жизненный цикл (ЖЦ) продукции высокой технологии (рис. 1) характеризуется более длительной стадией НИОКР и более короткими стадиями роста и спада. Длительность жизненного цикла может достигать двух-трех лет. Причины короткого жизненного цикла — короткие стадии “рост” и “спад” (что связано с повышенными требованиями к продукции высокой технологии), значительные вложения на стадии НИОКР позволяют сократить ее продолжительность и соответственно уменьшить жизненный цикл.

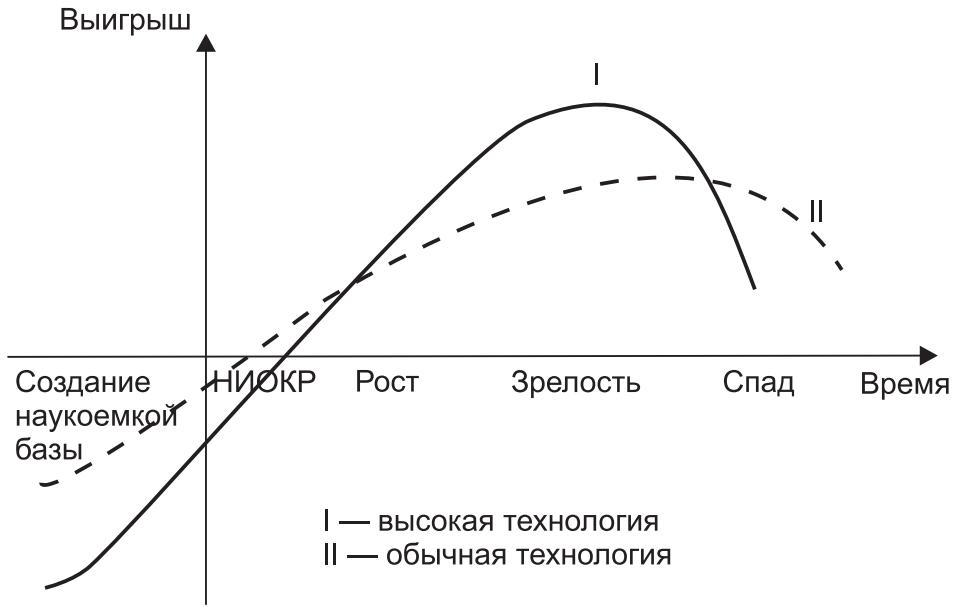


Рис. 1. ЖЦ продукции высокой технологии

Высокие технологии классифицируются по следующим признакам:

- по периоду реализации (перспективные и текущие);
- по степени наукоемкости (высочайшей, высокой и средней степени);
- по степени новизны (патенты, ноу-хау, изобретения, результаты НИР и т. п.);
- по времени выхода на рынок (с длительным и коротким сроком выхода);
- в зависимости от инициатора (созданные по инициативе потребителей, по инициативе производителей, принудительные технологии);
- по источникам ресурсообеспеченности (государственные, частнопромышленные, академические, смешанные);
- по создаваемым объектам (новые продукты, новые материалы, новые процессы);
- по базовым элементам (новые источники энергии, новые технологии, новые материалы);
- по принципу масштабности (национальные, региональные, местные);
- по степени воздействия на рынок (создающие новые рынки, расширяющие рынки в соответствующих отраслях).

Для сохранения конкурентоспособности предприятие должно располагать в физическом исполнении или в банке ноу-хау **системой технологий**, которая обеспечит перекрытие во времени жизненных циклов технологий и в целом стабилизацию эффективной деятельности.

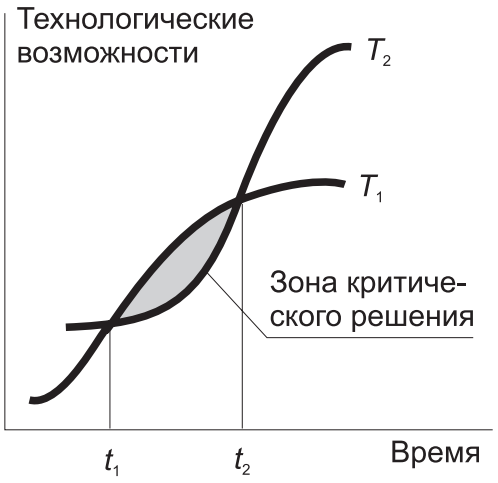


Рис. 2. Система технологий

Формирование системы технологий рассмотрим на примере двух технологий: T_1 используется в фирме, T_2 только разрабатывается (рис. 2). Современная ситуация соответствует моменту t_1, когда наступит момент t_2, неизвестно. Фирма преуспеет в бизнесе или потерпит неудачу в зависимости от начала капиталовложений в освоение технологии T_2. В такой ситуации предпочтительнее стратегия смешанных инвестиций — в обе технологии — в течение всего интервала времени (между t_1 и t_2): в T_1 для обеспечения непрерывного получения прибыли и максимальной отдачи от вложенного в нее ранее капитала, в T_2 для обеспечения плавного перехода к ее использованию, когда технология T_1 себя исчерпает.

По уровню гибкости различают стабильные, плодотворные и изменчивые технологии.

Стабильная технология (рис. 3,*а*) остается неизменной в течение всего жизненного цикла спроса, расширение производства достигается за счет улучшения отдельных параметров изделия, а не прогресса в технологии.

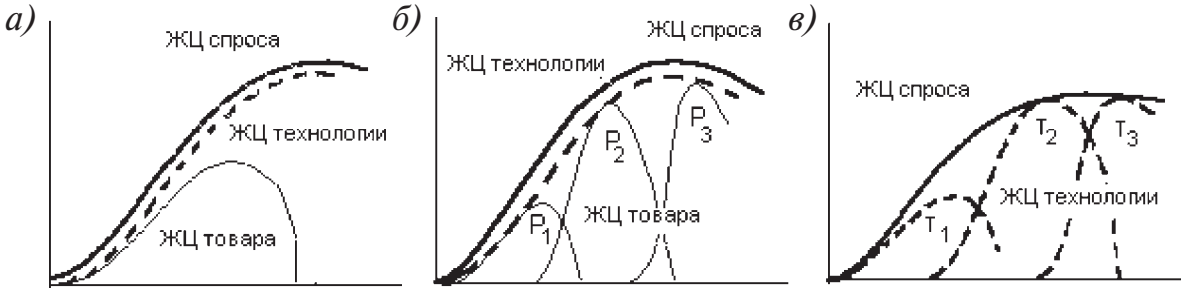


Рис. 3. Уровни гибкости технологий

При *плодотворной* технологии (рис. 3,*б*) основная технология сохраняется длительный период, но разрабатываются сменяющие друг друга поколения продукции с лучшими показателями и более широким диапазоном применения.

Изменчивая технология представлена на рис. 3,*в*.

Развитие технологий — это следствие стремления человечества к прогрессу, освоению новых видов энергии, материало- и трудосбережению, освоению новых знаний, созданию более комфортных условий жизнедеятельности своего и будущих поколений, сохранению среды. В целом технологии развиваются непрерывно, жизненные циклы следуют один за другим. Разрыв между циклами во времени, когда первый товар пошел на спад, а второй еще не выведен на рынок, грозит фирме потерей рынков сбыта и убытками, а несвоевременная смена технологий в 70 % случаев ведет к смене лидера в отрасли.

Важнейшим условием эффективности технологической системы является обеспечение ее динамического равновесия с системой управления и организационной культурой. Механизм обеспечения равновесия с системой управления поясняет рис. 4.

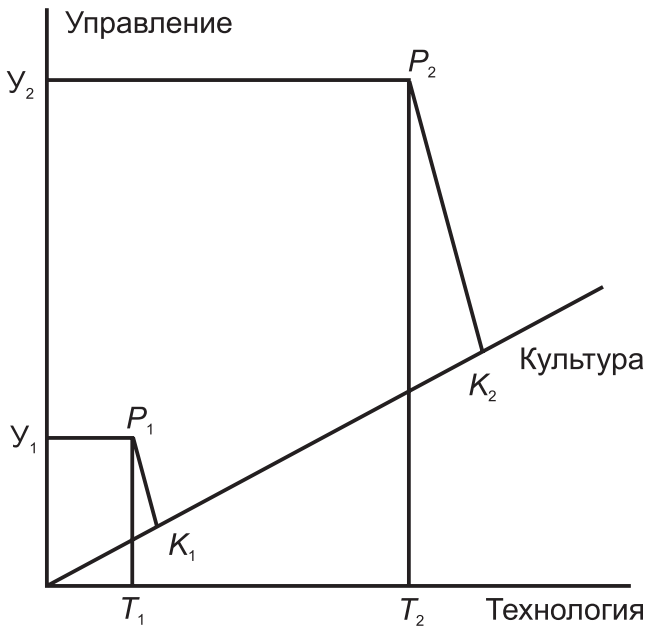


Рис. 4. Схема механизма равновесия технологии с управлением и культурой производства

Начальное состояние фирмы характеризуется относительным равновесием (P_1) с координатами T_1, $У_1$, K_1. Рыночная конъюнктура вынудила фирму применить новые технологические системы, в основе которых лежат наукоемкие технологии. В результате произошло повышение технологического уровня производства от T_1 до T_2. Система вышла из состояния относительного равновесия. Возникает внутрифирменное противодействие нововведениям. В итоге решения этой проблемы уровень управления

повышается до $У_2$, соответствующего равновесию с уровнем технологии $Т_2$. Для достижения устойчивого функционирования обновленной технологической системы необходимо повысить уровень организационной культуры до $К_2$.

Показатели, характеризующие технологическую систему предприятия, представлены в табл. 1.

Извлекаемое из недр минеральное сырье служит источником для получения 95 % энергии и 90 % товарной продукции тяжелой индустрии. Укрупненная классификация полезных ископаемых и минеральных ресурсов включает в себя:

твердое топливно-энергетическое и химическое сырье (уран, уголь, сланцы, торф);

жидкое и газообразное топливно-энергетическое и химическое сырье (нефть, природный газ, газовый конденсат, попутный нефтяной газ);

металлы черные (железо, марганец, хром, титан, ванадий);

металлы цветные (алюминий, магний, медь, свинец, цинк, никель, кобальт, олово, вольфрам, молибден, висмут, сурьма, ртуть, мышьяк);

металлы редкие (литий, бериллий, ниобий, тантал, цирконий, иттрий, стронций);

рассеянные элементы;

благородные металлы (золото, серебро, платина);

радиоактивные металлы (радий, торий);

сырье для металлургии (плавиковый шпат, флюсы, известняки, огнеупоры, алуниты, силлиманит, кианит);

техническое сырье, драгоценные и полудрагоценные камни;

сырье для строительной индустрии (строительные камни, облицовочные камни, наполнители бетона, вяжущие материалы, минеральные краски, стекольно-керамическое сырье);

горно-химическое сырье (натрийсодержащие соли, сера, серный колчедан, фтораты, бораты, сульфаты, апатиты, фосфориты, калийные соли, селитра);

воды (подземные, поверхностные, грязи и илы);

инертные газы (гелий, неон, аргон).

В общей стоимости годового объема добываемого минерального сырья (около 1 трлн. дол.) превалируют топливно-энергетические ресурсы (более 75 %) и черные и цветные металлы

Таблица 1

Характеристики технологической системы (ТС) предприятия

Экономические	Технологические	Социальные	Экологические
Результат			
Цена продукции Издержки потребления	Твердость Износостойкость Жаропрочность Надежность	Насыщение спроса Качество послепродажного обслуживания	Безопасность эксплуатации Возможность утилизации отходов продукции
Ресурсы			
Цена исходных ресурсов	Обрабатываемость Технологичность используемых материалов	Дефицитность ресурсов	Химический состав Изоляционные свойства
Экология			
Экономический ущерб от загрязнения окружающей среды Затраты на восстановление Штрафы за нарушения экологических норм	Характеристики отходов производства как вторичных ресурсов	Влияние ТС, отходов производства на социальное равновесие общества	Характеристики выбросов
Предприятие			
Издержки производства Прибыль Рентабельность Эффективность Ликвидность Объем продаж Производительность труда	Технологический уровень производства Конкретные параметры оборудования и технологии Уровень брака	Престижность Комфортность условий Культура производственных отношений Невыходы на работу	Температура Влажность Запыленность Освещенность рабочих мест Потери времени от травм

(около 15 %). На благородные металлы и алмазы приходится более 5 % стоимости, на неметаллические полезные ископаемые — менее 5 %. Среди развитых стран наиболее богаты мине-

ральными ресурсами Австралия, ЮАР, Канада, США. Из развивающихся стран это страны Ближнего Востока, Бразилия, Мексика, Чили, Перу, Марокко, Заир, Гвинея. Огромные запасы имеются в России, Казахстане, Китае, Монголии.

Различают **материальное** производство (промышленность, сельское хозяйство, строительство, связь, транспорт и др.) и **нематериальное** (наука, искусство, образование, здравоохранение).

Современная классификация материального производства включает следующие отрасли:

- добывающую (горнодобывающую, нефтяную и газовую);
- электроэнергетику;
- угольную;
- металлургию (черная, цветная);
- машиностроение и металлообработку;
- лесную;
- химическую;
- деревообрабатывающую и целлюлозно-бумажную;
- производство строительных материалов;
- транспорт и связь;
- легкую;
- пищевую;
- сельское хозяйство.

Под **отраслью** понимается совокупность предприятий, характеризуемых общностью назначения производимой продукции (услуг), однородностью потребляемых ресурсов, технической базы и технологических процессов, одинаковым профессиональным составом кадров и специфическими условиями работы. Каждая отрасль промышленного производства имеет свою технологическую и организационную специфику. Одни из них включают в себя предприятия, производящие продукцию для промежуточного потребления, другие — для конечного использования; одни относятся к добывающей, другие — к обрабатывающей промышленности, третьи — к сфере услуг.

Подотрасли — это группы однотипных предприятий в составе отрасли. Например, черная и цветная металлургия, входящие в отрасль “Металлургия”, состоят из предприятий разных подотраслей добывающей и обрабатывающей промышленности.

В составе машиностроительной отрасли выделяют группы предприятий: энергетическое и транспортное машиностроение; электротехническую промышленность; химическое и нефтяное машиностроение; станкостроительную и инструментальную промышленность; приборостроение; автомобильную промышленность; тракторное и сельскохозяйственное машиностроение; строительное, дорожное и коммунальное машиностроение; машиностроение для легкой и пищевой промышленности; авиационную, судостроительную, электронную промышленность; производство средств связи и медицинской техники; оборонную и тяжелую промышленность и др.

В составе электротехнической промышленности выделяют производство высоковольтной и низковольтной аппаратуры; светотехнической арматуры; преобразовательной техники; трансформаторов; электромашин; кабелей; ламп; изоляторов; конденсаторов; электробытовых приборов; транспортного и электросварочного оборудования и др. Электротехническая промышленность создает материальную основу для использования электроэнергии для производственных и бытовых нужд.

Предприятие (фирма, компания и др.) — это комплексная, открытая социально-экономическая система, связанная множеством специфических отношений с окружающей средой.

Производственная структура предприятия — это совокупность его подразделений (производств, цехов, участков), их специализация (подетальная, предметная, технологическая) и взаимосвязь (движение потоков). Она отражает особенности разделения труда внутри предприятия между составляющими его звеньями.

Производственный процесс на промышленном предприятии можно представить как системно увязанную совокупность естественных, трудовых и автоматизированных процессов, направленных на превращение исходных материалов в готовую продукцию. В процессе труда предметы труда (сырье, материалы, полуфабрикаты) претерпевают изменения или при непосредственном участии человека, или без него, но под влиянием созданных им условий (*автоматизированные* процессы). При *естественных* процессах изменение предметов труда происходит под воздействием сил природы, например, старение, разрушение металла и др.

Технологический процесс — это сочетание основных и вспомогательных операций. К последним можно отнести транспортировку ресурсов и продуктов, охлаждение, нагрев, очистку, контроль, упаковку. Одна и та же операция на разных производствах может быть в одном случае основной, в другом — вспомогательной. Так, в металлургии нагрев шихты перед ее расплавлением относят к основной операции, а нагрев металла перед его деформацией — к вспомогательной, облегчающей протекание основной.

На рис. 5 в общем виде показаны стадии технологического процесса превращения исходного сырья в готовый продукт.

Технологический процесс является основой любого производственного процесса. Выбор наиболее экономичных и рациональных операций — важнейший путь повышения эффективности производства.

Производственные процессы на промышленных предприятиях имеют различные организационные характеристики, назы-

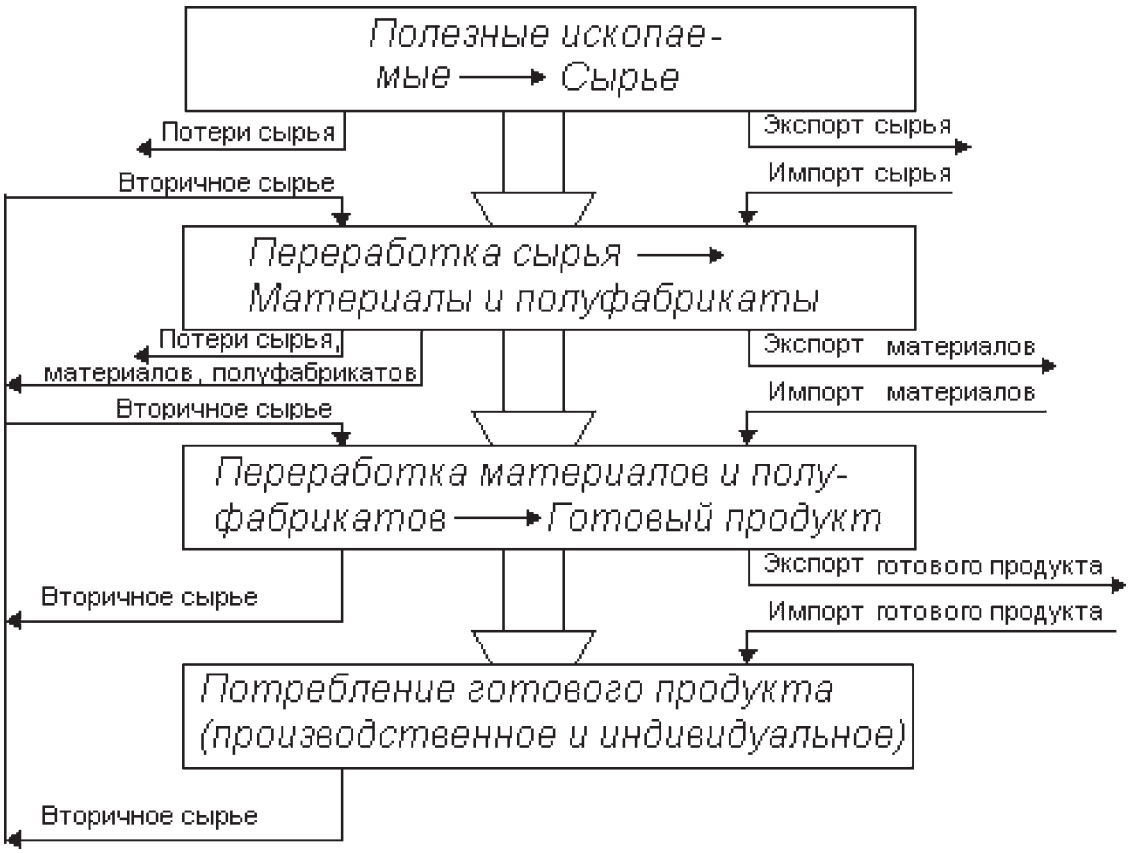


Рис. 5. Схема производства и использования конечного продукта

ваемые **типами производств**. Их признаки: масштаб производства, номенклатура производимой продукции, повторяемость изготовления отдельных ее видов, характер выполняемых операций на отдельных участках и рабочих местах.

В соответствии с этим различают:

единичное производство, которое характеризуется изготовлением единичных экземпляров изделий широкой номенклатуры, нерегулярной повторяемостью производственных работ и отсутствием узкой специализации рабочих мест;

серийное производство, которое связано с изготовлением небольшими партиями изделий ограниченной номенклатуры, регулярной повторяемостью производственных работ и выполнением нескольких операций на каждом рабочем месте; оно включает в себя: *крупносерийное* (2–10 производственных работ в месяц), *среднесерийное* (11–20 производственных работ в месяц) и *мелкосерийное* производство (21–40 производственных операций в месяц);

массовое производство, которое характеризуется постоянной загрузкой рабочих мест одной и той же производственной работой и изготовлением в больших количествах ограниченного числа видов или одного вида продукции.

По особенностям протекания во времени производственные процессы подразделяются на *непрерывные* и *прерываемые*. К первым относятся процессы, в которых оборудование работает без остановок продолжительное время (за исключением ремонтов), ко вторым — процессы, в которых оборудование работает периодически. Непрерывность процесса определяется особенностями технологии или необходимостью достижения высоких показателей использования оборудования. Такие процессы присущи основным цехам металлургических предприятий, а прерываемые — предприятиям и цехам машиностроительного профиля.

Примерами непрерывных процессов являются процессы, протекающие внутри доменных печей, внутрицикловые процессы на МНЛЗ, непрерывных прокатных станах, в сталеплавильных агрегатах.

Для массового непрерывного металлургического производства характерна поточная организация. К *поточным* относятся процессы, в которых все операции одного производственного

цикла протекают непрерывно, как и повторяемость циклов. Систематическое повторение циклов, обусловленное непрерывным движением предметов труда по участкам производства, называется **производственным потоком**.

1.2. ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Развитие техники и технологии происходит за счет создания новых источников энергии, конструирования новых машин и видов техники, создания новых материалов.

Начальным природным источником энергии для человека было солнце. Его тепло обеспечивало жизнь человека. Появление костра резко повысило температуру, которую можно было использовать для приготовления пищи, обработки орудий труда, кожи. Использование угля, нефти и газа предоставило человеку, следующий уровень рабочих температур.

Усилителями возможностей человека стали энергия воды и ветра. Дальнейшее расширение способностей человека было связано с открытиями электричества, магнетизма, радиоволн; лазерного луча; энергии химических реакций; энергии рентгеновских лучей; радиации; атомной энергии; гравитационной энергии.

Первоначально человек опирался на свои физические силы, силы используемых животных. С появлением новых источников энергии создавались соответствующие силовые установки: паровой двигатель; двигатель внутреннего сгорания; реактивный двигатель; электрический мотор; электрический генератор; радиопередатчик и приемник.

Стремление преобразовать один вид энергии в другой стимулировало создание большого разнообразия техники. Водяное колесо преобразовывало движение воды в перемещение жерновов, гидроэлектростанция фактически является мощным преобразователем энергии воды в электроэнергию. К подобному типу установок можно отнести турбины, ветродвигатели, аккумуляторные батареи, атомные станции.

Прогресс источников энергии и силовых установок стимулировал развитие транспортных средств. Весельные суда, транспортные упряжки заменили транспортные средства с паровым двигателем. Затем появились автомобиль, корабль и самолет

с двигателем внутреннего сгорания; автомобиль и самолет с реактивным двигателем, ракета; межпланетный корабль.

Металлургические технологии наиболее полно иллюстрируют развитие технологий. Здесь имеется целый комплекс принципиально разных технологических процессов, которые были созданы человеком. Объясняется это особой ролью металлов в истории научно-технического развития человечества. Отметим ключевые образцы металлургического оборудования: доменные, мартеновские, конверторные и электросталеплавильные печи, прокатные станы.

В машиностроении варианты технологий связаны с видами применяемых соединений отдельных элементов в конструкции, способами обработки материалов и процессами сборки машин и конструкций. Способы соединения элементов в конструкцию включают: механическое сцепление, болтовое соединение, сварку, склеивание.

Первые технологии как система приемов были связаны с обработкой шкур, используемых для изготовления одежды, и камня, применяемого для получения орудий труда и охоты. В этих простейших технологиях не использовалось дополнительное оборудование и не привлекались энергетические источники.

Первым этапом становления производственных технологий были металлургия (выплавка меди более 6 тыс. лет назад) и обжиг материалов. Эти процессы уже использовали энергию горения и простейшее производственное оборудование.

Различают три последовательные исторические **стадии технологии производства**:

- производственные технологии, основанные на *использовании* вещества природы (древесины, камня, открытых источников, углеводородного сырья и т. п.);
- производственные технологии, связанные с *преобразованием* природных материалов и использованием достижений химии, механики и других наук;
- система технологий, обусловленных *созданием* материала в том виде, в каком этот материал в естественной природе не существует (электронно-чистые вещества, синтезированные элементы и соединения, источники излучений и т. д.).

Этапы развития получаемых продуктов следующие.

1. Выделанные шкуры, орудия труда из дерева, камня и кости, естественные красители.

2. Обожженный кирпич, керамика, орудия труда из самородного металла (золото, серебро, свинец, бронза), стекло, фаянс, папирус, пергамент, растительные волокна.

3. Бумага, фарфор, бетон, стальные изделия, ткани.

4. Нефтепродукты, железобетон, пластмассы, синтетические красители, электролитическая медь, ацетилен, натуральный газ, легированные стали.

5. Искусственный каучук, искусственные кристаллы, полупроводники, металлокерамика, искусственные волокна, оптические волокна, биосинтетические материалы, изотопы.

Эволюция технологии связана с выбранными принципами, видами привлекаемых энергоресурсов, составом используемого оборудования.

Оценивая конкретную технологию следует ответить на следующие вопросы.

1. К какой классификационной группе относится технология?

2. Имеются ли альтернативные технологические процессы?

3. Какова роль (значимость) технологии в соответствующей отрасли национальной экономики?

4. Какие виды материальных ресурсов используются?

5. Насколько дефицитны используемые материальные виды ресурсов?

6. Какие виды энергии привлекаются?

7. Насколько дефицитны используемые виды энергии (энергоносителей)?

8. Какой интегральный к.п.д.?

9. Какими специфическими показателями характеризуется технология?

10. Возможна ли утилизация получаемого продукта после цикла использования?

11. Каковы направления повышения эффективности технологии?

12. Какова перспективность технологии?

Металлургия как отрасль сегодня отличается наибольшим разнообразием технологических процессов, многие из которых

не имеют аналогов в природе и являются результатом открытий. Например, принципы технологии получения чугуна, проката, алюминия и др. Эти процессы — не совершенствование предшествующих, а принципиально новые.

Мотивационной причиной развития технологий в большинстве случаев было сбережение энергии и труда, получение искусственного материала — аналога природного.

На базе процессов, используемых в металлургическом производстве (включая черные и цветные металлы, технологии обеспечивающего и вспомогательного производства), можно познакомиться с основным набором технологий промышленного производства.

Современная совокупность технологий зародилась в середине XX в. В этот период появилась вычислительная техника, микроэлектроника, лазеры, ядерная энергетика, искусственные белковые структуры. Из последних, наиболее значимых для развития, следует выделить микропроцессорную, космическую, лазерную и генную технологии. Появление микропроцессоров означает переход к интеллектуальной технике, космическая технология дополняет земные процессы, генная инженерия усовершенствует саму биологию человека, обогащает биосферу.

Эволюция технологий связана с созданием искусственного мира человека. Это неизбежно оказывает воздействие на естественную среду обитания. Опасным это воздействие становится при превышении восстановительного потенциала природы. В этом смысле опасными оказываются крупные металлургические комбинаты, химико-энергетические комплексы. С одной стороны, они позволяют реализовать масштабное эффективное производство, а с другой — оказывают невосстанавливаемое воздействие на окружающую среду. Гигантские производственные объекты несут в себе разрушительное экологическое начало. Нарушаются экологическое равновесие, микроклимат, тепловое равновесие.

Очень часто толчком к изменению технологического процесса становится дефицит исходных ресурсов; например развитие технологического процесса в металлургии. Первоначальным существенным источником энергии были дрова. Вплоть до XVIII в. для получения металла использовали древесный уголь. Их дефи-

цит и полное вырубание лесов привело, например в Англии, к запрету металлургических предприятий. Появился технологический процесс, базирующийся на использовании кокса. Годовая потребность металлургических комбинатов России в коксующемся угле оценивается в 20,8 млн. т. В сырьевой составляющей себестоимости чугуна на кокс приходится до 50 %. Это направило поиски последних лет на изменение технологии в сторону экономии и замены коксующихся углей. Появляется технология прямого восстановления. Роль восстановителя железной руды здесь выполняет природный газ, с помощью которого получают металлизованные окатыши. Активно идет поиск заменителей для каменноугольного кокса. Имеются разработки получения нефтяного и торфяного кокса.

Нефть как ценное сырье была известна многим народам еще в средние века. Славяне называли ее рапа, древние римляне петролеум (горящая смола), французы — жидкий битум, англичане — минеральное масло. В IV в. до н. э. Александр Македонский использовал светильники с нефтью, добытой на Апшеронском полуострове. В Древнем Египте нефть использовали как топливо и для бальзамирования, нефтяной битум применяли при строительстве зданий, бассейнов и дорог.

Первые сообщения об использовании нефти в России появились в 1641 г. Нефть использовали как горящий светильный продукт, лечебное средство. В эпоху Петра I были собраны сведения о природных ресурсах страны и в том числе о месторождениях нефти. Первое нефтеперерабатывающее предприятие в мире было построено в 1745 г. архангельским купцом Федором Прядуновым на реке Ухта.

Вплоть до конца XIX в. транспортировка нефти осуществлялась в емкостях. Идея создания трубопроводного транспорта принадлежит Д.И. Менделееву и была реализована на месторождении в Баку. Первый трубопровод имел длину 9 км и был проложен между нефтепромыслом и перерабатывающим заводом.

Иллюстрацией к рассматриваемому вопросу может послужить отрывок из книги Г. Форда "Моя жизнь, мои достижения", 1924 г.

Экономические методы производства явились далеко не все сразу. Они приходили постепенно, так же, как и мы постепенно, с течением времени, начали производить сами наши автомобильные части.

Автомобиль Форда состоит приблизительно из 5000 частей, включая винты, гайки и т. п. Некоторые части довольно объемисты, другие, наоборот, не больше части часового механизма. При постройке первых автомобилей мы собирали автомобиль, начиная с любой части, на земле, и рабочие приносили требуемые для этого части по порядку на место сборки — совершенно так же, как строят дом.

Первый успех в сборке состоял в том, что мы стали доставлять работу к рабочим, а не наоборот. Ныне мы следуем двум серьезным общим принципам при всех работах — заставлять рабочего, по возможности, не делать никогда больше одного шага и никогда не допускать, чтобы ему приходилось при работе наклоняться вперед или в сторону.

Правила, соблюдаемые при сборке, гласят:

1. Располагай инструменты, как и рабочих, в порядке предстоящей работы, чтобы каждая часть во время процесса сборки проходила возможно меньший путь.

2. Пользуйся салазками или другими транспортными средствами, чтобы рабочий мог по окончании работы над предметом положить его всегда на одно и то же место, которое, конечно, должно находиться как можно ближе. Если возможно, используй силу тяжести, чтобы подвести соответствующую часть следующему рабочему.

3. Пользуйся сборочными путями, чтобы привозить и увозить составные части в удобные промежутки времени.

Конечным результатом следования этим основным правилам являются сокращение требований, предъявляемым к мыслительной способности рабочего, и сокращение его движений до минимального предела. По возможности ему приходится выполнять одно и то же дело, одним и тем же движением.

Сборка шасси, с точки зрения неопытного человека, является самой интересной и наиболее значимой процеду-

рой. Было время, когда она представляла собой самый важный процесс. Теперь мы собираем отдельные части именно на местах их распределения.

Приблизительно 1 апреля 1913 г. мы произвели наш первый опыт со сборочным путем. Мне кажется, что это был первый подвижный сборочный путь, какой когда-либо был устроен. В принципе он похож на передвижные пути, которыми пользуются чикагские укладчики мяса при дроблении туши. Прежде, когда весь сборочный процесс находился еще в руках одного рабочего, последний был в состоянии собрать от 35 до 45 магнето в течение девятичасового рабочего дня, т. е. ему требовалось около 20 минут на штуку. Позднее его работа была разложена на 29 различных единичных действий, и благодаря этому время сборки сократилось до 13 минут 10 секунд. В 1914 г. мы приподняли путь на восемь дюймов, и время сократилось до семи минут. Дальнейшие опыты довели время сборки до пяти минут. С помощью научных методов рабочий в состоянии дать вчетверо больше того, что он давал сравнительно недавно. Сборка двигателя, которая раньше производилась одним рабочим, распадается сейчас на 48 отдельных движений, и трудоемкость занятых этим рабочих втрое увеличилась. Вскоре мы испробовали то же самое и для шасси. Наивысшая производительность, достигнутая нами при стационарной сборке шасси, равнялась в среднем 12 часам и 8 минутам для одного шасси. Мы попробовали тянуть шасси посредством ворота и каната на протяжении 250 футов. Шесть монтеров двигались вместе с ним и собирали во время пути приготовленные вблизи части. Этот несовершенный опыт сократил время уже до 5 часов и 50 минут для одного шасси. В 1914 г. мы проложили путь выше. В этот промежуток времени мы ввели принцип вертикального положения при работе. Один путь находился на высоте 26 и 3/4 дюйма, а другой — на 24 и 1/2 дюйма над землей, чтобы подогнать их к различному росту рабочих бригад. Поднятие рабочей плоскости на высоту руки и дальнейшее дробление рабочих движений (причем каждый человек делал все меньше движений руками) привели

к дальнейшему сокращению рабочего времени до 1 часа 33 минут для шасси. Монтаж кузова происходил на Джон Р. стрит — знаменитой улице, которая пересекала наши фабрики в Хайлэнд-Парке. А теперь весь автомобиль собирается по такому же принципу.

Для магнето мы сначала взяли скорость скольжения 60 дюймов в минуту. Это было слишком быстро. Потом мы попробовали 18 дюймов в минуту. Это было слишком медленно. Наконец мы установили темп 44 дюйма в минуту. Первым условием является, чтобы ни один рабочий не спешил — ему предоставлены необходимые секунды, но ни одной больше. После того как ошеломляющий успех сборки шасси побудил нас реорганизовать весь наш способ производства и ввести во всем монтировочном отделе рабочие пути, приводимые в действие механическим способом, мы установили для каждой отдельной монтировочной работы соответствующий темп работы.

При сборке шасси производится 45 различных движений и устроено соответствующее число остановок. Первая рабочая группа укрепляет четыре предохранительных кожуха к остову шасси; двигатель появляется на десятой остановке и т. д. Некоторые рабочие делают только одно или два небольших движения рукой, другие гораздо больше. Рабочий, в обязанности которого входит постановка какой-нибудь части, не закрепляет ее — эта часть иногда закрепляется только после многих операций. Человек, который вгоняет болт, не завинчивает одновременно гайку; кто ставит гайку, не завинчивает ее накрепко. При движении № 34 новый двигатель получает бензин, предварительно будучи смазан маслом; при движении № 44 радиатор наполняется водой, а при движении № 45 готовый автомобиль выезжает на Джон Р. стрит.

На нашей фабрике каждая отдельная рабочая часть находится в движении: или она скользит на больших цепях, прикрепленных выше человеческого роста, в последовательном порядке для монтажа, или движется по катящимся путям или посредством силы тяжести. Решающим является тот факт, что, кроме сырых материалов, ничто

не поднимается и не таскается. Сырые материалы доставляются куда следует на грузовиках посредством частично собранных фордовских шасси, которые настолько подвижны и проворны, что без труда скользят в проходах туда и сюда. Ни одному рабочему не приходится ничего таскать или поднимать. Для этого у нас существует особый транспортный отдел.

Мы начали с того, что собрали весь автомобиль на одной фабрике. Затем мы стали "фабриковать" отдельные части и сейчас же устроили отделы, в каждом из которых делалась одна какая-нибудь часть. В таком виде, в каком наше производство существует сейчас, каждый отдел делает только одну известную часть и собирает ее. Каждый отдел сам по себе — небольшая фабрика. Часть доставляется туда в виде сырого материала или отлитой формы, проходит через целый ряд машин и нагревательных процессов или еще через какой-либо специальный отдел и покидает свой отдел уже в виде готового полуфабриката. В начале нашего производства различные отделы были расположены довольно близко один от другого, и это было сделано для облегчения транспорта.

Промышленность, в высшей степени нормализованная и дифференцированная, никоим образом не должна концентрироваться в одном единственном фабричном здании, а должна принимать в расчет связанные с производством расходы по перевозке и затруднения из-за дальности расстояния. 1000—5000 рабочих должны составлять законный максимум, необходимый для одной фабрики. Этим самым разрешалась бы трудная задача — доставлять рабочих на место работы и обратно.

Раньше мы прикрепляли части кожуха к самому кожуху посредством пневматических молотов, которые считались тогда новейшим изобретением. Нужно было шесть человек, чтобы держать молоты, шесть человек около кожуха, и шум был невообразимый. Теперь же автоматический пресс, обслуживаемый одним рабочим, выполняет в пять раз больше того, что делали эти 12 человек в течение одного дня.

Ни один материал не обрабатывается у нас "от руки", ни один процесс не производится вручную. Если можно достигнуть того, чтобы машина функционировала автоматически, то это проводится. Ни об одном ручном движении мы не думаем, что оно является наилучшим и наиболее дешевым. При этом только 10 % машин являются специальными; остальные — обыкновенные машины, но приспособленные для известных действий. И все эти машины стоят близко одна от другой! Мы установили на площади в один квадратный фут больше машин, чем какая-либо фабрика на свете — каждая пядь означает ненужное повышение расходов по производству. Несмотря на это, недостатка в месте нет — каждый занимает столько места, сколько ему нужно, но не больше.

1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И МАТЕРИАЛОВ

В технической литературе встречается немало классификаций металлов. В основе одних принята плотность, других — температура плавления, третьих — расположение в периодической системе. Все они общеприняты и широко применяются. Ниже приведена одна из классификаций, в которой известные сегодня металлы разделены на семь групп.

1. **Основные конструкционные металлы**. В эту группу включены металлы, имеющие особые заслуги перед человечеством. Около 98 % всех металлических сооружений, конструкций выполнено из данных металлов. Это прежде всего медь и железо, которые определили два огромных периода в истории развития человечества — бронзовый и железный века.

Наиболее распространенные легирующие элементы в сплавах на основе железа: никель, марганец и кобальт. Они известны человечеству немногим более 200 лет, но в XX в. эти металлы обеспечивали три важнейших свойства сплавов — прочность, износостойкость и жаропрочность.

В эту группу входят также алюминий, магний и бериллий. У сплавов на основе данных металлов настолько много заслуживающих особого внимания свойств, что во многих областях

техники они потеснили сплавы на основе железа. Итак, основных конструкционных металлов — восемь.

2. **Тугоплавкие металлы**. Тугоплавкими принято называть металлы с температурой плавления выше температуры плавления железа (1539 °С). В данную группу входят одиннадцать металлов (в скобках приведена температура плавления): вольфрам (3370 °С), рений (3170 °С), тантал (3030 °С), технеций (2700 °С), молибден (2625 °С), ниобий (2415 °С), гафний (2130 °С), цирконий (1930 °С), ванадий (1919 °С), хром (1890 °С), титан (1668 °С).

В группе драгоценных металлов также имеются тугоплавкие: осмий (2700 °С), иридий (2443 °С), рутений (2400 °С), родий (1960 °С), платина (1773 °С). Однако в разделе тугоплавких они не рассматриваются, так как они как основа для конструкционных сплавов применяются редко.

3. **Легкоплавкие металлы**. В данную группу включены металлы, имеющие температуру плавления 500—950 °С. Это германий, сурьма, кальций, стронций, барий, радий.

4. **Особолегкоплавкие** — 16 металлов с температурой плавления ниже 500 °С, из которых шесть (натрий, калий, литий, цезий, рубидий, франций) принято называть щелочными. Остальные 10 металлов расположены вблизи условной границы металлы—неметаллы: цинк, свинец, олово, кадмий, талий, индий, галлий, ртуть, висмут, полоний.

5. **Редкоземельные металлы**. Сюда входят 17 металлов, из которых 15 — лантаноиды, а также скандий и иттрий.

6. **Драгоценные металлы** (раньше эти металлы назывались благородными). К ним относятся золото, серебро, платина, палладий, рутений, родий, иридий и осмий. Всего восемь металлов.

7. **Актиноиды и металлы, полученные синтезом**.

Все металлы в основном светонепроницаемы (за исключением металлической фольги), находятся при комнатной температуре в твердом состоянии (кроме ртути), обладают высокой прочностью, хорошо формируются, отличаются высокой тепло- и электропроводностью.

Металлы подразделяют на черные и цветные, легкие и тяжелые. У **легких** металлов или их сплавов плотность (масса единицы объема) составляет менее 4,4 г/см^3, а у **тяжелых** превышает это значение. К легким металлам относят алюминий, магний

и их сплавы, титан; к тяжелым — железо, медь, свинец, олово и сплавы на их основе, золото.

Свыше 90 % всех металлов, применяемых в современном производстве, приходится на **черные** металлы.

Материалы — это вещества, полученные из сырья и служащие основой для производства полуфабрикатов, строительных деталей, готовых изделий. К ним можно отнести все, что человек преобразует на базе животного, растительного или минерального сырья, чтобы использовать в трудовом процессе в качестве исходного вещества для производства продукции или применить в качестве вспомогательного вещества для проведения и поддержания производственного процесса.

Техническое значение материала определяется его строением и выражается в его свойствах. Например, прочность при растяжении, сопротивление сжатию обеспечивают экономичность чугуна и сталей, использование изделий из которых связано с механическими нагрузками, в то время как для стекла важным показателем является светопроницаемость.

Совершенствование техники и технологии неразрывно связано с улучшением потребительских свойств, прогрессивным изменением структуры **конструкционных** материалов (тех, из которых изготавливают детали конструкций, машин и механизмов, воспринимающих силовую нагрузку). Определяющими параметрами конструкционных материалов являются их механические свойства (прочность, вязкость, надежность, ресурс).

Конструкционные материалы подразделяются:

- по природе материалов — на металлические, неметаллические и композиционные;
- по технологическому исполнению — на деформируемые (прокат, штамповки, поковки, прессованные профили), литые, спекаемые, формуемые, склеиваемые, свариваемые (плавлением, взрывом, диффузионным сращиванием);
- по условиям работы — на работающие при низких температурах, жаропрочные, коррозионно-, окалино-, износостойкие и др.

К **металлическим** конструкционным материалам относят чугуны, большинство выпускаемых марок сталей, никелевые и кобальтовые сплавы, алюминиевые, магниевые и титановые, а также сплавы, основу которых составляют медь, цинк, молибден, цирконий, хром и другие элементы.

Неметаллические конструкционные материалы — это различные виды полимеров, пластмассы, стекло, керамика, цемент, бетон, древесина и др.

Полимерные материалы — это соединения углерода и водорода с добавлением кислорода, хлора, азота. Исходным сырьем для их производства являются нефть, природный газ, уголь. Современные конструкционные пластические массы пригодны для использования в таких наукоемких отраслях промышленности, как электронная, радиотехническая, медицинская, приборостроение. Они отличаются легкостью, прочностью и во многих случаях не уступают металлам. Из общих ресурсов пластмасс примерно 25 % может быть направлено для замены металлов, в том числе 70 % для замены черных металлов, 20 % для замены тяжелых цветных металлов и 10 % для замены алюминия.

Наибольшее значение среди конструкционных *пластмасс* имеют полиофелины, полиамидные смолы, полистирол, стеклопластики, фенопласты, поливинилхлориды, термопласты (полиформальдегид, поликарбонат), карбамидные пресс-порошки, пено- и поропласты. Они находят применение в машиностроении, строительстве, судо- и автомобилестроении и многих других производствах. Так, трубы из пластмассы во многих случаях могут быть использованы вместо стальных, например, в системах водоснабжения, газификации, орошения. При этом каждая тонна таких труб может заменить 4—5 т стальных труб. Сочетание пластмасс с металлом позволяет получить новый материал, имеющий комплекс свойств, присущих обоим этим материалам, и превосходящий по долговечности конструкционную сталь при более низких издержках производства.

Стекло и *керамику* получают из мелкозернистого песка с добавлением известняка, соды и других материалов. Стекло является эффективным заменителем стали и других металлов при производстве труб. Оно обладает высокой коррозионной стойкостью, прозрачностью, имеет гладкую поверхность, инертно к перекачиваемой среде и высокогигиенично. Стекло находит применение в пищевой промышленности, в химическом, гальваническом и других производствах. Упрочняющая обработка стеклянных изделий позволяет увеличить их прочность в 3—5 раз при одновременном повышении термостойкости. Керамика — перспективный конструкционный материал, обладающий высокой

прочностью и твердостью, хорошими электро- и теплоизоляционными свойствами, высокой коррозионной стойкостью.

Основой для изготовления *цемента* является известняк. Цемент и различные виды бетона (железобетон, полимербетон, армополимербетон) успешно используются для изготовления конструкций, деталей технологического оборудования.

Значительное применение находят *лесные* конструкционные материалы. Треть территории суши Земли занята лесом, а на долю России приходится 27,1 % лесов мира. *Древесина* — это возобновляемое сырье с широким спектром использования. Она применяется для изготовления древесно-стружечных, древесно-волокнистых, облегченных плит, деревянных клееных конструкций, слоистых материалов (сваривание слоев шпона) и др. Улучшение качества лесоматериалов достигается за счет их сушки и обработки антисептиками. Все большее развитие получает облагораживание поверхности древесных плит, например, напрессование на их поверхность полимерных пленок, текстурных бумаг, пропитанных смолами, печатание текстуры с последующим покрытием лаком и т. п. Древесина применяется не только в строительстве, промышленности или в качестве топлива, но и для производства целлюлозы — сырья для бумаги.

Важным условием эффективного использования лесных богатств является своевременное и качественное восстановление леса, его породного состава, повышение биологической продуктивности, недопущение ухудшения водного режима и обеднения животного мира. Немаловажное значение имеет и совершенствование технологии производства и использования древесины, снижение отходов и их переработка.

Композиционные материалы — металлические или неметаллические матрицы (основы) с заданным распределением в них упрочнителей (волокон, дисперсных частиц и др.).

Они сочетают высокую прочность с легкостью и стойкостью. Их применение в машинах, оборудовании, сооружениях позволяет снизить:

- массу конструкций на 25–30 %;
- трудоемкость изготовления в 1,5–3 раза;
- энергоемкость производства в 8–10 раз;
- материалоемкость производства в 1,6–3,5 раза.

При этом ресурс техники может быть увеличен в 1,5–3 раза, потери от коррозии сокращены до минимума, снижен расход топлива на движущихся машинах.

Идеальный материал должен одновременно соответствовать следующим требованиям: быть легким, прочным, нехрупким, свариваемым, коррозионностойким, способным собираться в конструкции, обладать одинаковыми свойствами по всем направлениям, утилизируемым. Однако такого материала в настоящее время нет.

Поскольку запасы природного сырья не безграничны, а безотходные технологии не получили широкого применения, весьма актуальной является проблема переработки отходов производства и использования вторичных материалов. Такие процессы разработаны и применяются для металлолома, макулатуры, стеклянного боя, отходов резины и других материалов. Так, в настоящее время отходы железа могут быть использованы вторично практически на 100 %, алюминия — на 85 %, стекла — на 50 %, полимеров — на 25 %.

1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Металлургическое производство и технологические процессы имеют ряд специфических особенностей, существенно отличающих их от других производств и накладывающих отпечаток на требования к способам и формам их организации.

К числу важнейших отраслевых особенностей современного металлургического производства относятся следующие:

- комплексность и структурная сложность современных металлургических предприятий;
- высокая степень концентрации производства;
- масштабность и массовость производства;
- многостадийность технологии и высокая материалоемкость;
- энерготехнологическая связь основных переделов.

Учет этих отраслевых особенностей является очень важным, но сложность состоит также в том, что специфические черты имеют производственные процессы внутри самого предприятия на различных переделах. В связи с этим металлургические про-

цессы отличаются большим разнообразием, сложностью и комплексностью.

По отношению к выпуску готовой основной (конечной) продукции и технологической значимости производственные процессы подразделяются на основные, вспомогательные, подсобные и побочные.

Основные — это процессы качественного, т. е. физико-химического или физико-механического изменения предмета труда, направленные на получение полуфабрикатов и готовой конечной продукции (чугуна, стали, проката, труб, метизов).

Вспомогательные — процессы, назначение которых — обслуживание и обеспечение бесперебойного протекания основных процессов (материально-техническое обеспечение, ремонты, транспорт).

Подсобные процессы направлены на добычу и подготовку исходного сырья и материалов, производство технологического топлива (агломерата, кокса, огнеупоров).

Побочные — это процессы изготовления различных видов продукции из отходов основного производства (кирпича, шлакобетона, цемента, изделий народного потребления из металлообрези в прокатном производстве и др.).

В зависимости от способов воздействия на предметы труда, уровня технической оснащенности процесса и степени участия в нем рабочего производственные процессы подразделяются на ручные, машинно-ручные, машинные, аппаратурные.

Ручные процессы осуществляются рабочими без помощи механизмов с применением простых инструментов и приспособлений (молоток, напильник, зубило, тиски и др.) и направлены главным образом на перемещение предмета труда или изменение его формы.

Машинно-ручные процессы выполняются машинами или механизмами при непосредственном участии в них рабочих. В таких процессах одновременно или со сдвигом во времени используются энергия машины и усилия рабочего. Примерами таких процессов могут служить прокатка на не полностью механизированных станах, обработка деталей на станках при ручных подаче, установке заготовки и съеме готового изделия.

Машинные процессы направлены как на изменение качества, так и главным образом на изменение формы предмета труда; выполняются с помощью специализированных машин, полностью механизированных или автоматизированных. Роль рабочего в таких процессах заключается в осуществлении функций контроля и управления.

Аппаратурные — химические и физико-химические процессы, направленные на изменение качественных признаков и свойств предмета труда и протекающие в специальных агрегатах (доменных, мартеновских и электросталеплавильных печах, конвертерах), оснащенных специальными механизмами и средствами управляющей автоматики. В аппаратурных процессах в функции рабочих входят контроль и управление работой агрегатов.

Классификация важна при проектировании технических мероприятий по механизации и автоматизации производственных процессов, планировании подготовки квалифицированного персонала, внедрения прогрессивных систем оплаты труда и др.

По степени возможности непосредственного наблюдения за ходом процесса для изучения и регулирования они делятся на *закрытые* и *открытые*.

Закрытые процессы — это физико-химические процессы, идущие в закрытых агрегатах (доменные печи). Исследовать ход таких процессов можно с помощью контрольно-измерительных приборов.

Открытые процессы не связаны с физико-химическими превращениями и их можно визуально наблюдать (прокатка, ковка, посадка заготовок в термическую печь и др.).

Каждый металлургический передел (стадия) имеет свою структуру, состоящую из ряда участков-ступеней. Ступень включает в себя набор технологически однородных операций. В доменных цехах такими ступенями являются: рудный двор с бункерной эстакадой, печь, ковшовое хозяйство, грануляционный бассейн, разливочные машины, шлаковый отвал.

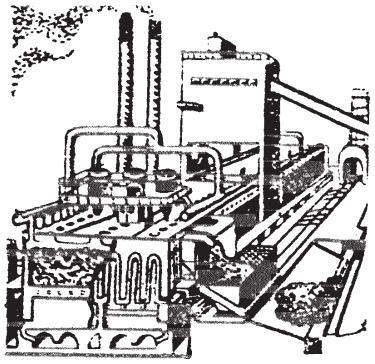
Поскольку ступени производства неоднозначны, с точки зрения организации производства выделяется основная ступень, на которой происходит основной процесс: доменные, мартеновские и электросталеплавильные печи, конвертеры, прокатные станы.

Производительность процесса при данных организационно-технических условиях — это изготовление определенного количества продукции в единицу времени. Показателями производительности в металлургии различных основных процессов могут быть тонны чугуна, стали, проката, цветных металлов, единицами времени — час, смена, сутки, месяц, год.

Основными факторами, определяющими производительность процессов, являются:

- техническая характеристика агрегатов (полезный объем доменных печей, емкость сталеплавильных агрегатов, число клетей, диаметр рабочих валков прокатных станов и др.);
- интенсивность основных процессов (скорость, давление, температура);
- сортамент продукции и трудоемкость ее изготовления;
- исходные материалы и режимы обработки;
- организационные факторы.

Особенности металлургических процессов и их динамики определяют сложность движущихся материальных потоков, согласование и регулирование их во времени и пространстве. Поэтому рациональная организация потоков, связывающих отдельные стадии, является такой же важной, как и организация производства внутри каждого передела. Для этого требуется так организовать ход производственного процесса на каждом предыдущем переделе, на всех его ступенях, чтобы на выпускающей (заключительной) ступени параметры процесса соответствовали ее требованиям.



2. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

В вещах, ставших повседневными,
чудесного никто не замечает.

М. Ефимов

Медь выплавляли за 7 тыс. лет до н. э. В VI тысячелетии до н. э. изобрели бронзу. Железный век наступил в начале I в. до н. э.

Среди изобилия золота и драгоценностей в гробнице Тутанхамона самое почетное место занимали три предмета. Под головой лежал выкованный из железа амулет, на руке — широкий браслет, украшенный камнями, на пальце красовался железный перстень. В те времена железо было дороже золота.

Черными металлами называют железо и его сплавы с разными металлами.

Добыча железа началась, по крайней мере, за два тысячелетия до нашей эры. Получение чистого железа, его сплавов стало возможным благодаря опыту, накопленному древними металлургами по выплавке меди и ее сплавов с оловом, серебром, свинцом и другими легкоплавкими металлами.

Доминирующее положение железа в технике объясняется тем, что на Земле имеется большое количество пригодных для промышленного использования месторождений железных руд, а само железо обладает уникальной способностью изменять свои свойства при легировании и специальной обработке.

Были такие времена, когда за обладание железом, как и за обладание золотом, убивали, предавали и вели войны. Множество судеб и изобретений связано с производством

стали. Не меньший интерес представляет и история науки об элементе с символом Fe и порядковым номером 26. Ни один из металлов не способен к таким превращениям, как железо. На сегодняшний день число сплавов на его основе превышает десять тысяч.

В геополитическом отношении важен тот факт, что запасы энергоносителей на Земле распределены неравномерно (рис. 6), что оказывает влияние на местоположение центров металлургии. Черная металлургия России отличается массовостью и высокой концентрацией производства, огромными масштабами использования сырья, топлива и вспомогательных материалов, тесным взаимодействием всех звеньев металлургического передела и его смежников. Эти технико-экономические особенности оказывают сильное влияние на территориальную организацию черной металлургии: освоение соответствующих по размерам сырьевых и топливных баз, выбор наиболее эффективных с точки зрения использования природных, трудовых и материальных ресурсов, вариантов размещения предприятий.

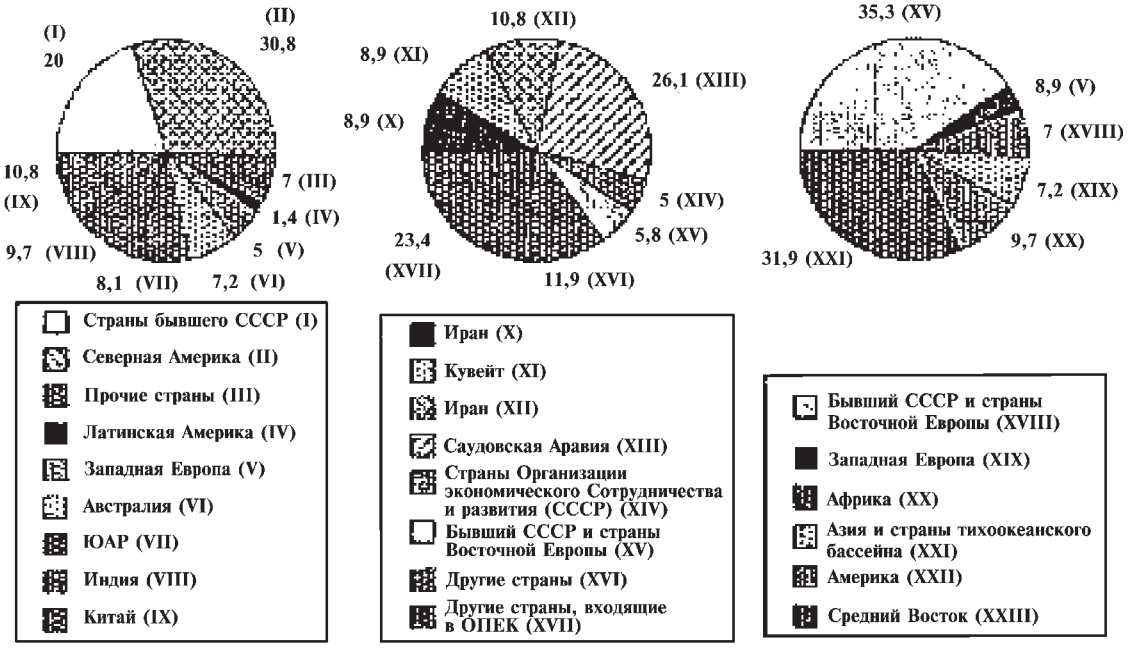


Рис. 6. Распределение восстановителей и энергетического сырья по регионам мировой черной металлургии, римские цифры в скобках — распределение, %:

а — каменный уголь, запасы 528 Гт у.т.; *б* — нефть, запасы 135,9 Гт (по состоянию на 1995 г.); *в* — природный газ, запасы 135 000 млрд. м^3

В связи с этим для России исключительно важно комплексообразующее и градообразующее значение металлургического комплекса в структуре экономики страны.

Черная металлургия — одна из важнейших базовых отраслей тяжелой индустрии, а ее продукция служит основой развития машиностроения и металлообработки, строительства, оборонного комплекса и многих других отраслей народного хозяйства.

Черная металлургия как отрасль включает добычу руды (открытую и подземную), ее обогащение, окускование (агломерацию и окомкование), усреднение, производство огнеупоров (и не только для нужд черной металлургии), кокса, ферросплавов и, наконец, выплавку чугуна, стали, производство проката. Сюда же входят сбор и подготовка лома, утилизация шлаков. В соответствии с этим металлургический комбинат объединяет рудник, коксохимическое предприятие, доменные, сталеплавильные, прокатные цехи. Современный высокий уровень металлургического производства базируется на глубоких теоретических исследованиях, важных открытиях, сделанных в разных странах мира, богатейшем практическом опыте. Немалую роль в этом сыграли русские ученые и изобретатели.

2.1. СОСТОЯНИЕ ОТРАСЛИ

Черная металлургия играет важную роль в экономике страны — на нее приходится 1 % ВВП, 0,7 % рабочей силы, 8 % общего объема экспорта.

Для объективности оценки показателей состояния производства российские предприятия разделены на три группы.

“Три крупнейших” (крупнейшие комбинаты — интегрированные производители листового и сортового проката): ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат”, ОАО “Северсталь” (г. Череповец), ОАО “Новолипецкий металлургический комбинат”; выпускают 55 % готового проката, на них занято 32 % рабочей силы отрасли.

“Шесть средних” (крупные производители сортового и специального проката): ОАО “Нижнетагильский металлургический комбинат”, ОАО “МЕЧЕЛ” (г. Челябинск), ОАО “Западно-Сибирский металлургический комбинат”, ОАО “Кузнецкий металлурги-

ческий комбинат", ОАО "НОСТА" (Новотроицк), ОАО "Оскольский электрометаллургический комбинат"; выпускают 38 % готового проката, на них занято 37 % рабочей силы отрасли.

"Прочие малые" (остальные заводы): ЗАО «Волгоградский металлургический завод "Красный Октябрь"», АО "Амурсталь", ОАО "Златоустовский металлургический завод", ОАО "Металлургический завод им. А.К. Серова", ОАО "Чусовский металлургический завод", АО "Ашинский металлургический завод", ОАО "Алапаевский металлургический завод" и остальные; выпускают 7 % готового проката, на них занято 31 % рабочей силы отрасли.

Предприятия первой и второй групп являются основными поставщиками экспортной продукции (рис. 7), которая направляется во многие страны мира (рис. 8).

Для первой группы предприятий характерен наиболее высокий уровень производительности труда (61 % от уровня США), для второй он составляет 41 %, для третьей — 21 % (по данным на конец 1990-х гг.). На рис. 9 представлены факторы, являющиеся определяющими в различии производительности труда и основных фондов американских и российских предприятий. Как видно, основными причинами низкой производительности на предприятиях России являются загрузка мощностей, устаревшие технологии и организация труда.

При общем спаде производства в 1990–1994 гг. особенно пострадали мелкие заводы, на которых объем производства снизился

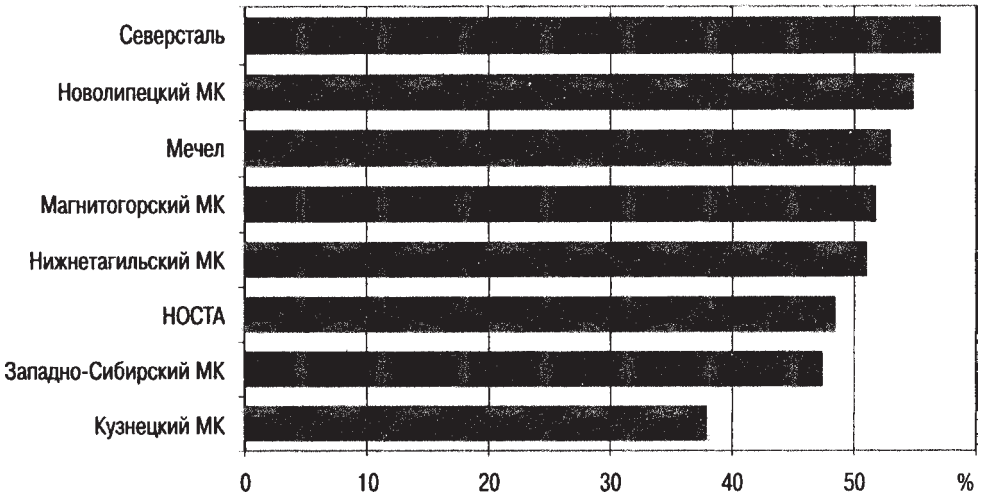


Рис. 7. Доля экспорта в общем объеме производства. 2002 г.

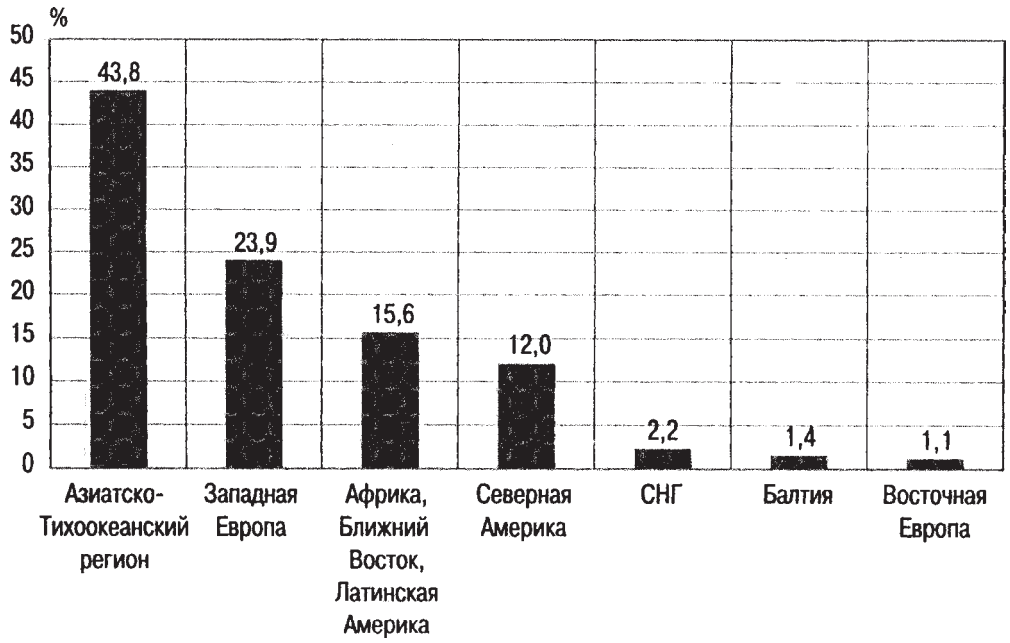


Рис. 8. Географическая структура экспорта металлопродукции из России

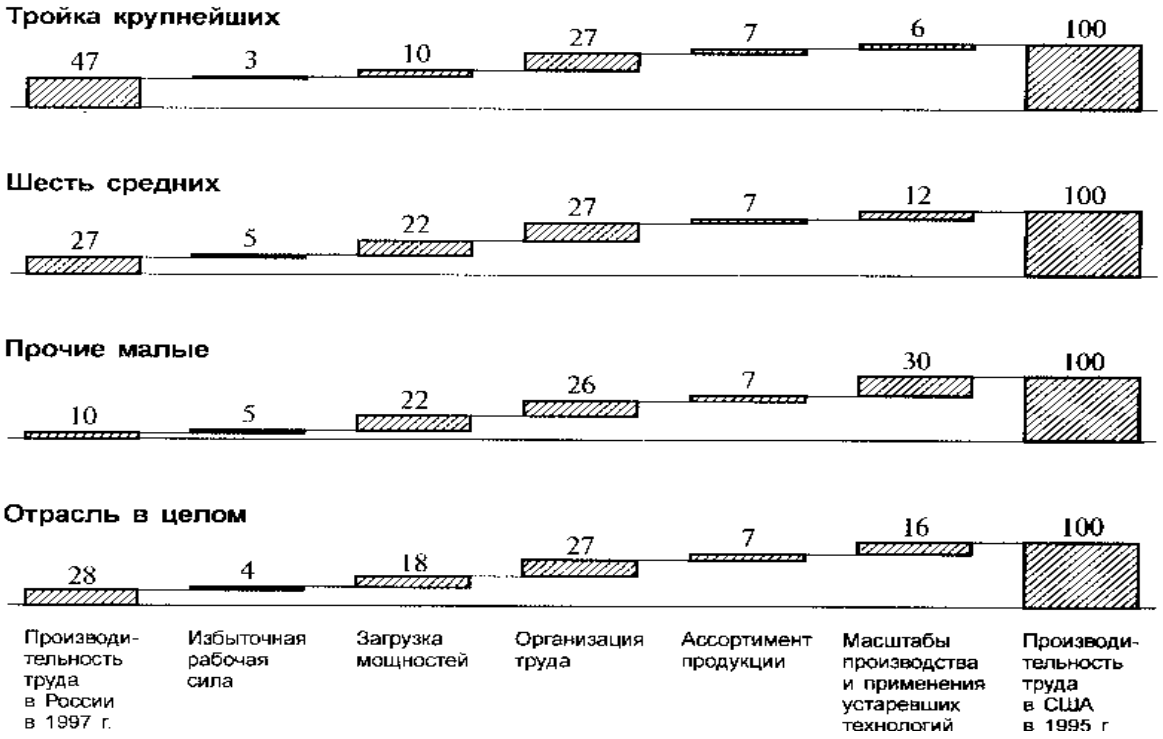


Рис. 9. Производственные причины низкой производительности труда на заводах России. Индекс: уровень США в 1995 г. — 100 %

на 70 %. Снижение производства чугуна в Российской Федерации произошло из-за падения спроса на чугун и готовый прокат на внутреннем рынке, из-за неплатежеспособности предприятий при расчетах за уголь, кокс, сырье, железнодорожный транспорт.

Ситуация усугубляется тем, что местные органы власти препятствуют закрытию предприятий независимо от того, насколько они неэффективны и убыточны. Только крупные предприятия могут законсервировать свои мощности, в то время как малые не имеют возможности ни увеличить объем производства, ни сохранить рабочую силу, поэтому находятся в тупиковой ситуации.

Отличие черной металлургии от других отраслей состоит в том, что на необходимое для производства проката основное оборудование требуется очень высокая доля всех основных фондов, действующих в отрасли.

Двумя существенными факторами, которые могут значительно влиять на производительность основных фондов в черной металлургии, являются уровень загрузки мощностей и доля мини-заводов.

До 1990 г. одним из важных преимуществ национальной черной металлургии был высокий уровень использования производственных мощностей. В 1990 г. загрузка мощностей составляла 95 % против 80 % в развитых странах. Глубокий экономический спад привел в 1990-е гг. к снижению объемов производства более чем в два раза. Параллельно в отрасли происходила активная реструктуризация, которая привела к выбытию значительной части устаревших и избыточных фондов. Так, за период с 1990 по 1999 г. из эксплуатации на российских предприятиях были выведены 11 прокатных станов, 8 коксовых батарей, 5 доменных печей, 66 мартеновских, 1 конвертер и 3 электропечи. Суммарная мощность выведенных мощностей по выплавке стали составила 27 млн. т.

Доля мини-заводов среди всех металлургических предприятий очень важна, поскольку производительность основных фондов мини-заводов в среднем почти вдвое выше, чем на интегрированных комбинатах. В настоящее время доля мини-заводов в РФ мала, поскольку в бывшем СССР развитие их не было приоритетным.

Основная причина низкой производительности труда в отрасли — устаревшие технологии (мартеновские печи и разливка металла в слиток). Многие из заводов построены до 1940 г., а некоторые еще в XIX в. Средний уровень износа основных фондов составлял на начало 2000 г. около 52 %, а по некоторым предприятиям значительно выше. Мощность большинства малых предприятий составляет менее 0,5 млн. т стали в год, в то время как эффективные масштабы производства, при которых может быть обеспечена адекватная производительность труда, для интегрированного металлургического комбината — 3–4 млн. т стали в год, а для мини-завода — 1 млн. т в год. В итоге устаревшие технологии требуют большего количества рабочих, чем современные процессы; удлиняется технологическая цепочка (количество операций). На таких заводах численность рабочих на 30 % выше, чем могла бы быть при применении более эффективных технологий.

Средний расход электроэнергии при производстве основных материалов черной металлургии в России в кВт·ч/т приведен ниже:

Железорудное сырье (агломерат и окатыши)	160–210
Кокс	50–65
Чугун	70–90
Сталь (конверторная)	50–65
Электросталь	550–700
Прокат черных металлов	130–180

Кроме того, растут эксплуатационные расходы (затраты на электроэнергию, запасные части и т. п.). Мартеновские печи и разливка в слитки требуют в три раза больше энергии на 1 т готового продукта, чем современные технологии конверторной выплавки и непрерывной разливки металла, повышая его себестоимость.

На российских предприятиях работает в три раза больше персонала, занятого непроизводственными функциями, чем на западных предприятиях такого же масштаба. В целом персонал российских предприятий весьма квалифицирован. Все сотрудники имеют по крайней мере среднее, а 30 % — специальное образование. Однако обучение персонала в области управления на основе качества находится в лучшем случае на начальном этапе. Отсутствие должного внимания к качеству продукции

и ответственности за выполняемую работу, очень низкая заработная плата приводят к плохой работе на предприятиях.

По мнению экспертов, отставание наших предприятий по производительности труда от западных вызвано прежде всего отсутствием или несовершенством систем управления и контроля производственных процессов. При организации эффективных систем управления производством может быть достигнуто значительное повышение производительности труда при небольших капиталовложениях.

Российские металлурги по-прежнему сталкиваются с проблемами при сбыте продукции в странах Юго-Восточной Азии (Китай, Малайзия, Таиланд), Западной Европы и США. Высокие таможенные барьеры, антидемпинговые процессы, введение квот поставки приводят к постепенному уходу с этих рынков российской металлопродукции со средним и высоким уровнем добавленной стоимости.

Так как около 50 % российской металлопродукции экспортируется, потеря иностранных рынков сбыта ослабляет позиции российских производителей и снижает долю валютной выручки, что приводит к падению объемов средств, направляемых на техническое перевооружение. Это тем более важно, что продукция металлургии занимает второе, после продукции нефтяной отрасли, место по получаемым страной экспортным доходам. Эти доходы были бы в 2–3 раза выше, если бы в структуре экспортируемого металла удалось повысить долю готовой продукции. В настоящее же время около половины поставок на экспорт — это заготовки и полуфабрикаты по цене до 200 дол./т, в то время как холоднокатаный прокат и трубы могут быть реализованы по 400–600 дол./т (табл. 2).

Негативные последствия снижения экспортных поставок компенсируются ростом внутреннего потребления. На протяжении последних лет отношение внутреннего потребления к общему объему реализации растет (табл. 3), что обусловлено постепенным ростом потребляющих отраслей — машиностроения, гражданского и промышленного строительства и др.

Основная причина увеличения затрат в металлургии — повышение цен на энергоносители и транспортные услуги (рис. 10). Так, с января по сентябрь 2001 г., по данным Госкомстата РФ,

Таблица 2

Структура экспорта стальной продукции из России, %

Вид продукции	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Стальные слитки	3,0	3,5	3,6	2,9	3,1
Стальные заготовки	38,4	31,5	44,8	40,6	42,1
Сортовой прокат	19,6	17,8	13,5	13,5	14,2
Листовой прокат	35,6	42,6	34,0	39,0	36,7
Лист с покрытиями	2,0	2,7	2,2	2,0	2,1
Трубы стальные	1,0	1,3	1,4	1,5	1,4
Прочая продукция	0,4	0,6	0,5	0,5	0,4

Таблица 3

Динамика изменения показателей производства

Готовый прокат, тыс. т	1998 г.	1999 г.	2000 г.	9 мес. 2001 г.
Объем производства	35 149	41 048	46 908	35 356
Экспорт	23 025	26 840	26 504	19 486
Импорт	1548	1174	1814	1632
Внутреннее потребление	13 672	15 382	22 218	17 502
Внутреннее потребление/производство, %	38,9	37,5	47,4	49,5

цены на электроэнергию выросли на 23,6 %, на газ — на 65,5 %, тарифы на железнодорожные перевозки — на 34,4 %. В результате в течение всего 2001 г. происходило снижение рентабельности деятельности металлургических предприятий РФ.

Структура российской черной металлургии (по типам производств) существенно отличается от структуры, сложившейся в развитых странах. Доля электростали в России в период с 1990 по 2000 г. выросла с 10,4 до 14,6 %, но по-прежнему существенно уступает развитым странам: в США — более 45 %, в странах ЕС — 38 %, в Японии — более 30 %, в Бразилии — около 22 %.

Конкурентоспособность металлопродукции при сопоставимом качестве определяется уровнем затрат на производство,

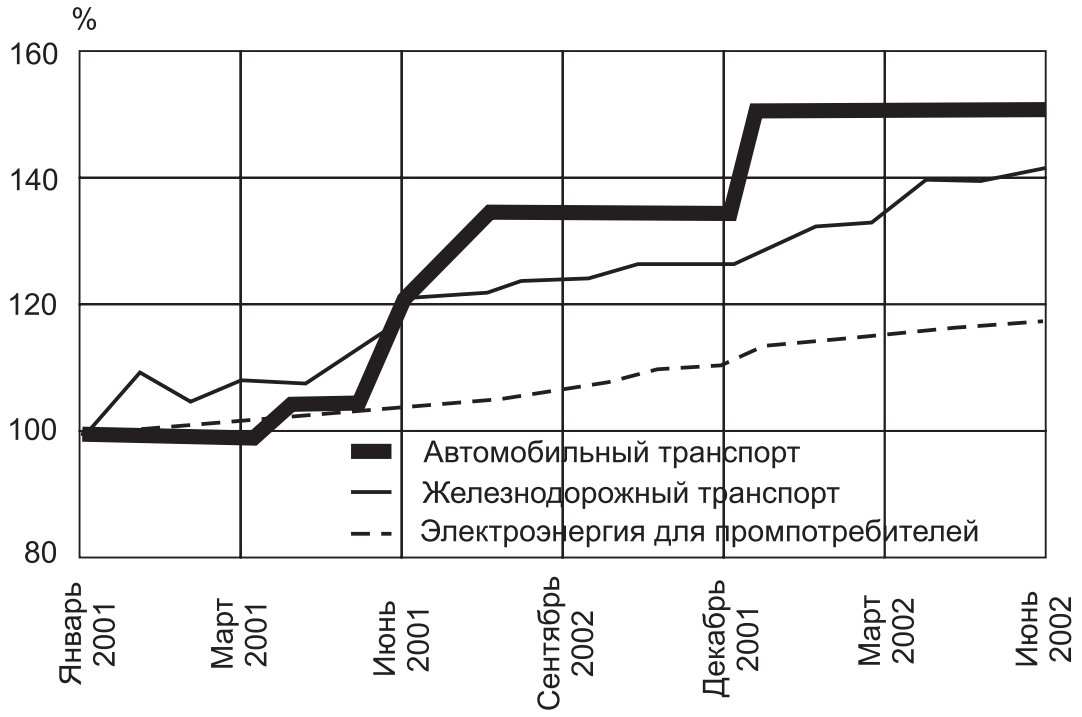


Рис. 10. Динамика роста цен на услуги
естественных монополистов (декабрь 2000 г.— 100 %)

условиями внутреннего налогообложения и таможенного регулирования. Наиболее важными факторами, определяющими уровень производственных затрат, являются: стоимость потребляемых сырья, энергоносителей, транспортных услуг и трудовых ресурсов; удельные расходы материальных и топливно-энергетических ресурсов электроэнергии. Это тем более важно, потому что черная металлургия — наиболее материалоемкая отрасль народного хозяйства, а доменное производство — наиболее энергоемкая стадия в металлургическом переделе. Сравнение удельных расходов (на 2000 г.) приведено в табл. 4. В качестве базы сравнения приняты усредненные данные за 1999 г. по пяти странам: США, Японии, Германии, Франции и Италии.

Приведенные данные показывают, что на сегодняшний день по своему техническому уровню черная металлургия России уступает многим странам мира. Вместе с тем, ведущие предприятия отрасли, такие, как “Северсталь”, ММК, НЛМК, ОЭМК, находятся на уровне лучших мировых предприятий-аналогов.

Развиваясь в сложнейших условиях, черная металлургия нашей страны, как и другие отрасли промышленности, проходит

Таблица 4

Сравнительные данные уровня удельных расходов

Показатель	Россия	5 стран	Соотношение, %
Доменное производство (на 1 т чугуна)			
Железорудная часть шихты, кг	1678	1589	105,6
Кокс металлургический, кг	472	393	120,1
Природный газ, $м^3$	90	17	529,4
Конверторное производство (на 1 т стали)			
Металлошихта, кг, в т. ч.	1141	1149	99,3
Чугун	878	987	89,0
Лом	242	160	151,3
Кислород, $м^3$	68	60	113,3
Прокатное производство (на 1 т проката)			
Расход стали, кг	1175	1105	106,3

стадию реконструкции. Цель ее состоит в создании эффективного производства, направленного на выпуск качественной, способной конкурировать на мировом рынке металлопродукции, а также в полной мере удовлетворяющей потребности внутреннего рынка.

2.2. ПРОИЗВОДСТВО ЧУГУНА

Без исследований — нет прогресса.
Девиз комитета доменного производства.

Германия, 1869 г.

В России до XVII в. производство железа носило кустарный характер. Выплавкой железа занимались отдельные крестьянские семьи или совместно несколько кресть-

янских дворов. Строили домницы на землях Новгорода, Пскова, в Карелии. В начале XVII в. появились доменные печи около Тулы, на Урале. Бурное производство чугуна началось при Петре I. Демидовыми на Урале была построена колоссальная по тем временам печь высотой 13 м, выплавлявшая в сутки 14 т чугуна. Обилие руды, леса, воды, множество крепостных способствовали бурному развитию русской металлургии. Чугун начали экспортировать за границу. Россия занимала первое место в мире по выплавке чугуна. В 1763 г. М.В. Ломоносовым написан труд "Первые основания металлургии, или рудных дел". Эта книга в течение многих лет являлась единственным пособием для русских инженеров и техников.

Современная доменная печь — первый агрегат в технологической цепочке получения сплавов железа, а доменный процесс — главный процесс современной выплавки чугуна.

Как известно, более 90 % всех металлов, применяемых в современном производстве, приходится на черные металлы. По внешнему виду чистое железо имеет серебристо-белый цвет, пластично, хорошо сопротивляется воздействию кислот. Плотность железа 7,87 г/см^3, температура плавления 1539 °С, температура кипения 3000 °С. Валентность железа меняется от 2 до 4, что объясняет разнообразие его соединений в природе. Доля железа в земной коре составляет 4,7 %.

Древние египтяне называли железо "бинипет" — небесный металл. В античной Греции и на Северном Кавказе оно было известно как "звездный металл", а славяне называли его "железо" — от "лезо" (лезвие). Латинское название "феррум", видимо, происходит от греко-латинского "твердый", "крепкий", "непреклонный", "нечувствительный" (fars).

Чугун является железоуглеродистым сплавом, содержащим от 2,14 до 6,67 % углерода. Обычно в чугунах содержание углерода не превышает 4,5 %. Как постоянные элементы в чугун входят кремний, марганец, фосфор и сера, а также микропримеси других элементов, присутствие которых обусловлено особенностью доменного производства чугуна и составом руд, входящих

в состав **шихты** (смесь сырых материалов, загружаемых в металлургическую печь).

Исходными материалами для производства чугуна являются железные руды, флюсы и топливо.

2.2.1. Основные материалы доменного процесса

Железные руды

Самородное желез-феррит встречается в земной коре крайне редко. В природе железо представлено в виде различных сложных и простых соединений, главным образом с кислородом, входящих в состав минералов, называемых железными рудами. Железной рудой называют такую горную породу, извлечение железа из которой экономически выгодно на данной стадии развития техники.

Любопытным является расположение металлургических объектов в прошлом. В древности кузнецы добывали железную руду не в подземных рудниках, а на ... болотах. Особой удачей считалось найти руду, залегавшую на краю болота или у берега реки, на сухом месте. Академик В.М. Севергин писал в 1803 г.: "Жители руду, отыскиваемую под березником или осинником, почитают лучшею, потому что из оной железо бывает мягче...", а под ельником — "жестче и кропче".

Академиком Б.А. Рыбаковым на основе трудов русских ученых прошлого века и более ранних авторов составлена карта месторождений болотных, озерных и дерновых руд в Восточной Европе. Оказалось, что это сырье на землях славянских племен и их близких соседей было распространено именно там, где росли густые леса. Следовательно, русские кузнецы рудой были вполне обеспечены. Бери лодку или плот, выезжай на реку или заросшее камышом озеро и добывай вязкую красную массу черпаком на длинной рукоятке.

Основные типы железных руд:

• магнитные железняки (магнетиты) — Fe_3O_4 (магнитная окись железа);

· красные железняки (гематиты) — Fe_2O_3 (безводная окись железа);

· бурые железняки (лимониты) — $2Fe_3O_4 \cdot 3H_2O$ (водная окись железа).

Содержание железа в различных рудах колеблется в достаточно широких пределах:

· в магнетитах и гематитах — свыше 50 %;

· лимонитах — примерно 37 %;

· сидеритах (углекислое железо) — 32 %;

· титаномагнетитах — 17 %.

К *вредным примесям* в руде относят серу, фосфор, мышьяк, цинк, свинец; к *полезным* — марганец, никель, ванадий, хром, кобальт, медь, титан и др. Неизбежной примесью руд является пустая порода, состоящая из кремнезема, глинозема, извести и магнезии.

Таблица 5

Характеристика основных месторождений железных руд

Месторождение	Запас, млрд. т	Тип руды
Курская магнитная аномалия: Лебединское, Михайловское, Стойленское	42	Гематиты Железистые кварциты
Кольский полуостров: Оленегорское, Ковдорское	0,6 0,5	Магнетиты Железистые кварциты
Карелия: Костамукшское	1,2	Магнетиты Железистые кварциты
Урал: Качканарское Бакальское	До 12 До 1	Титаномагнетиты Магнетиты Сидериты
Западная Сибирь: Горная Шория	0,2	Магнитные железняки
Хакассия: Абаканское, Тейское	До 2	Магнетиты
Ангаро-Питский железорудный район	1,4	Гематиты
Иркутская область: Коршуновское, Рудногорское	1	Магнетиты

По запасам и добыче железных руд Россия занимает одно из первых мест в мире. Географическое расположение месторождений, уровень запасов и тип добываемой руды приведены в табл. 5.

Подготовка железных руд к плавке

Для использования в доменной плавке руды должны быть тщательно подготовлены. Производительность печи, расход топлива, качество производимого чугуна целиком зависят от степени и качества подготовки руды.

> *Человека, который мог отличить "добрую" железную руду от плохой, в старину называли рудознатцем. Он разыскивал гнезда богатых руд и следил, чтобы рудокопы не примешивали к рудам "землю" (пустую породу). Породоотборка и разделение руды по крупности существовали и в древние века. В более позднее время подготовка руд к плавке предусматривала предварительный обжиг руд.*

Задачами подготовки руды являются: доведение содержания железа в концентрате до 64–67 %, получение прочных, газопроницаемых, хорошо восстановимых кусков железосодержащих материалов размерами от 10 до 40 мм, достижение однородного состава, введение необходимых флюсов. Такая подготовка производится на горно-обогатительных комбинатах (ГОК), работающих в непосредственной близости от железных рудников.

В зависимости от характеристики добываемой руды применяют следующие методы ее подготовки: а) дробление и сортировку по классам крупности; б) обогащение; в) усреднение; г) окускование.

Дробление представляет собой процесс уменьшения размера кусков твердого материала разрушением под действием внешних сил до определенной крупности. Добываемые в естественных условиях руды очень различаются по крупности. При открытой добыче размер отдельных кусков достигает 1000–1200 мм, а при подземной — 300–800 мм.

Дробление — один из самых распространенных технологических процессов в промышленности. В настоящее время он потребляет более 20 % всей вырабатываемой электроэнергии.

Дробление руды может быть основной или подготовительной операцией подготовки ее к плавке. Основной операцией оно является в тех случаях, когда дробленая руда направляется непосредственно в плавку без обогащения или окускования. Как подготовительную операцию дробление применяют для всех обогащаемых руд, разрушая куски руды до такой величины, которая позволяет отделить при обогащении рудный материал от пустой породы.

Различают несколько стадий дробления: при размерах кусков 100–350 мм — крупное дробление, 40–60 мм — среднее дробление, 6–25 мм — мелкое дробление, 1 мм и менее — измельчение. Крупное, мелкое и среднее дробление производится в установках, называемых дробилками, а измельчение — в мельницах.

Дробление выполняется следующими методами: раздавливанием, истиранием, раскалыванием, ударом и сочетанием перечисленных способов. Схематически сущность этих методов показана на рис. 11 и 12.

Мельница самоизмельчения использует принцип жерновов — куски породы загружаются в положенный на бок и вращающий-

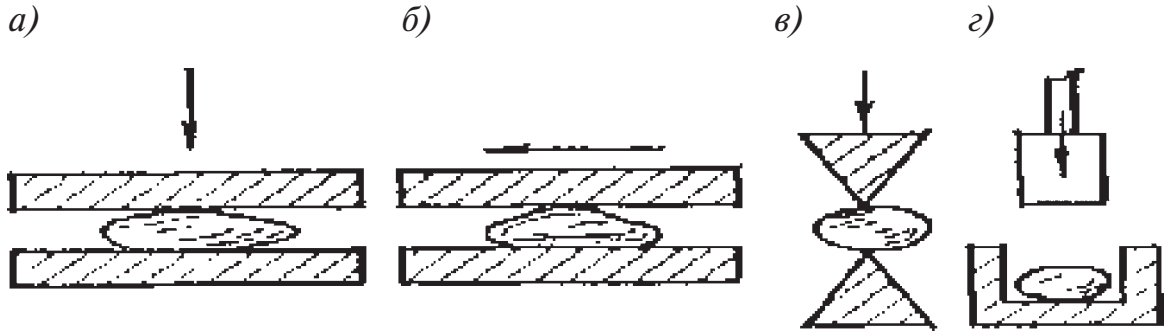


Рис. 11. Схематическое изображение основных способов дробления: *а* — раздавливание; *б* — истирание; *в* — раскалывание; *г* — удар

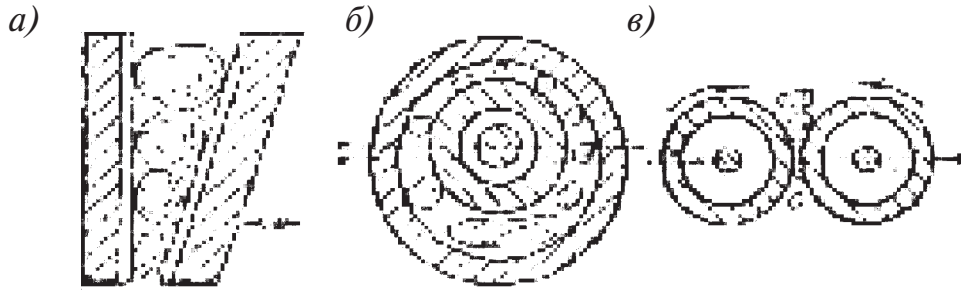


Рис. 12. Конструктивные приемы раздавливания

ся барабан. Куски увлекаются стенкой, затем падают и измельчаются за счет ударов и истирания.

В шаровой мельнице внутри барабана вращаются металлические шары. За счет истирания между ними процесс измельчения идет более интенсивно. Патент на шаровую мельницу был получен 180 лет назад. Первые шаровые мельницы выпустила датская компания Smidt & K в 80-е гг. XX в. Шаровые мельницы совершили революцию в горно-обогатительном, цементном, химическом и металлургическом производствах. В настоящее время они работают на всех разрабатываемых месторождениях минерального сырья. У самых эффективных моделей шаровых мельниц производительность составляет 100 тонн породы в час, диаметр барабана 6 м, длина барабана 15 м.

Пещерный человек для измельчения зерен, корней, минералов использовал пару камней, затем ступку, затем жернова. Патент на планетарную мельницу выдан в 1889 году. В ней имеется три или четыре барабана, вращающихся вокруг центральной оси (аналог вращения планет вокруг Солнца). Каждый из барабанов дополнительно вращается вокруг своей продольной оси в противоположном направлении. Шары внутри барабана получают центростремительное ускорение, намного превышающее ускорение силы тяжести. За счет этого интенсивность измельчения увеличивается в десятки раз, а изменением скорости можно регулировать размер получаемых частиц. Техническая предпочтительность планетарных мельниц очевидна, но только в 1950-е гг. во Франции был выдан патент на

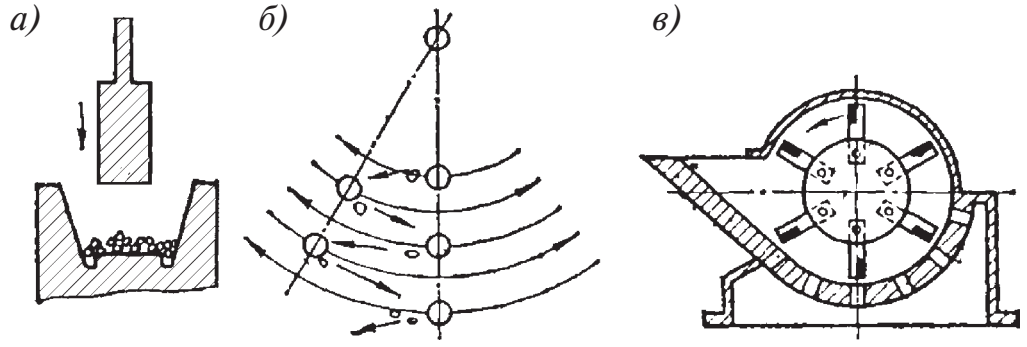


Рис. 13. Конструктивные приемы дробления ударом

планетарную мельницу с непрерывной загрузкой сырья. Лабораторный образец планетарной мельницы появился в 1970-е г.

Раздавливание происходит между плоскими качающимися щеками дробилки или между вращающимися навстречу друг другу валками, или между эксцентрически расположенными коническими поверхностями. В соответствии с этим различают щековые (см. рис. 12,*а*), валковые (см. рис. 12,*б*), конусные дробилки (см. рис. 12,*в*).

Раскалывание осуществляется острыми зубьями или шипами разнообразной формы, например в валковых дробилках, в основном для хрупких материалов.

Удар осуществляется движущимся пестом (см. рис. 13,*а*), вращающимися жестко закрепленными пальцами (дезинтеграторы) (см. рис. 13,*б*) или вращающимися молотками, стержнями (молотковые и ударные дробилки) (рис. 13,*в*).

Истирание, всегда сопровождающее раздавливание, ведется между вращающимися жерновами или плоской и цилиндрической поверхностями (бегуны).

Дробление и измельчение руды — самый дорогой и энергоемкий из всех стадий подготовки: его стоимость составляет от 35 до 70 % расходов на весь цикл обогащения, а стоимость дробильных устройств достигает 60 % стоимости всего оборудования. После каждой стадии дробления материал подвергается сортировке (разделению на фракции по крупности), что необходимо для отсева мелочи. Такая сортировка производится на **грохотах**.

Грохочение — это разделение или сортировка материалов по классам крупности при помощи решеток или металлических сит. Грохочением обычно разделяют материалы крупностью 1—3 мм, а более мелкие — **классификацией**. Классификация осуществляется с помощью воды или воздуха с использованием разности скоростей падения зерен различной крупности.

Добываемые из недр земли руды чаще всего не удовлетворяют требованиям металлургических производств по содержанию основного металла и вредных примесей, поэтому нуждаются в обогащении.

Обогащение — общее название ряда процессов, в результате проведения которых получается концентрат с содержанием по-

лезного компонента выше, чем в исходной руде. Остаточный продукт — хвосты — более бедный, чем исходная руда.

Об эффективности обогащения можно судить по выходу концентрата либо по степени извлечения железа. Выход концентрата

$$\gamma = P - O/(K - O) \cdot 100\ \%,$$

где P, K, O — содержание железа соответственно в исходной руде, концентрате и отходах-хвостах, %. Степень извлечения железа

$$\varepsilon = \gamma K/P.$$

Метод обогащения выбирается в зависимости от физического состояния железорудного материала. Вопрос об оптимальной степени обогащения железных руд целесообразно решать на основе технико-экономической оценки. С увеличением содержания железа в концентратах растут затраты на обогащение руд, при этом затраты в доменном цехе сокращаются. На практике

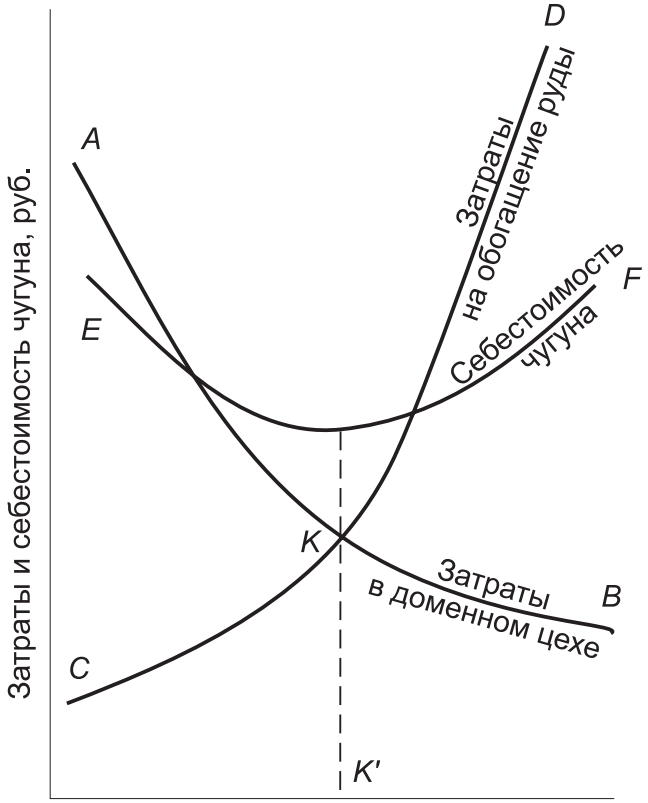


Рис. 14. Схема графического определения оптимального содержания железа в железорудной части шихты

установлено, что верхним пределом степени обогащения является 67–68 % железа в концентрате. Превышение этой величины приводит к снижению прочности сырья, а в итоге — к отрицательным последствиям для доменной плавки.

Все применяемые на практике способы обогащения являются по своей сути механической обработкой руд и основаны на использовании различий в физических и физико-механических свойствах составляющих руду минералов. При хорошей размываемости минерала водой применяют **промывку**, при различной плотности — **гравитационное обогащение**, при наличии магнитных свойств — **магнитное обогащение**, на использовании физико-механического различия в поверхностных свойствах основана **флотация**.

Магнитное обогащение заключается в том, что подготовленную руду, содержащую магнитный минерал, вводят в магнитное поле, создаваемое магнитами. Силовые линии магнитного поля намагничивают минерал, зерна притягиваются магнитом и, преодолевая постоянно действующие силы (тяжести, центробежные, сопротивления водной среды и др.), движутся в одном направлении, в то время как немагнитные зерна под действием этих сил движутся в другом направлении (рис. 15).

Флотацию осуществляют в бетонированных резервуарах, куда подают пульпу — раствор воды с тонкоизмельченной рудой с добавками пенообразователей и флотирующих веществ. Пульпу в резервуаре активно перемешивают пузырьками воздуха. Под влиянием поверхностно-активных элементов частицы оксидов железа прилипают к пузырькам газа. Раствор подбирают такого состава, чтобы он не смачивал частицы железной руды. Пустую породу, оседающую на дне резервуара, периодически убирают. Поднимающиеся частицы руды удерживаются на поверхности ванны пеной и затем вместе с ней снимаются с поверхности. Далее руду

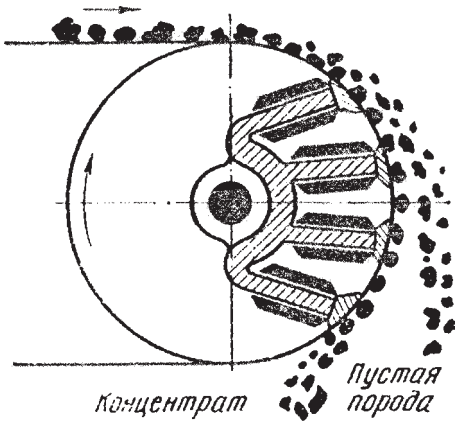


Рис. 15. Схема магнитного сепаратора для обогащения крупных руд

извлекают из пены. Флотация окисленных железных руд позволяет получать концентрат с содержанием железа до 60 %.

Железные руды имеют непостоянный химический состав, что приводит к неоднородности зернового (гранулометрического) состава раздробленных кусков. Особое значение имеет постоянное содержание железа. Рекомендуется так готовить шихту, чтобы отклонение от среднего содержания железа не превышало 0,3–0,5 %, иначе ухудшаются показатели работы печи.

Поступившую на склад руду укладывают в штабели послойно. Сформированный штабель выглядит как огромный слоеный пирог с множеством разнообразных по составу “начинок”. При отборе руды из штабеля или из бункера его и разрезают сверху донизу, как пирог, что обеспечивает заметное перемешивание материала. На некоторых заводах имеются механизированные склады для усреднения.

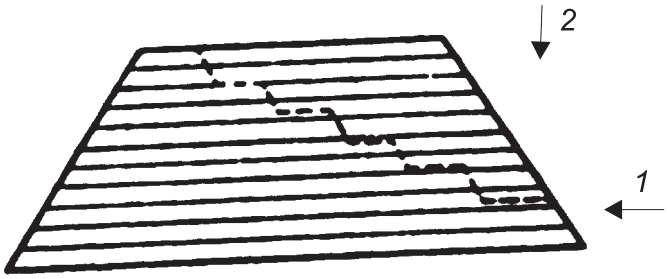


Рис. 16. Схема усреднения руды:
1 — укладка руды; *2* — отгрузка руды

Окускование — это процесс превращения мелких железорудных материалов (руд, концентратов, колошниковой пыли) в куски необходимых размеров для улучшения показателей работы металлургических агрегатов. Наиболее распространены два способа окускования: **агломерация** и **окомкование** (окатывание). Существует еще и такой способ как брикетирование, но для руд, используемых в доменном процессе, из-за сложности обработки брикетов для получения необходимой прочности и низкой производительности брикетных процессов он не получил широкого распространения.

Окускование способствует повышению газопроницаемости столба шихтовых материалов в доменной печи, уменьшению расхода топлива, ровному ходу печи, уменьшению выноса газовым потоком мелких фракций шихты из печи, улучшению восстановительной способности газового потока.

Изобретение агломерации стало важной вехой в истории развития доменного производства. Сначала этот процесс ис-

пользовался не в черной, а в цветной металлургии для окускования сернистых руд. С течением времени агломерация стала необходимым звеном, неотъемлемой частью доменного процесса. **Агломерация** — это процесс окускования рудной мелочи путем ее спекания.

Английские металлурги так и называют этот процесс "sintering" — спекание. Продукт агломерации и мы называем "спек" (или пирог) до тех пор, пока из него не отсеяна мелкая фракция — возврат. Однородные спеченные куски, которые направляют в доменную печь, металлурги называют агломератом.

Известно несколько способов агломерации руд: а) просасыванием воздуха; б) во вращающихся печах; в) во взвешенном состоянии; г) с подачей воздуха снизу; д) с подачей воздуха сверху. Наибольшее распространение получил способ спекания рудной мелочи на колосниковой решетке с просасыванием воздуха через слой шихты.

В агломерационной шихте, кроме железосодержащих материалов, присутствуют известняк (для получения офлюсованного агломерата), другие добавки (марганцевая руда, отходы производства).

Основные компоненты шихты для спекания, %:

Железосодержащие материалы (руда, концентрат, колошниковая пыль) крупностью 8–0 мм	40–50
Известняк крупностью 2–0 мм	15–20
Возврат (мелкий агломерат) крупностью 10–0 мм	20–30
Твердое топливо крупностью 3–0 мм	4–6
Влага	6–9

Спекание подготовленной шихты производится на колосниковой решетке (рис. 17). На колосниковую решетку чаши или конвейерной ленты загружают так называемую "постель" высотой 30–35 мм, состоящую обычно из возврата крупностью 10–25 мм. Сверху на нее загружают шихту (250–350 мм). Под решеткой создают разрежение для засасывания в слой воздуха. В самом начале процесса для нагрева верхнего слоя шихты до 1300 °С и воспламенения топлива используется специальное зажигательное устройство. Зона горения постепенно продвигается сверху вниз со скоростью 10–40 мм/мин. При достижении зоной

горения “постели” процесс спекания заканчивается, обычно длительность его составляет 10–20 мин.

Агломерат должен быть прочным, пористым, хорошо восстановимым. Для оценки прочности агломерата проводят специальные испытания в глухом стальном барабане. В барабан загружают 20 кг агломерата и вращают в течение определенного времени. Количество образовавшейся мелочи характеризует прочность агломерата (мелочи в кусках до 25 мм должно быть не более 25 %). Использование агломерата в шихте доменных печей России составляет 98 %. Его значение растет в связи с тем, что на рудниках увеличивается количество пылеватых руд.

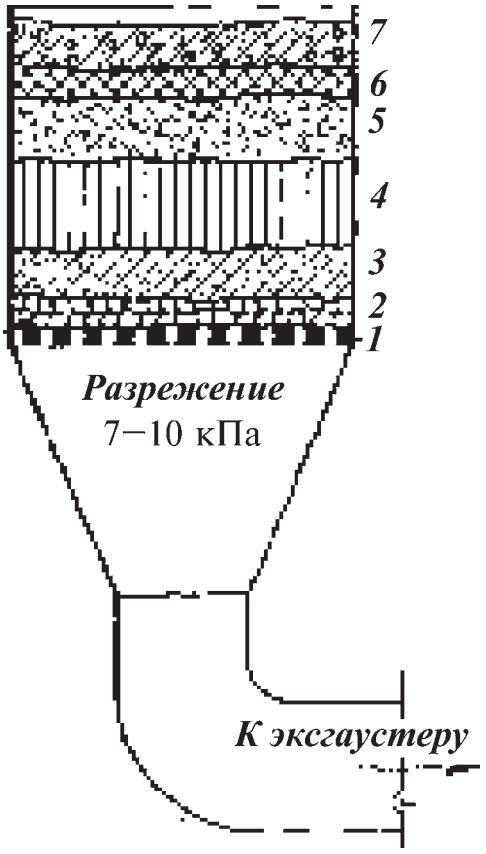


Рис. 17. Схема процесса агломерации

Появление процесса **окомкования** было вызвано расширением использования бедных руд и стремлением к их более глубокому обогащению. В результате получались тонкоизмельченные железорудные концентраты (менее 0,05 мм), для которых было экономически невыгодно использовать агломерацию: снижалась производительность агломерационных машин и ухудшалось качество агломерата. Продукт процесса окомкования — окатыши — используется как в доменной печи, так и для прямого получения железа восстановлением.

Технология производства окатышей включает два этапа: 1) получение сырых (мокрых) окатышей; 2) упрочняющий высокотемпературный обжиг при температуре 1200–1350 °С. Сырые окатыши получают в грануляторе, который представляет собой вращающийся барабан с наклоном 2–3,5°, его длина в 2–3 раза больше его диаметра. Благодаря поверхностным силам сцепления материал в нем слипается по принципу образования снежного кома, а при вращении барабана происходит обкатка комков до сферической формы.

Топливо доменной плавки

Основным топливом доменной плавки является каменноугольный кокс. На протяжении 100 лет применения кокса среди доменщиков остается в силе поговорка: “Самый лучший мастер печи — это хороший кокс”. Мировые запасы коксующихся углей оцениваются сейчас примерно в 1,5 трлн. т и составляют менее 10 % общих ресурсов каменного угля. Разведанные запасы насчитывают около 400 млрд. т, большая их часть сосредоточена в США, Китае, России, Германии.

Работа доменной печи без кокса невозможна по физическим причинам, так как он является восстановителем, источником технологического тепла и науглероживающим средством, а также обеспечивает газопроницаемость столба шихты в печи, служа ее опорным каркасом. Такое топливо лишь частично можно заменить другим (жидким, газообразным, пылевидным).

Многие сотни лет черные металлы получали, используя древесный уголь. На 1 т металла расходовалось до 40 м³ леса. В конце XVI в. английская королева Елизавета вынуждена была запретить использовать лес для производства угля. Через 30 лет выплавка железа была прекращена во всей Англии. В XVIII в. русская императрица Елизавета специальным указом запретила строить железоделательные заводы в радиусе 200 верст от Москвы.

К твердому топливу предъявляют следующие основные требования:

1) высокая теплота сгорания;

2) достаточная прочность и термостойкость (чтобы не образовывалось много мелочи при нагреве и прохождении через печь);

3) неспекаемость в условиях доменного процесса;

4) достаточная чистота по содержанию вредных примесей — серы и фосфора.

Также желательно, чтобы в топливе было мало золы, особенно глинозема и кремнезема, требующих применения флюсов. С учетом этих требований приходится специально изготавливать топливо.

Производство доменного кокса осуществляется на металлургических заводах с полным циклом и на специализированных коксохимических заводах.

В XVIII и в первой половине XIX в. кокс получали в кучах. Куча представляла собой сооружение высотой 3–4 и диаметром 3–4 м, вмещала 3–4 т угля. В центре из крупных кусков угля или камней выкладывали канал для отвода газов. Процесс длился 4–5 дней, а выход кокса составлял 50–55 %.

Шихтой для производства кокса служат различные сорта каменного угля: коксовые, жирные, тощие, газовые (коксующиеся угли — наиболее дорогой сорт). Металлургические заводы России снабжаются коксующимися углями Кузбасса, Печоры, Якутии.

Перед коксованием уголь измельчают и обогащают, удаляя минеральную часть породы для снижения содержания золы в коксе. Шихту увлажняют и отправляют в коксовые печи. При нагреве без доступа воздуха мелкие угольные частички переходят в пластическое состояние и размягчаются, обволакивая твердые зерна некоксующегося угля. При температуре более 450 °С в массе начинается процесс разложения угля с выделением органических соединений (углеводороды, аммиак и др.). Выделяющиеся газообразные вещества вспучивают размягченную массу, образуя в ней многочисленные поры.

По мере протекания процесса сухой перегонки масса все более обогащается углеродом, теряет пластичность и при 600–650 °С переходит в состояние полукокса. При 1000 °С он отвердевает, и никакой повторный нагрев не может перевести эту массу в плавкое состояние снова. Этот твердый остаток и есть кокс. Длительность процесса составляет 14–16 часов.

Кокс получают в камерных печах, объединенных в коксовые батареи, производительностью до 1 млн. т кокса в год. Батарея может иметь до 80 камер коксования (рис. 18). Камера имеет форму спичечного коробка с размерами: ширина 0,5, высота 5, длина 15–17 м. Коксовые печи отапливаются доменным и коксовым газом, сжигаемым в простенках между камерами — вертикалах — при температуре 1400 °С. При этом тепло идет на нагрев кирпичной кладки стен и угольной массы. Подаваемый воздух нагревается в регенераторах, находящихся под коксовыми печами, за счет тепла продуктов сжигания газа (**регенератор** — устройство для аккумулирования тепла отходящих газов).

Для выгрузки кокса камеру отключают от трубопровода, в который уходят газообразные продукты коксования. Располо-

женные с обеих сторон дверцы раскрываются. К передней дверце по рельсам подкатывает коксовыталкиватель, имеющий горизонтальную штангу с башмаком. Штанга вводится внутрь, выдавливая коксовый пирог, который многотонным огненным водопадом падает в вагон для тушения и сбора кокса.

Существует два способа тушения кокса: мокрый и сухой. При мокром кокс интенсивно охлаждается струями воды в башне, а при сухом коксовый пирог охлаждают инертным газом (азотом). Сухое тушение позволяет возвратить до 50 % тепла, расходуемого на процесс коксования, и использовать его, например,

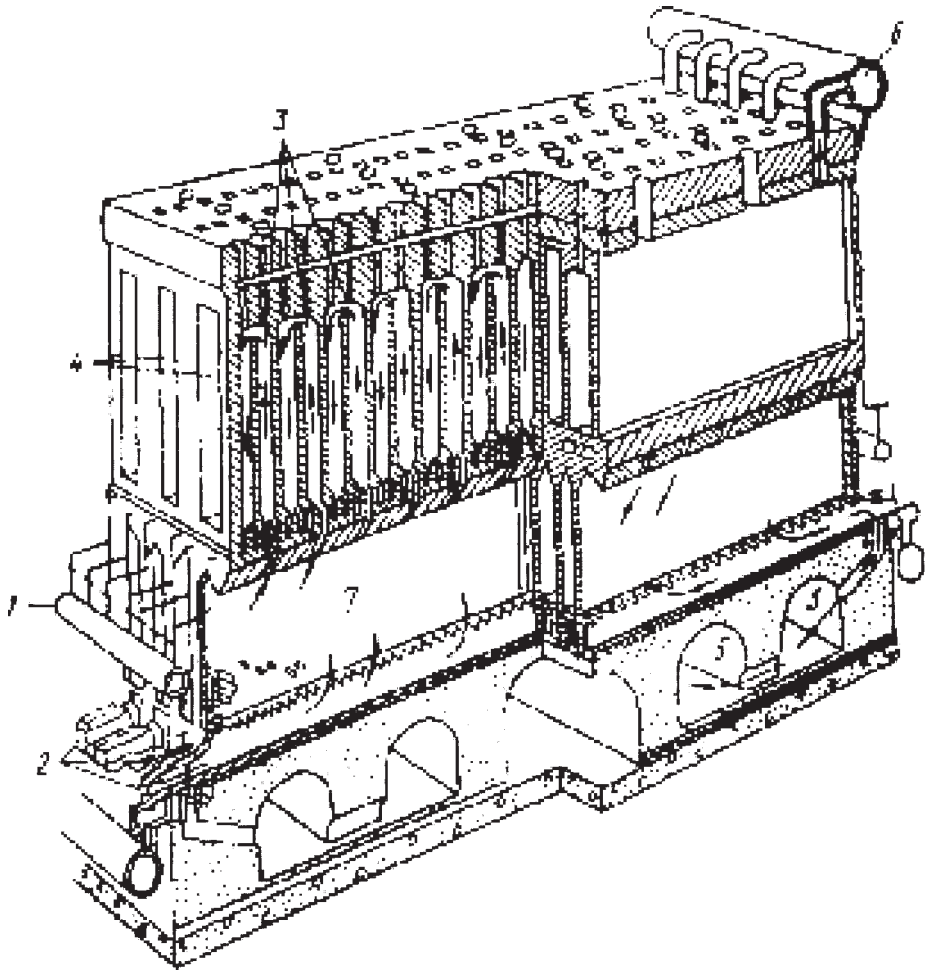


Рис. 18. Разрез коксовой батареи:
1 — подача воздуха; *2* — подача газа; *3* — вертикальные отопительные каналы; *4* — камеры коксования; *5* — борова для продуктов горения; *6* — отвод газообразных продуктов коксования; *7* — регенераторы

для получения пара и преобразования его в электрическую энергию.

Серебристый кусок кокса можно взять в руку (он не пачкает). Резкое охлаждение при мокром тушении ухудшает кокс, делая его влажным, а после сухого он менее влажен и более прочен. Кроме того, при сухом тушении нет пара, а следовательно, исключается коррозия оборудования.

Твердый, пористый кокс проходит испытания на разрушение и истирание, кусковатость (для определения крупности кусков кокс просеивают через решетки-сита с отверстиями, размеры которых предусмотрены соответственными стандартами), влажность, содержание золы, серы и летучих газов.

Кроме кокса при коксовании получают коксовый газ и ценные химические продукты. Из 1 т сухой угольной шихты получают 750–800 кг кокса, 320 м^3 газа, 38 кг каменноугольной смолы, 11 кг бензола. Кокс является дорогим и дефицитным сырьем. Для использования менее дефицитных плохо коксующихся углей пытаются заменить обычный кокс формованным, который получают высокотемпературным прессованием угольной шихты из некоксующихся углей.

Проблема экономии кокса в доменном производстве является важнейшей. Этого можно достигнуть, во-первых, за счет использования в доменной плавке наряду с коксом в качестве топлива природный газ, каменноугольную пыль, мазут; во-вторых, за счет обогащения дутья кислородом и применения офлюсованного агломерата и окатышей.

Наибольший экономический эффект достигается при использовании комбинированного дутья, когда на 1 м^3 кислорода вдувается 1,1–1,2 м^3 природного газа, 0,8–1,0 кг мазута или угольной пыли. Обычно расход природного газа составляет 100–120 м^3/т. Предварительное восстановление железной руды является также одним из эффективных способов снижения расхода кокса.

Ужесточение природоохранного законодательства с целью уменьшения выбросов в окружающую среду, высокая капиталоемкость коксохимических производств, повышение требований к качеству производимой продукции вызывают необходимость совершенствования коксохимического производства.

Флюсы

Флюсы — это вспомогательные материалы, вводимые в шихту для снижения температуры плавления пустой породы и образования в горне доменной печи шлака требуемого химического состава и физических свойств. Вид флюса и его количество выбираются в зависимости от состава пустой породы.

Если в пустой породе много кремнезема, т. е. кислого компонента, то в печь или шихту для агломерации вводят основные флюсы, т. е. содержащие известь. Если в пустой породе содержатся оксиды кальция и магния, прибегают к добавке кислых флюсов, содержащих кремнезем. В первом случае используют известняк, во втором — кварциты. Основную массу известняка составляет $CaCO_3$. При нагревании известняк разлагается с образованием извести и углекислого газа: $CaCO_3 = CaO + CO_2$. Известь является шлакообразующим элементом.

Известняк для доменной плавки должен быть кусковатым (крупность 25–60 мм), прочным, не образовывать мелочи, а главное, не содержать серы, фосфора и кремнезема. Месторождения известняка: вблизи Череповца — Пикалевское, возле Липецка — Студеновское, на Урале — Агаповское и др.

В шихте доменных печей часто используют отходы различных металлургических производств с повышенным содержанием железа или марганца. **Колошниковая пыль** содержит до 45 % Fe, поэтому ее направляют на агломерационные фабрики и подмешивают к шихте для производства агломерата. **Сварочный шлак** — отход прокатного производства, образующийся при высоком нагреве стальных заготовок в нагревательных печах, содержит около 50 % Fe и ничтожные количества серы и фосфора. **Окалина** — отход прокатного производства, ее удаляют со слитков и заготовок при прохождении прокатных клетей. Иногда используют шлаки сталеплавильного производства, литейных цехов, машиностроительных предприятий в виде стружки и мелкого лома.

2.2.2. Схема доменного процесса

Современная доменная печь — мощный и высокопроизводительный агрегат, расходующий огромное количество шихты и дутья. Это огромное сооружение, высотой 100 м и объемом

5000 м^3 и более, ежесуточно расходует до 25 000 т шихты, 18 000 т дутья, 180 т природного газа и выдает свыше 13 000 т чугуна, 4500 т шлака, огромное количество колошникового газа. Для ее обслуживания только в сутки расходуется около 100 тыс. м^3 воды.

Срок службы доменных печей (время между капитальными ремонтами 1-го разряда) колеблется от 13 до 22 лет. Пуск современного доменного комплекса — печь "Северянка" объемом 5580 м^3 ОАО "Северсталь" — был осуществлен 12 апреля 1986 г. Новые комплексы и доменные печи в последующем в России не возводились. От общего полезного объема печей России 45 % составляют печи объемом менее 2000 м^3. Большинство этих печей физически и морально устарели и подлежат выводу из эксплуатации. Объемы оставшихся доменных печей обеспечивают выплавку 34–42 млн. т чугуна в год.

Доменная печь — печь шахтного типа. Она имеет вытянутое в высоту рабочее пространство и круглое поперечное сечение, конфигурация которого выработана многовековым опытом. По оснащенности автоматикой она принадлежит к "династии чемпионов", так как является одним из самых механизированных и автоматизированных металлургических агрегатов. АСУ печи учитывает все входные данные: состав шихты, температуру и состав дутья, другие факторы, устанавливает оптимальные соотношения между ними для обеспечения максимальной производительности и высокого качества чугуна заданного состава.

> *Самая древняя печь — примитивный горн, вырытый в земле или выложенный из камня. Их чаще всего устраивали на холме с отверстием у его подножия. Естественная тяга создавала высокую температуру. Затем научились подавать дутье мехами. Позже вместо таких горнов стали строить шахтные печи. В России они назывались* ***домницами****.*

На рис. 19 показаны схемы профиля печей, дающие представление об их изменении за последние столетия: от простейших типа домниц (см. рис. 19,*а*) с постепенным переходом (см. рис. 19,*б,в,г*) к современному (см. рис. 19,*д*). Процесс доменной плавки непрерывный. Сверху в печь загружают сырые материалы (офлюсованный агломерат, кокс), а в нижнюю часть

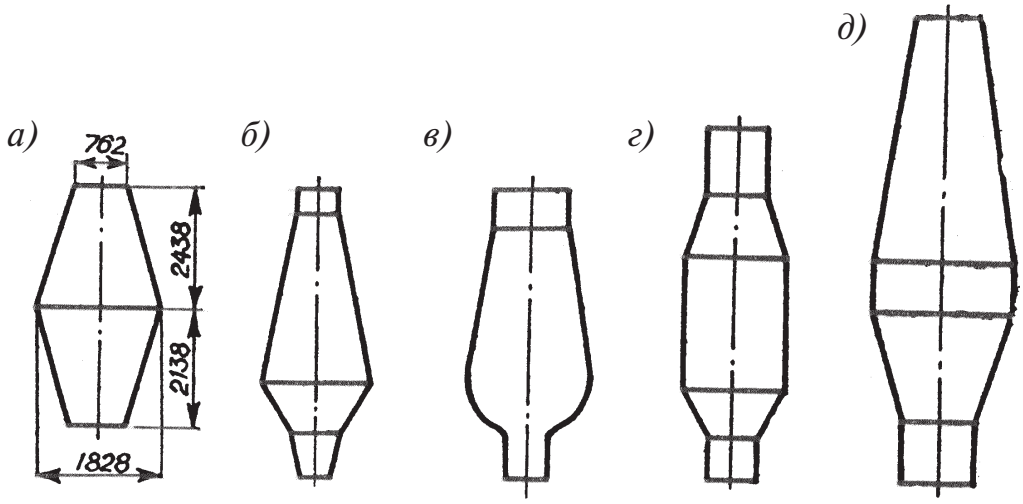


Рис. 19. Схема последовательного изменения профиля доменных печей

через фурмы подают нагретое дутье (воздух, обогащенный кислородом) и газообразное, жидкое или пылевидное топливо.

Полученные от сжигания топлива газы проходят через столб шихты, отдавая ей свою химическую и тепловую энергию. Опускающаяся рудная шихта нагревается, восстанавливается и расплавляется. Часть кокса расходуется в печи на восстановление железа и других элементов, а большое его количество сгорает в зоне фурм. Ровное, быстрое опускание шихты и хорошее взаимодействие с газами, т. е. лучшее использование тепловой и химической энергии газового потока, являются важнейшими факторами в доменном производстве. Схематически доменный процесс можно представить в следующем виде:

Железные, марганцевые руды; агломерат; окатыши; флюсы → Горение топлива: восстановление Fe, Mn, S, P, Si; науглероживание Fe → Продукты плавки: чугун, шлак, доменный газ

Устройство печи

Для обеспечения непрерывной подачи шихтовых материалов и выпуска чугуна и шлака необходимы простые и очень надежные конструкции, позволяющие работать печи без простоев в течение длительного времени.

Рассмотрим подробнее устройство основных частей доменной печи, общий вид которой показан на рис. 20. Объем печи, ограниченный огнеупорной футеровкой, называется **рабочим пространством**.

Огнеупоры — керамические материалы, способные противостоять продолжительному воздействию высоких температур и агрессивных металлургических сред, сохраняя при этом основные физико-механические свойства в заданных пределах. В доменном производстве используются следующие основные виды огнеупоров.

Динас содержит более 93 % SiO_2. Изготавливается из кварцевых порошков с добавками извести, оксидов железа и марганца при обжиге. Хорошо противостоит воздействию кислых шлаков. **Шамот** содержит 54–70 % SiO_2 и 28–46 % Al_2O_3. Изготавливается из смеси огнеупорной глины и каолина. По сравнению с динасом обладает более высокой термостойкостью и хорошо противостоит воздействию кислых и основных шлаков. **Углеродистые** огнеупоры изготавливаются из кокса, термоантрацита, графита и смолы. **Легковесные** теплоизоляционные огнеупоры используются для снижения тепловых потерь. Кроме указанных материалов для изоляции вспомогательных устройств доменного цеха (воздухопроводов горячего дутья, фурменных рукавов и др.) используют асбестовый картон, нити, шнуры и другие неформованные материалы.

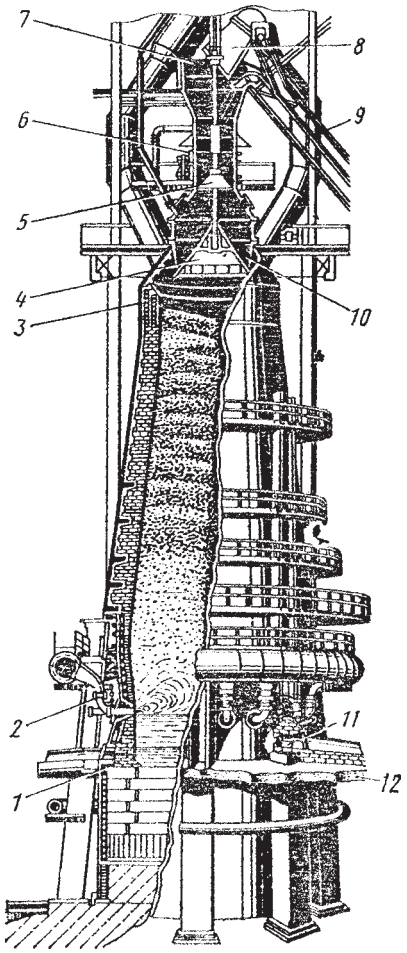


Рис. 20. Общий вид доменной печи:
1 — летка для выпуска чугуна; *2* — фурменное устройство для подачи комбинированного дутья; *3* — цилиндрическая часть колошника с защитными плитами; *4* — большой конус колошника; *5* — малый конус колошника; *6* — устройство для вращения; *7* — приемная воронка; *8* — скип; *9* — наклонный мост; *10* — межконусное пространство; *11* — летка для выпуска шлака; *12* — площадка

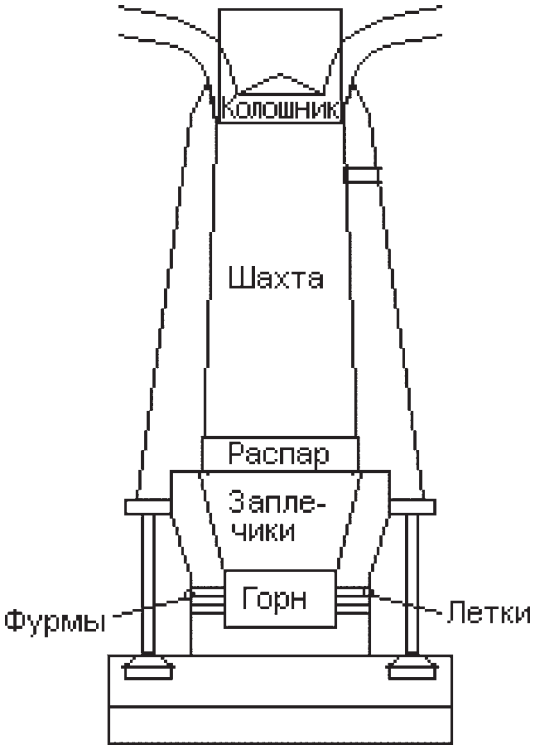


Рис. 21. Профиль доменной печи

Фундамент печи. Вместе со всеми сооружениями, металлоконструкциями, футеровкой и находящимися в ней шихтовыми материалами, продуктами плавки печь может иметь массу до 30 000 т. Вся эта масса должна быть равномерно распределена на грунте. Нижнюю (подземную) часть фундамента (**подошву**) делают в виде восьмиугольной бетонной плиты толщиной до 4 м. Верхняя (наземная) часть — монолитный цилиндр из жаропрочного бетона с огнеупорностью не ниже 1400–1500 °С — называется **пнем**.

Внутреннее очертание рабочего пространства в вертикальном сечении называется **профилем доменной печи**. Профиль печи состоит из пяти основных частей (рис. 21). **Колошник** — верхняя цилиндрическая часть печи, которая в сочетании с засыпным аппаратом обеспечивает требуемое размещение шихтовых материалов, определяя характер распределения газового потока. Раньше колошей называли короб, из которого уголь загружали в печь. Верхняя часть печи представляет собой расширяющийся усеченный конус, чтобы шихта не зависала и загруженные сырые материалы медленно и свободно опускались вниз.

Основной частью колошникового устройства является засыпной аппарат. Он предназначен для загрузки и равномерного распределения шихтовых материалов в печи. Конструкция двухконусного засыпного аппарата представлена на рис. 22. Засыпной аппарат состоит из приемной воронки, куда ссыпаются поданные снизу материалы, воронки малого конуса, запертой снизу большим конусом.

Загрузка материалов в печь осуществляется следующим образом. Из приемной воронки материалы падают и располагаются на малом конусе. При закрытом большом конусе производится

опускание малого конуса, и материалы попадают на большой конус. Так повторяется несколько раз, пока на большом конусе не соберется вся подача, состоящая из нескольких порций кокса, агломерата, окатышей и т. д. Затем при закрытом малом конусе (чтобы запыленные газы не проникали в атмосферу) опускается большой конус, и все материалы попадают в печь.

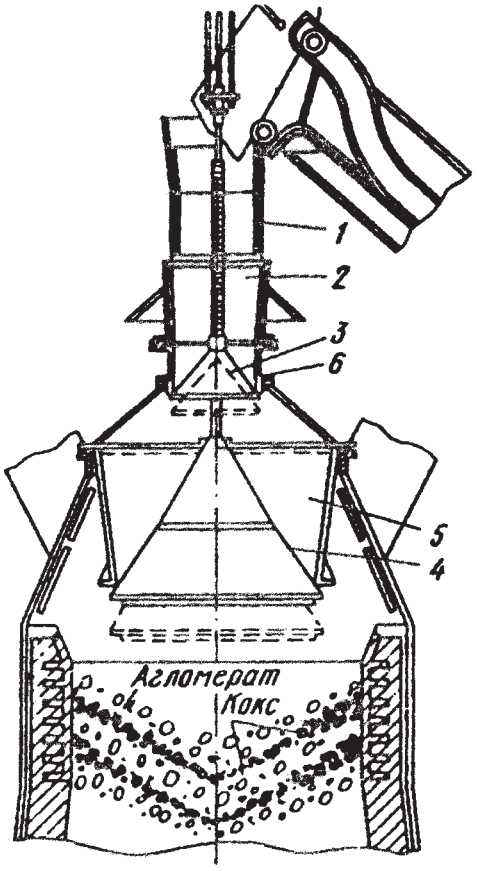


Рис. 22. Конструкция двухконусного засыпного аппарата доменной печи: *1* — приемная воронка; *2* — воронка малого конуса; *3* — малый конус; *4* — большой конус; *5* — чаша большого конуса; *6* — газовый затвор

Шахта — усеченный конус с большим основанием внизу. Такая форма шахты обеспечивает плавный сход материалов, увеличивающих свои размеры при нагревании. Здесь протекают основные процессы восстановления оксидов железа и других элементов.

Распар — самая широкая часть печи в форме цилиндра, необходимая для плавного перехода от нижнего широкого основания шахты к сужающимся заплечикам.

Заплечики представляют собой усеченный конус с большим основанием вверху. В них происходит резкое сокращение объема загруженных материалов из-за выгорания кокса и образования жидких продуктов плавки.

Горн — нижняя цилиндрическая часть печи, куда стекают расплавленный чугун и шлак. Горн делится на две зоны: фурменную и металлоприемник. Подина металлоприемника называется **лещадью**. В фурменной зоне по окружности расположены воздушные фурмы (16–42 шт.), через которые в печь подается горячее дутье. В нижней части горна есть отверстия — **летки** для выпуска чугуна и шлака. При наличии одной чугунной и одной шлаковой леток чугун выпускается 6–15 раз в сутки, а шлак в 2–3 раза чаще.

На современных мощных печах устанавливают по 4 чугунные летки, т. е. чугун и шлак выпускают практически непрерывно. Температура выпускаемого чугуна 1700–1800 °С, шлака — на 50–100 °С выше.

Каждая зона печи выложена особым огнеупорным кирпичом, выдерживающим огромную температуру и механическую нагрузку и охлаждаемым специальными холодильниками. Снаружи печь заключена в металлический **кожух** толщиной 20–50 мм.

Подача шихты в доменную печь

На новых печах полностью автоматизированы операции набора, взвешивания и загрузки шихты.

Существуют две системы подачи шихты: **скиповая и конвейерная**. Скиповая подача осуществляется по скиповому подъемнику, представляющему собой мост с углом наклона 50°. Подъем и опускание скипов производится с помощью лебедки с барабаном, на который наматываются и одновременно разматываются тросы, соединенные с каждым скипом. Скорость перемещения скипов на эстакаде моста достигает 15 км/ч. Режим работы лебедки автоматический. Руду, агломерат, окатыши и флюсы подают к скипам с помощью вагона-весов или транспортеров и промежуточных взвешивающих воронок. Конвейерная подача шихты производится по наклонной транспортерной ленте.

Все запасы сырых материалов хранятся в штабелях на рудном дворе. Вагоны с агломератом, коксом, окатышами подаются на **бункерную эстакаду**, которая расположена вдоль фронта доменного цеха рядом с рудным двором. Бункера представляют собой бетонированные конусообразные емкости, над которыми сверху проходят рельсовые пути для движения составов с материалами. Разгрузка в бункера производится или при открывании днищ вагонов, или с помощью вагоноопрокидывателей. Снизу бункера закрыты затворами барабанного типа.

При вращении барабана материал высыпается из бункера в вагон-весы, при этом масса насыпаемого материала регистрируется на шкале весов. Для забора нужного материала вагон-весы подъезжает к нужному бункеру, сцепляется с барабанным затво-

ром, приводя его во вращение, и насыпают необходимую порцию материала. Затем вагон наезжает на скиповую яму, створки дна вагона открываются, и шихта ссыпается в скип или промежуточный бункер.

Доменные печи могут иметь непрерывную конвейерную подачу материалов к скипам. В этом случае взвешивание шихты происходит в весовых воронках возле печи. Конвейерная загрузка имеет автоматическое управление: определяется вид и масса загружаемых материалов, устанавливается очередность выдающих их отдельных бункеров, корректируется вес подач и ведется запись хода загрузки.

По сравнению со скиповой конвейерная подача имеет следующие преимущества: удельные капитальные затраты и эксплуатационные расходы на 15–20 % ниже; более высокая производительность; возможность создания единой системы машин непрерывного транспорта от бункеров до колошника и полная автоматизация этой системы.

При расчете шихты определяют необходимое количество материалов для выплавки 100 кг чугуна и потом пересчитывают это количество на величину коксовой колоши, которая всегда остается постоянной, например, весит 6000 кг; определяют, сколько агломерата, флюса, окатышей нужно загрузить в печь на это количество кокса, т. е. определяют величину всей подачи.

Разливка чугуна и шлака

Выпуск чугуна из крупных доменных печей происходит почти непрерывно. После закрытия одной летки через 10–15 мин открывают другую. За один выпуск может выдаваться до 800 т чугуна. Чтобы выпустить чугун, электробуромолотом в летке просверливают канал диаметром 60 мм. Через этот канал по футерованному желобу чугун стекает в чугуновозный ковш. После выпуска металла летку заделывают с помощью пушки поршневого типа зарядом огнеупорной глины.

Из цеха чугун перевозится в футерованных ковшах грушевидной формы емкостью 140–300 т. Схема ковша представлена на рис. 23. При перевозке чугуна на далекое расстояние используют ковши миксерного типа удлиненной цилиндрической формы

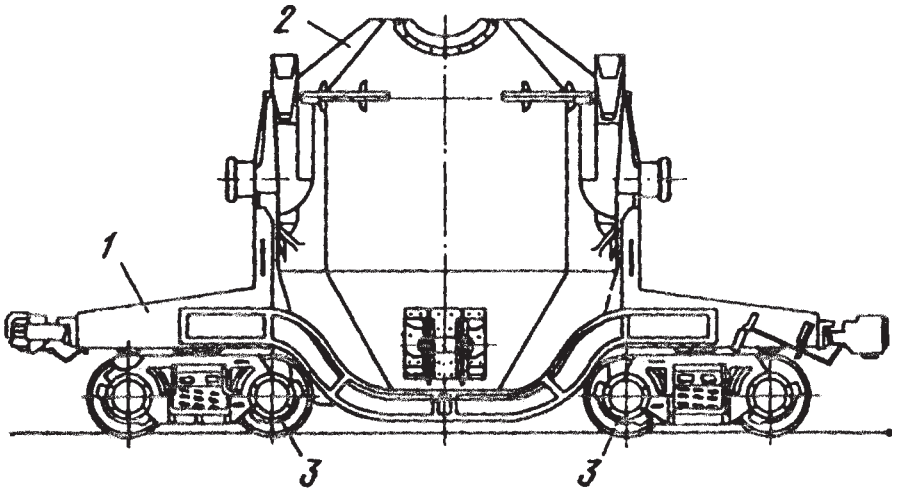


Рис. 23. Чугуновозный ковш:
1 — платформа; *2* — ковш; *3* — ходовые тележки

емкостью до 600 т. Длина такого ковша емкостью 420 т равна 32 м, ширина 3,7 м. Жидкий чугун можно перевозить на расстояние до 300 км. Среднее понижение температуры металла в таком чугуновозе 5 °С/ч. Такие перевозки осуществляются, например, между Западно-Сибирским и Кузнецким металлургическими комбинатами.

Шлак выпускают или отдельно через шлаковые летки, или вместе с чугуном через чугунные. При выпуске вместе с чугуном шлак отделяется в специальных разделителях — скиммерах, где он задерживается и отводится в шлаковые чугунные или стальные чаши емкостью до 24 м^3. Новые доменные цехи оборудованы устройствами для грануляции шлака, при которой он измельчается.

Грануляция шлака производится в бетонированных бассейнах с водой. По одной стороне бассейна проложен путь для шлаковозных ковшей, по другой — пути для железнодорожных вагонов, в которые грейферный кран перегружает гранулированный шлак из бассейна. Грануляция происходит при плавном сливе струи шлака из ковша в бассейн.

Большая часть выплавленного чугуна направляется в передельные мартеновские или конверторные цехи, но часть вывозится с завода в слитках. Чугунные слитки — чушки — отливаются на разливочных машинах. Струя металла вытекает на Т-образный желоб, направляющий два потока чугуна на конвейерные ленты

машины. Ленты состоят из чугунных форм — мульд, прикрепленных к шарнирно-пластинчатым бесконечным цепям.

По мере движения конвейера чугун в мульдах застывает, покрываясь сверху коркой. Для ускорения затвердевания мульды поливают водой из расположенных над конвейером брызгал. Скорость движения рассчитана так, чтобы во время нахождения в мульде чугун застыл полностью. При переворачивании мульды на разгрузочном конце машины чушка вываливается из мульды и падает на направляющий желоб, по которому идет в железнодорожный вагон.

2.3. ПРОДУКТЫ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Конечные продукты доменной плавки — выпускаемые из печи в огненно-жидком виде чугун и шлак, а также доменный (колошниковый) газ.

В зависимости от назначения чугуна и состава шихтовых материалов в нем может содержаться хром, никель, ванадий, титан, медь и мышьяк. Содержание этих элементов регламентируется соответствующим ГОСТом или техническими условиями и определяется при анализе проб, отбираемых в ходе плавки и при выпуске металла из печи.

Все доменные чугуны по своему назначению подразделяют на три основных вида:

- передельный, предназначенный для дальнейшего передела в сталь;
- литейный, используемый после переплава в чугуноплавильных цехах для отливки чугунных изделий;
- доменные ферросплавы, используемые в качестве раскислителей или присадки в сталеплавильном и чугунолитейном производствах.

Передельный чугун является преобладающим видом продукции доменного производства. На его долю приходится около 90 % общего производства чугуна. Он предназначен для производства стали в конвертерах или мартеновских печах и обычно содержит 0,3–1,2 % Si; 0,2–1,0 % Mn; 0,15–0,2 % P и 0,02–0,07 % S.

Литейный чугун по содержанию фосфора делят на четыре класса: А — до 0,1 % P (малофосфористый), Б — 0,1–0,3 % P

(обычный) и высокофосфористые чугуны классов В и Г с содержанием фосфора соответственно 0,31–0,7 и 0,71–1,2 %. Для изготовления высокопрочных изделий применяют чугуны с низким содержанием фосфора, а для художественного литья — высокофосфористые чугуны.

К **доменным ферросплавам** относятся: ферромарганец (70–75 % Mn и более, до 2 % Si, 0,33–0,45 % P, до 0,03 % S); ферросилиций (9–18 % Si, до 3 % Mn, до 0,2 % P, до 0,04 % S) и зеркальный чугун (15–25 % Mn, до 2 % Si, до 0,22 % P и до 0,03 % S).

В последние годы выплавка ферросплавов в доменных печах сократилась, а ферросилиция прекращена полностью вследствие неэкономичности передела. Более выгодно выплавлять ферросплавы в электропечах, где одновременно обеспечивается их более высокое качество.

Выплавка чугуна в доменных печах неизбежно сопровождается получением значительного количества доменного шлака. Шлак образуется в доменной печи из флюсов, золы, кокса, пустой породы руды и агломерата. Обычно при выплавке передельного и литейного чугунов выход шлака составляет 0,3–0,6 т на 1 т чугуна.

Основными составляющими шлака являются оксиды кремния (SiO_2), кальция (CaO), алюминия (Al_2O_3), магния (MgO), а также небольшое количество закиси железа (FeO), закиси марганца (MnO) и сульфидов металлов (FeS, MnS, CaS, MgS).

До недавнего времени доменный шлак почти не находил применения. Значительное его количество вывозилось в шлаковых ковшах в отвал. Разработку шлаковых отвалов вели лишь с целью утилизации попавших в шлак корольков чугуна. В настоящее время в связи с развитием техники переработки доменные шлаки широко применяют в качестве сырья для производства различных строительных материалов: цемента, вяжущих веществ, растворов и бетонов, шлаковой пемзы и ваты, дорожной брусчатки и др. Ежегодно перерабатывают и используют около 80 % всех шлаков.

Переход металлургических предприятий на работу без шлаковых отвалов высвобождает земельные площади и снижает загрязнение окружающей среды. В перспективе должны быть

полная переработка шлаков и постоянное использование старых шлаковых отвалов.

Газы, выходящие из печи через ее верхнюю часть — колошник, называют колошниковыми. Они состоят из CO, CH_4, H_2, CO_2 и N_2. После очистки от пыли газы используют как топливо для нагрева насадок воздухонагревателей, стальных слитков, коксовых батарей, отопления котлов и др. Горючие компоненты в газе: CO, H_2 и CH_4.

В процессе очистки колошникового газа получают колошниковую пыль, содержащую 45–55 % Fe в виде оксидов и 5–10 % C. Вынос пыли составляет от 10 до 80 кг/т чугуна. Основная масса пыли поступает на агломерационную фабрику. Можно также использовать колошниковую пыль в качестве наполнителя для асфальтных покрытий и дорог.

2.3.1. Структура, свойства и назначение чугуна

Из чугуна можно изготовлять изделия практически любого размера и сложности: от сковородок до коленчатых валов и великолепных произведений искусства. Из всех литых конструкционных материалов он остается главным. О технологичности чугуна можно судить по данным табл. 6.

Таблица 6

Технологические свойства литых сплавов

Свойство	Место литейного сплава по технологическим свойствам				
	СЧ 20	Сталь 40 Л	Алюминиевый сплав	Сплав магния	Бронза
Жидкотекучесть	I	III	II	V	IV
Усадка	V	I	IV	III	II
Трещиноустойчивость	I	IV	II	V	III
Обрабатываемость	III	V	I	IV	II
Свариваемость	V	I	III	II	IV

За многие сотни лет до появления стали чугун использовали прежде всего в земледелии (серпы, мотыги), а также в быту и для ритуальных целей. На Востоке в древности из чугуна отливали колокола, огромные скульптуры и мелкие монеты.

Pig-iron (англ.), Sohweineeisen (нем.) — "свиное железо", в русском закрепилось слово "чушка", обозначающее брусок металла, обычно цветного, отлитого в открытую сверху форму. Первоначально "pig-iron" называли получавшийся одновременно с железной крицей нежелательный хрупкий чугун. Затем чушками стали называть чугунные слитки, которые использовали для переплава на сталь. Из-за хрупкости чугун считали отходом производства и выбрасывали. Позже заметили, что он обладает хорошими литейными свойствами, и из него стали отливать пушки, ядра, архитектурные украшения.

Чугуны имеют широкий диапазон свойств и структур. В отличие от стали они обладают высокими литейными свойствами и низкой способностью к пластической деформации. Их технологические свойства зависят от структурных составляющих.

Структура чугуна может быть из смеси феррита (Ф) — твердого раствора углерода в железе, цементита (Ц) — химического соединения железа и углерода, перлита (П) — механической смеси цементита (Ц) и феррита (Ф), а также графита (Гр). Причем в перлите всегда содержится 0,8 % углерода. Особенность чугуна и заключается в том, что углерод в нем может находиться в различном состоянии: в свободном ($С_{Гр}$), образуя включения графита, залегающего в металлической основе; в химически связанном ($С_{св}$) — в виде зерен цементита. В структуру чугуна может одновременно входить как графит, так и цементит в различном соотношении.

В зависимости от состояния углерода различают белые, серые и половинчатые чугуны. В табл. 7 приведена характеристика чугунов с различной степенью графитизации, из которой также видно, что для деталей ответственного назначения наилучшим является перлитный; он занимает среди других чугунов первое место по прочности и вязкости и среднее — по твердости. Кроме того, такой чугун имеет повышенные износостойкость и терми-

Таблица 7

Распределение чугунов по их структуре и свойствам

Чугун	Структура	Место по свойствам		
		Прочность	Твердость	Вязкость
Белый	П-Ц	IV	I	V
Половинчатый	П-Ц-Гр	II	II	IV
Перлитный	П-Гр	I	III	I
Перлитоферритный	П-Ф-Гр	III	IV	II
Ферритный	Ф-Гр	V	V	III

ческую выносливость, что делает его наиболее приемлемым конструкционным материалом машиностроения. Форма графитных включений может быть различной: пластинчатая, точечная, хлопьевидная, шаровидная, стручкообразная (вермикулярная).

Белый чугун твердый, хрупкий, износостойкий, поэтому его используют в основном как полуфабрикат для производства ковкого чугуна, а также для деталей, работающих на износ (прокатные валки, тормозные колодки, рабочие органы дробилок и мельниц) и подвергающихся воздействию высоких температур (колосники, футеровки классификаторов и т. п.).

Большинство отливок производится из **серого** чугуна — конструкционного материала для производства деталей машин. Структура серого чугуна следующая: металлическая основа, аналогичная стальной, в которой залегают неметаллические графитные зерна, резко ее ослабляющие. Поэтому иногда говорят, что чугун — это “сталь, испорченная графитом”. Но графит в чугуне хотя и снижает его механические свойства, но придает сплаву ряд иных, весьма важных, характеристик (например, более высокие технологические свойства).

В **ковком** чугуне графит находится в хлопьевидной форме. Название ковких чугунов условное, так как изделия из них получают литьем, и пластической деформации они не подвергаются. Такой чугун получают из белого при специальной термической обработке (отжиге). Отливки из ковких чугунов применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках (картеры, редукторы, фланцы, муфты).

Структура и свойства чугуна определяются не только химическим составом, но и скоростью охлаждения отливки. Заливая чугун одного и того же состава в формы с различной скоростью охлаждения, можно получать разные по структуре чугуны.

В 1948–1949 гг. почти одновременно в США, Англии и СССР был создан новый чугун — **высокопрочный** с шаровидным графитом. Он имеет большую пластичность, прочность и вязкость, его даже можно ковать почти как сталь. По механическим свойствам значительно превосходит серый чугун.

Отличие химических составов чугуна с шаровидным графитом и серого чугуна с пластинчатым графитом — в ничтожно малом количестве (сотые доли процента) глобуляризующей добавки, обеспечивающей графиту шаровидную форму. Именно потому что новый материал мало отличается от серого чугуна по строению и составу, его отнесли к чугунам, но к чугунам с особо высокими свойствами. Вначале его даже называли сверхпрочным чугуном.

Высокопрочный чугун превосходит сталь по таким свойствам, как износостойкость, термическая выносливость (хорошо сопротивляется действию циклических нагревов), теплоустойчивость (сохраняет свойства при повышенных температурах), коррозионностойкость в агрессивных средах. Каким же образом удается получать вместо обычного хрупкого, малопрочного и непластичного сплава новый конструкционный материал, обладающий технологическими свойствами, приближающимися к характеристикам серого чугуна, а по служебным свойствам превосходящий сталь?

В качестве глобуляризующей добавки (модификатора) используют в основном магний, реже церий, хотя такими свойствами обладают кальций, литий, иттрий. Большое значение имеет способ ввода магния. Существует большое количество таких способов, предложены сотни глобуляризующих лигатур. Например, магний вводится в металл в “стаканчике”, прикрепленном к штанге, или прямо в литейную форму.

Из высокопрочного чугуна изготавливают поршни, поршневые кольца, распределительные валы, головки и блоки цилиндров, трубы грузовых систем танкеров и др.

У чугуна с **вермикулярным** графитом средние между свойствами серого и высокопрочного чугунов показатели прочности, вязкости, пластичности, но меньше, чем у серого чугуна, склонность к скорости охлаждения, и более высокие, чем у высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, стойкость против термических ударов, теплопроводность, циклическая вязкость, более низкий коэффициент термического расширения. А главное — у него ряд преимуществ перед высокопрочным чугуном с шаровидным графитом по технологическим свойствам.

Чугун с вермикулярным графитом успешно можно применять для изготовления деталей сложной конструкции, работающих при повышенных нагрузках, испытывающих большие ударные нагрузки, требующих повышенных износостойкости, демпфирующей способности, термической выносливости. Благодаря хорошим литейным свойствам и обрабатываемости производство деталей из такого чугуна более экономично, чем из чугуна с шаровидным графитом.

Наиболее широкое распространение получили **износостойкие** чугуны. Износ, т. е. процесс истирания, разрушения поверхности детали при трении о другую поверхность, встречается в большинстве изделий.

Немагнитные чугуны, относящиеся к группе высоколегированных, широко используют в электропромышленности и приборостроении.

Большинство деталей современных машин работает в условиях значительных повторно-переменных нагружений, что требует хорошей выносливости, ибо сплавы, как и человек, устают. Пожалуй, нет сплава, который бы работал в условиях повторно-переменных нагрузок более надежно, чем чугун.

Научившись лить чугунные изделия в песчаных формах в начале XV в. русские мастера раньше других в Европе использовали его для сложных отливок — пушечных ядер, пушек. Впервые в мире отлили пушку невиданной массы — более 65 т (Царь-пушка).

Использовав интересную инженерную находку — специальное водяное охлаждение песчаного стержня, заполнявшего полость ствола, они добились почти двойного повышения прочности сплава в наиболее ответственной части пушки. И Царь-пушка при испытании показала

прекрасные свойства, не уступая бронзовым пушкам, которые в то время использовались в мире.

Нельзя не отметить роль чугуна в художественном литье. Начиная с XVIII в. он привлекает внимание архитекторов и скульпторов. Больше всех в мире изготовлением чугунных художественных отливок прославился Урал (г. Касли). В уральских художественных отливках каждый узор, каждая деталь передается искусно и тонко, порой даже не верится, что они сделаны из металлического сплава.

Литые ансамбли Санкт-Петербурга, Москвы, знаменитых усадеб никого не могут оставить равнодушными, так как они отличаются ажурностью, высокой художественностью и прекрасным исполнением.

2.3.2. Технико-экономические показатели доменного процесса

Производительность печи оценивается в тоннах передельного чугуна, выплавляемого в печи в сутки. Если выплавляют чугун других марок, то при помощи определенных коэффициентов их пересчитывают на передельный. Например, для литейного чугуна коэффициенты пересчета 1,15–1,40. Для сравнения работы печей различного объема служит коэффициент использования полезного объема (к.и.п.о.). Он равен отношению полезного объема печи в кубических метрах к суточной производительности печи в тоннах, т. е. показывает, сколько чугуна в сутки производится одним кубическим метром полезного объема. Так, при к.и.п.о., равном 0,5, с каждого кубического метра получают в сутки 2 т чугуна. Чем меньше этот показатель, тем лучше работает доменная печь.

Производительность доменных печей зависит от сорта выплавляемого чугуна. Для сопоставления работы печей в формулу к.и.п.о. вносят выплавку передельного чугуна в тоннах в сутки. А при выплавке других марок чугуна вводятся переводные коэффициенты:

Передельный мартеновский чугун	1,00
Передельный высококачественный чугун	1,34
Литейный чугун	1,26
Доменный ферросилиций	2,5
Доменный ферромарганец	2,5

Удельный расход кокса. Поскольку кокс является дорогим топливом и в настоящее время дефицитным, то его расход является одним из важнейших показателей процесса получения чугуна. Удельный расход кокса непосредственно влияет на производительность печи. При одной и той же интенсивности плавки производительность возрастает по мере снижения расхода кокса. Средний расход кокса в России составляет около 540 кг/т чугуна, на лучших доменных печах мира — 360 кг/т.

2.3.3. Способы экономии топлива

Улучшение подготовки и качества сырых материалов: повышение прочности агломератов, отсев мелких фракций, обеспечение однородности и химического состава сырья.

Повышение содержания железа в сырье на 1 % сопровождается повышением производительности печи на 2,5 % и снижением расхода кокса на 1,5–2,0 %. Замена обычного агломерата офлюсованным позволяет исключить из шихты доменной печи известняк. Снижение расхода известняка на 100 кг/т чугуна приводит к снижению расхода кокса на 3 %.

Понижение содержания мелочи в шихте улучшает газопроницаемость столба шихтовых материалов и обеспечивает более равномерный ход газов в шахте печи. Уменьшение содержания мелочи в агломерате на 10 % приводит к увеличению производительности доменной печи на 10 %.

Каждый килограмм серы, выведенный из состава шихты, дает экономию 17–20 кг кокса, а снижение содержания серы в коксе на 1 % приводит к уменьшению его расхода на 2,5 % и на столько же повышает производительность печи.

Применение высоконагретого дутья. Дутье создает воздушную подушку, на которой держится вся масса сырья, заполняющего внутреннее пространство печи.

> *Дутье — столь важный фактор, что доменщики ввод печи в эксплуатацию называют задувкой. На каждый 1 м³ полезного объема печи воздуходувка подает более 2000 м³ воздуха в минуту. Этот ураган обеспечивает горение огромной массы кокса.*

Впервые нагрев дутья до 150 °С применили в 1829 г. По мере развития конструкций воздухонагревателей температура дутья постепенно повышалась и в настоящее время достигла 1350 °С. Повышение температуры дутья является одним из самых действенных факторов снижения расхода кокса. С горячим дутьем в доменную печь поступает большое количество физического тепла. Это заменяет тепло, которое получают от сжигания кокса.

При повышении температуры дутья от 1000 до 1200 °С расход кокса снижается на 4,5 %. В ближайшее время температура дутья может достичь 1250–1400 °С, что потребует разработки новых конструкций воздухонагревателей и более стойких огнеупоров.

Вдувание топлива в печь для замены кокса. Самой дорогой составляющей шихты доменного процесса является кокс. На долю кокса приходится 40–50 % себестоимости передельного чугуна. Поскольку заменить полностью кокс в доменном процессе пока невозможно, ученые и металлурги всего мира постоянно ищут топливно-восстановительные добавки, позволяющие снизить расход кокса (так называемое комбинированное дутье). В настоящее время такими добавками являются кислород, природный газ, мазут, пылеугольное топливо.

При увеличении содержания кислорода в дутье до 30 % производительность печи повышается на 10 %, а расход кокса уменьшается на 9 %. Расход природного газа на дутье, обогащенное кислородом до 30 %, составляет 150–200 $м^3$/т чугуна.

Практически применение природного газа является сейчас эффективным только в Северной Америке и России (причем используется газ собственных месторождений), а использование мазута экономически целесообразно для условий Западной Европы. В остальных регионах мира, где производятся черные металлы, основным заменителем кокса служит пылеугольное топливо (табл. 8). Пылеугольное топливо (ПУТ) нашло широкое применение в 1993–1996 гг. в связи с необходимостью реконструкции большого числа коксовых батарей.

Расход мазута составляет 60 кг/т чугуна. Это топливо вызывает в доменном процессе те же изменения, что и природный газ. Использование мазута повышает производительность доменных печей на 2 % и снижает расход кокса на 8–16 %.

Таблица 8

Затраты основных энергоносителей на производство чугуна в главных регионах мира (1998—первая половина 1999 г.)

Регион	Доля от мирового производства чугуна, %	Общие затраты энергии в агломерационном переделе, ГДж/т чугуна	Затраты энергоносителей, кг/т чугуна			
			Кокс	Пылеугольное топливо	Нефтепродукты	Природный газ
Западная Европа (страны ЕС)	19	16,19	360	84	37	0
Северная Америка (США и Канада)	12	16,07	375	77	21	14
Дальний Восток (Япония, Южная Корея, Тайвань)	22	15,68	360	120	–	–
Китай, Индия, Северная Корея	24	20,73	620	30	–	–
СНГ и Восточная Европа	13	19,00	530	–	0	65
Мир в среднем	–	17,68	456	65	11	22

Количество пыли, вводимой в печь, составляет 60–80 кг/т чугуна, что понижает расход кокса примерно на такое же количество. Вдувание угольной пыли требует разработки процессов ее подготовки: измельчения, осушения, транспортировки. Еще более эффективным является совместное применение природного газа и угольной пыли.

Во многих странах мира (Японии, Германии, Южной Корее, Бразилии, Китае и др.) в настоящее время ведутся активные исследования применения в агломерационном и доменном производствах ***техногенных энергоносителей***: пластмасс, древесных опилок, отработанных технических масел, спиртов, пищевых отходов производства сахара, риса, муки и т. п. Наиболее перспективным большинством специалистов признается применение в качестве заменителя кокса отходов пластмасс как произ-

Таблица 9

Сопоставление химического состава пластмасс с другими видами топлив, %

Составные элементы топлив	Топливные добавки к доменному дутью			
	Природный газ	ПУТ	Мазут	Пластмассы
Углерод	70–75	75–80	85–87	75–80
Водород	22–26	4–5	10–12	10–14
Зола	0	8–12	0,05–0,10	4–6
Сера	Менее 0,001	0,6–1,2	2,0–2,5	0,5–1,5
Хлор	0	0,1–0,3	Менее 0,05	До 1,5
Фтор	0	Менее 0,01	До 0,001	До 1,5
Калий	0	0,2–0,3	До 0,001	0,03–0,06
Натрий	0	Менее 0,1	До 0,001	0,08–0,12
Теплота сгорания, МДж/м^3	30,0–38,5	13,0–28,0	40,0–42,5	38,0–45,0

водственных, так и в виде ТБО. Пластмассы по энергометаллургическим характеристикам не уступают либо превосходят известные топливно-восстановительные материалы (табл. 9).

Впервые пластмассы начала использовать в доменной печи немецкая фирма "Штальверке Бремен ГмбХ" в 1993 г. Для подачи пластмасс в фурмы была использована модернизированная система вдувания ПУТ. Предварительная подготовка пластмассовых ТБО включала сортировку, после которой пленочные материалы плавили и гранулировали, а твердые пластмассы дробили. Затем оба компонента смешивали и вдували в доменную печь.

Повышение давления газов в печи значительно увеличивает производительность печи и несколько снижает расход кокса. Для повышения давления газа в доменной печи используется специальное дроссельное устройство на газопроводе очищенного колошникового газа. Это позволяет увеличить количество воздуха, подаваемого в печь. Расход кокса снижается, потому что повышается эффективность использования газов в печи.

Кроме повышения производительности печи на 5–7 % и снижения расхода кокса, повышение давления способствует уменьшению выноса пыли из-за снижения скорости газов на колошнике на 20–50 %.

2.4. СПОСОБЫ ПРЯМОГО ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

Штирия — одна из крупнейших земель Австрии — издавна славится своими железорудными богатствами. Старинное предание повествует о том, как здесь появилась Рудная гора, которая уже много столетий служит источником железа. Когда-то в сети рыбаков, ловившие в этих краях в озере рыбу, попался водяной. Умолял он выпустить его обратно в озеро и пообещал за свое освобождение солидный выкуп: либо золота — на один год, либо серебра — на десять лет, либо железа — на вечные времена. Местные жители без колебания выбрали железо. А водяной, судя по всему, слово свое сдержал — железные запасы до сих пор не иссякли.

В настоящее время основное количество черных металлов производится по двухступенчатой схеме чугун—сталь, но все большее развитие в мире получают процессы внедоменного (бескоксового) получения металла. Причины возникновения и развития процессов внедоменного получения металла следующие:

дефицит и дороговизна коксующихся углей, ухудшение их качества, отсутствие во многих регионах мира;

стремление более рационально использовать топливно-энергетические ресурсы и необходимость увеличения в черной металлургии доли наиболее экономичных видов топлива — газа, нефти, некоксующихся углей;

ограниченность ресурсов скрапа гарантированной чистоты и стабильного состава;

постоянно растущие требования к качеству металла и возможность достижения более высокого качества стали при использовании для ее выплавки металлизованного сырья вместо скрапа вследствие повышенной чистоты металлизованного сырья по вредным примесям и особенно примесям цветных металлов;

возможность организации маломасштабной металлургии (строительство мини-заводов) и расширение экономико-географических районов рентабельного металлургического производства на основе получения и использования металлизованного сырья, что особенно важно для многих развивающихся стран;

ужесточение требований к охране окружающей среды, которым бескоксовая металлургия удовлетворяет в большей степени, чем традиционная коксодоменная технология.

Основным продуктом прямого восстановления является железорудный материал, в котором бóльшая часть находится в металлическом виде. При большой степени металлизации продукт прямого восстановления называется **губчатым железом**, при более низкой (до 90–94 % металлического железа) — **металлизованным сырьем**. Основным назначением металлизованного продукта является переплав в дуговых сталеплавильных печах. В качестве исходного железорудного сырья используют агломерат, окатыши, а в качестве восстановителя — твердое топливо или газ, содержащий H_2 и CO.

В течение почти двух последних десятилетий XX в. производство металлизованного сырья постоянно росло, практически удваиваясь каждые семь лет. За период 1990–2000 гг. оно увеличилось почти в 2,5 раза. При этом среднегодовые темпы роста составили 7,5–8 %, а в отдельные периоды (1993, 1994 и 2000 гг.) достигали 13–16 %.

Крупнейшим регионом по производству металлизованного сырья является Латинская Америка, на долю которой приходится 35–36 % всей продукции бескоксовой металлургии (табл. 10). Крупными производителями являются Ближний Восток и Северная Африка (27–30 %), а также Азия (19–21 %). Основные страны, на долю которых приходится около 60 % общего объема производства металлизованного сырья, — Венесуэла, Мексика, Индия, Иран и Саудовская Аравия.

В России на базе прямого восстановления работает металлургический комбинат (ОЭМК) в г. Старый Оскол (ввод в эксплуатацию в 1983 г.). За это время на ОЭМК произведено 27,5 млн. т металлизованных окатышей, которые по качеству являются лучшими в мире (табл. 11).

Таблица 10

Производство металлизованного сырья

Производство, млн. т, %	1990 г.	1995 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
В мире	**17,68**	**30,67**	**36,96**	**38,60**	**43,78**	**40,51**
	100	173,5	209,8	218,3	247,6	229,1
Латинская Америка	**7,56**	**11,09**	**13,86**	**14,03**	**15,96**	**14,13**
Венесуэла	3,02	4,72	5,06	5,05	6,69	6,38
Мексика	2,48	3,70	5,68	6,24	5,83	3,67
Тринидад и Тобаго	0,70	1,05	1,14	1,30	1,53	2,31
Аргентина	1,03	1,33	1,54	0,99	1,42	1,28
Бразилия	0,29	0,30	0,34	0,40	0,42	0,43
Ближний Восток и Северная Африка	**3,34**	**7,80**	**9,28**	**10,15**	**12,06**	**12,08**
Иран	0,29	3,23	3,69	4,12	4,74	5,00
Саудовская Аравия	1,09	2,13	2,27	2,36	3,09	2,88
Египет	0,71	0,85	1,61	1,67	2,11	2,37
Ливия	0,50	0,97	1,01	1,33	1,50	1,09
Катар	0,58	0,63	0,71	0,67	0,62	0,73
Азия	**2,66**	**7,25**	**7,93**	**8,07**	**8,60**	**8,53**
Индия	0,61	4,28	5,26	5,22	5,44	5,59
Индонезия	1,41	1,86	1,64	1,74	1,82	1,48
Малайзия	0,62	1,09	0,91	0,96	1,26	1,12
Китай	–	–	0,08	0,11	0,05	0,30
Северная Америка	**1,12**	**1,47**	**2,84**	**2,59**	**2,69**	**0,12**
США	0,39	0,46	1,60	1,67	1,56	0,12
Канада	0,73	1,01	1,24	0,92	1,13	–
Россия	**1,69**	**1,68**	**1,55***	**1,88***	**1,92**	**2,51**
Африка (ЮАР)	**1,01**	**0,96**	**1,05**	**1,16**	**1,53**	**1,56**
Австралия	**–**	**–**	**–**	**0,32**	**0,56**	**1,37**
Европа (Германия)	**0,31**	**0,41**	**0,45**	**0,40**	**0,46**	**0,21**

* По данным ОЭМК в 1998 и 1999 гг. производство металлизованного сырья составило соответственно 1,73 и 1,79 млн. т.

Таблица 11

Показатели производства металлизованных окатышей на ОЭМК

Показатель	Неофлюсованные окатыши				Офлюсованные окатыши						
	1990 г.	1991 г.	1992 г.	1993 г.	1994 г.	1995 г.	1996 г.	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.
Производство, тыс. т	1682,67	1676,11	1575,06	1544,10	1707,43	1678,10	1504,56	1730,35	1726,00	1787,00	1918,50
Использование календарного времени, %	88,44	89,22	82,70	80,99	86,24	84,09	75,69	84,26	85,03	89,23	92,93
Производительность за фактическое время работы, т/ч	217,2	214,5	216,8	217,6	226,0	227,8	226,3	234,4	231,7	228,6	235,0
Степень металлизации, %	94,3	94,3	94,9	95,9	95,8	96,0	96,4	96,1	96,4	96,2	96,2
Средняя температура восстановительного газа, °С	780	781	793	789	804	842	880	883	893	894	898
Расходы на производство 1 т:											
окисленные окатыши, кг	1444,6	1428,0	1438,0	1413,9	1418,9	1402,6	1390,9	1384,6	1381,3	1392,5	1400,8
природный газ, $м^3$	365,9	361,2	362,3	352,0	342,4	341,4	337,0	325,6	326,0	325,7	325,2
электроэнергия, кВт·ч	126,4	121,9	121,2	119,7	115,0	115,7	119,5	116,0	115,0	113,4	111,6

Под процессами **прямого получения железа** понимают такие химические, электрохимические или химико-термические процессы, которые дают возможность непосредственно из руды, минуя доменную печь, получать металлическое железо в виде губки, порошка или жидкого металла.

Переход к строительству мини-заводов полного цикла на основе производства губчатого железа начался в 70-х гг. XX в. Это объясняется тем, что схема доменная печь—конвертер экономически эффективна при производстве 3 млн. т стали в год, а схема шахтная печь—электропечь уже при 300–400 тыс. т в год; при капитальных затратах 750 и 380 дол./т соответственно. Кроме того, меньше потребность в рабочей силе (2,6 и 1,2 чел.·ч на 1 т) и быстрее вводятся в действие производственные мощности (в течение 20 месяцев с начала строительства).

Процессы внедоменного получения металла разделены на два больших класса: твердофазные и жидкофазные. В твердофазных процессах удаление кислорода из руды при использовании газообразного или твердого восстановителя происходит при температурах ниже температуры размягчения компонентов шихты. Продукты восстановления называются губчатым железом, или металлизованными окатышами. В высокотемпературных процессах восстановление оксидов железа частично происходит при температуре расплавления, а довосстановление — при температуре плавления оксидной и металлической фаз.

2.4.1. Процессы твердофазного восстановления

Основным способом такого процесса и наиболее промышленно освоенным в мире и нашей стране является технология металлизации “Мидрекс” (рис. 24). Этот процесс осуществляется в невысоких шахтных печах (объем 200 м^3, высота 10–14 м, диаметр 3,0–3,5 м) или ретортах с использованием конвертированного природного газа. В 2001 г. на установках “Мидрекс” было получено 26,8 млн. т металлизованного сырья, что составляет 66,2 % мирового производства.

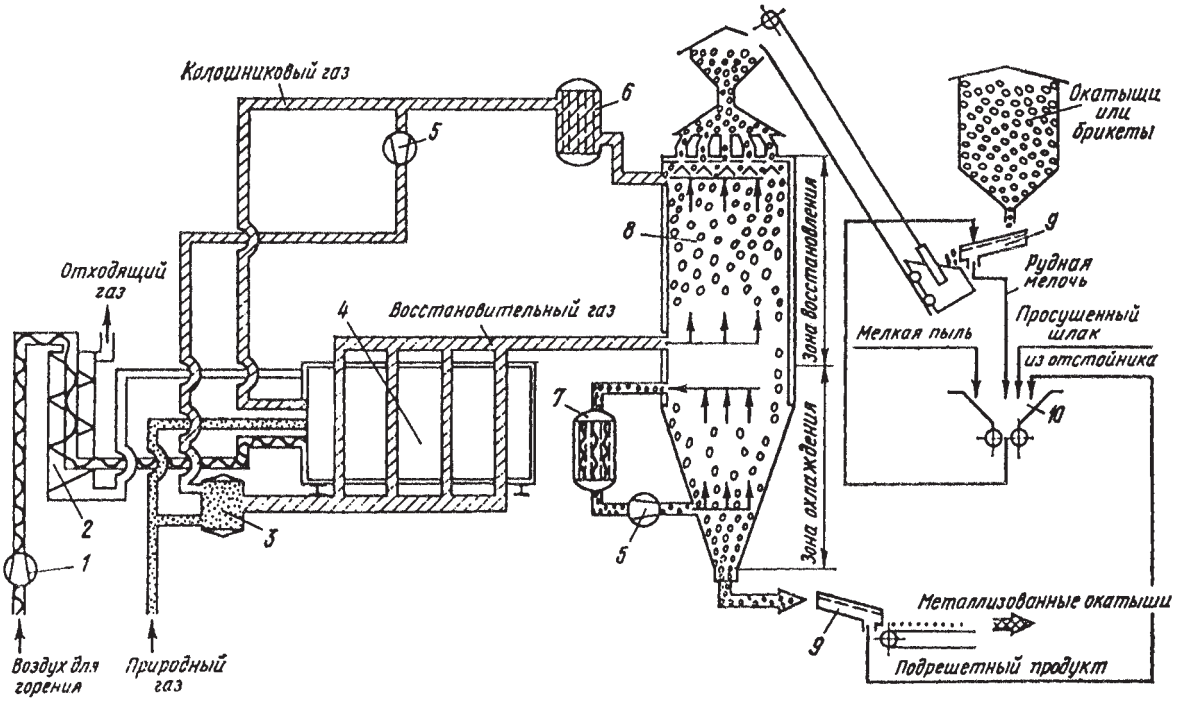


Рис. 24. Технологическая схема процесса “Мидрекс”:
1 — воздуходувка; *2* — теплообменник; *3* — смеситель газов;
4 — конвертер; *5* — компрессор; *6, 7* — скруббер
для колошникового газа; *8* — шахтная печь;
9 — вибрационный грохот; *10* — брикетировочный пресс

Конверсия природного газа заключается в превращении углеводородов путем их разложения на водород и углерод с последующим дожиганием углерода до CO при помощи углекислого газа и водяных паров по следующим реакциям:

$$CH_4+CO_2= 2CO+2H_2;\ CH_4+H_2O = CO+3H_2.$$

В конвертер подается смесь природного и колошникового газов. Конвертер представляет собой футерованный изнутри рекуператор прямоугольной формы, в котором установлены трубы из жароупорной стали, заполненные кусковыми глиноземистыми огнеупорами, пропитанными никелевым катализатором. Снаружи трубы разогреваются сжиганием колошникового газа. В этих трубах при температуре 1000 °C природный газ при помощи CO_2 колошникового газа конвертируется в восстановительный газ, содержащий 30 % CO и 70 % H_2. Восстановительный газ подается в шахтную печь снизу, а сверху производится загрузка железорудного материала в виде окатышей. Ис-

ходное сырье должно содержать более 66 % железа и очень мало кремнезема.

Печь по высоте разделена на две зоны с двумя самостоятельными оборотными циклами. Верхняя зона предназначена для восстановления железа, а нижняя — для охлаждения металлизованного продукта.

Восстановительный газ отсасывается из верхней части зоны восстановления, подвергается очистке и охлаждению в скруббере, и далее треть объема этого газа поступает в конвертер для конверсии природного газа. Температура окатышей в зоне восстановления 760 °С, на выходе из печи 40 °С. Продолжительность пребывания в зоне восстановления 4–6 ч. Суммарная длительность пребывания окатышей в печи 8–12 ч.

Полученные металлизованные окатыши выгружают из печи снизу. Их хранят в бункере, заполненном инертным газом. На производство 1 т сырья расходуется 9,7–11 ГДж природного газа, 80–130 кВт·ч электроэнергии. Степень металлизации составляет 93–96 %.

В 1980-е гг. процесс “Мидрекс” был модернизирован. В результате этого охлаждение окатышей в печи было заменено горячим брикетированием, для чего под шахтой размещаются брикетировочные прессы и оборудование для разделения брикетов размером 30×50×100 мм с последующим охлаждением. В отличие от металлизованных окатышей они не подвержены вторичному окислению и опасности самовозгорания. В табл. 12 приведены показатели процесса “Мидрекс”.

Вдувание кислорода в поток горячего восстановительного газа приводит к значительному повышению температуры газа и шихты, что приводит к росту производительности более чем на 12 %.

Технология OXY+ состоит в особом производстве восстановительного газа. Ее применение предполагает рост производительности на 21 % по сравнению с работой без применения кислорода. Пока эта технология в промышленном масштабе на установке “Мидрекс” не применяется. В 2001 г. в мире было произведено 7,3 млн. т брикетов, или 18 % общего объема производства.

Другим способом металлизации в шахтных печах является разработанный в Мексике на базе классического процесса ХиЛ-I в периодически действующих ретортах процесс ХиЛ-III, особен-

Таблица 12

Показатели процесса “Мидрекс”

Производительность, т/ч	Рост производительности, %	Добавка природного газа, %	Температура, °С		Удельный расход (на 1 т)		
			Восстановительного газа	Шихты	Кислорода, $нм^3$	Природного газа, $нм^3$	Электроэнергии, кВт·ч
88,8	–	4,5	780	789	–	268,6	135
100,3	13	3,5	850	814	–	262,3	120
110,2	24,1	3,5	918	834	–	257,9	109
121,5	36,8	4,5	1050	860	17,5	260,3	99
129,2	45,5	3,0	961	857	30,2	265,8	93
133,6	50,4	3,0	1050	898	41,2	264,6	90

ностями которого являются повышенные давление и температура восстановительного газа.

Схема установки (ХиЛ-I) показана на рис. 25,*а*, на которой слева расположены агрегаты для конверсии природного газа, а справа — установки для получения железа. Реторта для металлизации представлена на рис. 25,*б*.

После десульфурации в аппарате природный газ подвергается конверсии паром в конвертере, который представляет собой печь с трубами, заполненными керамикой с добавкой в качестве катализатора NiO. После конверсии в газе содержится 14 % CO; 58 % H_2; 8 % H_2O; 4–5 % CO_2; 15 % CH_4. Горячий газ осушают в парогенераторе, он проходит котел-утилизатор. В сухом газе возрастает количество восстановительных составляющих: H_2 до 73 %, CO до 15–16 %. Установка имеет четыре реторты диаметром 5,25 м и высотой 15 м, в каждой из которых последовательно проводятся предварительное восстановление, охлаждение и науглероживание (длительность этих трех циклов $3 \cdot 3 = 9$ ч), разгрузка—загрузка (1,5 ч). Перед каждой ретортой имеется подогреватель газа, а после нее — устройство для удаления влаги. Газ подогревают в трубчатых рекуператорах до 1100 °С. Рекуператоры отапливаются газом, выходящим из реторт.

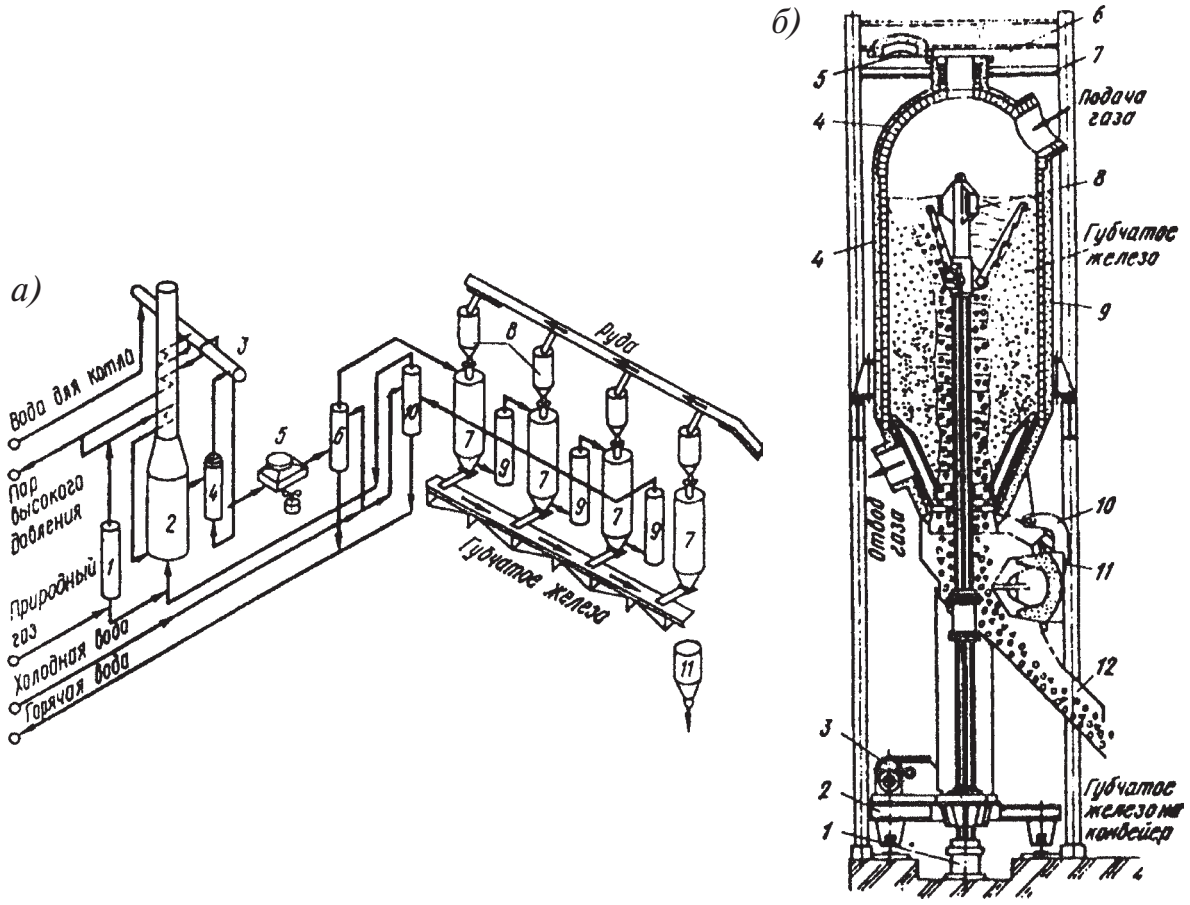


Рис. 25. Получение губчатого железа в периодически действующих ретортах:
а — схема процесса (*1* — аппарат для десульфурации исходного газа; *2* — печь паровой конверсии природного газа; *3* — парогенератор; *4* — утилизатор тепла; *5* — воздушный охладитель конвертированного газа; *6* — башня для отмывки отработанного газа; *7* — реторта восстановления; *8* — бункер руды; *9* — подогреватель газа; *10* — башня для отмывки отработанного газа; *11* — бункер губчатого железа); *б* — реторта для металлизации (*1* — гидроцилиндр; *2* — тележка; *3* — механизм привода; *4* — корпус реторты; *5* — крышка; *6* — загрузочная горловина; *7* — площадка; *8* — вращающийся резец; *9* — футеровка реторты; *10* — механизм откидного днища; *11* — затвор; *12* — желоб для загрузки)

Отходящий газ используют в качестве топлива для обогрева нагревателей, конвертера и выработки пара для турбин.

Шихта из реторт не перегружается. Один цикл процесса следует за другим благодаря переключению клапанов и направления соответствующего газа в реторту. Готовое железо холодным выгружается из реторты на конвейерную ленту, а реторту загружают сверху свежей шихтой. Степень металлизации состав-

Таблица 13

Показатели процесса ХиЛ-III (для установки мощностью 1,5 млн. т/год без реформера, степень металлизации 93 %)

Показатель	Холодная выгрузка		Брике-ты	Горячая выгрузка	
Температура на выгрузке, °С	40	40	700	700	700
Содержание углерода, %	4,3	2,5	2,5	4,3	2,5
Расходные показатели (на 1 т):					
железорудное сырье, т	1,36	1,39	1,41	1,36	1,39
природный газ, ГДж/т	9,36	9,11	9,28	9,74	9,32
электроэнергия, кВт·ч	65	65	80	65	65
кислород, нм^3	42	53	53	48	53
азот, м^3	12	12	19	18	18
вода, м^3	0,8	0,8	1,1	0,8	0,8
трудозатраты, чел.-ч	0,11	0,11	0,13	0,12	0,12
Текущий ремонт, дол./т	3,3	3,3	3,3	3,65	3,65
Брикетирование, дол./т			3,0		

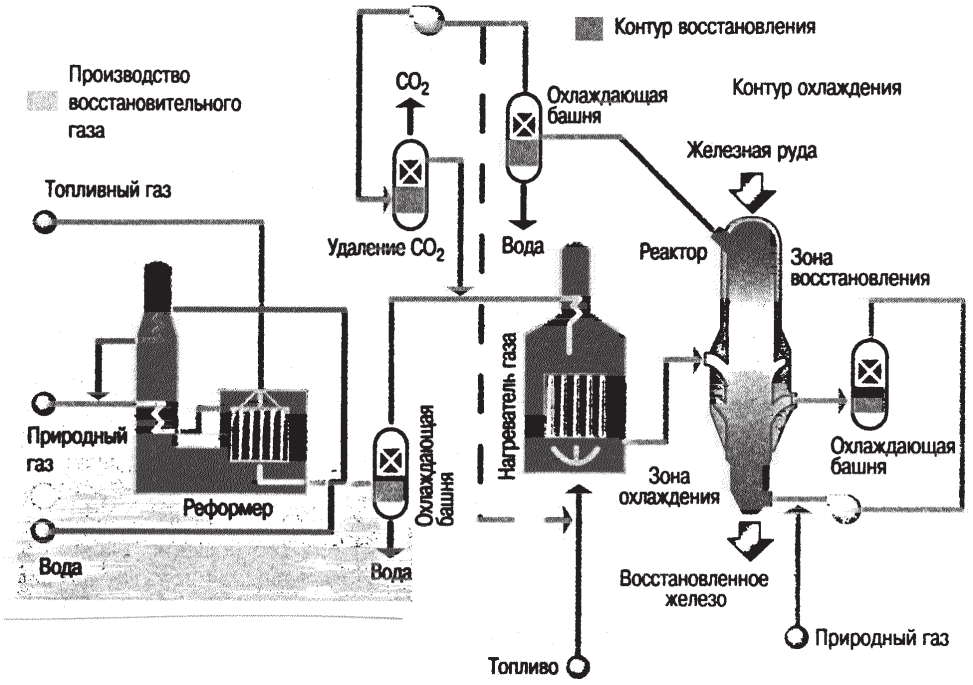


Рис. 26. Схема процесса ХиЛ-III

ляет 90–94 %. На производство 1 т сырья расходуется 10,3–11 ГДж природного газа, 60–100 кВт·ч электроэнергии. Показатели процесса ХиЛ-III приведены в табл. 13.

В 1999 г. на Лебединском ГОКе построена установка ХиЛ-III (рис. 26) мощностью ~1 млн. т/год брикетов (степень металлизации 94 %). Она называется установкой ГБЖ (горячего брикетирования железа) и рассчитана на работу в течение 330 суток с использованием в шихте 100 % окисленных окатышей. На 1 т брикетов должно расходоваться около 1,5 т окатышей, 42 кВт·ч электроэнергии, 11,5 ГДж природного газа. Капитальные затраты составили 315 млн. дол. В 2001 г. ЛГОК произвел около 600 тыс. т брикетов, из которых 412 тыс. т отгружено на экспорт, в основном в Италию.

В этих процессах практически невозможно использовать железорудную мелочь и концентраты без предварительного окускования. Окускование усложняет технологическую схему, повышает стоимость производства.

В настоящее время разработаны способы металлизации, применяемые в промышленном масштабе, в которых используется железорудная мелочь без окускования: ФИОР (Венесуэла), ФИНМЕТ (Австрия), “Циркоред” (Германия).

Чаще всего губчатое железо применяют как высокочистую добавку к стальному лому, а также для замены лома при его дефиците или высоких ценах. Однако повышение цен на лом не является главной причиной возросшего интереса к губчатому железу. Наиболее стабильный спрос на него отмечается в странах с недостаточными мощностями доменного производства и поставками стального лома. Меньшую роль в производстве металла губчатое железо играет в промышленно развитых странах Европы, в Японии и США, где железная руда, стальной лом и твердое топливо продолжают оставаться достаточно дешевыми, что обеспечивает производство чугуна при более низких затратах, чем производство губчатого железа.

Основными процессами работающих, строящихся и проектных установок для производства губчатого железа являются процессы с применением шахтных печей (главным образом, процессы (ХиЛ-III) и реторт периодического действия (процессы ХиЛ-I, ХиЛ-II). Процессы с использованием вращающихся печей и твердого восстановителя (процессы SL-RN, “Krupp”,

Таблица 14

Технико-экономические показатели производства металлизованного сырья в различных агрегатах

Агрегат	Процесс	Производительность, т/сут	Степень металлизации, %	Расход на 1 т металлизованного сырья				Расход тепла, млн. МДж/т продукта	Удельные капиталовложения, дол./т
				Железорудное сырье, т	Природный газ, $м^3$	Электроэнергия, кВт·ч	Вода, $м^3$		
Шахтные печи	“Мидрекс”	1200	93	1,4	360–400	120–140	1–2	12,2–13,4	70–75
	“Armco”	800–1050	90	1,4	360–400	35–40	1,9–2,7	13,0–14,4	60–75
	“Purofer”	500	90	1,4–1,5	385–400	100–150	1,5	13,0–13,8	70
Периодически действующие реторты	HIL	700–1200	90	1,4	460–600	6–15	3,8	15,6–21,0	60–63
Установка с кипящим слоем	FIOR	400	92	1,5	500	150	Нет данных	15,3–17,0	90–125
Вращающиеся печи*	“Krupp”	400	90	1,48	155	Нет данных	Нет данных	16,8–18,9	50
	SL-RN	60–100	90	1,4	95	Нет данных	Нет данных	14,7–16,8	Нет данных

* Во вращающихся печах расход твердого топлива составляет: в процессе “Krupp” 0,45 т/т, в процессе SL-RN 0,41 т/т; расход флюса соответственно 0,09 и 0,04 т/т.

“Kawasaki” и др.) в последние годы находят промышленное применение, главным образом, при переработке металлургических отходов — пыли и шламов, которые содержат примеси цинка, свинца, а также железных руд (богатых титаном, хромом, марганцем), не пригодных для доменного процесса.

Процессы в кипящем слое получили меньшее распространение в связи с целым рядом специфических особенностей (жесткие требования к гранулометрическому составу, газодинамические ограничения существования кипящего слоя, тем-

Таблица 15

Структура себестоимости карбида железа и металлизованных окатышей

Показатель	Цена, дол.	Расход на 1 т					
		Карбида железа			Металлизованных окатышей		
		Количество	Стоимость		Количество	Стоимость	
			дол.	%		дол.	%
Мелкая железная руда, т	23	1,4	32,2	27,2	–	–	–
Окатыши окисленные, т	30	–	–	–	1375	41,2	26,5
Природный газ, 1000 $м^3$	90	0,375	33,8	28,5	0,35	31,5	20,3
Электроэнергия, МВт·ч	20	0,23	4,6	3,9	0,15	3	1,9
Трудозатраты	–	–	2,9	2,4	–	5,1	3,2
Амортизация	–	–	28,6	24,1	–	48,3	31,2
Прочие расходы	–	–	16,5	13,9	–	25,9	16,8
Итого	–	–	118,6	100	–	155	100
Расход энергии, МДж:							
на сырье	–	2800	–	14,4	3300	–	18,2
природный газ	–	14 100	–	72,3	13 160	–	72,5
Электроэнергия, МВ·ч	–	2587	–	13,3	1687	–	9,3
Итого	–	19 487	–	100	18 147	–	100

пературные условия и др.). Преимущественное развитие в мировой практике прямого восстановления процессов "Мидрекс" и ХиЛ обусловлено их лучшими технико-экономическими показателями (табл. 14).

Установки прямого получения железа сооружаются в основном в развивающихся странах, с относительно малой потребностью в стали, ограниченными капиталами, малыми ресурсами лома, коксующихся углей и природного газа. Например, ЮАР не имеет газа и строит свою металлургию на собственных углях.

Другой разновидностью железа прямого восстановления является **карбид железа**. Он представляет собой дисперсный порошок высокой твердости с частицами размером 0,2 мм, не требующий брикетирования. Его производит американская фирма "Ньюкор" в Тринидаде. Цена этого материала с учетом затрат на транспортировку в 1,5 раза меньше стоимости 1 т металлолома. Суммарные затраты на его производство на 7,4 % выше, чем на окатыши (табл. 15).

2.4.2. Процессы жидкофазного восстановления

В этих процессах восстановление железа из руды происходит в жидкой фазе.

Процесс "Корекс" (Германия) применяется в промышленных масштабах с середины 80-х гг. XX в. Это плавильно-восстановительный процесс получения чугуна из руды и угля с низкими затратами и минимальными выбросами в окружающую среду. Схема процесса приведена на рис. 27. Кусковую руду или агломерат, или окатыши загружают в восстановительную шахту, в которой они восстанавливаются газами до 90 %-ной степени металлизации. Образовавшееся губчатое железо транспортером подают в плавильную камеру, в которой происходит окончательное восстановление, плавление и нагрев расплава. Через определенные промежутки времени выпускают чугун и шлак. Для получения чугуна расходуется 1500 кг/т руды, 1200 кг/т угля, 420 кг/т флюсов и 600 $м^3$/т кислорода. Восстановительный газ образуется в плавильной камере, в которой газифицируется уголь.

В газовом потоке выносится большое количество пыли, частиц железа. Мелкая пыль задерживается в циклоне и возвращается в плавильную камеру. Восстановительный газ подается в восста-

новительную шахту. Температура восстановительного газа регулируется добавкой к нему охлажденного газа, который получают охлаждением части восстановительного газа в скруббере до 800–850 °С. Газ, выходящий из восстановительной шахты после очистки и охлаждения может использоваться как топливо в паровых котлах или установках твердофазного восстановления.

Процесс обладает высокой гибкостью, поэтому возможна его комбинация с процессом прямого получения железа. Производимый жидкий чугун по качеству не уступает доменному, используются дешевые сырьевые материалы (некоксующийся уголь и кусковая руда).

К 1987 г. в МИСиС и НЛМК была отработана промышленная технология жидкофазного восстановления железа (“Ро-

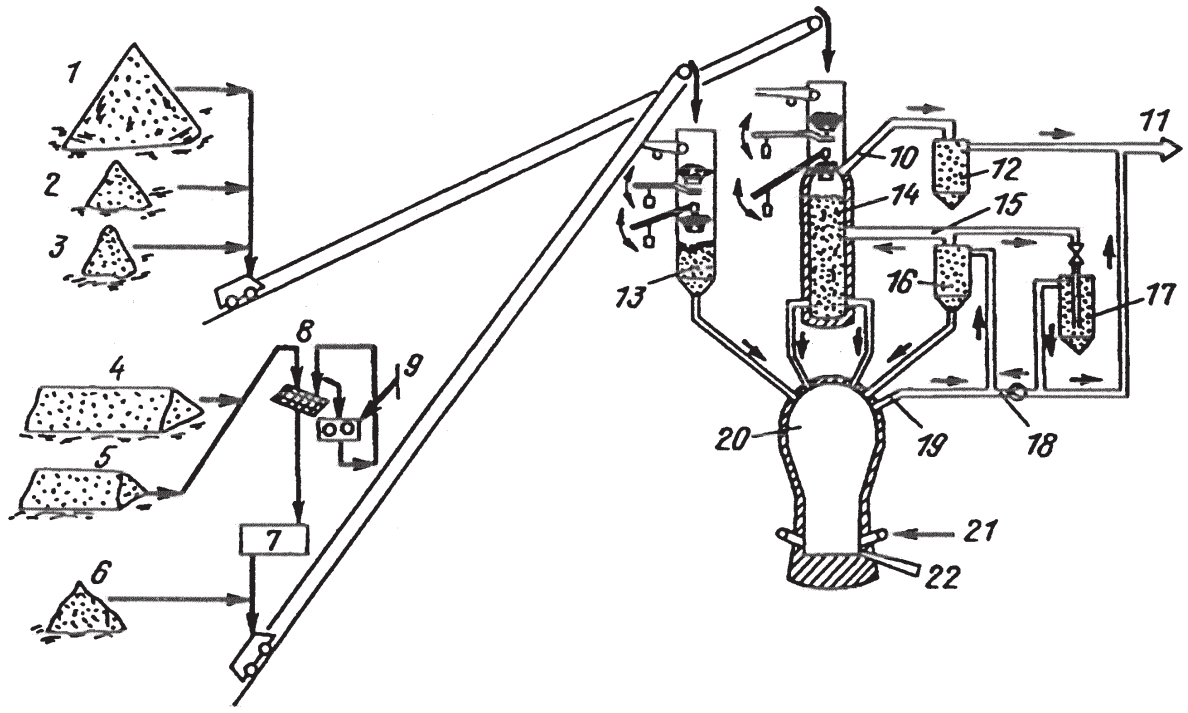


Рис. 27. Схема процесса “Корекс”:
1 — железная руда; *2* — известь; *3* — доломит; *4* — уголь; *5* — кокс; *6* — песок; *7* — осушительное устройство; *8* — грохоты; *9* — дробилка; *10* — выход колошникового газа; *11* — отходящие газы; *12* — скруббер колошникового газа; *13* — система подачи угля; *14* — восстановительная шахта; *15* — восстановительный газ; *16* — циклон для горячей пыли; *17* — скруббер ожидающего газа; *18* — охлажденный газ; *19* — продукты газификации; *20* — плавильный агрегат-газификатор; *21* — кислород; *22* — выпуск металла и шлака

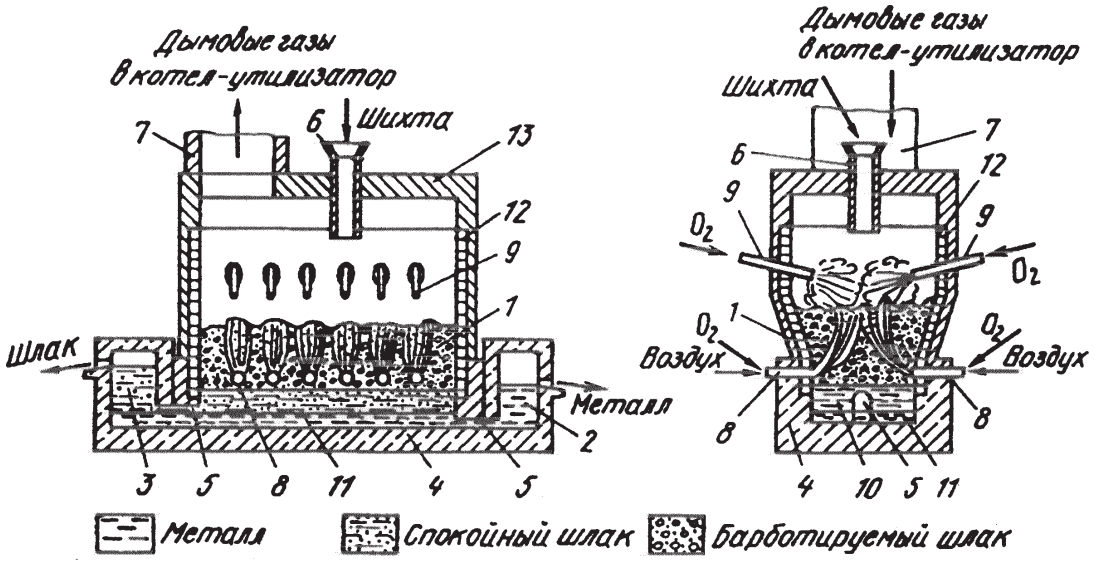


Рис. 28. Схема процесса “Ромелт”:
1 — слой шлака; *2* — отстойник для металла (сифон); *3* — шлаковый сифон (отстойник); *4* — горн; *5* — проток шлака и металла; *6* — загрузочная воронка; *7* — отвод дыма; *8* — барботажные фурмы нижнего ряда; *9* — верхние фурмы для дожигания; *10* — слой спокойного шлака; *11* — слой металла; *12* — водоохлаждаемые кессоны; *13* — свод

мелт”). Схема производства представлена на рис. 28. Переработке подвергаются руды, их концентраты, окалина, шлаки, стружка. Особенностью процесса является использование вместо кокса угля обыкновенного качества при большом удельном расходе кислорода (более 500 м^3), что в пять раз превышает его расход в доменных печах.

Восстановительная плавка происходит в жидкой шлаковой ванне, которая продувается кислородом. Шихта загружается в печь сверху. Металл накапливается в отстойнике и выпускается непрерывно или порциями из печи. Так же происходит и выпуск шлака. Через верхние фурмы в печь подают воздушно-кислородное дутье для дожигания восстановительных газов. Бóльшая часть тепла от сжигания газа возвращается в шлаковую ванну. Отходящие газы направляют в котел-утилизатор. Наряду с производством железных сплавов в печи могут перерабатываться бытовые отходы с улавливанием вредных газов.

По сравнению с двухстадийным процессом “Корекс” процесс “Ромелт” осуществляется в одну стадию, более прост в конструктивном исполнении, при одинаковой мощности основных агрега-

Таблица 16

Сравнительная оценка технологий

Показатель	Доменная плавка	Металлизация в шахтной печи	Процесс	
			“Корекс”	Жидкофазное восстановление
Железосодержащее сырье: Fe, %	Не ограничено	68	Более 60	Не ограничено
Минимальный размер кусков, мм	10	10	10	Не ограничено
Использование комплексных руд	Возможно управляемое извлечение попутных компонентов	Не используется	Ограничено	Трудновосстановимые элементы теряются со шлаком
Степень извлечения:				
Fe	99,5	90–96	99–99,5	88–98
Mn, Cr, V и др.	Более 60	–	40–60	5
Топливо	Кокс и природный газ, уголь	Природный газ	Рядовой уголь	Рядовой уголь
Расход:				
твердого топлива, кг/т	350–400	–	950–1000	4000–6000
природного газа, $м^3$/т	–	300–400	–	–
кислорода, $м^3$/т	50–150	–	500–550	2000–3000
электроэнергии, кВт·ч	50–70	200	230	230
Выбросы в атмосферу, кг/т:				
твердых частиц	5–6	4–5	6–8	100–300
вредных веществ	2–4	2–4	2–4	360–410
в том числе:				
S	0,4–1,0	0,5–1,5	25–75	–
CO	2–3	2–3	Более 325	–
$NO_к$	–	–	0,35–0,7	–
прочих	–	–	5	–

тов имеет более низкие (10 %) текущие издержки, требует меньших (в два раза) капиталовложений.

В настоящее время производство металлизованного сырья не привело к конкуренции с традиционной схемой получения металла, так как чугун и металлизованное сырье используется в качестве шихты в разных металлургических агрегатах для выплавки стали разного назначения и сортамента, а при их производстве применяется первичное топливо разных видов. В табл. 16 сравниваются все рассмотренные технологии.

Оценка эффективности процессов внедоменного (жидкофазного восстановления) получения железа показывает, что показатели их работы на сегодняшний день, несмотря на улучшение условий труда и экологической обстановки, уступают показателям работы доменных печей, а сами установки представляют собой химико-металлургический и энергетический комплекс со сложным оборудованием.

Таким образом, в условиях дефицита шихты доменное производство и альтернативные способы будут дополнять друг друга. Развиваться новые способы получения чугуна будут там, где нет условий для создания доменного производства, но есть возможности выплавки без кокса.

2.5. ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ

О большой ценности железа свидетельствует следующий факт. При раскопках Ниневии — столицы древней Ассирии — во дворце могущественного царя Саргона II, правившего в конце VIII в. до н. э., археологи обнаружили настоящий железный клад: в особой комнате хранилось около 200 т различных изделий из железа (шлемы, пилы, кузнечные орудия и др.) и необработанные крицы этого металла, которые запасливый царь, наверное, припрятал на черный день.

В 1820 г. англичане купили в России на Урале листовое железо для покрытия крыши здания государственного учреждения. За 150 лет крышу ни разу не ремонтировали и не красили. До сих пор крыша не имеет даже следов ржавчины.

2.5.1. Общие положения

Очистить чугун от вредных примесей, удалить из него лишний углерод и одновременно ввести в металл легирующие добавки — задача сталеплавильного передела, который является вторым, после доменного, металлургическим переделом.

Сталью называется деформируемый (ковкий) сплав железа с углеродом (менее 2,14 %) и другими примесями. Исключительно важная роль стали в развитии и создании материальной базы человечества объясняется тем, что она как конструкционный материал обладает таким комплексом физико-технических свойств, которые удовлетворяют экономическим требованиям и имеют очень широкую область применения. Общим термином "сталь" в настоящее время обозначают свыше 2000 материалов, предназначенных для различных целей. В общем потреблении металлов она составляет 93 %, а свое лидирующее положение и в будущем сохранит по следующим причинам:

для черной металлургии во всем мире имеется надежная база высококачественных сырых материалов на длительную перспективу;

сталь является надежным и хорошо зарекомендовавшим себя конструкционным материалом; ее поведение в качестве деталей конструкций можно предсказать заранее с большой точностью;

сталь является материалом с выдающимся отношением цены к возможности применения; ее производство требует по сравнению с другими металлами меньших расходов первичных энергоносителей;

сталь может быть утилизирована в виде вторичного сырья и вследствие круговорота материалов с длительностью цикла в десятки лет является экологически приемлемым и ресурсосберегающим материалом; в настоящее время примерно 40 % всей выплавляемой стали получают из скрапа;

внедрение технологических новшеств в производство стали приведет к дальнейшему повышению эффективности использования энергии и исходных материалов.

Доказательством уникальных качеств стали является ее место во всем спектре механических и термических свойств:

Плотность, г/см^3	0,5 (1)	7,8–7,9(2)	22,5(3)
Предел прочности при растяжении, Н/мм^2	10 (4)	440–2100 (2)	4800(5)
Вязкость разрушения, Дж/м^2	0,2(6)	140–220(2)	350(7)
Коэффициент термического расширения, 10^{-6}/K	0,5(8)	10–20(2)	250(9)
Теплопроводность, Вт/(м·K)	0,1(1)	15–60(2)	350(10)
Температура плавления, K	365(11)	1570–1800(2)	3925(12)

Обозначения: 1 — древесина; 2 — сталь; 3 — осмий; 4 — свинец; 5 — стекловолокно; 6 — цемент; 7 — никель; 8 — стекло; 9 — полиэтилен; 10 — медь; 11 — поливинилхлорид; 12 — графит.

Особенно важное преимущество этого материала — возможность расширения диапазона свойств за счет изменения химического состава, термической обработки, придания определенной структуры, возможности изготовления изделий в жидком и пластическом состояниях и соединения сваркой.

Многообразие сталей в сортаменте современного металлургического производства поражает: нержавеющая, быстрорежущая, шарикоподшипниковая и пружинная, магнитная и немагнитная, жаропрочная, жаростойкая и хладостойкая — чтобы перечислить все марки сталей понадобилась бы не одна страница! В 80-е гг. XX в. на одном из бельгийских заводов был введен в действие стан для прокатки стальной полосы с нанесением на ее поверхность различных узоров. Таким способом стальному листу можно придать вид дерева, кожи, ткани и других материалов. Лист с узорчатой поверхностью пришелся по вкусу автомобилестроителям, архитекторам, создателям бытовой техники.

Душевое потребление стали в мире сейчас составляет примерно 145 кг, а в развитых индустриальных странах оно достигает 500, 600 и даже 800 кг в год на человека. Эта величина уже давно является показателем индустриального развития государства.

Кроме стали к конструкционным материалам относятся алюминий, цемент, пластмасса, которые считаются альтернатив-

ными. Мировое производство первичного алюминия в 1990 г. составило 18,2 млн. т, что соответствует 2,4 % массы выплавляемой стали и сохраняется на этом уровне. Промышленное производство пластмасс началось в 1930-е гг., очень быстро развивалось и к 1990 г. достигло 90 млн. т (почти 18 % от выплавки стали).

Цемент — единственный материал, объем производства которого превысил объем выплавки стали: к 1999 г. он составил 1500 млн. т (почти в два раза больше, чем стали).

Области применения и объемы производства конструкционных материалов, кроме инженерно-технических, зависят от экономических и экологических показателей.

При сравнении инженерно-технических свойств становится очевидным, что замена перечисленных материалов весьма затруднительна, а во многих случаях просто невозможна. Определяющим условием такой замены является не экономическая целесообразность, а решение каких-то функциональных для данного изделия задач. Кроме экономичности использования конструкционного материала важнейшими его характеристиками являются наличие и цена исходного сырья для его производства и энергоемкость этого производства. Ниже приведены данные по потреблению энергии для производства разных групп материалов, МДж/кг:

Алюминий (полуфабрикат):	
первичный алюминий (из бокситов)	160–240
вторичный алюминий (переплав лома)	12–20
пластмассы (гранулы, например, поливинилхлорид, полиэтилен)	45–70
Сталь (заготовка):	
кислородно-конверторная (на базе руды)	16–27
электросталь (на базе скрапа)	10–18

В XX в. мировой объем производства стали вырос с 28,3 до 800 млн. т (в 28 раз), что по годам характеризуется следующими цифрами, млн. т:

1930 г.	110	1980 г.	716
1950 г.	152	1990 г.	769

Таблица 17

Страны— крупнейшие производители стали

Страна	1990 г.		1999 г.	
	млн. т	Рейтинг	млн. т	Рейтинг
КНР	66,3	4	123,3	1
США	89,7	2	96,1	2
Япония	110,3	1	94,2	3
Россия	89,6	3	51,5	4
Германия	44,0	6	42,1	5
Республика Корея	23,1	8	41,0	6
Украина	52,6	5	26,8	7
Бразилия	20,6	9	25,0	8–9
Италия	25,5	7	25,0	8–9
Индия	15,0	12	24,3	10
Франция	19,0	10	20,2	11
Великобритания	17,8	11	16,6	12

1960 г. 346 1998 г. 776
1970 г. 603 1999 г. 787

Перечень и рейтинг крупнейших мировых производителей стали приведены в табл. 17.

Основными способами переработки чугуна в сталь являются: конверторный, мартеновский и электросталеплавильный. Для структуры сталеплавильного производства последних десятилетий характерна полная замена мартеновского производства конвертерным и электросталеплавильным.

2.5.2. Шихтовые материалы

Исходными металлическими материалами для производства стали являются чугун (жидкий или твердый), стальной лом (скрап), продукты прямого восстановления железа (металлизованное сырье), ферросплавы. Самая дешевая часть металлошихты — лом. В любой промышленной стране ежегодно образуется

значительное количество этого материала. В зависимости от происхождения лом разделяют на четыре большие группы:

1) собственные отходы черной металлургии и литейного производства (circulating scrap); фактически эти отходы полностью идут на переплавку на производственных предприятиях, за исключением незначительного обмена между заводами;

2) отходы металлообрабатывающих заводов (process scrap); речь идет о "неизбежном ломе", который во избежание загромождения производственное предприятие вынуждено продавать; следовательно, объем таких отходов на рынке тесно связан с уровнем промышленного производства;

3) утильный, или амортизационный лом (capital scrap), который включает в себя все забракованные или устаревшие металлические изделия, начиная от промышленного превращения в скрап и кончая бытовыми отходами;

Рис. 29. Схема образования вторичных черных металлов

4) возможно поступление металла из шлаковых отвалов после соответствующей переработки.

Весь металлолом вне зависимости от происхождения практически полностью используется в черной металлургии.

На рис. 29 представлены основные источники образования лома и отходов черных металлов и их доля (по оценке АО "Втормет" на 2000 г.).

Количество собственного (оборотного) лома на металлургических предприятиях зависит от объема выплавки жидкой стали и уровня использования непрерывной разливки.

В последнее время, в связи с ростом доли непрерывной разливки, количество оборотного лома постоянно уменьшается. С 1990 по 1997 г. объем стали, разливаемой на машинах непрерывной разливки, увеличился с 23,1 до 46,5 %, что привело к снижению отходов оборотного лома почти на 28 %.

Доля отходов металлообрабатывающей и машиностроительной отраслей в ресурсах лома также снижается за счет совершенствования технологических процессов металлообработки. В то же время объем использования амортизационного лома увеличивается (рис. 30). Для России характерна такая же тенденция. Количество амортизационного лома определяется металлофондом страны и сроком службы металла в различных видах основных средств. Ниже приведены нормативные сроки службы производственных и непроизводственных зданий, некоторых видов рабочих машин и транспортных средств, лет:

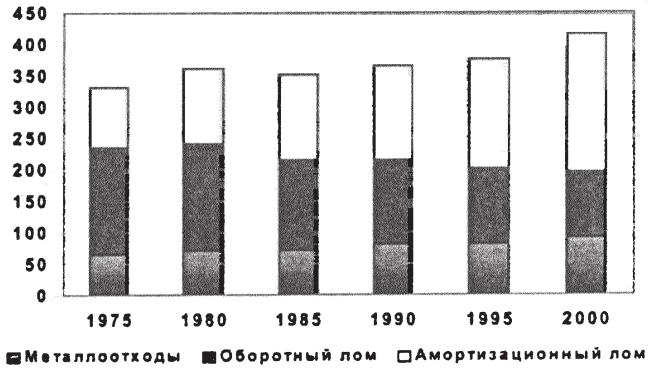


Рис. 30. Образование лома в мире, млн. т

Здания производственного и непроизводственного назначения	40–100
Металлорежущее оборудование	12–15
Оборудование литейного производства	6–10
Кузнечно-прессовое оборудование	10–16

Насосы	3–8
Машины и оборудование:	
подъемно-транспортные	8–20
для бетонных и отделочных работ	5–10
для дорожно-строительных работ	5–15
для подземных и открытых горных работ	3–7
черной металлургии	10–20
цветной металлургии	8–17
Сельскохозяйственные машины	5–10
Железнодорожный подвижной состав	15–30
Суда:	
морские	14–27
речные	21–36
рыболовецкие	16–20
Автомобильный транспорт	6–12

Средний срок службы металла в основных фондах составляет 24–25 лет, т. е. металл, вложенный в основные фонды, через 25 лет превращается в амортизационный лом. Таким образом, ресурсы амортизационного лома 2000 г. должны соответствовать объему металловложений в основные фонды в 1975 г., ресурсы лома 2020 г. — объему металловложений в 1995 г.

Ржавчина занимает больший объем, чем железо, из которого она образуется. Это явление может вызывать катастрофические последствия. Каменные блоки собора Святого Павла в Лондоне были скреплены железными скобами, положенными поверх рядов камня в желобах. За сотни лет скобы проржавели, увеличились в объеме и стали поднимать слои камня. Колокольня собора наклонилась. Потребовалось разобрать кладку и заменять скобы на нержавеющую сталь.

Купол над читальным залом Британского музея держится ржавчиной. Чугунные детали его решетки скрепили "замазкой" из железных опилок с нашатырем, замешанной на воде. Опилки быстро превратились в ржавчину, смесь отвердела и плотно заполнила щели между деталями. Она туго распирает детали, прижимая их друг к другу.

По статистическим данным реально списывается в амортизационный лом не более 30–50 % его потенциальных ресурсов. Это происходит из-за следующего:

убыточность или слишком низкая рентабельность работы с вторичным сырьем в отдаленных от перерабатывающих предприятий районах Восточной и Северо-Восточной России;

качество амортизационного лома ухудшается; возрастает доля низкосортного легковесного лома, содержащего примеси цветных металлов, а отечественные предприятия по подготовке лома к плавке оснащены устаревшим оборудованием, не способным выполнить требования заказчика к качеству вторичных металлов;

ужесточение требований к качеству выплавляемой стали по содержанию вредных примесей ограничивает применение в шихте не только низкокачественных, но и высококачественных оборотных отходов;

меняющаяся конструкция дуговых сталеплавильных печей, вывод из строя мартеновских печей вызывают специфические требования к вторичным металлам по физическим и химическим параметрам.

Основными качественными показателями металлолома как шихтового материала являются: насыпная плотность, химическая однородность, содержание неметаллических примесей (земли, песка, ржавчины, масла, деталей из органических материалов и т. д.) и цветных металлов. Для приведения лома в удобное для использования состояние производят его предварительную подготовку: сортировку, разделку, дробление, прессование, пакетирование, обжиг и т. д. Сбором всех видов лома и его подготовкой, занимаются специализированные предприятия (“Вторчермет”). Несмотря на то что для этого требуются значительные затраты, эти затраты (на 1 т) ниже затрат на добычу, обогащение железной руды и получение из нее чугуна. Поэтому лом, даже после переработки, стоит дешевле чугуна. Кроме того, при использовании лома на производство стали требуется меньше в 2,5 раза энергетических ресурсов, чем при применении чугуна (энергоемкость лома составляет 302 кг условного топлива/т, а чугуна — 757 кг условного топлива/т).

Использование вторичных черных металлов в качестве сырья позволяет сохранить природные ресурсы, улучшить экологическую обстановку. Так, пылегазовыделение при подготовке 1,25 т лома составляет 0,99 кг/т, а при производстве чугуна — 27,7 кг/т. Экологический ущерб природе от коррозии металлофонда, не

возвращающегося для повторного использования, составляет около 7 млрд. руб. в год.

В качестве добавочных материалов (флюсов) в сталеплавильном производстве используют известняк, известь, боксит, плавиковый шпат, марганцевую руду, песок (около 95 % SiO_2), шамотный бой. Ко всем добавочным материалам предъявляют высокие требования по содержанию вредных примесей (серы, фосфора и др.).

Окислителями являются кислород, сжатый воздух, железная руда, окалина, железорудные брикеты.

2.5.3. Конверторное производство стали

В настоящее время конверторное производство является основным производителем стали: из 798,5 млн. т всей выплавляемой в мире стали 541 млн. т приходится на долю конверторного металла (около 70 %).

В России работают восемь цехов с 22 конвертерами емкостью 9×(300−350) т и 13×160 т общей мощностью 35 млн. т. Технический уровень конверторных цехов достаточно высок, а лучшие из них по своей оснащенности и технологическим возможностям входят в число ведущих цехов мира.

Предшественниками современного конверторного процесса, называемого кислородно-конверторным, были бессемеровский и томасовский способы конвертирования. Сейчас эти способы практически не используются.

Генри Бессемер — прирожденный изобретатель — получил за свою жизнь более 120 патентов. Способ получения стали, запатентованный 17 октября 1855 г., открыл новую эпоху в черной металлургии. Бессемер расплавил в керамическом тигле 5 кг доменного чугуна, затем продул через полученный расплав воздух через вставленную в ванну керамическую трубку. После такой обработки нековкий чугун превратился в ковкое железо. Эту первую бессемеровскую сталь прокатали в морском арсенале. В коллекции Iron and Steel Institute хранится проба этой стали, к которой посетители относятся как к реликвии.

Кислородно-конверторный процесс был впервые реализован в промышленном варианте в 1952 г. и в течение последующих десятилетий интенсивно развивался и быстро вытеснил мартеновский процесс практически во всех промышленно развитых странах.

Приоритетное развитие этого процесса объясняется прежде всего его существенными технико-экономическими преимуществами в сравнении с другими сталеплавильными процессами:

высокая производительность кислородных конвертеров (до 450 т/ч) и мощность современных конверторных цехов до 6—8 млн. т стали в год;

высокая технологическая гибкость процесса, т. е. возможность переработки различных шихтовых материалов и прежде всего чугунов различного химического состава;

возможность производства сталей широкого сортамента — от углеродистых обыкновенного качества до качественных, низко- и среднелегированных;

простота конструкции агрегатов, низкий расход огнеупорных материалов, относительно невысокая трудоемкость ремонтов при высокой стойкости огнеупорной футеровки;

возможность внедрения систем отвода конверторных газов без дожигания (снижение капитальных затрат, увеличение интенсивности продувки ванны кислородом и использование отводимого CO в качестве вторичного энергоносителя);

эффективное управление процессом (удобен для автоматизации) и обеспечение выпуска металла с минимальным количеством корректировок температуры и химического состава при работе на стабильной металлошихте.

Недостатками процесса являются:

вдувание большого количества газообразного кислорода от 2,5 до 4,5 $м^3$/(т·мин) в достаточно ограниченный объем металла, что приводит к целому ряду нежелательных последствий — переокислению и перегреву металла в реакционной зоне и, как следствие, к интенсивному испарению железа и необходимости сооружения дорогостоящих систем газоочистки;

ограничения количества перерабатываемого лома в конверторном процессе вследствие его аутотермичности и напряженности теплового баланса процесса;

достаточно высокая ресурсо- и особенно энергоемкость процесса;

определенные трудности при выплавке углеродистых сталей (рельсовая, металлокорд, инструментальные и др.) из-за недостатка тепла и трудности остановки продувки при высоком содержании углерода;

трудность удаления серы по ходу процесса.

В основу конверторного производства положена обработка жидкого чугуна газообразным окислителем, при этом извне дополнительный подвод тепла не производится, и процесс осуществляется за счет химического тепла экзотермических реакций окисления примесей и физического тепла чугуна.

Конвертер (рис. 31) представляет собой стальной сосуд грушевидной формы. Внутренняя часть футерована огнеупорным материалом. Конвертер цапфами опирается на стойки и имеет возможность поворачиваться при заливке жидкого чугуна, выпуске стали и шлака.

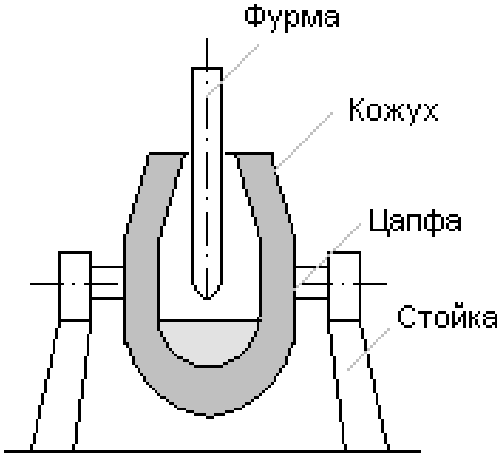


Рис. 31. Конвертер

Размеры и форма конвертера влияют на показатели процесса и должны обеспечивать продувку без выбросов металла через горловину.

Для своих опытов Бессемер использовал цилиндрический конвертер высотой чуть более 1 м, выполненный из листового железа, футерованного изнутри. Поскольку об оптимальных размерах устройства и возможностях процесса ничего не было известно, однажды произошло следующее. Не прошло и десяти минут после начала продувки, как из отверстия в крышке внезапно выбился фонтан искр, который с каждым мигом становился все больше и сильнее, пока не превратился в большой столб пламени. Вслед за этим раздались глухие хлопки, и высоко в воздух начали выбрасываться расплавленный металл и шлак. Конвертер стал напоминать вулкан во время извержения. Так как подойти к вулкану и отключить подачу дутья было невоз-

можно, Бессемер оказался в положении беспомощного наблюдателя: в любое мгновенье мог начаться пожар или произойти взрыв. Но, к счастью, не произошло ни то, ни другое, и спустя несколько минут извержение прекратилось. Выпущенный из потухшего вулкана металл оказался ковким железом.

Диаметр горловины равен 0,4–0,6 диаметра рабочего пространства, который составляет 4–7 м.

Горловина конвертера больше всего подвержена высокотемпературной пластической деформации вследствие теплоизлучения металла и газов в период плавки. Поэтому для увеличения срока службы горловины применяют водяное охлаждение, иногда горловину выполняют съемной.

Наружную часть конвертера — **кожух** — выполняют сварным из листов стали толщиной до 110 мм.

Днище может быть неотъемным и отъемным (в этом случае облегчается и ускоряется ремонт футеровки, но уменьшается прочность и надежность конструкции нижней части кожуха).

Механизм поворота обеспечивает вращение конвертера вокруг оси цапф на 360° со скоростью 0,1–1 м/мин.

Футеровка состоит из арматурного слоя, прилегающего к кожуху, промежуточного и рабочего слоя, обращенного внутрь конвертера. Арматурный слой выполняется из обожженного магнезитового или магнезитохромитового кирпича и имеет толщину 110–250 мм. Он длительное время не требует замены. Промежуточный слой, защищающий основной арматурный слой, выполняется из смолодоломитового кирпича. Рабочий слой выполняют из безобжигового смолодоломитового или доломитомагнезитового кирпича. Толщина рабочего слоя составляет 380–750 мм для конвертеров разной вместимости. Общая толщина футеровки конвертеров в зависимости от вместимости 700–1000 мм.

Условия эксплуатации огнеупоров в конвертерах значительно сложнее, чем при других способах производства стали. Это обусловлено следующим: 1) интенсивным перемешиванием стали при продувке кислородом; 2) ударным воздействием загружаемых материалов; 3) действием знакопеременных нагрузок,

возникающих при вращении конвертера; 4) резкими колебаниями температуры в период от одной плавки до выпуска стали следующей плавки; 5) действием высоких температур; 6) образованием большого количества пыли.

Огнеупоры для кладки конвертера должны обладать высокой химической стойкостью, сопротивляемостью размывающему воздействию потоков металла и шлака и противоударной устойчивостью загрузке шихты.

Бессемеровский конвертер имел кислую футеровку, поэтому не был пригоден для использования в процессе плавки чугуна с высоким содержанием фосфора (содержание фосфора должно быть < 0,25 %). Все попытки удалить фосфор не давали положительных результатов. Эта проблема была решена Сидни Джилькристом Томасом. Его изобретение стало величайшей сенсацией и завоевало все промышленно развитые страны мира. В 1878–1879 гг. им был разработан вариант конверторного процесса, при котором футеровка выполнена из материала с основными свойствами (томасовский процесс). Генри Бессемер лично вручил Томасу золотую медаль своего имени.

Эффективным способом повышения стойкости футеровки является **торкретирование** наиболее изношенных участков кладки. Способ заключается в нанесении на поверхность футеровки массы из мелкозернистой магнезитохромитовой смеси в струе сжатого воздуха. Длительность торкретирования не превышает 5–7 мин, и его проводят после каждой или нескольких плавок. Стойкость футеровки современных конвертеров 500–800 плавок (максимальная стойкость футеровки составляет 1400 плавок). Это соответствует расходу огнеупоров от 2 до 6 кг/т, что является самым низким расходом огнеупоров из всех способов производства стали.

Кислород поступает в конвертер по водоохлаждаемой фурме, изготовленной из трех цельнотянутых труб, концентрически входящих одна в другую. Снизу фурма заканчивается медным наконечником — головкой. Головка фурмы сменная.

Высоту фурмы над ванной можно изменять по ходу плавки. Поднимают и опускают фурму с помощью механизма, сблоки-

рованного с механизмом вращения конвертера. Его нельзя повернуть, пока из него не удалена фурма. Фурмы устанавливают вертикально, строго по оси конвертера. Конструкция фурмы оказывает большое влияние на работу конвертера и определяет его производительность, стойкость футеровки, выход годного и т. д.

Применение многосопловых фурм позволяет получить рассредоточенное, "мягкое" дутье, при котором увеличивается площадь реакционной зоны, уменьшается количество выбросов, что дает возможность работать с расходами кислорода до 3000 $м^3$/мин.

Наибольшее распространение получили трех- и четырехсопловые фурмы. Головки этих фурм имеют веерообразно расходящиеся сопла, наклоненные под углом 6–15° к оси фурмы. Стойкость фурм 70–100 плавок.

Шихтовые материалы

Главным шихтовым материалом процесса является жидкий чугун. На отечественных заводах применяют чугун следующего состава: 3,9–4,3 % C; 0,5–1,0 % Si; 0,7–1,7 % Mn; 0,03–0,06 % S; 0,015–0,15 % P. Состав чугуна в значительной степени влияет на ход процесса, качество стали, стойкость футеровки и технико-экономические показатели работы.

Количество стального лома составляет до 30 % массы шихты. Применяемый лом должен быть малогабаритным (крупные куски могут повредить футеровку при загрузке), содержать минимальное количество вредных примесей и ржавчины. Легковесный лом увеличивает длительность завалки. Лучшим ломом считаются отходы прокатных цехов. Частично лом можно заменять металлизованными окатышами или губчатым железом.

Основной источник шлакообразования (флюс) — известь. Ее качество в значительной степени определяет основные показатели плавки. Известь должна быть свежеобожженной и иметь равномерный состав с размером кусков 20–60 мм. Количество влаги в извести должно быть минимальным, содержание серы — не более 0,1–0,2 %, кремнезема не более 2,5–3 %. Плавиковый шпат используют как разжижитель шлака. Кроме указанных ма-

териалов применяют агломерат, окатыши, марганцевую руду, а также легирующие и раскислители.

Легирование — введение в состав сплавов легирующих элементов (Cr, Ni, Mo, W, Ti и др.) для придания сплавам определенных физико-химических или механических свойств. По количеству введенных элементов различают низколегированные (суммарное содержание легирующих до 5,0 %), среднелегированные (5,0–10 %) и высоколегированные (более 10 %) стали.

Японские специалисты-металловеды разработали и получили нержавеющую сталь, которая умеет сама себя "лечить". Если поверхность детали из такой стали подверглась износу, достаточно нагреть ее в вакууме — и она вновь готова к работе. В чем же секрет? В эту сталь введены бор и азот. Когда металл нагревается, их атомы как бы выталкиваются кристаллической решеткой стали к поверхности, образуя на ней защитный панцирь — очень прочную пленку нитрида бора. Износится эта пленка — деталь можно снова нагреть в вакууме, и она опять обретет нужную броню.

Раскисление — химический процесс восстановления оксидов, находящихся в расплавленном металле или сплаве (удаление кислорода). В качестве раскислителей используют элементы, более активно соединяющиеся с кислородом, чем раскисляемые металлы, и образующие легкоудаляемые из сплавов оксиды.

Технология плавки

Загрузка конвертера начинается с завалки стального лома. Его загружают в наклоненный конвертер через горловину при помощи кранов или завалочных машин лотками в несколько приемов (рис. 32,*а*). Далее заливают жидкий чугун (рис. 32,*б*), конвертер устанавливают в вертикальное положение, вводят фурму и включают подачу кислорода с чистотой не менее 99,5 % (рис. 32,*в*). Одновременно с началом продувки загружают первую порцию шлакообразующих (рис. 32,*г*). Остальную часть этих материалов подают в конвертер в процессе продувки одной или несколькими порциями, чаще всего через 5–7 мин после начала продувки.

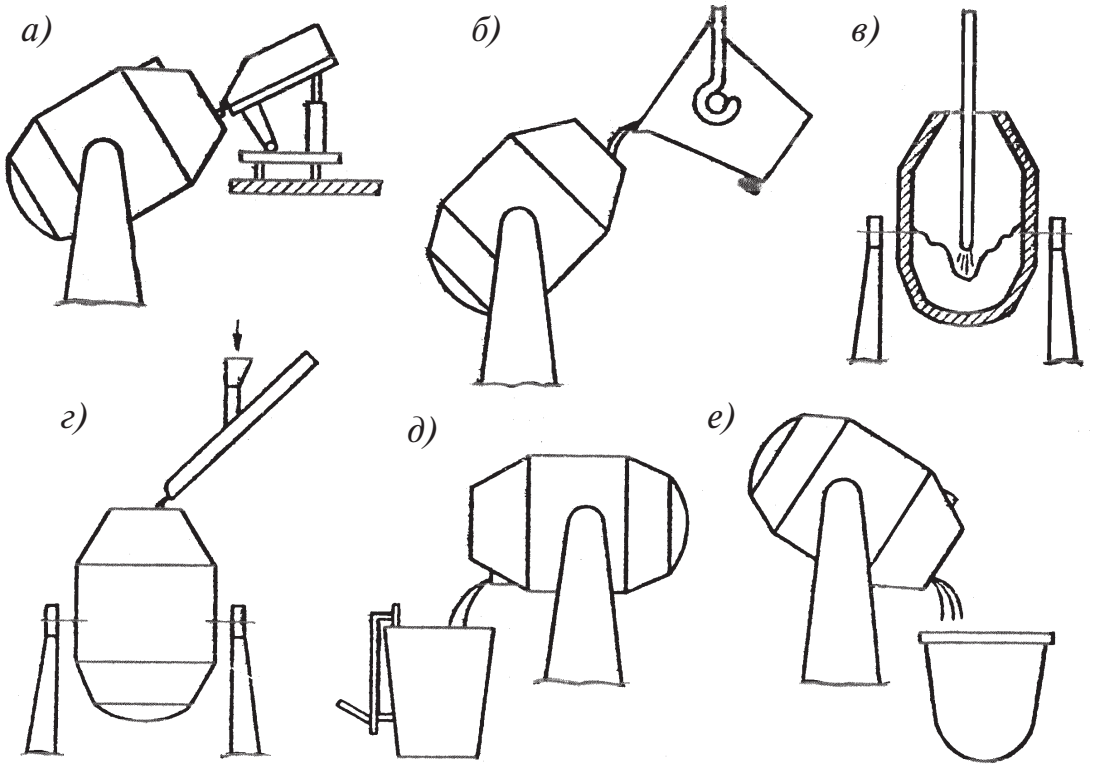


Рис. 32. Технологические операции конверторной плавки

Образующиеся при окислении углерода пузырьки CO вспенивают металл и шлак и существенно усиливают циркуляцию шлака и металла, чем ускоряют процессы окисления, дефосфорации, десульфурации, нагрева металла и др. Вместе с пузырьками окиси углерода из металла удаляются растворенные в нем вредные газы — водород и азот.

Выделяющееся при реакциях окисления тепло обеспечивает нагрев металла до требуемой перед выпуском температуры и расплавление стального лома. Плавление лома обычно заканчивается в течение первых 2/3 периода продувки.

Газообразные продукты окисления углерода (CO и немного CO_2) покидают конвертер через горловину, образуя высокотемпературный поток отходящих газов, в котором содержится много (до 250 г/м^3) мелкодисперсных частиц Fe_2O_3.

Продувка в зависимости от интенсивности подачи кислорода продолжается от 12 до 20 мин и должна быть закончена на заданном для выплавляемой марки стали содержании углерода. К этому моменту металл должен быть нагрет до необходимой

температуры (1580–1650 °С), а содержание серы и фосфора в нем не должно превышать допустимых для данной марки стали значений.

Момент окончания продувки определяют по количеству поданного кислорода и данным ЭВМ. По окончании продувки фурму поднимают, отбирают пробы металла и шлака. При необходимости проводят либо додувку, либо добавляют кокс или графит для корректировки содержания углерода. Конвертер наклоняют, выпуская сталь в ковш через летку (рис. 32,*д*), и одновременно вводят в ковш раскислители и легирующие добавки. В ковш также сливают немного шлака (шлаковый слой толщиной 200–300 мм предохраняет металл от охлаждения). Оставшийся шлак сливают в шлаковую чашу через горловину, сильно наклоняя конвертер (рис. 32,*е*).

Разновидности конверторных процессов

Процесс с донной продувкой кислородом. Наряду с продувкой металла сверху получили распространение конвертеры, в которых продувка осуществляется кислородом снизу. При донной продувке ванна лучше перемешивается, улучшается усвоение добавочных материалов.

Основное отличие конвертеров с донной продувкой от конвертеров с верхним дутьем заключается в том, что они имеют меньший удельный объем (0,5–0,9 $м^3/т$) и оснащены отъемным днищем. Корпус конвертера с донным дутьем ниже и шире, чем корпус конвертера с верхней продувкой. В днище устанавливают от 7 до 22 фурм в зависимости от емкости конвертера. Обычно их располагают в одной половине днища так, чтобы при наклоне конвертера они были выше уровня жидкого металла. Перед установкой конвертера в вертикальное положение через фурмы начинают подачу дутья.

Принципиальной особенностью способа подачи кислорода через дно конвертера является подвод кислорода, струя которого окружена защитным слоем углеводородного (природного газа) или жидкого топлива (мазута). Этот защитный слой предохраняет огнеупоры днища от преждевременного прогорания. Стойкость футеровки конвертеров 400–600 плавок; стойкость днищ

300–400 плавок при защите газом и 500–600 плавок с использованием мазута. Для примера приведен режим плавки в конвертере 200 т донного дутья: загрузка лома 2–3 мин, заливка чугуна 2–3 мин, продувка 12–14 мин, отбор проб, измерение температуры до 9 мин, продувка азотом до 1 мин, скачивание шлака 2–3 мин, выпуск 5–6 мин. Всего 31–40 мин. Расход порошкообразной извести 5 т/мин, расход кислорода 3,3 $м^3$/т·мин, выход годного на 1,5 % больше, чем в конвертере с верхним дутьем.

Процесс с комбинированным дутьем. В конвертерах комбинированного дутья металл продувается одновременно сверху кислородом и снизу кислородом, аргоном или азотом. В таких конвертерах рационально сочетаются преимущества верхней и нижней продувок: обеспечивается интенсивное перемешивание ванны, с большей полнотой протекают процессы обезуглероживания, десульфурации и дефосфорации. В России этот вариант процесса применяется на ОАО “Северсталь”, ОАО “Запсиб”, ОАО “НЛМК” и др.

Для управления конвертерной плавкой разработаны математические модели процесса, основанные на материальном и тепловом балансах плавки. На основании математического описания процесса создается программа для компьютера, в которую вводят исходные данные о составе чугуна, флюсов, охладителей, количестве сыпучих, температуре чугуна, чистоте кислорода, основности конечного шлака, составе и температуре готовой стали и т. п. Компьютер на основе полученной информации и уравнений математической модели процесса прогнозирует ход плавки, рассчитывает количество и время присадок, расход кислорода на плавку и момент окончания продувки, необходимое количество раскислителей, вводимых в ковш.

В конвертерах выплавляют широкий сортамент углеродистых, низколегированных и легированных (нержавеющих, динамных, трансформаторных) сталей. Из них изготавливают катанку, проволоку, сортовой прокат, лист, трубы, рельсы и широкий сортамент других изделий.

Производство конверторной стали характеризуется высокой производительностью.

Основные технико-экономические показатели работы конверторных цехов следующие:

Вместимость конвертеров, т	100–350
продолжительность, мин:	
продувки	15–24
цикла плавки	30–50
годовая производительность цеха, млн. т слитков:	
три конвертера 100 т	2,5–3,0
три конвертера 250 т	4,7–5,0
выход годного, %	89–92
расход, на 100 кг стали:	
извести, кг	6–10
лома, кг	18–27
расход кислорода, $м^3$/т стали	50–56
расход огнеупоров на футеровку конвертеров, кг/т стали	2–4
стойкость футеровки, число плавок	400–800.
Вместимость конвертеров, т	20–180
продолжительность, мин:	
продувки	18–28
цикла плавки	50–65
выход годного, %	87–89
расход кг/100 кг стали:	
извести	10–16
лома	20–35
расход кислорода, $м^3$/т стали	60–63
стойкость футеровки, число плавок	120–450

Недостатками конверторного процесса являются сложность и высокая стоимость очистки отходящих газов, а также необходимость использования в шихте жидкого чугуна.

2.5.4. Мартеновское производство стали

В мартеновских печах, переживших несколько технологических революций, возможно выплавлять сложнейшие марки стали. В отличие от конверторного, мартеновский процесс производства стали не может проводиться без подачи дополнительного тепла извне. Нагрев и расплавление металла идет за счет тепла, выделяющегося при сгорании топлива. В результате сложных физико-химических процессов при взаимодействии газовой, жидкой (шлак, металл) и твердой (под печи) фаз получается сталь.

Эмиль и Пьер Мартены выплавляли сталь, которая оказалась превосходным материалом для ружейных ство-

лов. Спрос на нее возрастал, и Мартены занялись поиском способа получения стали, не уступающей по качеству тигельной, но более дешевой. Результатом поиска стал способ, основанный на плавке чугуна и скрапа на набивном поду регенеративной (сименсовской) печи (1864). Сименс-мартеновский процесс успешно конкурировал с конверторным. Его преимущество состояло в возможности, используя лом, количество которого постоянно росло, получать высококачественную сталь.

Как это часто бывает, вскоре об изобретателях забыли, считая, что их нет в живых: в отношении Эмиля это было правдой, а Пьер прожил еще четыре десятилетия после зенита своей славы в нужде и нищете. В 1910 г. "нашли" этого человека, которому черная металлургия очень обязана. Умер Пьер Мартен в 1915 г. в возрасте 91 год. Незадолго до его смерти Iron and Steel Institute присудил ему Бессемеровскую золотую медаль.

Для обеспечения полного сгорания топлива в печь подают несколько больше воздуха, чем теоретически необходимо. Избыток кислорода, CO_2 и H_2O в продуктах сгорания создает окислительный характер атмосферы в рабочем пространстве печи, поэтому окисление железа и примесей металлической шихты начинается с момента завалки в печь при непосредственном взаимодействии газовой фазы с шихтой.

Устройство мартеновской печи

Мартеновская печь является пламенной регенеративной печью и состоит из следующих элементов (рис. 33): рабочего пространства, головок, вертикальных каналов, шлаковиков, регенераторов, боровов с перекидными устройствами, котла-утилизатора и дымовой трубы.

Рабочее пространство, головки печи и вертикальные каналы расположены выше рабочей площадки цеха и условно называются верхним строением печи. Все остальные элементы находятся под рабочей площадкой и называются нижним строением.

Рабочее пространство ограничено сверху сводом, снизу — подом. **Подина** печи имеет наклон к задней стенке, в которой

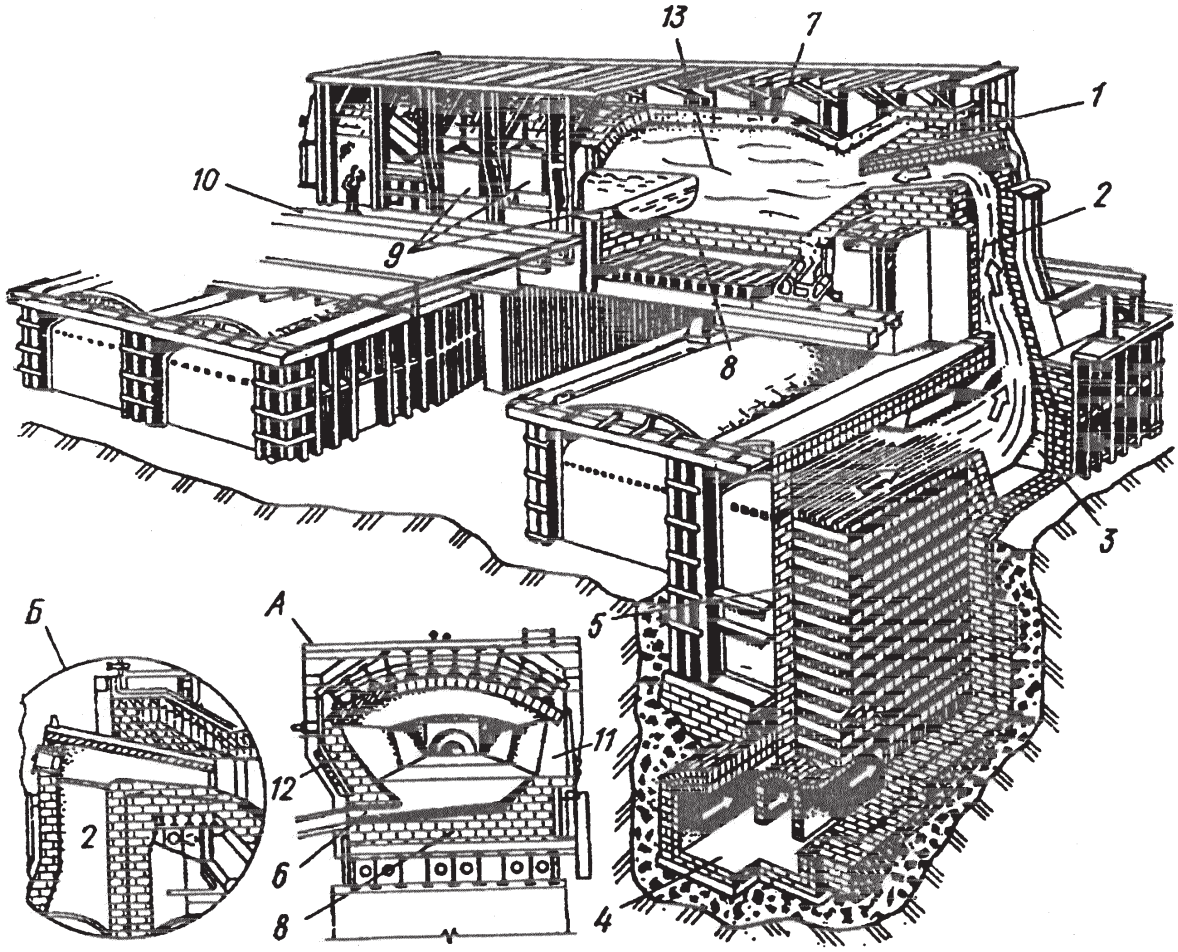


Рис. 33. Устройство мартеновской печи:
А — поперечный разрез рабочего пространства печи; *Б* — разрез головки печи; *1* — головка; *2* — вертикальный канал; *3* — шлаковик; *4* — борова; *5* — насадка регенератора; 6 — выпускное отверстие; *7* — свод; *8* — подина; *9* — завалочные окна; *10* — рабочая площадка; *11* — передняя стенка; *12* — задняя стенка; *13* — рабочее пространство

предусмотрено отверстие для выпуска готовой стали. В передней стенке имеются проемы — завалочные окна, которые служат для загрузки твердой шихты, заливки жидкого чугуна (по специальному желобу), взятия проб и наблюдения за ходом плавки.

Обычно **завалочные окна** закрыты специальными футерованными крышками с отверстиями — “гляделками”, через которые сталевар наблюдает за ходом плавки и состоянием печи.

Из всех элементов печи рабочее пространство находится в наиболее тяжелых условиях — в нем идет плавка стали. Во время завалки твердой шихты огнеупорные материалы, из кото-

рых изготовлено рабочее пространство, подвергаются резким тепловым и механическим ударам, во время плавки они подвергаются химическому воздействию расплавленного металла и шлака; в рабочем пространстве максимальная температура. Материалы, находящиеся в контакте с рабочим пространством, должны обладать максимальной огнеупорностью. Стойкостью элементов рабочего пространства печи определяют, как правило, стойкость печи и, следовательно, сроки промежуточных и капитальных ремонтов.

Продукты сгорания имеют температуру 1500–1600 °С и, проходя через насадку регенератора, отдают ей значительную часть тепла. Холодный же воздух, поступающий в рабочее пространство, нагревается за счет этого до 1100–1200 °С, а дымовые газы охлаждаются до 500–600 °С (для дальнейшего использования тепла их направляют в **котел-утилизатор**).

Головки обеспечивают подачу требуемого количества топлива. По вертикальному каналу к головке подводятся нагретый воздух и газ. Мазут подается через мазутную фурму — форсунку, устанавливаемую в торце головки.

Шлаковики представляют собой камеры, вытянутые под головками параллельно поперечной оси печи. Основное назначение шлаковиков — предохранение насадок регенераторов от засорения плавильной пылью. Сечение шлаковиков больше сечения вертикального канала. Поэтому дымовые газы, попадая в шлаковик, резко теряют свою скорость, одновременно изменяя направление движения. При этом бóльшая часть плавильной пыли (~60 %) оседает в шлаковиках. Шлаковики соединены с вертикальными каналами при помощи окон в сводах и сообщаются с регенератором через окна, расположенные над перевальной стенкой. Для очистки шлаковиков от осевшей пыли подину шлаковиков делают выкатной вместе со стеновыми блоками, скрепленными металлическими поясами. Это позволяет производить очистку вне печи.

Из шлаковиков отходящие газы (их температура около 1600 °С) попадают в **регенераторы**, в которых физическое тепло отходящих газов используется для подогрева направляемого в печь воздуха. Регенераторы представляют собой прямоугольные камеры, заполненные решеткой из огнеупорного кирпича, называемой насадкой.

Из поднасадочного пространства отходящие газы попадают в **борова**. Борова служат для подвода газа и воздуха к регенераторам и отвода продуктов сгорания от регенераторов к трубе или котлу-утилизатору.

Мартеновская печь — агрегат реверсивного действия, в котором направление движения газов по системе печи периодически меняется. Для этого в боровах, а также в газопроводах и воздухопроводах устанавливают систему шиберов, клапанов, дросселей, задвижек, объединяемых общим названием "**перекидные клапаны**", которые переключаются автоматически.

Состав шихты определяет следующие виды мартеновского процесса:

скрап-процесс (основной составляющей шихты является стальной лом; в зависимости от содержания углерода в шихте добавляют твердый чугун в количестве, достаточном для проведения периода кипения, от 25 до 45 %; этот процесс применяют на заводах, где нет доменного производства);

скрап-рудный процесс (шихта состоит из 50–80 % жидкого чугуна и 20–40 % лома);

рудный процесс (шихта на 100 % состоит из жидкого чугуна; в твердом виде заваливают еще железную руду).

В зависимости от состава шлака и огнеупорных материалов для изготовления пода мартеновский процесс может быть основным и кислым.

В отличие от плавки в конвертере, продолжающейся менее часа, плавка в мартеновской печи длится много часов. Кроме того, жидкий металл все время находится под слоем шлака, поэтому все вводимые в печь добавки проходят в металл через шлак.

По существу руководство ходом плавки заключается в том, что меняют состав, температуру и консистенцию шлака и таким образом добиваются получения металла нужного состава и качества.

Основные источники образования шлака следующие:

1) продукты окисления чугуна и скрапа;

2) продукты разъедания футеровки агрегата — MgO и CaO в основных печах и SiO_2 в кислых;

3) загрязнения, внесенные шихтой (песок, глина и др.); во время заливки жидкого чугуна, хранившегося в миксере, в ковш,

а затем в мартеновскую печь попадает некоторое количество миксерного шлака;

4) ржавчина, покрывающая скрап;

5) добавочные материалы (известняк, известь, железная руда, агломерат, марганцевая руда и др.).

Количество и состав шлака, температура, жидкоподвижность и другие его параметры оказывают огромное, а во многих случаях и решающее, влияние на процесс плавки и качество металла.

Шихтовые материалы делятся на две группы: металлическую и неметаллическую. К первой группе относятся чугун и стальной лом, раскислители и легирующие добавки. Ко второй группе — флюсы. Используются также железная и марганцевая руды, агломерат, окатыши.

Чугун используют в жидком или твердом виде. Соотношение чугуна и лома в шихте зависит от разновидности процесса, марки выплавляемой стали и др.

В качестве легирующих и раскислителей используют ферросплавы и некоторые чистые металлы (алюминий, никель).

Стальной лом, используемый в шихте мартеновских печей, подразделяют на оборотный (отходы сталеплавильных, прокатных, кузнечных и других металлообрабатывающих цехов своего завода) и покупной. Весь лом должен подвергаться предварительной подготовке для отделения цветных металлов, мусора и для соответствующего дробления.

Железная руда и агломерат применяются в качестве окислителей, а также в качестве флюса для ускорения образования активного шлака. С этой целью можно использовать окалину. Известняк, известь, боксит, плавиковый шпат служат для формирования шлака необходимого состава и вязкости. Вместо руды и известняка применяют иногда офлюсованный агломерат и известково-рудные брикеты.

В качестве примера рассмотрим скрап-рудный процесс в основной мартеновской печи. Он является наиболее распространенным вариантом, отличается от скрап-процесса повышенным количеством жидкого чугуна, твердых окислителей и известняка в шихте.

Процесс плавки состоит из заправки печи, завалки шихты, плавления, доводки и выпуска.

Заправка печи производится для восстановления изношенных участков пода и относов. Продолжительность заправки 15–25 мин.

Завалка шихты происходит следующим образом: сначала на подину загружают часть железной руды и известняка слоями с промежуточными нагревами, после этого — скрап. Его нагревают до 1300–1400 °С и заливают чугун. Прогрев лома предотвращает затвердевание чугуна и способствует активному плавлению шихты.

В период **плавления** идет расплавление лома, разложение известняка, растворение оксидов в жидком шлаке, окисление элементов металлической шихты (Si, Mn, P, C, Fe). Плавление сопровождается интенсивным выделением газов CO и CO_2, из-за чего металл фонтанирует.

Плавление даже при благоприятных условиях протекает довольно медленно. Его длительность составляет 30–40 % продолжительности всей плавки. А суммарная продолжительность завалки шихты, заливки чугуна и плавления составляет 70 % длительности всей плавки. Для ускорения процесса плавления и окисления примесей продувают ванну кислородом, сжатым воздухом или их смесью. Конец периода плавления определяют по прекращению фонтанирования металла в печи. К этому времени содержание углерода в металле должно превышать его содержание в конце доводки на 0,3–0,5 %. Температура металла должна быть 1520–1550 °С.

Доводка состоит из двух стадий: полировки и чистого кипения. Задачами этого периода являются удаление избытка примесей и нагрев металла до температуры выпуска. При этом регулируют содержание углерода, фосфора, серы, основность шлака. В период чистого кипения одновременно с нагревом металла идет удаление из ванны газов, неметаллических включений, окисление углерода до требуемого в готовом металле содержания.

После периода доводки металл раскисляют (если нужно — легируют) и **выпускают** в ковш. В процессе плавки отбирают пробы металла и шлака на анализ. Температуру металла контролируют термопарами погружения.

Двухванные сталеплавильные печи

Первая двухванная печь в России начала работать в 1965 г. на Магнитогорском металлургическом комбинате. Эти печи, как и мартеновские, являются подовыми отражательными, имеют две головки, два шлаковика, два вертикальных канала, а также систему боровов и перекидных клапанов. В такой печи производится интенсивная продувка металла кислородом, а тепло газов, отходящих из рабочего пространства одной из ванн, используется для нагрева шихты, находящейся в другой ванне. Также используется тепло, выделяющееся при окислении CO и CO_2. Схема печи представлена на рис. 34.

Выплавка стали в двухванной печи осуществляется следующим образом: в одной ванне металл продувают кислородом, в другую ванну в это время загружают лом и сыпучие материалы. Выделяющийся при продувке ванны кислородом CO догорает над заваливаемой шихтой, благодаря чему шихта быстрее подогревается и плавится. Обе ванны имеют свод, и в каждой есть отверстие для спуска шлака и загрузочные окна.

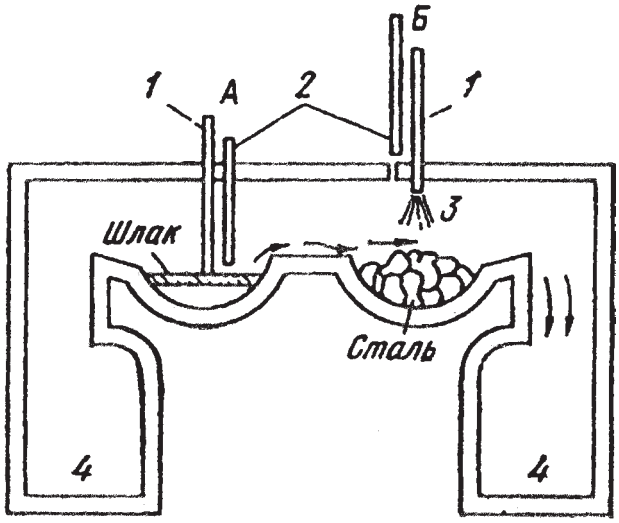


Рис. 34. Схема двухванной печи: *А* — положение фурмы в период доводки; *Б* — положение фурмы в период подогрева скрапа; *1* — газокислородные фурмы; *2* — кислородные фурмы; *3* — факел газокислородной фурмы; *4* — шлаковики

После выпуска плавки из первой ванны в нее загружают лом, а во вторую ванну заливают чугун и проводят додувку (доводку) с подачей кислорода и топлива. Поток газов направляется из второй ванны в первую.

При работе на шихте, содержащей 65–68 % жидкого чугуна, двухванные печи могут работать без подачи топлива. Если же по условиям производства в печь загружается меньшее количество чугуна, то необходимо отопление печи. Топливо в двухванные печи подается с по-

мощью топливно-кислородных горелок, установленных в своде и торцах печи. Горелки могут быть стационарными и подвижными.

Технология плавки стали в двухванных печах принципиально не отличается от технологии плавки в мартеновских печах, работающих с интенсивной продувкой кислородом, хотя некоторые отличия имеются.

Производительность двухванной печи может достигать 1,5–1,8 млн. т стали в год; расход кислорода составляет 70–75 $м^3$/т, огнеупоров 3–4 кг/т. Фактически двухванная печь по существу процесса и по технико-экономическим показателям приближается к конвертеру с верхним дутьем.

Недостатками этих печей являются повышенный угар металла (выход годного 87–89 %), интенсивное пылевыделение. Большой подсос холодного воздуха осложняет тепловую работу печи. Сложными являются осмотр печи и ее заправка.

Технико-экономические показатели мартеновского процесса

Технико-экономические показатели мартеновского процесса зависят от многих факторов и для разных заводов изменяются в широких пределах. Основной характеристикой работы мартеновских печей является количество получаемой стали в тоннах, приходящееся на 1 $м^2$ площади пода в сутки. Характеристикой печи служит также часовая (т/ч) и годовая (т/год) производительность.

Производительность печей характеризуется следующими данными:

Вместимость печи, т	200	400	650	900
Годовая производительность, тыс. т/год	200–300	300–400	400–600	700–800

Выход годного при скрап-процессе 89–92 %, при скрап-рудном процессе 92–96 %. Выход годного — это отношение массы стали к количеству металла, нагруженного в печь (чугун, лом, ферросплавы).

Себестоимость 1 т стали определяется стоимостью материалов (60–80 % общей стоимости стали) и затратами по переделу (зарплата, топливо, электроэнергия, вода, пар, кислород, сжа-

тый воздух, отчисления на амортизацию и т. д.). В цехах, использующих скрап-процесс, расходы по переделу выше, чем в цехах, работающих скрап-рудным процессом. Себестоимость легированной стали возрастает за счет расходов на ферросплавы и легирующие добавки. Расходы условного топлива составляют 110–130 кг/т. Важнейшим резервом уменьшения себестоимости стали является повышение производительности труда, т. е. увеличение количества стали, выплавляемой в течение года, приходящейся на одного работника. Этот показатель может быть значительно улучшен благодаря механизации трудоемких работ, автоматизации теплового и технологического режимов плавки.

2.5.5. Электросталеплавильное производство

Приоритетное развитие электрометаллургии определяется преимуществами, которые электроплавка имеет перед другими способами выплавки металла.

> *Когда в Египте сооружалась Асуанская плотина, археологи вели многочисленные раскопки в Нубийской пустыне, которая после ввода плотины в строй должна была стать районом затопления. Однажды был найден стальной нож, пролежавший в земле несколько тысяч лет. Вряд ли эта находка всерьез заинтересовала бы ученых, если бы не одно обстоятельство: лезвие ножа оказалось настолько острым, что им легко можно было резать даже мягкий хлеб. Столь высокое качество изделий свидетельствует о большом мастерстве древних металлургов и оружейников.*

Электропечь является универсальным агрегатом. В ней можно плавить углеродистый, низколегированный, легированный и высоколегированный сортамент сталей и сплавов. Дуговые печи работают непрерывно или периодически. Они быстрее расплавляют лом, поскольку нагрев осуществляется “изнутри”, в колодцах шихты. Угар легирующих и раскислителей в электропечи на 25–30 % меньше, чем в других плавильных агрегатах. Электропечь незаменима для переработки металлизованного сырья, доля которого с каждым годом увеличивается.

Относительный рост электростали опережает темпы роста других способов производства и общего производства стали, млн. т/%:

1920 г.	1940 г.	1960 г.	1980 г.	1990 г.	1995 г.	1998 г.
0,65/0,87	6,0/4,24	34,6/10,0	157,5/22,0	217,1/28,2	242,6/32,6	262,5/33,8

Ранее перед электросталеплавильным производством стояли задачи повышения производительности печей, снижения времени плавки, расхода электроэнергии, электродов, огнеупоров и трудовых затрат. Затем на первый план вышли экологические факторы и необходимость использования различных видов металлошихты. Результатом решения этих задач была разработка сверхмощных трехфазных дуговых печей, оборудованных водоохлаждаемыми панелями стен и свода, топливно-кислородными горелками и фурмами для вдувания кислорода и угля.

Значительные достижения в электрометаллургии связаны с разработкой и внедрением в производство технологии высокого уровня, направленной на достижение высокой производительности, снижение себестоимости продукции, повышение качества и конкурентоспособности стали и сплавов, реализацию энерго- и ресурсосберегающих и экологически чистых технологий. Такие технологии предполагают использование электропечи **только для расплавления шихты** и выплавки полупродукта; все рафинировочные операции, легирование, доводка металла по составу и температуре осуществляются вне печи методами ковшевой металлургии.

В настоящее время в мире работает более 1200 дуговых печей. В среднем еженедельно вводится одна электропечь. Данные об объеме производства электростали в ряде стран представлены в табл. 18.

Первая дуговая печь в России была установлена в Петербурге на Обуховском заводе в 1910 г. В настоящее время в нашей стране действует около 70 электропечей емкостью от 6 до 150 т.

Ввод в действие мини-заводов привел к резкому росту электрометаллургии за последние 30 лет. Сейчас в мире работает несколько сотен мини-заводов. Например, в США в 1995 г. на таких заводах произведено 62 % общего объема электростали. Прогнозируется, что к 2020 г. более 50 % выплавляемой в мире стали будет производиться ни мини-заводах. Что касается России, по разным субъективным и объективным причинам этому

Таблица 18

Производство электростали в 1998 г.

Страна	Производство стали, млн. т		Доля электростали, %
	Общее	Электростали	
США	97,7	43,6	44,6
Япония	93,5	29,5	31,9
КНР	114,3	23,0	20,1
Италия	25,7	15,3	59,4
Германия	44,0	12,1	27,5
Испания	14,8	10,5	71,1
Франция	20,1	8,0	40,0
Индия	23,5	7,5	31,8
Тайвань	16,9	7,1	41,9
Россия	43,8	5,5	12,6
Канада	15,9	6,6	41,5
Великобритания	17,3	3,9	22,5
Иран	5,6	3,4	60,7
ЮАР	7,5	2,7	36,0
Швеция	5,2	2,0	37,9
В мире	774,4	262,5	33,9

вопросу не было уделено необходимого внимания (в 1980-е гг. было построено в СССР три мини-завода: в Комсомольске-на-Амуре, Молдавии и Белоруссии).

Мощные электропечи применяют для получения низко- и среднеуглеродистых сталей самых распространенных марок. Электропечи также остаются основными агрегатами для выплавки легированных сталей с низким содержанием фосфора и серы, неметаллических включений.

В сочетании с методами внепечной обработки стали в электропечах получают высококачественные, высоколегированные нержавеющие, шарикоподшипниковые, инструментальные стали, жаропрочные сплавы и другие стали и сплавы специального назначения, а также ферросплавы.

Стальной лом (скрап): товарный (поступающий со стороны) и собственные (оборотные) отходы. Оборотные отходы образуются по всему технологическому циклу производства продукции и практически полностью используются в сфере своего производства. Ресурсы лома являются определяющим фактором в формировании структуры производства стали по способам выплавки в каждой стране. Средний удельный расход лома $Р_{уд}$ связан со структурой сталеплавильного производства следующим соотношением:

$$Р_{уд} = К_{э}Э + К_{к}К + К_{м}М,$$

где $К_{э}$, $К_{к}$, $К_{м}$ — средний удельный расход лома соответственно в электросталеплавильных, конверторных и мартеновских цехах, кг/т; Э, К, М — доля этих способов производства. На заводах "Втормета" для переработки лома применяют пакетирование, ножничную резку, брикетирование, дробление и переплав стружки.

Для снижения расхода электроэнергии лом предварительно нагревается до 200–250 °С. Предварительный подогрев лома улучшает плавление благодаря более устойчивому горению дуг. При этом сокращаются продолжительность плавки, расход электроэнергии и электродов. Использование для подогрева лома теплоты отходящих газов повышает степень использования электроэнергии.

Первые разработки по предварительному подогреву лома включали в себя технологии подогрева лома отходящими газами в загрузочных корзинах, специальных камерах нагрева. Установки нагрева лома вне печи имеют существенные недостатки, поэтому немецкая фирма "Fuchs Systemtechnik" создала печь с шахтой для внутреннего подогрева лома. Такая печь емкостью 150 т работает на ОАО "Северсталь" (г. Череповец). Лом подогревается в шахте за счет теплоты отходящих газов и с помощью газокислородных горелок мощностью по 4 МВт, встроенных в нижнюю часть шахты. Конвертерная система подогрева лома реализована в печи системы "Consteel", в которой подогреватель лома имеет длину до 24 м.

Чугун традиционно применяется для повышения содержания углерода в шихте. Поскольку он имеет высокую (по сравнению с ломом) стоимость, его использование в электроплавке значительно сократилось. Сейчас его применяют в основном для разбавления некачественного лома (понижения содержания вредных примесей в расплаве).

Использование металлизованного сырья в электроплавке имеет следующие преимущества: химический состав точно известен, сырье однородно, в нем отсутствуют нежелательные примеси; повышается производительность печи; при плавлении меньше шума; допускается расширение производства при минимальных капитальных затратах.

Суперком (синтеком) — это новый тип металлошихты, его название — комбинация букв от слов "суперкомпозит оксид металла". В качестве основы в этом материале содержатся чугун (70–90 %) и твердые окислители в виде окатышей, концентрата железной руды, агломерата (10–30 %). Суперком имеет вид чушек с равномерно распределенными по их объему минеральными компонентами. Он может использоваться и в качестве самостоятельного вида шихты, и в сочетании с другими (традиционными) материалами для электроплавки. Главное преимущество материала — высокая чистота по примесям цветных металлов, что позволяет выплавлять стали любого сортамента (листовые, высокопрочные конструкционные, рельсовые, котловые и др.). При этом уменьшается выход годного металла на 1 т металлозавалки и растет удельный расход электроэнергии из-за необходимости восстановления оксидов железа рудной части суперкома. Наличие суперкома устраняет зависимость производства стали от конъюнктуры рынка лома.

Карбид железа в качестве шихтового материала может частично и даже полностью заменить чугун и скрап. Отсутствие вредных примесей обеспечивает получение высококачественного металла при экономии электроэнергии и капитальных затрат. Ухудшение качества скрапа и его удорожание позволяют считать карбид железа перспективным материалом для электрометаллургии.

В качестве шлакообразующего материала используются известь, известняк, флюсы (плавиковый шпат, шамотный бой).

Наиболее широко применяемыми окислителями являются газообразный кислород и железная руда (наилучшей рудой для электроплавки является сухой красный железняк Криворожского месторождения). Иногда в качестве окислителя используют металлизованные окатыши с пониженной степенью металлизации.

Для получения требуемого содержания углерода добавляют углеродсодержащие вещества: мелкие отходы производства графитированных электродов и изделий, электродный бой, кокс.

Для российской металлургии одной из важнейших проблем является снижение удельных расходов исходных материалов и энергии, так как доля энергоресурсов в себестоимости продукции постоянно растет, достигая 25–30 %, что почти вдвое превышает это значение в странах ЕЭС.

Удельный расход металлошихты на 1 т стали является главным показателем расхода материалов в сталеплавильном производстве. Анализ эффективности металлургических процессов и оборудования основывается на тепловых балансах. Показатель расхода энергии на единицу производственной продукции —

Таблица 19

Энергоемкость основных материалов сталеплавильного производства

Материал	Энергоемкость	
	МДж/ед.	кг у.т./ед.
Чугун, кг	23,8	0,811
Металлолом, кг	0,2	0,007
Метализованные окатыши, кг	17,0	0,579
Известь, кг	5,4	0,184
Кислород, $м^3$	5,8	0,20
Азот, $м^3$	2,5	0,085
Аргон, $м^3$	35,6	1,21
Природный газ, $м^3$	37,6	1,28
Мазут, кг	41,0	1,40
Электроэнергия, кВт·ч	11,25	0,0383
Ферромарганец-75 (ФМн-75)	55,02	1,875
Ферросилиций-45 (ФС-45)	70,34	2,40

Таблица 20

Энергозатраты на 1 т стали

Сталеплавильный процесс	Доля лома в шихте, %	Энергозатраты, кВт·ч на 1 т стали					
		Общие*, кВт·ч/ГДж	В том числе, %				
			Чугун	Лом	Ферросплавы	Топливо + электроэнергия	Остальное
Конверторный	25–30	6060/21,82	90,7	0,3	4,3	1,7	3,0
Мартеновский:							
скрап-рудный	40–50	5190/18,68	75,9	0,5	5,0	15,9	2,7
скрап-процесс	65	4640/16,70	53,7	0,8	5,6	36,8	3,1
Электросталеплавильный:							
ДСП традиционный	100	2610/9,40	0	2,2	10,0	69,0	18,8
ДСП с шахтным подогревом лома	70	3960/14,25	55,1	1,1	6,6	30,1	7,4
Конструкции фирмы “Фукс системтехник”	100	1940/6,98	0	3,0	13,5	66,3	17,2
Процесс EOF с использованием жидкого чугуна	50	4820/17,35	78,3	0,7	5,4	9,1	6,5

*Энергозатраты, выраженные в кВт·ч/т, переводили в ГДж/т с коэффициентом 1 кВт·ч = 3,6 МДж.

затраты тепловой энергии (энергоемкость). Энергозатраты выражаются в величине тепловой энергии — ГДж/т (МДж/кг) либо в расходе условного топлива при его теплотворной способности, равной 29,4 МДж/кг (кг у.т./т).

Данные, приведенные в табл. 19 и 20, характеризуют энергоемкость материалов и конечной продукции — стали, а также удельный расход металлошихты.

Наиболее энергоемким материалом является чугун, который определяет величину энергоемкости производимой на его основе стали.

Улучшение экономических и технических показателей работы плавильных агрегатов, улучшение экологических условий связано с внедрением энерго- и ресурсосберегающих технологий.

Устройство дуговой печи

Кожух печи должен выдерживать нагрузку от массы огнеупоров и металла. Его делают сварным из листовой стали толщиной 16–50 мм в зависимости от размеров печи. Форма кожуха определяет профиль рабочего пространства дуговой печи. Днище кожуха обычно выполняется сферическим для обеспечения наибольшей прочности и минимальной массы кладки. Сверху печь закрыта **сводом**.

Современные дуговые печи работают в основном на графитированных **электродах**, расход которых зависит от их качества и условий работы печи. Дуговые печи сверхвысокой мощности работают на очень высоких токах (не менее 100 кА, напряжение 100–800 В), для них используют специальные высококачественные электроды, обладающие низким электрическим сопротивлением, более плотные и прочные.

Затраты на электроды печей обычной мощности при выплавке углеродистых сталей составляют 8 % себестоимости, для сверхмощных печей — до 15 % себестоимости стали. Для экономии электродов наносят защитные покрытия из алюминия, силикокальция и других веществ на их боковые поверхности. В ходе плавки электроды сгорают, укорачиваясь, поэтому их наращивают для поддержания дуги.

На современных печах своды выполняют любо полностью водоохлаждаемыми из плоских панелей или трубчатыми. Своды бывают и комбинированными: периферийная — бóльшая — часть свода выполняется либо из панелей с водяным охлаждением, либо из трубчатых элементов, охлаждаемых водой, а центральная часть — из огнеупорного кирпича. Стойкость стен достигает 100–150 плавок, подины — один-два года. Стены, как и свод, делают водоохлаждаемыми.

Система загрузки печи бывает двух видов: через завалочное окно мульдозавалочной машиной и сверху при помощи бадьи. Загрузку через окно применяют только на небольших печах.

Загрузка печи сверху осуществляется в один-два приема в зависимости от насыпного веса шихты. Чем тяжеловеснее шихта, тем меньше число загрузок. При этом меньше охлаждается футеровка, сокращается время плавки, уменьшается расход электроэнергии. Для загрузки печи свод приподнимают на 150–200 мм над кожухом печи и поворачивают в сторону вместе с электродами, полностью открывая рабочее пространство печи для введения бадьи с шихтой. Свод печи подвешен к порталу. Портал соединен с неподвижными стойками электродержателей в одну жесткую конструкцию, покоящуюся на поворотной консоли, которая укреплена на опорном подшипнике. Крупные печи имеют поворотную башню, в которой сосредоточены все механизмы поворота свода. Башня вращается вокруг шарнира на катках по дугообразному рельсу. Бадья представляет собой стальной цилиндр, диаметр которого меньше диаметра рабочего пространства печи. Снизу цилиндра имеются подвижные гибкие сектора, концы которых стягиваются через кольцо тросом. В некоторых конструкциях днище бадьи закрыто грейферным затвором.

Взвешивание и загрузка шихты в бадью производятся на шихтовом дворе электросталеплавильного цеха. Бадья с шихтой на трансферкаре подается в плавильное отделение цеха, поднимается краном и опускается в печь. Дно бадьи открывается, и при ее подъеме шихта из бадьи вываливается в печь в том порядке, в котором она была загружена в бадью.

При использовании в качестве шихты металлизованных окатышей загрузка может производиться непрерывно по трубопроводу, который проходит в отверстие в своде печи. В нашей стране получили распространение печи с выкатным корпусом и поворотным сводом.

Нагрев и плавление металла осуществляются электрическими дугами, горящими между концами трех электродов, и металлом, находящимся в печи.

Для ускорения расплавления печи оборудуют стеновыми газокислородными горелками в количестве от 2 до 4 штук. Горелки располагаются под углом к вертикальной поверхности стен корпуса печи. Сжигание газа ускоряет расплавление и экономит электроэнергию. Этой же цели служит продувка кислородом через сводовую фурму или через трубки, вводимые в рабочее окно.

Выпуск шлака и готового металла происходит через летки. Если надо выпустить шлак, печь наклоняется на 10–15° в сторону рабочего окна, при выпуске металла печь наклоняется на 45° в сторону выпускного желоба (традиционный выпуск на маломощных печах).

Современные дуговые печи имеют и другие схемы выпуска стали (рис. 35).

Печь с сифонным выпуском имеет выпускное отверстие, расположенное ниже уровня металла. В такой печи можно оставлять после выпуска часть жидкого металла — "болото", это позволяет быстрее расплавлять заваливаемый в печь лом.

Печь с эркерным выпуском имеет выпускное отверстие выше уровня подины. Такое расположение отверстия позволяет либо сливать весь металл, либо оставлять часть металла в печи и полностью отсекать шлак от металла. Эркерный выпуск позволяет сократить длительность этого периода с 8–12 до 2–4 мин. При ускоренном выпуске металла короткой сплошной струей его температура на 20–30 °С ниже обычной. При этом расход электроэнергии снижается на 3,4–4,6 %, а электродов — на 6 %.

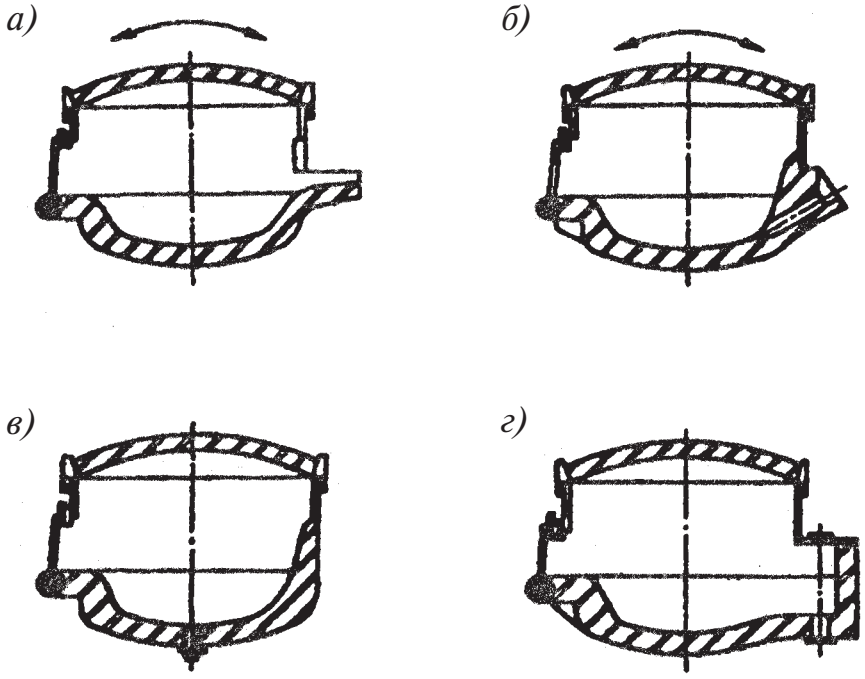


Рис. 35. Схема выпуска стали из дуговых печей:
а — традиционная; *б* — сифоном; *в* — через донное отверстие;
г — через отверстие в эркере

Технология плавки

Плавка начинается с **заправки** печи (ремонт подины и откосов). Перед заправкой с поверхности подины удаляют остатки шлака и металла. На поврежденные места подины и откосов — места перехода подины в стены печи — забрасывают сухой магнезитовый порошок, а при больших повреждениях — порошок с добавкой пека или смолы.

Заправку производят заправочной машиной, выбрасывающей через насадку при помощи сжатого воздуха заправочные материалы или разбрасывающей материалы по окружности быстровращающегося диска, который опускают в открытую печь сверху.

Загрузка печи. Для наиболее полного использования рабочего пространства печи в центральную ее часть ближе к электродам загружают крупные куски (40 %), ближе к откосам средний лом (45 %), на подину и наверх загрузки мелкий лом (15 %). Мелкие куски должны заполнять пространство между крупными кусками.

Период плавления. Расплавление шихты составляет основное время плавки. В настоящее время многие операции легирования и раскисления металла переносят в ковш, поэтому длительность расплавления шихты определяет производительность печи. После окончания завалки опускают электроды и включают ток. Металл под электродами разогревается, плавится и стекает вниз, собираясь в центральной части подины. Под электроды забрасывают известь для наведения шлака. Постепенно озеро металла под электродами становится все больше, оно подплавляет куски шихты, которые падают в жидкий металл и расплавляются в нем. Уровень металла в печи повышается, а электроды под действием автоматического регулятора поднимаются вверх. Продолжительность расплавления металла 1−3 ч в зависимости от размера печи и мощности установленного трансформатора. В современных дуговых печах вместимостью 70−150 т период расплавления не превышает 45−50 мин.

Традиционная технология электроплавки стали предусматривает два варианта работы:

— на первичной шихте;

— с переплавом отходов.

При плавке по первому варианту шихта состоит из простых углеродистых отходов, малоуглеродистого лома, металлизованных окатышей с добавкой науглероживателя. Избыточное количество углерода окисляют в процессе плавки. Металл легируют присадками ферросплавов для получения стали нужного состава. Во втором варианте состав почти полностью определяется составом отходов, а легирующие добавляют только для некоторой корректировки состава. Окисление углерода не производят.

Плавка на отходах значительно короче (на 1 ч) по сравнению с плавкой на свежей шихте за счет окислительного периода. Это увеличивает производительность электропечей на 15–20 % и сокращает расход электроэнергии на 15 %.

В последнее время в электрометаллургии появился новый класс сверхмощных печей, в которых продолжительность всей плавки составляет 60 мин. Такие печи выплавляют в год до 1 млн. т стали. Основные операции получения заданной марки стали (легирование и рафинирование) перенесены в установки внепечной обработки стали. Для сокращения времени плавки, в связи со снижением износа подины и стен, в этих печах не производят заправку подины после каждой плавки, а оставляют в печи 10–15 % жидкого металла — "болото". Полностью печь опорожняют через 6–10 плавок, а печи с эркерным выпуском еще реже — один раз в неделю.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ

Жидкий старт. Под этим термином понимают начало плавки, в которой используется остаток расплава от предыдущего цикла. Для осмотра и ремонта подины или при переходе на выплавку стали другой марки, несовместимой с предыдущей, печь опорожняют полностью. Работа с остатком металла позволяет заметно увеличить среднюю потребляемую мощность при устранении ограничений начального периода плавления.

Особое значение жидкий старт имеет для технологии плавки стали с использованием металлизованной шихты. Наличие жидкой ванны резко увеличивает скорость плавления окатышей, непрерывно загружаемых в жидкую ванну со вспененным шлаком. Большинство трудностей устраняется, если окатыши с рег-

ламентированной скоростью непрерывно подаются в жидкую ванну, оставленную от предыдущей плавки.

Вдувание газов через подину осуществляется для активизации перемешивания жидкой ванны аргоном или азотом. При этом снижается градиент температуры по высоте ванны, улучшается взаимодействие металла и шлака, снижается расход электроэнергии и сокращается время плавки.

Вдувание кислорода. В настоящее время суммарный расход кислорода в электросталеплавильном производстве составляет от 15 до 30 $м^3$/т, а для электропечей-рекордсменов с производительностью более 1 млн. т стали в год расход доходит до 40 $м^3$/т. Это обеспечивает поступление около 30–40 % энергии, необходимой для плавления шихты. Интенсивность подачи кислорода в крупных печах составляет 0,7–0,85 $м^3$/мин на 1 т. Использование 1 $м^3$ кислорода позволяет сэкономить 3,0–3,5 кВт·ч электроэнергии.

Применение жидкого чугуна связано с дефицитом лома, его высокой стоимостью, наличием избытка чугуна на некоторых металлургических заводах. Кроме того, высокое содержание цветных неудаляемых примесей в ломе ограничивает область использования электростали для производства листа. Добавление жидкого чугуна позволяет решить эту задачу.

Использование чугуна целесообразно в электропечах с небольшой удельной мощностью трансформатора (300–400 кВ·А/т). На мини-заводах, оснащенных сверхмощными печами, возможно использование чушкового чугуна для получения качественной стали по примесям цветных металлов.

Применение топливно-кислородных горелок (ТКГ). В настоящее время ТКГ являются эффективным способом ускорения электроплавки. В ТКГ происходит сжигание газообразного, жидкого или твердого топлива непосредственно в рабочем пространстве печи с получением высокотемпературного факела. ТКГ используют для ускорения расплавления шихты (окислительное плавление), для нагрева шихты и подрезки лома на холодных участках плавильного пространства.

Топливо и кислород, расходуемые в горелках, частично замещают необходимую электроэнергию. Число горелок варьируется от 1 до 9; удельная мощность до 200 кВт/т. Суммарная мощность для электропечей вместимостью до 50 т — до 10 МВт, от 50 до 120 т —

10–20 МВт и от 120 до 150 т — 20–25 МВт. Время работы ТКГ около 15–20 мин. Использование ТКГ позволяет выбрать режим, соответствующий минимальным энергозатратам, в зависимости от конкретных местных условий (стоимости электроэнергии, ее доступности, наличия природного газа, керосина и т. п.).

Работа со вспененными шлаками и вдувание углеродсодержащих материалов. Давно известное сталеплавильщикам негативное явление вспенивания шлака, затрудняющее теплопередачу в мартеновских печах и создающее опасность выбросов металла в кислородных конвертерах, в дуговых печах оказалось тем важнейшим технологическим элементом, благодаря которому окончательно утвердилась концепция скоростной плавки.

На образование вспененного шлака влияют газовая фаза и шлаковая ванна, поэтому в печь вводят повышенное количество кислорода и вдувают угольный порошок. Экономия энергии достигает 10–30 кВт·ч/т жидкой стали. Идеальным для поддержания вспененных шлаков является использование металлизованных окатышей, содержащих и углерод, и кислород.

Перемешивание ванны. При перемешивании ванны в дуговых печах ускоряются расплавление лома, усреднение температуры, активизируются реакции между шлаком и металлом. Особенно сильно влияние перемешивания сказывается при плавке стали с использованием металлизованной шихты, когда могут образовываться “айсберги” из металлизованных окатышей.

В трехфазных дуговых печах перемешивание проводят путем донного вдувания аргона или азота. Донное газовое перемешивание повышает производительность печей на 3–6 %, снижает расход электроэнергии на 1–7 % и огнеупоров на 10 %.

Дожигание технологических газов. Анализ теплового баланса работы дуговых печей показывает, что до 20 % энергии, введенной в печь, теряется с отходящими газами, что соответствует потерям электроэнергии до 200 кВт·ч/т. Потери энергии складываются из физической теплоты газов (50–65 кВт·ч/т) и химической теплоты, которая может быть выделена при их дожигании (окисление монооксида углерода и водорода).

Существуют различные системы дожигания: в объеме печи, в шахте, в подогревателях шихты, которые состоят из системы отбора и анализа отходящих газов, фурм для вдувания кислоро-

да, систем клапанов и систем компьютерного управления печью. Расположение, количество и конструкции фурм для дожигания весьма разнообразны и определяются характеристиками дуг печи, видом шихты и технологией плавки.

Обобщенные показатели эффективности использования вышеперечисленных альтернативных источников энергии в сверхмощных электропечах приведены ниже:

Источник снижения расхода электроэнергии	Экономия электроэнергии, кВт·ч/т
Предварительный подогрев лома:	
вне печи	40
в шахтных печах	200
Работа на повышенной мощности за счет длинных дуг	15
Использование топливно-кислородных горелок:	
в малых печах	30–60
в крупных печах	90–120
Применение вспененных шлаков	30–50
Использование жидкого чугуна	25–30
Использование донного выпуска	15–30
Автоматизация и управление электроплавкой	30–35

Электродуговые печи постоянного тока

В последнее время в мире значительное внимание уделяется созданию и внедрению в производство дуговых печей постоянного тока (ДППТ). Как было показано ранее, основной объем электростали выплавляется в дуговых печах переменного тока, но они имеют недостатки, затрудняющие их эксплуатацию: высокий уровень шума при работе, сильная запыленность и загазованность, кроме того, ДСП являются источником интенсивных помех в питающих энергосистемах. Устранить эти недостатки и призваны ДППТ.

Эти печи имеют аналогичные ДСП по конструкции кожух, свод, механизмы наклона печи и перемещения электрода, оди-

наковые схему загрузки шихты и выпуска металла, требования к качеству шихтовых материалов. Отличие в том, что ДППТ имеет один вертикально расположенный сводовый электрод, закрепленный в корпусе электродержателя и введенный внутрь печи через отверстие в центре свода.

Важнейшим элементом ДППТ является конструкция токоподвода к шихте. Для этого используется или токопроводящая подина с металлическими элементами, или один (несколько) стержневых подовых электродов. В России ДППТ имеют стержневые водоохлаждаемые подовые электроды, геометрические размеры которых рассчитываются с помощью математического моделирования с учетом движения жидкого металла под действием электромагнитных сил.

Питание печи производится от источника постоянного тока, отрицательный полюс которого соединен со сводовым электродом, а положительный — с подовым электродом. Источник питания находится в специальном помещении, которое иногда располагается на значительном расстоянии от печи (десятки и даже сотни метров), и представляет собой комплект электрооборудования, включающий в себя силовой трансформатор, преобразователь, реактор постоянного тока и теплообменник (при водяном охлаждении преобразователя).

В процессе плавки ток дуги проходит по всей глубине ванны, взаимодействует с собственным магнитным полем, создавая электромагнитные силы, которые вызывают направленное движение и перемешивание металла.

При плавке в ДППТ испаряется намного меньше металла и шлака, образуется в 6–8 раз меньше пыли, поэтому в ней можно плавить металлы и сплавы с относительно низкой температурой плавления.

Кроме перечисленных, ДППТ обладают и другими преимуществами по сравнению с ДСП: сокращается расход графитированных электродов (до 0,8–1,5 кг/т); повышается выход годного металла за счет снижения угара на 3–4 %; снижается расход ферросплавов на 15–20 %; за счет уменьшения пылевыбросов снижаются затраты на газоочистку; на 15 дБ падает уровень шума; стабилизируется электрический режим; возможно электромагнитное перемешивание жидкого металла.

2.5.6. Разливка стали

Выплавленную в мартеновской печи, конвертере или дуговой печи сталь выпускают в сталеразливочные ковши. Затем ее разливают по изложницам, в которых она затвердевает в форме слитков, или на машине непрерывной разливки стали (МНРС). Слиток является конечной продукцией сталеплавильного цеха и направляется в прокатные кузнечные цехи для дальнейшего передела в сортовой прокат. Разливка представляет собой важнейшую стадию сталеплавильного производства. Существует три способа разливки: сверху, сифоном и на МНРС.

Разливка стали сверху. Такой способ используют в основном для разливки мартеновской и конверторной стали в слитки массой до 25 т для прокатки на станах и в кузнечные слитки массой до 300 т. Сталь из ковша разливается в одну, а при наличии двух стопоров (отверстия в днище) в ковше сразу в две изложницы — высокие, чаще всего чугунные, емкости. Отверстие перекрывают и с помощью крана передвигают ковш к следующей изложнице. Операцию повторяют столько раз, сколько нужно для разливки всей плавки.

Иногда разливку производят через промежуточную емкость, которую устанавливают между ковшом и изложницами. Эта емкость имеет 2–4 стопора и позволяет одновременно наполнять четыре изложницы, что значительно ускоряет процесс разливки.

Разливка стали сифоном. Изложницы наполняют снизу по принципу сообщающихся сосудов, направляя струю металла не в изложницу, а в специальную центровую трубу, от которой в поддоне расходятся каналы к 2–8 изложницам. Каналы, как и центровую трубу, изнутри футеруют плотно состыкованными огнеупорными изделиями — проводками, имеющими снаружи форму канала поддона, а внутри — круглый канал для течения стали. После наполнения всех изложниц данного куста стопор ковша закрывают и перевозят ковш на следующий поддон. Сифоном производят разливку почти всех качественных и легированных сталей.

Сравнение этих двух способов разливки стали показывает, что разливка сверху имеет следующие преимущества перед раз-

ливкой сифоном: 1) простая подготовка оборудования; 2) отсутствие расхода металла на литники (металл, застывший в каналах сифонной проводки и в центровой трубе, который приходится отправлять в переплавку).

После разливки металл остывает в изложнице неравномерно: сначала у холодных ее стенок, затем по направлению к центру изложницы. Застывая, сталь кристаллизуется, и объем ее уменьшается. В каждом слитке появляется неправильной формы пустота — усадочная раковина. В окружающей ее рыхлой части концентрируются все загрязнения: кристаллизующийся металл постепенно выталкивает сюда все, что мешает образованию правильных кристаллов — частички шлака, огнеупорных материалов и другие примеси. Газовые пузырьки скапливаются в свободном пространстве. Эту часть слитка (прибыль) сразу же удаляют и пускают в переплав.

Стремясь уменьшить эти потери, сверху на изложницы устанавливают надставки, утепленные огнеупорным материалом, которые задерживают остывание металла в процессе кристаллизации. Надставку не только утепляют, но и обогревают. Иногда вводят специальные экзотермические добавки.

Для защиты стали от окисления используют различные методы. Например, разливку дорогих легированных сталей производят в атмосфере аргона: либо всю изложницу помещают в камеру, наполняемую аргоном, либо струю аргона подают так, чтобы она окружала струю стали и наполняла внутреннюю полость изложницы. Очень эффективна разливка под слоем жидкого шлака. При этом перед началом разливки в изложницу кладут брикет или порошок, состоящий из марганцевой руды, селитры, алюминия, магния, плавикого шпата, доменного шлака.

При заполнении изложниц сталью брикет плавится, а его горючие составляющие возгораются, поверхность слитка сверху и по стенкам изложницы покрывается слоем жидкого шлака, газообразные продукты сгорания оттесняют воздух из изложницы. Кроме того, сгорание смеси дает дополнительное тепло, которое обеспечивает необходимую скорость затвердевания прибыльной части. Этот способ значительно улучшает качество поверхности слитка, уменьшаются брак слитка и проката, отходы стали при зачистке слитков.

Непрерывная разливка стали. Скачком в сталеплавильном производстве, особенно в последние два десятилетия XX в., явилось широкое применение непрерывной разливки стали (НРС). Если в 1970 г. в мире непрерывным способом разливали 4,3 %, то в 1998 г. — уже 83,3 % всей стали. Некоторые обобщенные данные по доле непрерывной разливки в промышленно развитых странах, в бывшем СССР, в России и в мире приведены ниже, млн. т/% к общему объему:

Страны	1985 г.	1998 г.
Промышленно развитые	257,4/68,8	385,7/96,2
Бывшего СССР	20,9/13,5	29,9/40,2
Россия	15,5/17,5	22,6/51,7
В мире	332,8/46,3	646,6/83,3

В России внедрение НРС идет медленнее, чем в мире по ряду причин:

сложившаяся структура сталеплавильного производства (в мартеновских цехах установка НРС практически исключается);

преимущественное использование машин непрерывной разливки (МНРС) вертикального типа.

Внедрение этого способа было направлено на снижение затрат материалов и энергии, улучшение экологической ситуации и условий труда, повышение качества продукции.

МНРС отлично вписываются в технологический цикл современных конверторных и электросталеплавильных цехов, создавая условия для объединения разливки и прокатки металла в единые литейно-прокатные комплексы.

Идея непрерывной разливки стали была сформулирована в середине прошлого столетия, а первое промышленное воплощение получила в нашей стране. В научно-производственном объединении "Тулачермет" начала работать первая в мире установка непрерывной разливки стали (УНРС). Высота установки определялась скоростью затвердевания металла, а первые УНРС были либо многоэтажными башнями, либо шахтами, зарытыми глубоко в землю. Это было очень неудобно.

Раньше слиток, освобожденный из изложницы, необходимо было обжать до определенных размеров, только после этого становилась возможной дальнейшая его деформация. Для обжатия только что остывший слиток снова нагревали, но уже в прокатных цехах, куда стремятся его доставить как можно быстрее. А МНРС сразу дает заготовку разнообразных сечений — и квадратную, и прямоугольную, и круглую, и, если это нужно, даже полую. Появились непрерывнолитые заготовки и для получения прутков, катанки, балок, труб. Необходимость в мощных обжимных станах, в нагреве слитка перед подачей на эти станы отпала.

На многих заводах всю сталь разливают на МНРС. Парк изложниц, все операции по их подготовке и изготовлению (изложница недолговечна: после 15–20 наливов ее приходится отправлять в переплав), процессы, связанные с изготовлением и подготовкой поддонов, центровых, разливочных тележек, сифонного припаса, на этих заводах отсутствуют вместе со стрипперными отделениями с мощными кранами, где слиток “раздевают”, снимая с него изложницу. НРС предусмотрена во всех вновь строящихся цехах и предприятиях.

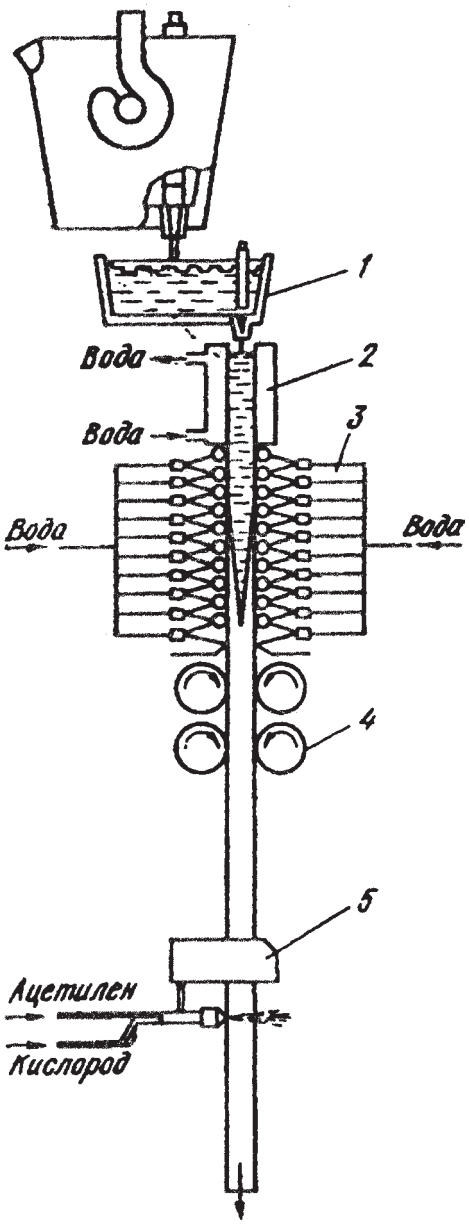


Рис. 36. Схема УНРС вертикального типа:
1 — промежуточный ковш;
2 — кристаллизатор;
3 — вторичное охлаждение;
4 — тянущие валки; *5* — резак

МНРС бывают вертикального, радиального и криволинейного типов (рис. 36 и 37).

Сталь из разливочного ковша поступает в промежуточную емкость, которая имеет один или два стопора для одновремен-

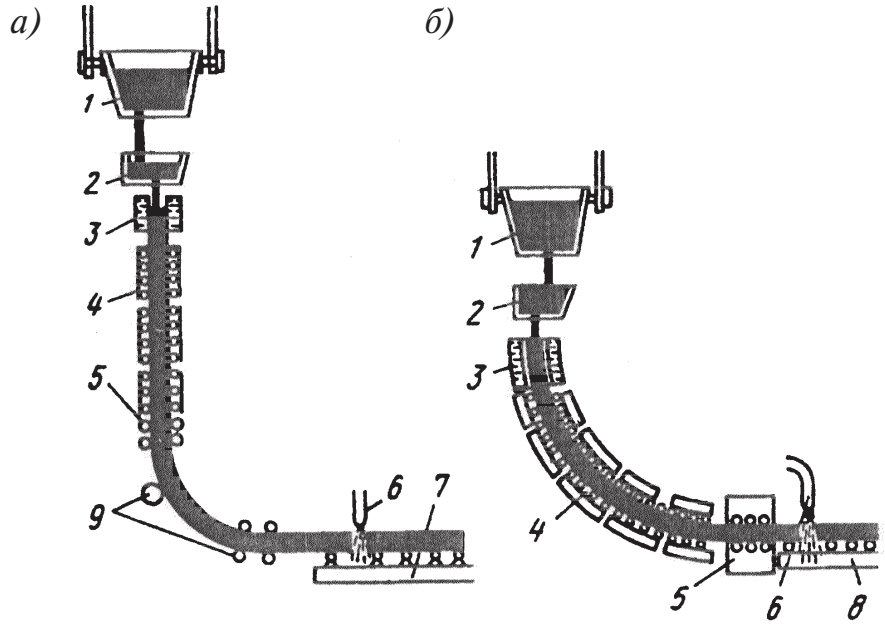


Рис. 37. Схема УНРС с изгибом слитка (*а*)
и радиального типа (*б*):
1 — сталеплавильный ковш; *2* — промежуточный ковш;
3 — кристаллизатор; *4* — зона вторичного охлаждения;
5 — тянущие валки; *6* — автоматический резак;
7 — подъемник; *8* — рольганг; *9* — изгибающий механизм

ной заливки одного или двух кристаллизаторов. Промежуточное устройство позволяет точно регулировать скорость заливки стали, отделяет шлак и т. д. Ниже промежуточного устройства расположен медный водоохлаждаемый кристаллизатор, внутренняя форма которого соответствует форме получаемой стальной заготовки. Кристаллизатор обеспечивает оптимальный отвод тепла и однородную толщину корочки слитка.

Высота кристаллизатора определяется условиями образования достаточно прочной корочки образующегося слитка и усилиями по его вытягиванию, необходимыми для преодоления сил трения (обычно она составляет 700–800 мм). Перед началом разливки в кристаллизатор вводят стальную штангу-затравку, конец которой имеет головку в виде ласточкина хвоста. Образующийся в кристаллизаторе слиток сцепляется с головкой затравки и вытягивается вниз тянущими клетями.

После выхода из кристаллизатора слиток имеет жидкую сердцевину длиной 7–8 м. Для ее затвердевания слиток направляется в зону вторичного охлаждения, которая состоит из водяных

брызгал с интенсивной подачей мелкораздробленных водяных струй и опорных роликов. Ролики препятствуют деформации заготовки и ее вспучиванию под действием ферростатического давления жидкой сердцевины.

Из зоны вторичного охлаждения слиток выходит полностью затвердевшим и попадает в тянущие валки, которые обеспечивают заданную скорость вытягивания от 0,5 до 8,0 м/мин. Последняя операция — резка заготовки на мерные длины. В зоне резки с помощью кислородных резаков, движущихся вместе со слитком, отрезают мерные заготовки, отправляемые на склад.

Большим недостатком установок вертикального типа является их высота (до 45 м), поэтому более экономичными являются МНРС радиального (высота до 12 м) и криволинейного типов.

Технология НРС постоянно совершенствуется, ведутся разработки новых конструкций кристаллизатора и его оборудования. Параллельно с прогрессом в технологии появляются новые достижения в автоматизации процесса. Мировая практика показывает, что основные тенденции развития НРС направлены на увеличение скорости разливки, расширение сортамента и повышение качества заготовки, снижение затрат.

2.5.7. Внепечная обработка стали

В настоящее время внепечная обработка (ВО) является ключевым звеном современных процессов получения качественной стали. Наиболее широко ВО используется при производстве стали для подшипников, высокопрочных конструкционных марок для судостроения, газонефтяного комплекса (особенно для изделий, работающих в условиях Севера), флокеночувствительной, с особо низким содержанием углерода и неметаллических включений для автомобильной промышленности, электротехники, высокохромистых коррозионных сталей и сплавов.

Основная цель ВО состоит в более быстром и эффективном, чем в сталеплавильной печи, проведении некоторых технологических операций.

Совокупность всех разработанных на сегодняшний день методов внепечной обработки позволяет решать следующие задачи сталеплавильного производства.

1. Существенное повышение чистоты металла, эффективная подготовка металлического расплава к кристаллизации с помощью глубокого комплексного рафинирования от вредных примесей, неметаллических включений, микролегирования и модифицирования точного регулирования химического состава, выравнивания температуры металла и др.

2. Повышение производительности основных сталеплавильных агрегатов.

3. Большая гибкость и мобильность технологических операций.

4. Энерго- и ресурсосбережение.

По функциональной направленности многочисленные способы ВО можно разделить на четыре основные группы.

1. Методы перемешивания с усреднением температуры и химического состава расплава.

2. Методы введения порошкообразных реагентов, раскислителей и микролегирующих элементов.

3. Вакуумная обработка.

4. Методы комплексной обработки с подогревом на установках ковш—печь.

Методы перемешивания. Перемешивание металла путем продувки аргоном или азотом, а также электромагнитное перемешивание расплава являются простыми, дешевыми и самыми распространенными способами внепечной обработки (рис. 38).

Продувку металла в ковше инертным газом осуществляют через погруженную фурму (либо фурмы, расположенные тангенциально в нижней части ковша, см. рис. 38,*а*), а также через пористые пробки, швы и вставки, установленные в днище ковша (см. рис. 38,*б*). В первом случае не требуется вводить никаких конструктивных изменений в устройство футеровки ковша, но трудно обеспечить пузырьковый режим перемешивания расплава по всему объему. Это успешно достигается при использовании одной или нескольких пористых пробок из спеченного муллита (70 % Al_2O_3) или периклаза (95 % MgO), стойкость которых достигает 15—20 плавок. Средняя интенсивность подачи газа для продувки 0,01—0,05 $м^3$/т, продолжительность 5—10 мин.

В процессе CAS (Composition Adjustment by Sealed Argon) (см. рис. 38,*в*) поверхность металла защищена слоем синтетического

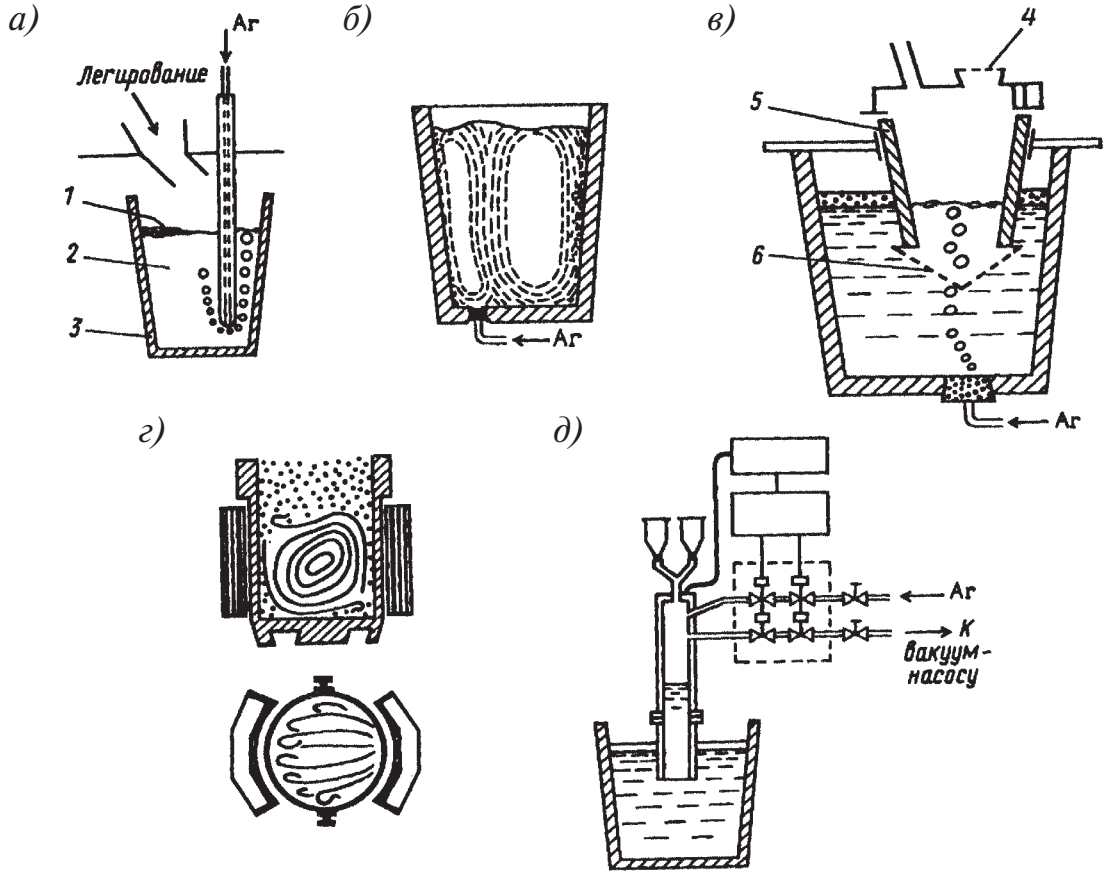


Рис. 38. Методы перемешивания расплава:
а — продувка через погруженную фурму; *б* — продувка снизу через пористую пробку; *в* — процесс CAS; *г* — электромагнитное перемешивание; *д* — пульсационное перемешивание; *1* — шлак; *2* — металл; *3* — ковш; *4* — люк; *5* — погружной колпак; *6* — защитный стальной конус

шлака, а легирование и раскисление проводят в нейтральной атмосфере через выполненный из высокоглиноземистых огнеупоров погружной колпак. Для химического подогрева металла со скоростью 5−15 °С/мин во время обработки в расплав вдувают сверху кислород и одновременно вводят алюминиевый порошок (CAS — OB (Oxygen Blowing)- процесс).

По сравнению с продувкой инертным газом электромагнитное перемешивание металла (см. рис. 38,*г*) более надежно и безопасно, обладает гибкостью и точностью регулирования режима, но ухудшается интенсивность массообмена металлической и шлаковой фаз и невозможно удалить растворенный в металле водород с пузырьками аргона.

Процесс пульсационного перемешивания (Pulsation Mixing — PM) позволяет более равномерно и интенсивно перемешивать весь объем жидкой стали. Огнеупорный полый цилиндр, соединенный с вакуумным насосом и газопроводом, погружается в ковш с жидкой сталью (см. рис. 38,*д*). Давление в цикле вакуумирования, когда металл поднимается в цилиндр, 50 кПа, а в цикле вытекания 150 кПа. Время обработки 15 мин.

Методы введения порошкообразных реагентов, раскислителей и микролегирующих добавок. Эти методы "инжекционной металлургии" широко используются практически во всех промышленно развитых странах и предназначены для максимального очи-

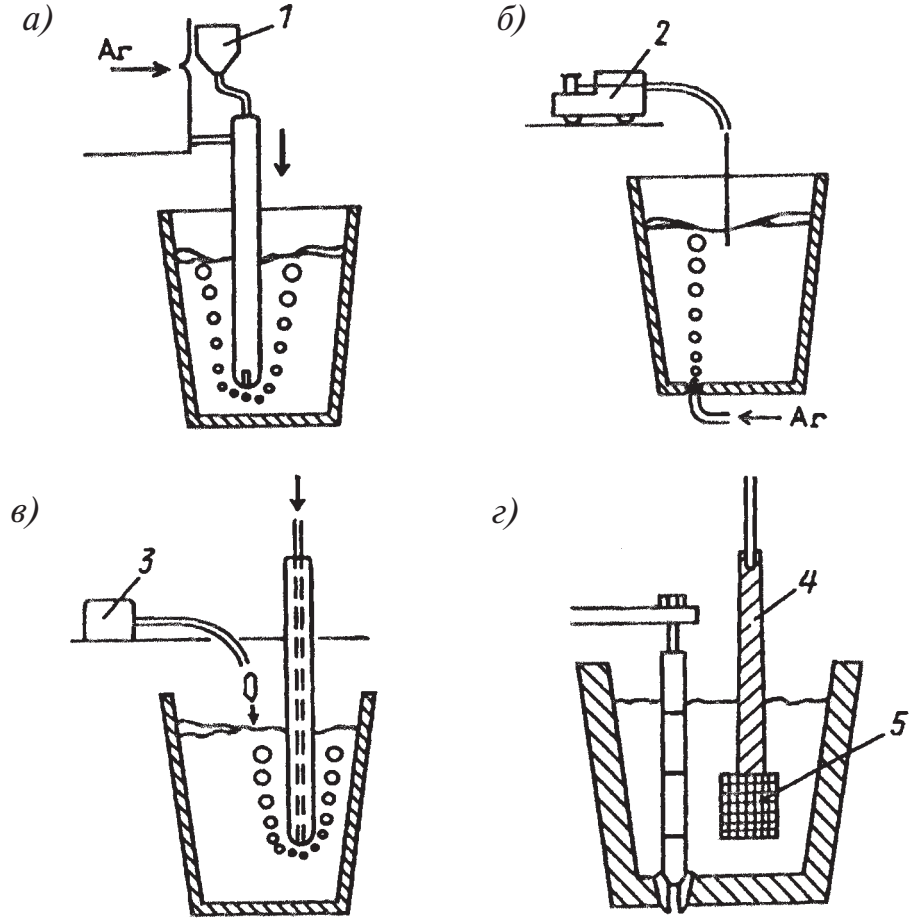


Рис. 39. Методы введения порошкообразных реагентов, раскислителей и микролегирующих компонентов:
а — вдувание порошков; *б* — введение полой проволоки; *в* — выстреливание пуль; *г* — погружение в контейнер; *1* — контейнер; *2* — трайб-аппарат; *3* — пневматическая пушка; *4* — штанга; *5* — закрытый контейнер

щения металла от вредных примесей. Вдувание порошкообразных материалов (крупностью до 2 мм) производится в токе инертного газа через погруженные в расплав фурмы разнообразных конструкций (рис. 39).

Сущность технологии состоит во вдувании в ковш, заполненный металлом (накрытый крышкой или без крышки, сбоку, снизу и т. д.), различных смесей в струе газа. В качестве порошков используются различные смеси: CaSi + CaO + CaF_2, CaO + + CaF_2, Mg + CaO + CaF_2, карбиды Ca и Mg в гранулированном виде и др. Время вдувания порошка 15 мин. Затем металл перемешивается с аргоном в течение 10 мин.

Вакуумная обработка. Металлургическая продукция для изделий ответственного назначения, не прошедшая вакуумирование на стадии производства, в современных условиях пользуется на рынке все меньшим спросом. Рост объемов вакуумированной стали значителен, и по прогнозам на 2010 г. около 27 % всей выплавляемой стали должно обрабатываться в вакууме.

Существующие методы вакуумирования делятся на три группы (рис. 40):

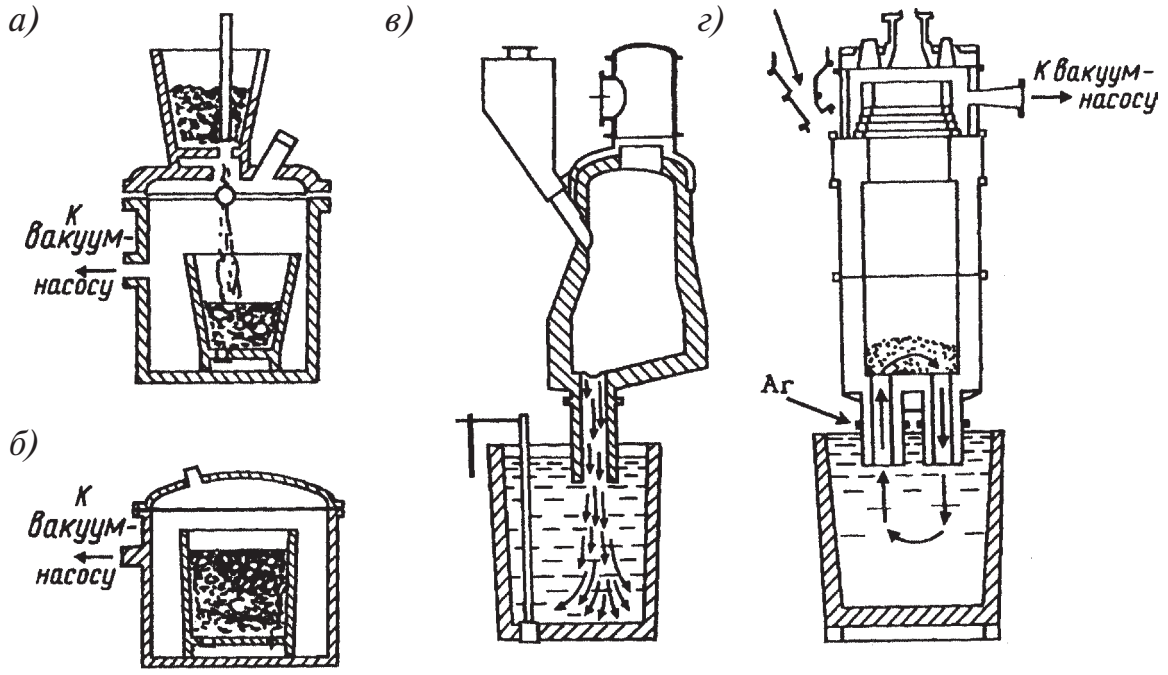


Рис. 40. Вакуумная обработка стали:
а — струйное вакуумирование; *б* — вакуумирование в ковше;
в — порционное вакуумирование; *г* — циркулярное вакуумирование

1) струйное вакуумирование при выпуске металла из сталеплавильного агрегата в ковш, при переливе из ковша в ковш, при разливе в изложницу или на МНРС (см. рис. 40,*а*);

2) вакуумирование в ковше с электромагнитным перемешиванием или продувкой инертным газом (см. рис. 40,*б*);

3) вакуумирование отдельных порций металла вне ковша в вакуум-камере (см. рис. 40,*в,г*).

Вакуумирование стали при выпуске из печи и при переливе из ковша в ковш не получило широкого распространения из-за технических сложностей и большой потери температуры жидким металлом (до 40–90 °С). Струйное вакуумирование применяют в основном при отливке в изложницы крупных слитков массой до 500 т и более для ответственных поковок коленчатых и гребных валов судов, роторов турбин, генераторов, прокатных валков.

Вакуумирование стали в ковше, помещенном в специальную вакуумную камеру или закрытом герметичной крышкой, является наиболее простым способом вакуумной обработки жидкого металла. Двумя основными способами вакуумирования отдельных порций металла в вакуум-камере вне ковша являются разработанные в ФРГ порционное вакуумирование и циркуляционное вакуумирование. В России установка циркуляционного вакуумирования успешно работает на Ижевском металлургическом и других заводах. Преимущества этих методов следующие:

простота конструкций и их технического обслуживания;

высокая производительность (время обработки 8–20 мин);

технологическая гибкость проводимых операций;

малые потери тепла;

возможности физического и химического подогрева металла.

Комплексная обработка стали. Комбинированные способы ВО осуществляют в агрегатах ковш—печь, позволяющих при необходимости выдерживать металл в ковше с заданной температурой перед разливкой длительное время.

Широкое распространение получает новое поколение агрегатов ковш—печь, конструкция которых обеспечивает проведение процессов обработки практически всех марок сталей в оптимальном режиме. Такие агрегаты за рубежом получили название LF (Ladle—Furnace), а у нас в стране — АКОС (агрегат комплексной обработки стали). Они включают в себя систему точного

легирования и корректировки состава, устройства для вдувания порошков, отбора проб, контроля температуры расплава в пределах ±2 °С, эффективную очистку отходящих газов.

Установки ковш—печь потребляют 20–30 кВт·ч/т электроэнергии и 0,2–0,35 кг/т электродов; скорость нагрева металла 2–5 °С/мин; время обработки 25–40 мин. Стоимость таких установок 6–13 млн. дол. из-за высокой степени автоматизации, но себестоимость стали, прошедшей такую комплексную обработку, может снижаться за счет повышения производительности сталеплавильных печей, снижения энергетических затрат, повышения качества и расширения сортамента металлопродукции.

Ниже приведены технико-экономические показатели применения установок внепечной обработки:

Повышение производительности мощных ДСП, %	20–30
Сокращение брака по неметаллическим включениям и несплошностям, %	30–50
Сокращение брака по химическому составу, %	50–70
Сокращение расхода ферросплавов, кг/т:	
ферросилиция	3–4
ферромарганца	2–3
феррохрома	5–25
ферротитана	8–10
Увеличение усвоения легирующих элементов и раскислителей (среднее/максимальное), %	
углерода	30/50
алюминия	30/40
кремния	10/20
титана	20/50
Удаление вредных примесей до уровня менее (среднее/минимальное), %:	
кислорода	25/10
водорода	1,5/1
серы	50/5
фосфора	35/5
Сокращение расхода электродов, кг/т	3–4
Сокращение электроэнергии, %	5–10
Стабилизация пределов отклонения температуры разливки на МНРС (среднее/минимальное), °С	±5/±2

В России используют все указанные способы внепечной обработки, но в меньшем, чем в промышленно развитых странах,

объеме. Помимо ограниченных инвестиций ситуация осложняется затруднениями при установке агрегатов в старых цехах, а также отсутствием специализированной базы для их изготовления.

2.5.8. Индукционные печи

Индукционные печи (ИП) находят широкое применение в металлургии и машиностроении. От дуговых печей они отличаются источниками нагрева металла до жидкого состояния, конструктивными и технологическими особенностями процессов. По сравнению с ДСП ИП занимают меньше пространства, при плавке на 15 % меньше пыли, потери металла на испарение — 1 % (в ДСП из-за испарения в дуге 5 %), ниже уровень шума. Эффективность использования линий электропередачи и трансформаторов для ИП — 92 %, для ДСП 70 %.

К недостаткам ИП относятся необходимость особого отбора и подготовки лома, низкая стойкость футеровки, а также плохо перемешиваемый шлак, который не позволяет так же интенсивно, как в дуговых печах, проводить процессы рафинирования.

Основной тип современных ИП — это печи без сердечника. Такая печь состоит из индуктора-катушки, навитой из медной трубки с водяным охлаждением. Внутрь индуктора вставляется либо готовый огнеупорный тигель, либо тигель набивается порошкообразными огнеупорными материалами. При наложении на индуктор переменного электрического тока образуется переменное магнитное поле, пронизывающее пространство внутри индуктора. Это магнитное поле наводит в металлической садке, находящейся в тигле, вихревые токи индукции. Появление токов сопровождается выделением тепла, которое нагревает и расплавляет металл.

Конструктивно печи выполняют открытыми для плавки на воздухе и закрытыми для выплавки стали и сплавов в вакууме. Источниками тока высокой частоты служат магнитные генераторы с частотой тока от 50 до 10 000 Гц.

Технология плавки стали в индукционной печи

Плавку производят на высококачественном ломе с пониженным содержанием фосфора и серы. Крупные и мелкие куски так

укладывают в тигель или бадью, с помощью которой загружают крупные печи, чтобы куски плотно заполняли объем тигля. Тугоплавкие ферросплавы укладывают на дно тигля. После загрузки включают ток на полную мощность. По мере проплавления и оседания скрапа подгружают шихту, не вошедшую сразу в тигель. После окончательной загрузки шихты на поверхность металла забрасывают шлакообразующие материалы.

В ходе плавки шлак раскисляют добавками порошка кокса, ферросилиция, металл — кусковыми ферросплавами и в конце плавки алюминием. Так как угара легирующих элементов практически не происходит, в ИП можно выплавлять сплавы сложного состава.

2.5.9. Специальные методы электрометаллургии

Плазменная плавка

Эффективным методом выплавки высококачественных сталей является плазменно-дуговая плавка с помощью электрической плазмы (ионизированного газа). Основным узлом в плазменно-дуговой печи является плазмотрон, состоящий из двух соосно расположенных электродов. Внутренний электрод имеет форму сопла (рис. 41). При постоянном токе внутренний электрод служит катодом, а сопло — анодом. Поток газа подается в камеру плазмотрона через сопло, выдувает дугу, которая направляется на металл. Электрический разряд между катодом и анодом ионизирует газ с образованием низкотемпературной плазмы с температурой до 30 000 К. В виде факела нагретый газ с большой скоростью вырывается из сопла.

В качестве плазмообразующих газов используют двухатомные газы с высокой теплопроводностью: аргон, гелий, водород, азот, а также водяной пар. Плазменный нагрев применяется в печах с огнеупорной футеровкой (рис. 42) и с медным водоохлаждаемым кристаллизатором (рис. 43).

Форма печи с огнеупорной футеровкой внешним видом напоминает дуговую печь, но отличие в том, что она полностью закрыта. Плазмотрон в печь входит через свод, а загрузочное окно и сливной носок имеют заслонки. Катодом служит верхний

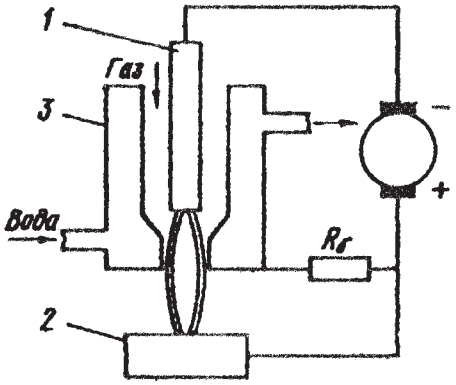


Рис. 41. Схема плазматрона с независимой дугой:
1 — внутренний стержневой электрод-катод; *2* — нагреваемый металл; *3* — внешний кольцевой электрод-анод (сопло)

водоохлаждаемый электрод, а анодом — ванна. В подину печи заделан электрод, имеющий контакт с жидким металлом.

Дуга в плазменной печи горит стабильно без коротких замыканий и толчков тока. Плазменно-дуговые печи с огнеупорной футеровкой работают бесшумно, практически без пыле- и газовыделений, их емкость — 1—30 т.

Особенности другой разновидности плазменно-дугового переплава заключаются в следующем. Заготовка подается в камеру печи специальным механизмом и расплавляется двумя плазмотронами. Процесс наплавле-

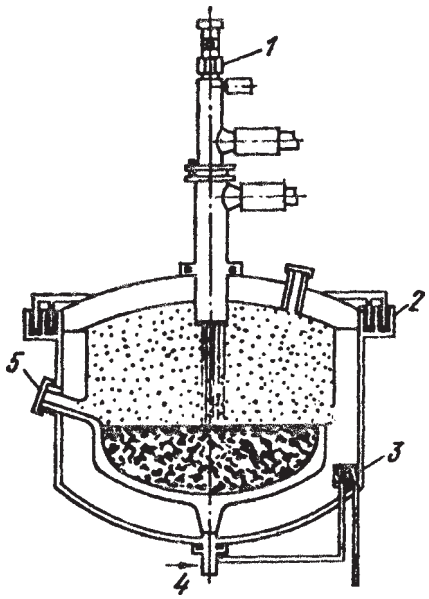


Рис. 42. Схема плазменно-дуговой печи с огнеупорной футеровкой:
1 — плазматрон; *2* — песочный затвор; *3* — индукционные катушки для перемешивания металла; *4* — подовый электрод; *5* — разливочный носок

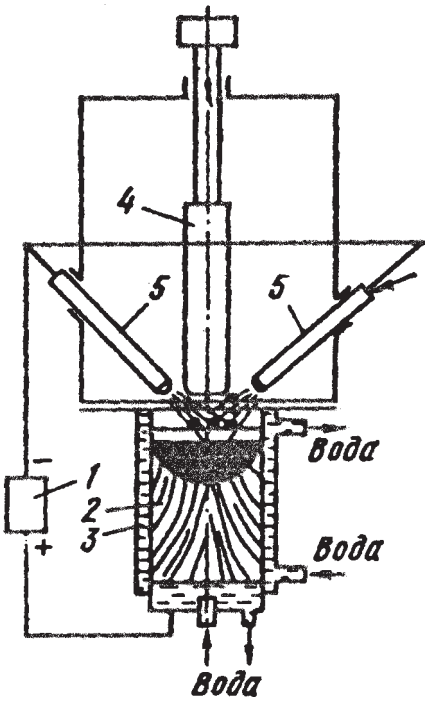


Рис. 43. Схема плазменно-дугового переплава:
1 — источник питания; *2* — слиток; *3* — кристаллизатор; *4* — заготовка; *5* — плазматроны

ния идет непрерывно, так как металл стекает в кристаллизатор и по мере наплавления вытягивается из него. В таких печах могут переплавляться как целые штанги, так и заготовки, набранные из прутков, мелкого профиля, листовых отходов проката. Слитки, полученные в плазменно-дуговых печах, имеют высокое качество поверхности и пониженное содержание неметалличес-ких включений и газов.

Электрошлаковый переплав

В 1952 г. в Киеве в Институте электросварки им. Е.О. Патона был выплавлен первый в мире электрошлаковый слиток с уникальными свойствами. Новое тогда физическое явление — электрошлаковый процесс — впоследствии сыграл огромную роль в металлургии и машиностроении. Главное преимущество электрошлакового переплава (ЭШП) по сравнению с вакуумно-дуговым (ВДП), вакуумно-индукционным (ВИП), плазменно-дуговым (ПДП), электронно-лучевым (ЭЛП) переплавами и другими переплавными процессами — это простота и надежность оборудования для его реализации, высокая универсальность и эффективность технологии.

Особенность ЭШП в том, что это бездуговой процесс, а расходуемый электрод переплавляют в водоохлаждаемом кристаллизаторе под слоем шлака. На рис. 44 показана принципиальная схема установки ЭШП. Нагрев жидкого электропроводного шлака до 2000 °С при прохождении тока обеспечивает плавление погруженного в него электрода.

Установка ЭШП состоит из колонны, по которой перемещается каретка с электродержателем и электродом. При помощи электродвигателя и регулятора производится автоматическое перемещение электрода по мере его сплавления. Напря-

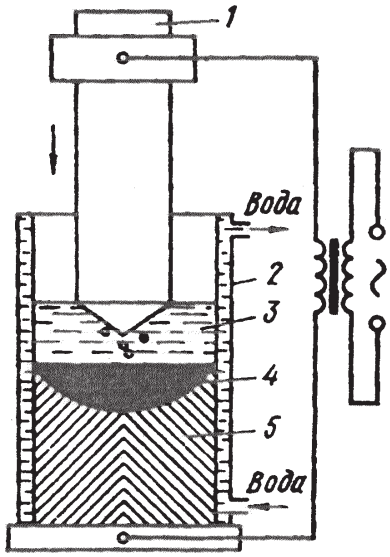


Рис. 44. Схема электрошлакового переплава:
1 — расходуемый электрод;
2 — кристаллизатор;
3 — расплавленный шлак;
4 — ванна металла;
5 — слиток

жение на электрод и к поддону кристаллизатора подается кабелями и шинами.

В начале плавки на поддон кристаллизатора заливают жидкий шлак, который готовят в специальной шлакоплавильной электропечи. Электрод опускают вниз до погружения в шлак и включают ток. Электрод плавится, и в кристаллизаторе образуется слиток. После окончания плавки, когда весь металл в кристаллизаторе затвердеет, поддон кристаллизатора опускают вниз вместе со слитком, который снимают краном. Расходуемый электрод для ЭШП может иметь круглое или квадратное сечение; его получают различными способами: отливкой в специальные высокие изложницы, прокаткой, ковкой.

ЭШП — рафинирующий переплав: после него снижается содержание неметаллических включений в 2—2,5 раза и серы до 0,001 %, последовательная снизу вверх кристаллизация способствует формированию плотного литого металла с высокой химической и структурной однородностью.

Методом ЭШП получают стали для дисков и лопаток газотурбинных авиационных двигателей, газовых турбин, электро- и парогенераторов, прокатных валков и других деталей различного оборудования, работающих в сложных условиях.

Электрошлаковая технология — перспективный, постоянно развивающийся процесс, различные варианты которого предоставляют все новые возможности улучшения структуры и качества заготовок различного назначения. Например, электрошлаковое литье (ЭШЛ) и его разновидности (центробежное электрошлаковое и электрошлаковое кокильное литье) являются высокоэффективными и металлосберегающими методами заготовительного производства. В 1998 г. на Украине (г. Краматорск) создан первый в мире комплекс для производства методом ЭШН ЖПМ (электрошлаковое наплавление с жидким присадочным материалом) заготовок прокатных валков диаметром до 1000 мм, длиной до 2500 мм и массой до 20 т и изготовлена по новой технологии партия валков. Применение жидкого присадочного металла в комбинации с подачей в металлическую ванну кусковых присадочных материалов также открывает новые возможности в управлении формированием макроструктуры и свойств наплавленного металла.

В тяжелом машиностроении ЭШЛ применяется при изготовлении заготовок штампов горячей и холодной штамповки, цапф и подцапфовых плит для крупных сталеразливочных ковшей, валков горячей и холодной прокатки, бандажей валков и цементных печей, коленчатых валов, металлургического инструмента, например калибров к станам холодной прокатки труб, а также при изготовлении сварных баллонов высокого давления.

Все новые агрегаты ЭШП оснащены компьютерами, снабжены системами автоматического управления. Автоматизированная система управления технологическим процессом ЭШП (АСУ ТП ЭШП) обеспечивает контроль параметров агрегатов и управление процессом, воздействуя на исполнительные механизмы печей. Ее основой является математическая модель, действующая в реальном масштабе времени, разработанная на базе экспериментальных и теоретических исследований. В России такая система действует, например, на одном из ведущих предприятий по производству металлопродукции из качественных сталей ОАО “Ижсталь”.

Сдерживает широкое развитие ЭШП, во-первых, его высокая стоимость из-за дороговизны расходуемых электродов независимо от способа их производства: прокат, ковка, прессование, непрерывное литье или литье в изложницу; во-вторых, высокая энергоемкость самого переплава расходуемых электродов.

В 90-е гг. XX в. получил развитие и промышленное применение способ ДШП (дугошлаковый переплав), особенно для производства высокоазотистых сталей и сплавов. По сравнению с ЭШП метод ДШП позволяет в полтора раза снизить расход электроэнергии и почти в два раза уменьшить расход синтетического флюса. По качеству металл ДШП уступает металлу ЭШП.

ДШП в азотсодержащей атмосфере совмещает в себе три технологических процесса: плавление электрода дугой, легирование металла азотом непосредственно из газовой фазы и обработка металла шлаком с формированием слитка в шлаковом гарнисаже. Процесс может осуществляться как на постоянном, так и на переменном токе. Высокая химическая однородность и низкое содержание вредных примесей, присущие сталям ДШП, определяют изотропность механических свойств проката и стойкость к трещинам при сварке.

В последнее время выявились и новые перспективные области использования ЭШП и ДШП. Так, проведенные научно-исследовательские работы доказали эффективность применения указанных методов для утилизации артиллерийских стволов танковых пушек.

Вакуумная металлургия

Постоянное развитие и совершенствование атомной энергетики, авиации, космической техники, радиоэлектроники, вычислительной техники, точного машиностроения требует производства чистых металлов, жаропрочных сплавов, высококачественных сталей. Такие материалы должны содержать минимальное количество кислорода, водорода, азота, серы, фосфора, примесей цветных металлов, неметаллических включений, а обычными способами их получить невозможно. Поэтому их производят в специальных печах, работающих при пониженном давлении (в вакууме). Вакуумная обработка позволяет получать не только более чистый металл, но и изменяет технологию обычного процесса. Существуют две области вакуумной металлургии: печная и внепечная. Вопросы использования вакуума при внепечной обработке были рассмотрены ранее. При плавке в вакууме газы, растворенные в металле, примеси цветных металлов, обладающие высокой упругостью пара, выделяются. В результате содержание примесей снижается до нескольких десятитысячных долей процента.

Вакуумная индукционная плавка. Вакуумная индукционная печь (ВИП) представляет собой высокочастотную печь, помещенную в герметичный корпус, из которого при помощи вакуумных насосов откачиваются газы. Вместимость вакуумных печей — от нескольких килограммов до 30 т. Преимущества ВИП по сравнению с другими установками подобного назначения следующие:

1) металл в вакууме можно выдерживать длительное время, поэтому металл подвергается глубокой дегазации, раскислению, очищению от неметаллических включений и примесей цветных металлов;

2) выплавляются любые сложные по химическому составу сплавы из самых разных шихтовых материалов;

3) печи пригодны для отливки крупных слитков массой в несколько тонн и для литья мелких фасонных изделий.

Недостатком ВИП является возможность загрязнения жидкого металла из-за контакта с огнеупорной футеровкой тигля, снижающая эффективность рафинирования металла.

Плавильный процесс в ВИП может быть периодическим (с открыванием печи после каждой плавки) и полунепрерывным. Схема подобной установки показана на рис. 45. Плавильная камера с размещенной в ней печью отделена от камеры изложниц и шихты шлюзовыми устройствами с вакуумными затворами.

Камера изложниц или литейных форм закрывается снаружи, и из нее откачивается воздух. Когда давление в ней и в печи уравнивается, открывают соединяющий их затвор и изложницы подают в печь для заполнения металлом. После заливки их выводят из камеры печи в камеру изложниц и напускают воздух,

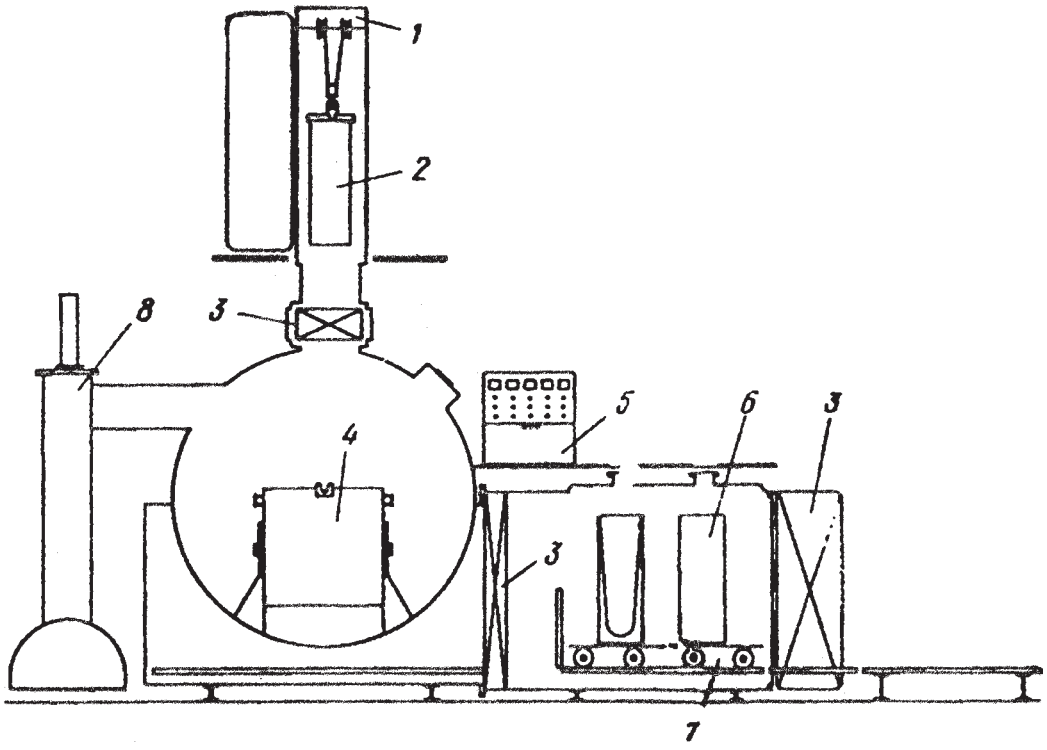


Рис. 45. Схема вакуумной индукционной печи полунепрерывного действия:
1 — подвеска загрузочной корзины; *2* — загрузочная корзина; *3* — шиберный затвор; *4* — печь; *5* — пульт управления; *6* — изложницы; *7* — тележка; *8* — вакуумные насосы

предварительно закрыв соединяющий затвор. Открывают камеру изложниц и убирают заполненные формы, взамен устанавливают пустые, и цикл повторяется. Все это время камера печи остается под низким давлением.

Принцип действия камеры загрузки такой же. В ней на тросе подвешивается бадья с порцией шихты. Затем камеру закрывают, откачивают воздух и открывают шибер, отделяющий эту камеру от печной. Затем опускают бадью в печь и загружают тигель. Пустую бадью поднимают, закрывают затвор и напускают в камеру загрузки воздух. Вместо пустой бадьи ставят бадью с шихтой. Печь работает без открывания плавильной камеры до тех пор, пока позволяет стойкость огнеупорной футеровки (в среднем 20–40 плавок). Для смены тигля печь открывают и отсоединяют индуктор с тиглем от токо- и водоподводов. Вместо использованного тигля устанавливают сменный индуктор со свеженабитым или выложенным из кирпича тиглем. После закрывания камеры и откачки воздуха печь снова готова к работе. Полунепрерывный процесс имеет более высокую производительность, чем периодический.

Вакуумные дуговые печи. Для изготовления крупных слитков (массой в несколько десятков тонн) из нержавеющих, высокопрочных и других сталей применяют вакуумные дуговые печи (ВДП). Они бывают с расходуемым и нерасходуемым (вольфрамовым) электродом. Наплавление слитка в медный водоохлаждаемый кристаллизатор производится с помощью электрической дуги.

Для получения металла особо высокой степени чистоты проводят двойной переплав, или дуплекс-плавку: сначала в ВИП, затем в ВДП. ВДП имеют следующие преимущества:

1) однородность получаемой кристаллической структуры слитка;

2) исключение неравномерности распределения элементов по сечению слитка (сегрегация);

3) отсутствие усадочной раковины и других дефектов, характерных для слитков, отлитых в обычные изложницы.

Недостатки этих печей в том, что переплавляется готовая заготовка заданного состава, невозможно легирование по ходу плавки.

Электронно-лучевые печи (ЭЛП). Принцип нагрева металла в этих установках заключается в бомбардировке нагреваемого объекта электронным пучком высокой энергии. Наплавление металла производится в водоохлаждаемый медный кристаллизатор. Плавку ведут в глубоком вакууме (10^{-2}—10^{-3} Па). ЭЛП применяют для выплавки особо чистых металлов (тугоплавких — Mo, W и др.), сталей и сплавов. Высокая степень рафинирования металла при высокой температуре, отсутствие огнеупорной футеровки, возможность переплава активных и тугоплавких металлов определяют преимущества этих печей. Основные недостатки: сложность и высокая стоимость установок, большой расход электроэнергии.

ЭЛП состоит из камеры, внутри которой расположен либо медный водоохлаждаемый кристаллизатор с устройством для вытягивания слитка, либо медная водоохлаждаемая чаша — тигель для плавки в гарнисаже. Разливка осуществляется наклоном чаши. Заготовку круглого или квадратного сечения подают в печь сверху

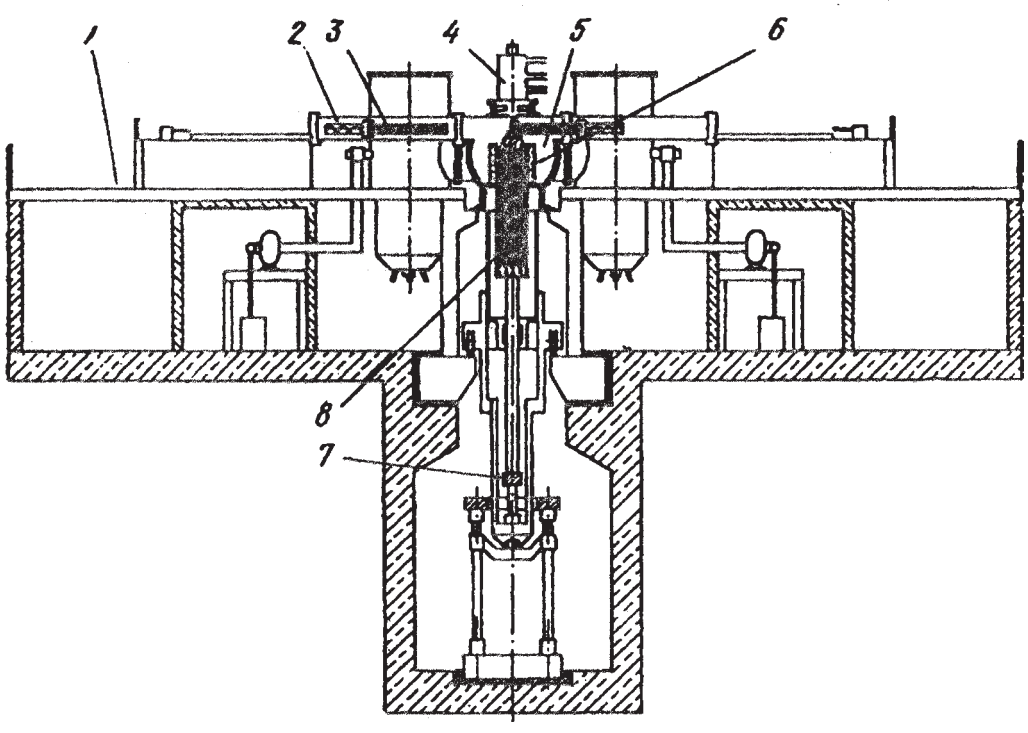


Рис. 46. Схема электронно-лучевой печи ЕМО-1200:
1 — рабочая плита; *2* — шибера; *3* — заготовка;
4 — электронная пушка; *5* — вакуумная камера; *6* — кристаллизатор;
7 — механизм вытягивания слитка; *8* — слиток

по оси кристаллизатора либо сбоку горизонтально. На рис. 46 представлена схема крупнейшей в мире печи ЕМО-1200 с пушкой мощностью до 1700 Вт. В этой печи можно выплавлять слитки массой до 11 т. Камера печи имеет два боковых шлюза, через которые производится подача заготовки массой до 1 т. Электронный пучок имеет программированное синусоидальное отклонение по поверхности ванны. Расход электроэнергии 900 кВт·ч/т, годовая производительность печи до 4000 т.

Электронно-лучевой переплав используют для производства слитков специальных сталей, предназначенных для изготовления особо важных изделий, работающих в тяжелых условиях.

2.5.10. Классификация стали

В нашей стране сталь классифицируется в соответствии с государственными стандартами (ГОСТ) и техническими условиями (ТУ). Стали классифицируют по химическому составу, назначению, качеству, структуре, способу производства и сортаменту. Два основных классификационных признака — химический состав и основные свойства (показатели назначения продукции) лежат в основе терминов и определений, относящихся к наименованию сталей. В качестве дополнительных признаков используются: область применения, технология, структура и др. В зависимости от числа общих отличительных признаков стали делятся на классы (один общий признак), подклассы (два) и группы (три и более); если необходима более детальная классификация, вводятся подгруппы.

По способу производства различают конверторную, мартеновскую стали и электросталь.

По назначению различают конструкционные, инструментальные, стали со специальными физическими и химическими свойствами.

Конструкционные стали применяют для изготовления строительных конструкций, деталей машин и механизмов, судовых и вагонных корпусов, паровых котлов и других изделий. Конструкционные стали могут быть как углеродистыми, так и легированными. По названию некоторых конструкционных сталей мож-

но судить об их назначении (котельная, судостроительная, клапанная, рессорно-пружинная, строительная и т. д.).

Многие технологические процессы современной техники основаны на вибрационных колебаниях, помогающих бурить нефтяные скважины, обрабатывать металлические изделия и заготовки, транспортировать сыпучие материалы. Детали вибрационного оборудования, работающие в особенно тяжелых условиях, разрушаются и требуют частой замены. Специалисты одной из японских компаний нашли оригинальное решение проблемы: создана сталь, способная преобразовать энергию вибрации в теплоту. Деталям, изготовленным из такой стали, никакая тряска не страшна, так как они не только поглощают вибрацию, но и гасят возникающие при этом резонансные колебания.

Инструментальные стали служат для изготовления различных инструментов, резцов, фрез, пил, штампов, калибров и другого режущего ударно-штампового и мерительного инструмента. Эти стали легируют хромом, вольфрамом, молибденом, ванадием и другими элементами. Среди инструментальных сталей широкое распространение получили быстрорежущие стали.

По химическому составу стали классифицируют на углеродистые и легированные. В зависимости от содержания углерода различают *низкоуглеродистые* (менее 0,25 % С), *среднеуглеродистые* (0,25–0,6 % С) и *высокоуглеродистые* (более 0,6 % С).

Легированные стали в зависимости от входящих в них элементов подразделяют на хромистые, марганцовистые, хромомарганцовистые, хромомолибденванадиевые и т. п. Количество введенных элементов определяет степень легирования: низколегированные, среднелегированные и высоколегированные стали.

В 1883 г. Роберт Гадфильд запатентовал марганцовистую сталь, которая обладала необыкновенными свойствами. Пытались закаливать эту сталь в различных средах, но тщетно — она оставалась мягкой. Когда ее подвергали холодной ковке, то участки, на которые приходились удары молота, становились твердыми, и чем больше была степень деформации, тем тверже становилась сталь. При обработке напильником наблюдалось аналогичное явление. Сопро-

тивление металла под напильником росло по мере надавливания: чем сильнее был нажим, тем больше сопротивление. Это был идеальный материал для сейфов, предохранительных решеток, высоконагружаемых деталей машин и подверженных усиленному износу механизмов. И вряд ли кто сегодня вспомнит изобретателя марганцовистой стали, когда, например, едет в трамвае, а тот со скрежетом и визгом проходит по стрелкам или круто поворачивает.

Таблица 21

Классификация сталей по содержанию в них микроэлементов (Cu+Mo+Sn+Cr)

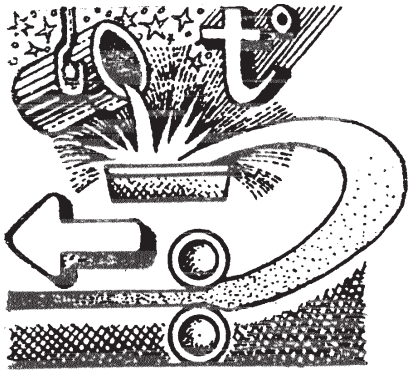
Класс	Содержание Cu+Mo+Sn+Cr, мас. %	Области применения
0	0,033	Авиационная промышленность, атомная энергетика, специальная нефтяная арматура, специальные подшипники, электроды для ЭШП
1	0,090	Стали высокопрочные, для сверхглубокой вытяжки, мартенситно-стареющие, тонкая проволока, подшипники, белая жесть для вытяжки
2	0,280	Стали для глубокой вытяжки, холодной вытяжки, глубокой высадки, штамповки, заготовки для бесшовных труб
3	0,335	Сортовой прокат стали для автомобилестроения, штрипсовая сталь, резервуары высокого давления
4	0,390	Трубы массового назначения, белая и черная жесть, холоднокатаная калиброванная сталь, колесная сталь, оцинкованный и эмалированный листы
5	0,600	Толстая проволока, крупный сортовой прокат, сталь для фасонных профилей, горячекатаные рулонные стали
6	0,800	Арматурные и строительные стали
7	Более 0,800	Остальной сортамент

По качеству стали классифицируют на рядовые, или обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные. Под качеством стали понимают совокупность свойств, определяемых металлургическим процессом ее производства, при этом основным показателем для разделения сталей по качеству служит содержание в них вредных примесей.

Стали обыкновенного качества выплавляют только углеродистыми, качественные и высококачественные — углеродистыми и легированными, особо высококачественные — легированными. Например, по содержанию серы и фосфора они отличаются следующим образом. Стали обыкновенного качества содержат S и P менее 0,055–0,06 %; качественные — менее 0,04–0,045 %; высококачественные — менее 0,02–0,03 % и даже меньше (до 0,005 %).

В 1999 г. в странах Европейского сообщества утверждена классификация сталей по содержанию в них основных микропримесных элементов: Cu, Mo, Sn и Cr (табл. 21). В связи с этим ожидается, что конкурентоспособными окажутся те предприятия, на которых будет осуществляться полный контроль поведения микроэлементов в исходных шихтовых материалах и по всему циклу металлургических переделов.

Классификационная группа характеризует область применения, свойства металла, его надежность в работе, стоимость и другие параметры.



3. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Должность металлургии тут кончается,
когда она поставит чистые металлы
или полуметаллы в дело годные.

М.В. Ломоносов

Егору Кузнецову — крепостному горнозаводчиков и землевладельцев Демидовых — пришла мысль приспособить "плющильную машину" не для выравнивания "дощатого" железа, а для его получения, т. е. прокатки. Не зная грамоты, не умея чертить и читать чертежи, Кузнецов сумел тем не менее изготовить нужные валки и саму машину "для приготовления листового железа". Первые образцы прокатного металла были посланы "на досмотр" в Москву Демидову. Одобрив в целом идею прокатки, Демидов требовал подвергнуть рабочие валки обточке и тщательной отшлифовке. Критика сверху была учтена, и в 1766 г. первый в России листопрокатный стан начал выпускать свою продукцию.

3.1. ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Процесс обработки металла давлением (ОМД) — это придание материалу требуемой формы, размеров и физико-механических свойств без нарушения его сплошности путем пластической деформации. Пластичность металлов и сплавов зависит не только от их химического состава, структуры, но и условий, при которых происходит деформация: температуры, скорости и сте-

пени деформации. Технические процессы ОМД производятся в горячем и холодном состоянии.

При нагреве металла его способность к пластической деформации увеличивается, а сопротивление деформации падает, поэтому процессы горячей обработки менее трудо- и энергоемкие. В то же время качество поверхности изделий, полученных горячей обработкой, хуже, так как образуется окалина, и меньше точность геометрических размеров по сравнению с изделиями, полученными холодной обработкой.

Металлы являются кристаллическими телами. При затвердевании жидкого металла сначала образуются кристаллы с правильным расположением атомов в пространственной решетке. В дальнейшем правильная форма кристаллов нарушается в результате их взаимного воздействия. Кристаллы с неправильной формой называются зернами, или кристаллитами.

Опыты показывают, что металл чаще разрушается не по границам зерен, а по самим зернам — по плоскостям скольжения кристаллов. Установлено, что для металлов и их сплавов основным механизмом пластической деформации является **скольжение** — сдвиг одной части кристалла относительно другой под действием касательных напряжений. Плоскости, по которым происходит скольжение, и называют **плоскостями скольжения**.

Скольжение в металлах нельзя рассматривать как одновременный сдвиг одной части кристалла относительно другой по всей плоскости скольжения из-за нарушений (несовершенств) строения кристаллической решетки. Такие несовершенства (дефекты) могут быть точечными или линейными. Точечные образуются в результате выхода атомов из узлов решетки с образованием пустых мест, называемых **вакансиями**. Линейные же дефекты, в отличие от точечных, распространяются на значительную длину. Их принято называть **дислокациями**.

Дислокации бывают двух видов: краевые (линейные) и винтовые. Краевая дислокация образуется в результате вторжения в кристаллические решетки дополнительной атомной полуплоскости (рис. 47,*а*), именуемой экстраплоскостью. За счет этого число атомов над плоскостью *AB* становится на один больше, чем под ней. Лишняя по сравнению с идеальной решеткой плоскость вызывает искажения — сжатие или растяжение решет-

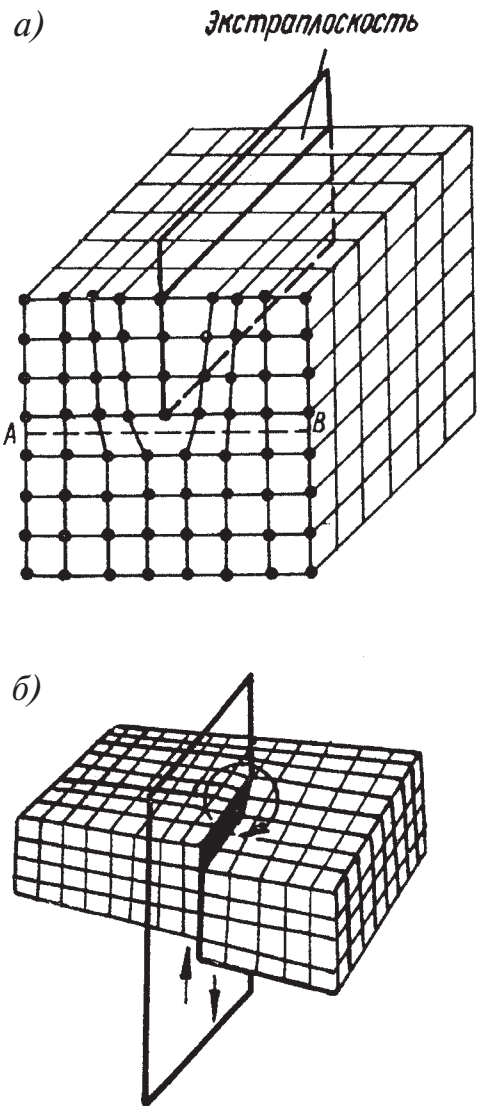


Рис. 47. Дислокация в кристаллической решетке (схемы): *а* — краевая; *б* — винтовая

ки. Край экстраплоскости называют линией дислокации. Дислокации могут быть положительными или отрицательными в зависимости от расположения экстраплоскостей.

Винтовая дислокация (рис. 47,*б*) является более сложным несовершенством, чем краевая часть кристаллической решетки на некотором расстоянии оказывается сдвинутой на один параметр решетки относительно другой. При винтовой дислокации лишней атомной плоскости нет.

Дислокации образуются при кристаллизации металла, его пластической деформации и термической обработке. Они могут взаимодействовать между собой: дислокации одного знака отталкиваются, а разных — притягиваются друг к другу. При взаимодействии дислокаций противоположных знаков может происходить слияние экстраплоскостей и полное их устранение.

Количество дислокаций достигает 10^6—10^{12} на 1 см^2 поверхности металла в зависимости от его состояния. Основными свойствами дислокации являются способность их к перемещению под действием небольших усилий, способность к размножению и торможению. Дислокации тормозятся, встречая препятствия в виде примесных атомов или же дислокаций другого направления. Для дальнейшего их продвижения необходимо дополнительное усилие. Поэтому при увеличении плотности дислокаций и наличии атомов другого типа в кристаллической решетке прочность металла также будет возрастать.

При пластической деформации металлов происходит движение имеющихся дислокаций и образование новых, увеличивает-

ся их плотность. Таким образом, пластическое деформирование металла приводит к повышению его прочности. Это явление называется **наклепом**, или **нагартовкой**.

Методами пластической деформации получают заготовки из стали, чугуна, цветных металлов, пластмасс, резины и др. Широкое распространение ОМД объясняется высокой производительностью процессов и высоким качеством изделий. ОМД включает в себя прокатку, ковку, штамповку, прессование и волочение.

3.2. СХЕМА И СУЩНОСТЬ ПРОКАТКИ

Прокатка является наиболее распространенным способом ОМД благодаря хорошим экономическим показателям, непрерывности и поточности процесса, высокой производительности агрегатов и возможности получения изделий самой разнообразной формы и улучшенного качества.

Сущность процесса прокатки заключается в деформировании металла (заготовки) путем обжатия его между вращающимися валками прокатного стана, в результате чего происходит изменение формы заготовки.

Первые прокатные станы появились в средние века. Вначале на них обрабатывались цветные металлы, как более мягкие и податливые. Эти станы приводили в действие вручную и только в конце XIV в. начали применять "водные двигатели" (металлурги издревле использовали воду как двигательную силу, поэтому и строили металлургические и обрабатывающие заводы вблизи водоемов). На этих более мощных станах уже можно было прокатывать и железо (вторая половина XVI в.). В 1783 г. Генри Корт предложил способ обработки железа прокаткой. Начало прокатки тяжелых полос в Англии относят к 1795–1800 гг. Первые катаные железнодорожные рельсы появились в 1825 г. Первые машины для привода прокатных станов начали использовать во второй половине XIX в., а электропривод — в XX в. С появлением паровых машин резко увеличился спрос на фасонные профили, что стимулировало появление катаного углового и таврового железа.

Сортаментом прокатной стали называется совокупность профилей (форм поперечных сечений) и размеров металла, которые можно получить в результате прокатки его на станах.

Сортамент прокатной продукции делится на пять групп.

1. Сортовой прокат простого и сложного профилей.
2. Листовой прокат (тонколистовой и толстолистовой).
3. Трубный прокат (бесшовные и сварочные трубы).
4. Периодический прокат.
5. Специальный прокат.

Качественная характеристика проката различна и определяется по химическому составу, механическим свойствам, применению и назначению дальнейшей обработки. В зависимости от исходного материала на металлургических заводах применяют две схемы проката (рис. 48). При использовании в качестве исходного материала слитков *1* в технологической схеме предусматривается участок нагревательных колодцев и обжимного стана — блюминга или слябинга *2*, *3*. При использовании в качестве исходного

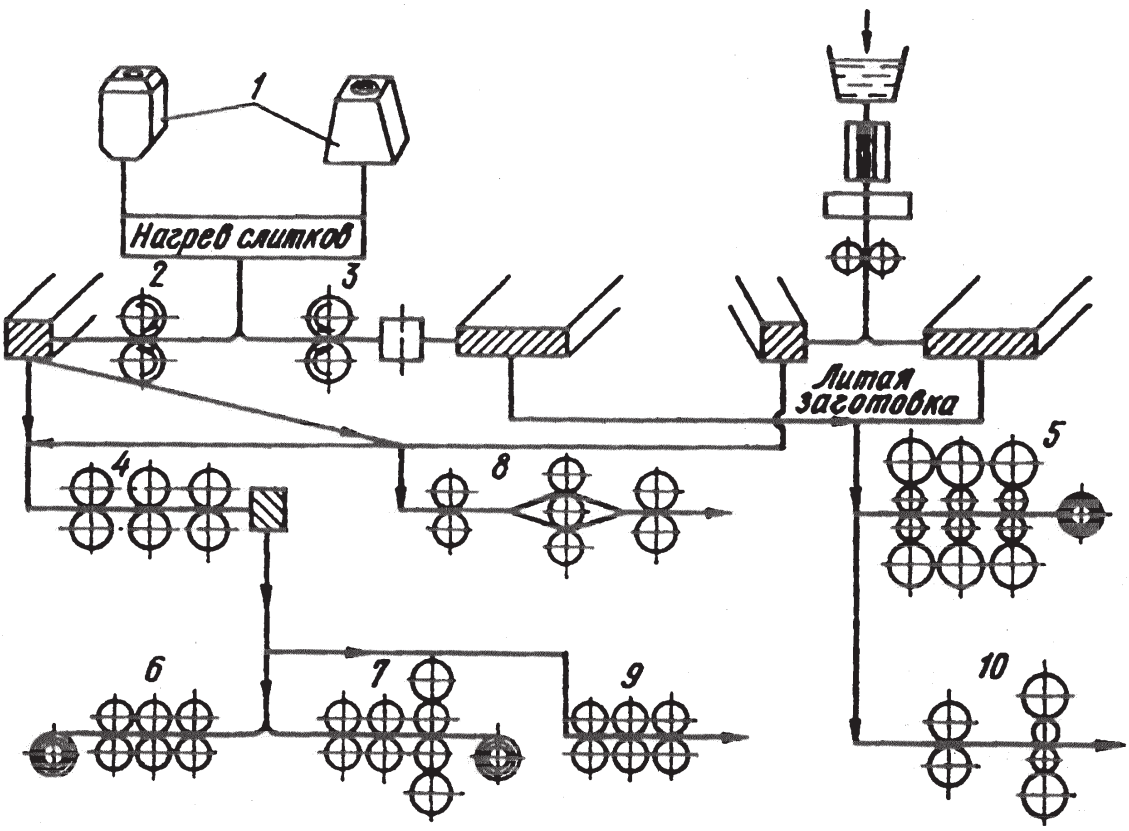


Рис. 48. Схема производства проката

материала блюмов или слябов технологический процесс начинается с заготовочных станов — непрерывного заготовочного стана *4* при сортовой прокатке или широкополосного стана горячей прокатки *5* при листовой прокатке. Последующие технологические операции получения проката одинаковы для обеих схем.

При производстве сортового проката заготовка поступает на крупносортные и среднесортные *9* станы, мелкосортные, проволочные *6* и штрипсовые *7* станы. Непосредственно из блюмов производится прокатка на рельсобалочных и крупносортных станах *8*. При листовом производстве заготовка поступает на одно- и многоклетьевые станы холодной прокатки *10*. На толстолистовых станах в качестве исходного материала используют слитки и слябы.

Способы прокатки. При основном способе — **продольной прокатке** — толщина заготовки уменьшается, а длина и ширина увеличиваются.

Способом **поперечной прокатки** можно получить зубчатые колеса, звездочки цепных передач и другие специальные и периодические профили.

При **поперечно-винтовой прокатке** оси валков располагают под некоторым углом, что обеспечивает вращающейся заготовке перемещение вдоль своей оси. Этот метод применяют для получения бесшовных труб, осей, шаров и других изделий.

Плоской прокаткой изготовливают листы, ленту, фольгу, полосы, плиты, рамы и другие изделия. Листы прокатывают толщиной 0,3–0,5 мм, шириной 500–3000 мм и длиной до 6000 мм.

Сортовая прокатка в основном является заготовительным переделом для последующего процесса волочения, и лишь в виде редкого исключения часть катаных круглых прутков идет непосредственно потребителю для обработки на различные детали. Помимо круглой катанки сортовой прокаткой изготавливают заготовку для волочения прямоугольной полосы для двигателей, генераторов и коллекторов динамо-машин.

3.3. ТИПЫ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Прокатные станы классифицируют по назначению выпускаемой продукции, конструкции рабочих клетей и способу приведения валков во вращение, расположению рабочих клетей, а также по техническому уровню.

По назначению выпускаемой продукции прокатные станы разделяют на следующие типы: блюминги, слябинги, заготовочные, непрерывные заготовочные, трубозаготовочные, сутуночные, рельсобалочные, крупносортные, среднесортные, мелкосортные, штрипсовые, проволочные, толстолистовые, среднелистовые, тонколистовые, широкополосные, универсальные, полосовые, бандажепрокатные, колесопрокатные, кольцепрокатные, периодической прокатки, осепрокатные, шаропрокатные, деталепрокатные, холодной прокатки, по производству гнутых профилей.

В зависимости от *конструкции и способа приведения валков во вращение* рабочие клети прокатных станов можно разделить на восемь групп.

1. Клети дуо с верхним холостым валком; оба валка приводные, реверсивные, двойное и переменное дуо (рис. 49,*а,б,в*).

2. Клети трио: листовое и сортовое дуо (рис. 49,*г,д*).

3. Клети кварто: листовое и для прокатки рулонов (рис. 49,*е*).

4. Клети шестивалковые: листовые и для прокатки рулонов (рис. 49,*ж*).

5. Многовалковые клети: двенадцативалковые и двадцативалковые (рис. 49,*з*).

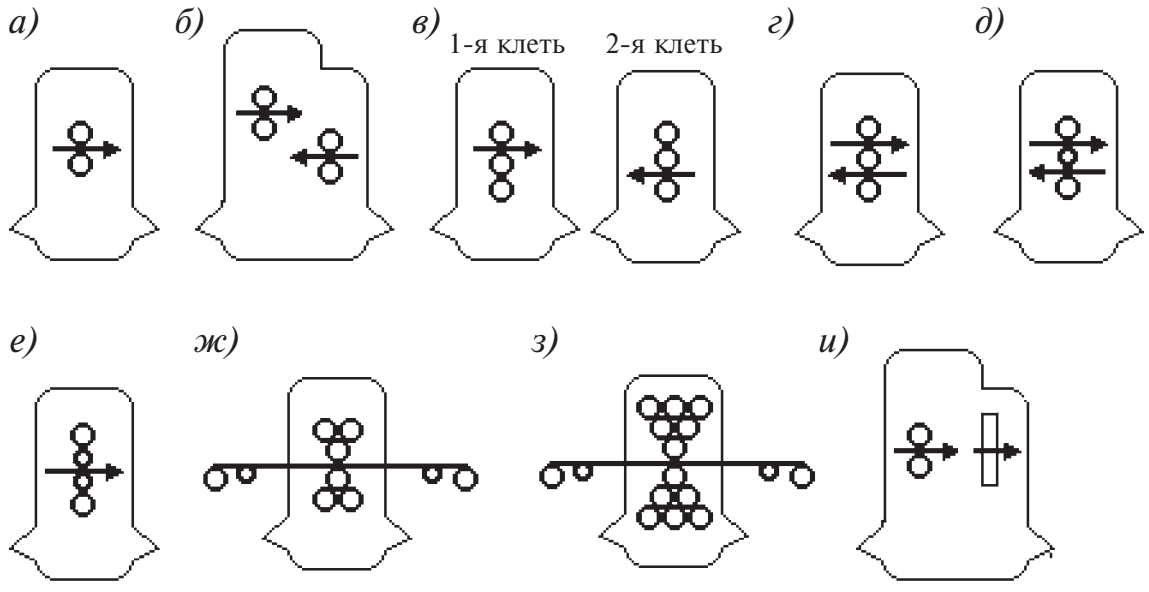


Рис. 49. Виды рабочих клетей прокатных станов:
а — дуо; *б* — двойное дуо; *в* — переменное дуо; *г* — трио сортовое; *д* — трио листовое; *е* — кварто; *ж* — шестивалковая реверсивная; *з* — двенадцативалковая; *и* — универсальное дуо

6. Универсальные клети: дуо, трио, кварто и балочные (рис. 49,*и*).

7. Клети специальной конструкции: колесопрокатные, бандажепрокатные, кольцепрокатные, шаропрокатные.

8. Моноблоки.

По расположению рабочих клетей (с точки зрения большей или меньшей дифференциации процессов прокатки) все прокатные станы могут быть разделены на шесть групп.

1. Одноклетьевые станы: одноклетьевые блюминги, слябинги, обжимные, заготовочные и листовые станы (дуо, трио, кварто).

2. Однолинейные станы, когда рабочие клети расположены в одну линию. Станы этого типа наиболее старые, возникли преимущественно как сортовые в то время, когда потребность в прокате была небольшой.

3. Станы ступенчатого типа. Число линий колеблется от двух до четырех. Нижняя граница характерна для станов, выпускающих крупные профили, верхняя — для проволочных станов (обжимная черновая и две чистовые линии).

4. Станы с двумя или тремя последовательно расположенными клетями, допускающие несколько проходов в отдельных клетях. К этой группе относятся двухклетьевые блюминги и листовые станы. Они появились в результате развития прокатных станов первой группы.

5. Станы с последовательным расположением рабочих клетей, в каждой из которых осуществляется только один проход. Станы этой группы могут быть разбиты на три подгруппы:

станы последовательно-возвратные, процесс прокатки в них осуществляется с интервалом, в течение которого полоса перемещается от одной клети к следующей;

станы полунепрерывные сортовые, прокатка осуществляется в отдельных группах клетей, расположенных последовательно (в каждой клети находится только одна полоса) и непрерывно (полоса находится одновременно в двух или более клетях); станы полунепрерывные широкополосные состоят из двух групп — черновой (одна—три клети, прокатка в которых производится в несколько проходов) и чистовой непрерывной;

непрерывные станы, полоса в которых одновременно находится в нескольких рабочих клетях.

Примерами станов первой подгруппы являются шахматные станы, станы с зигзагообразным расположением клетей, второй подгруппы — среднесортные, крупносортные и широкополосные полунепрерывные станы, а третьей подгруппы — проволочные, мелкосортные, среднесортные, штрипсовые, широкополосные станы и станы бесконечной прокатки (со сваркой заготовки или подката).

В станах пятой группы процесс прокатки максимально дифференцирован. Это дает возможность выбрать параметры отдельных клетей так, чтобы они наилучшим образом соответствовали процессу прокатки.

Станы первой подгруппы имеют следующие преимущества:

а) полосу одновременно прокатывают только в одном калибре, что исключает возможность возникновения дефектов, связанных с натяжением или петлеобразованием между клетями, и обеспечивает нормальные условия работы оборудования;

б) повышенная точность размеров сечения профиля и качества его поверхности;

в) каждая клеть (пара валков) имеет самостоятельное регулирование размеров калибра, вытяжки и окружной скорости, так как почти все клети таких станов имеют индивидуальный привод, что позволяет вести прокатку с повышенной скоростью и более рациональным использованием оптимального температурного интервала.

Станы третьей подгруппы также имеют свои существенные преимущества. В непрерывном стане прокатка полосы ведется одновременно в нескольких клетях при значительных скоростях, поэтому частичный ритм прокатки значительно сокращается и уменьшается длина цеха. На этих станах можно катать заготовку большей массы, получая более длинные полосы, уменьшая тем самым отходы. Непрерывные станы, кроме петледержателей и рольгангов, не требуют других каких-либо вспомогательных механизмов для передачи полосы из одной клети в другую.

6. Перспективная группа — литейно-прокатные комплексы. В комплексе сочетаются машина непрерывного литья заготовок и прокатный стан.

Первый литейно-прокатный комплекс, запуск которого осуществлен в 1989 г. на мини-заводе фирмы “Ньюкор”, США,

показан на рис. 50. Жидкую сталь из двух электропечей подвергают внепечной обработке в ковше (масса плавки 112 т, цикл выпуска 50 мин, состав шихты 100 % металлолома), подают в вертикальную одноручьевую МНЛЗ, имеющую вибрирующий в вертикальной плоскости первичный кристаллизатор (частота вибрации — до 6,6 Гц, амплитуда 2–8 мм) и роликовый вторичный и отливающую слябы сечением 50×1100–1300 мм со скоростью 3,5–6 м/мин. Слябы нужной длины отрезаются ножницами, установленными перед печью, и после выравнивания температуры подаются в четырехклетьевой непрерывный стан, перед которым расположены аварийные ножницы и установка гидросбива окалины. Поскольку к камерам нагрева и выдержки слябов добавлен накопитель длиной 38 м, общая длина печи равна 158 м.

По техническому уровню станы делятся на морально устаревшие, реконструированные, современные и новейшие. К основным технико-экономическим показателям прокатного производства относятся: расход металла на 1 т готовой продукции; часовая производительность прокатного стана; скорость прокатки; выход годного проката; себестоимость продукции.

Валки прокатных станов являются одним из основных элементов, от которых в решающей степени зависят производи-

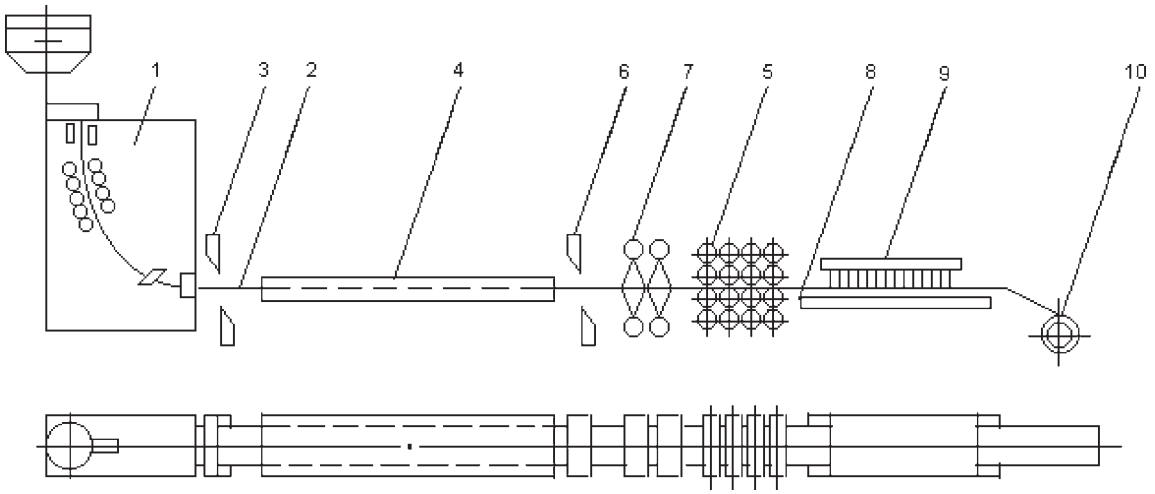


Рис. 50. Литейно-прокатный комплекс “Ньюкор” — “Шлеман-Зимаг”: *1* — УНРС; *2* — сляб; *3* — ножницы; *4* — печь; *5* — четырехклетьевой непрерывный стан; *6* — аварийные ножницы; *7* — установка гидросбива окалины; *8* — отводящий рольганг; *9* — система охлаждения; *10* — подпольная моталка

тельность прокатки, качество выпускаемой продукции и в конечном счете ее стоимость. Несмотря на сравнительно простую конструкцию валка, условия его эксплуатации таковы, что валок находится в сложном напряженном состоянии, вызывающем возникновение в нем различных дефектов, препятствующих выполнению предназначенных функций.

Условия прокатки, определяющие эксплуатационное качество валка, существенно различаются в зависимости от сортамента проката, конструкции стана, расположения клети в стане и многих других факторов. Валки могут быть рабочие и опорные, горячей и холодной прокатки, листовые и сортовые и располагаться в чистовых и черновых клетях.

Рабочие валки листовых станов горячей прокатки являются наиболее распространенными. Они работают в следующих условиях:

нагрев от 80 до 600 °С за 1 с;

охлаждение до 80 °С за 4 с;

высокоскоростные ударные нагрузки каждые 2–3 мин (в результате удара концевых частей прокатываемой полосы);

абразивное истирание прокатываемой полосой;

контакт с опорным валком, через который при каждом обороте передается на валок усилие, необходимое для деформации полосы, вызывающее на глубине 5–8 мм от поверхности рабочего валка максимальные напряжения;

переменные изгибающие нагрузки;

переменный крутящий момент;

периоды бездействия, когда температура может падать до 40–50 °С;

окисление и образование окалины;

внезапные термические удары при аварийных остановках стана, когда валок контактирует с полосой, нагретой до температуры 1200 °С.

Традиционным материалом валков горячей прокатки является чугун, отбеленный слой которого имеет высокую твердость и износостойкость. С появлением новых технологий изготовления валков и высоколегированных материалов чугунные валки стали заменяться валками из высокохромистой и быстрорежущей стали.

Валки листовых станов холодной прокатки традиционно изготавливают из деформируемых высокоуглеродистых и инструментальных сталей и высокохромистого отбеленного чугуна.

Опорные валки служат для предохранения рабочих валков от изгиба и сохраняют необходимую геометрию проката, а также обеспечивают безаварийную работу рабочих валков при больших усилиях прокатки. При эксплуатации эти валки испытывают большие сжимающие нагрузки, поэтому их прочность должна быть высокой. Диаметр опорных валков обычно больше, чем рабочих.

Сортовые станы характеризуют диаметром валка, например: блюминг 1150 — диаметр валков 1150 мм; сортовой стан 450 — диаметр валков 450 мм. Листовые станы определяют максимальной длиной цилиндрической части (бочки) валка, например, листовой стан 2000 имеет длину бочки валка 2000 мм.

Валки имеют проточки, называемые **ручьями,** или **калибрами**. **Калибровкой** называется последовательное расположение на валках ручьев, обеспечивающее получение готового профиля заданных размеров.

Разность высот полосы до и после прокатки называется **обжатием**.

Блюм — квадратная заготовка со скругленными углами сечением до 400×400 мм. Блюмы подаются к валкам **рольгангами**. **Рольганг** — это устройство, состоящее из близко поставленных друг к другу вращающихся роликов небольшого диаметра.

С развитием металлургического машиностроения блюминги превратились из маломощных станов, прокатывающих небольшие слитки (массой 0,4–0,5 т) в валках диаметром 700–800 мм, в мощные и высокопроизводительные агрегаты. Современные блюминги диаметром валков до 1300–1500 мм и мощностью привода до 14 000 кВт, на которых исключен тяжелый ручной труд вальцовщика и применены современные средства управления и автоматизации, предназначены для прокатки крупных слитков массой до 20 т.

На рис. 51 показана калибровка валков блюминга. Прокатка слитка производится в широком калибре I. По мере уменьшения сечения раскат передается в ящичные калибры II, III, IV. Если

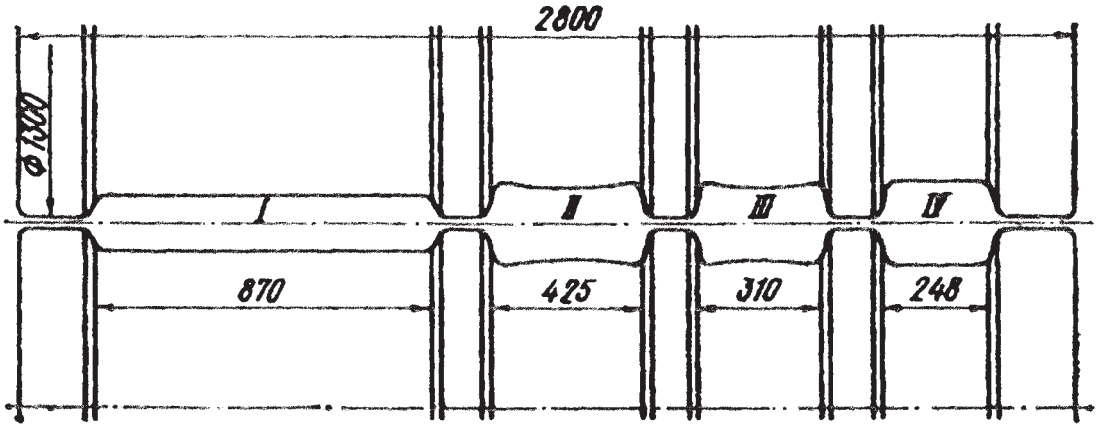


Рис. 51. Калибровка валков блюминга

на блюминге прокатывают небольшое количество слябов, то калибр I выполняют в середине валка для равномерного распределения усилия прокатки на левый и правый подшипники. Заданную ширину обеспечивают пропуском сляба на ребро через ящичные калибры. За 9—13 пропусков через валки слитки прокатываются в блюмы сечением от 300×300 до 370×370 мм.

Кантовка раскатов перед пропусками и установка их по длине бочки валка напротив нужного калибра обеспечиваются крюковым кантователем, встроенным в линейку манипулятора, и манипуляторами, установленными с обеих сторон рабочей клети. Окалина, образовавшаяся на поверхности слитка в процессе нагрева, разрушается при первых пропусках через валки с небольшим обжатием и смывается водой.

3.4. ЛИСТОПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

В современных условиях развитие листопрокатного производства непрерывно совершенствуется как для повышения качества горяче- и холоднокатаных листов, полос, лент, так и для повышения эффективности производства. С этой целью кардинально меняются технологические схемы производства, совершенствуются типовые технологические процессы, создаются новейшие системы управления и оборудование.

Горячая прокатка, которая позволяет резко увеличить размеры и массу слитков, исключает промежуточные обжиги, необходимые при **холодной прокатке**, значительно повышает произ-

водительность станов и выход годного, уменьшает производственный цикл обработки изделия. Вместе с тем горячая прокатка, по сравнению с холодной, имеет ряд недостатков: 1) из-за узкого интервала пластичности некоторые сплавы нельзя прокатывать вгорячую; 2) нагрев слитков требует нагревательных устройств, рабочих по их обслуживанию, расхода топлива, энергоносителей и обусловливает потерю металла в связи с его угаром; 3) точность размеров изделий, полученных горячей прокаткой, ниже, чем при холодной прокатке.

За последние 15–20 лет соотношение производства сортового и листового проката в России мало изменилось и составляет 3:2, в то время как в большинстве передовых стран оно уже давно достигло уровня 2:3. Как известно, чем меньше сортового проката в металлопродукции, тем меньше потери металла в процессе производства и использования. Сложившуюся ситуацию можно объяснить, учитывая следующие обстоятельства.

Первое — острая потребность в металле для восстановления разрушенного войной народного хозяйства вызывала необходимость задействовать довоенные прокатные станы, подавляющее большинство которых были сортовой специализации. Второе — металлопотребляющие отрасли (машиностроение и строительство) по технологии и составу оборудования также довоенных времен специализировались на преимущественном использовании сортового проката. Возможно, это обстоятельство сказалось и на особенно медленном развитии производства холоднокатаного листа.

Предпочтительное использование сортового проката перед листовым до сих пор является главным тормозом совершенствования национальной структуры сортамента металлопродукции.

До 1917 г. в России было 250 прокатных станов. Первый блюминг 1150 в нашей стране был установлен на Макеевском заводе в 1933 г., первый широкополосный стан — в 1937 г., первый слябинг — на заводе "Электросталь" в 1937 г.

Сейчас в мире наибольший объем горячекатаных полос получают на крупных интегрированных заводах с полным металлургическим циклом, где в качестве исходной заготовки используют непрерывнолитой сляб толщиной 150–300 мм (рис. 52). Технология непрерывного литья изменила структуру сталеплавильного производства и технологию прокатки. Непрерывноли-

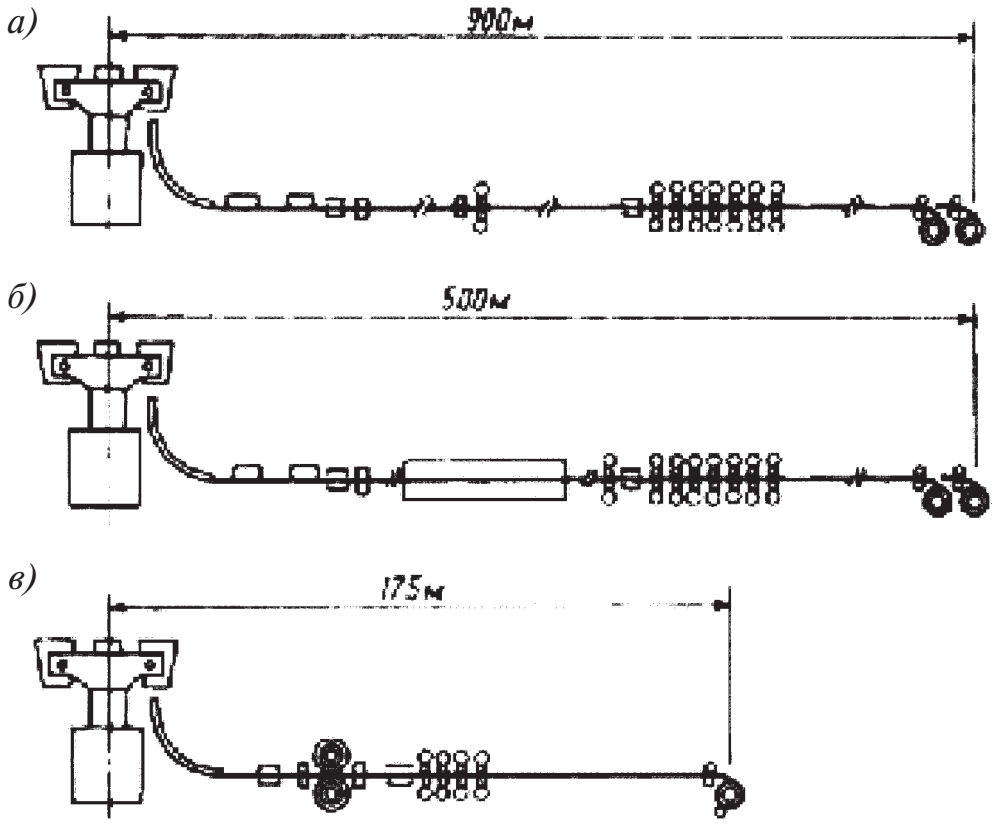


Рис. 52. Принципиальные схемы производства горячекатаных полос из непрерывнолитых слябов:
а — обычная технология (толщина сляба 200–250 мм);
б — обычная технология с горячей посадкой сляба толщиной 200–250 мм; *в* — тонкие слябы

той металл котируется достаточно высоко по качественным показателям и пользуется большим спросом у потребителей.

Технология непрерывного литья слябов позволяет производить любую листовую продукцию с более высоким выходом годного (до 97 %), чем по традиционной схеме изложница—сляб, и лучшего качества.

Инверсионное литье (рис. 53) представляет собой процесс, по которому полоска-подложка с определенной температурой (например, комнатной), толщиной 0,5–2 мм пропускается в течение определенного времени через ванну с жидкой сталью, имеющей контролируемую температуру. Во время контакта между полосой-подложкой и ванной некоторое количество жидкого металла кристаллизуется на подложке и вытягивается вместе с ней в виде композиционного изделия с контролируемой конечной толщиной.

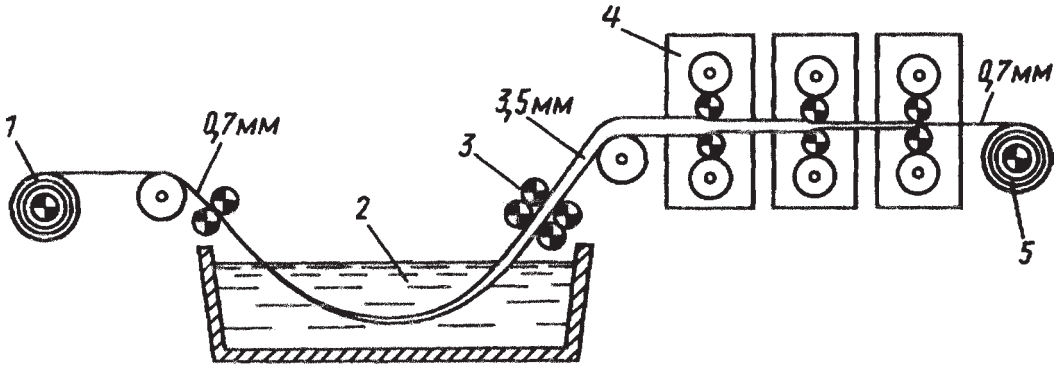


Рис. 53 . Схема инверсионного литья полос и их холодной прокатки:
1 — размыватель полосы-подложки; *2* — ванна с расплавленным металлом; *3* — обжатие полосы с горячим покрытием; *4* — стан холодной прокатки; *5* — моталка

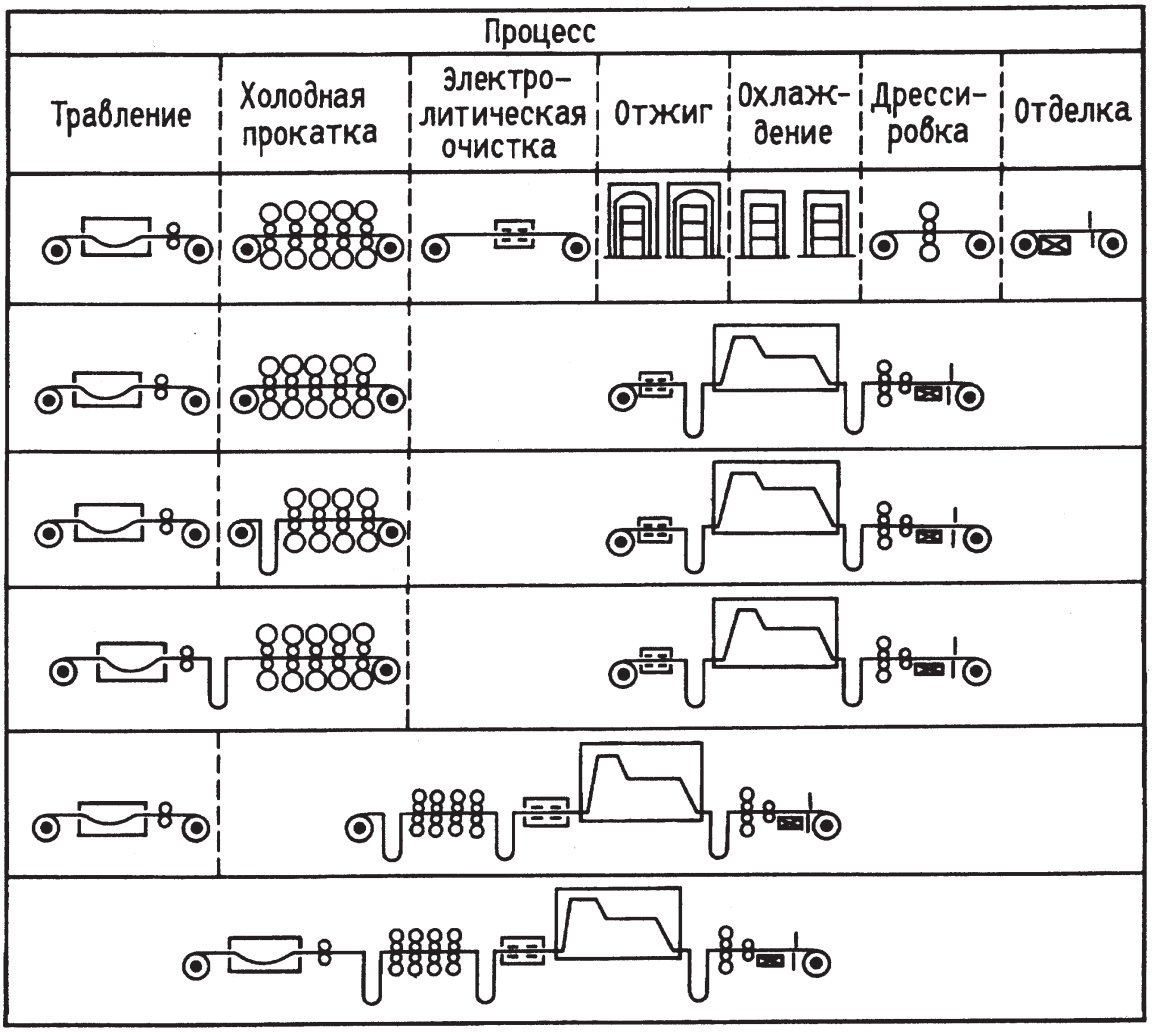


Рис. 54. Принципиальные схемы производства холоднокатаных полос

По такой технологии производятся круглые изделия и фасонные профили, а также композиционный материал в виде листов толщиной 1–10 мм и шириной 200–1000 мм, которые могут быть переданы для дальнейшего передела непосредственно на стан холодной прокатки (рис. 54).

В структуре себестоимости полос холоднокатаной стали около 83–87 % составляют затраты на металл и 17–13 % — затраты по переделу. В цехах холодной прокатки затраты по переделу распределяются следующим образом: 19–25 % — травление, 18–20 % — термическая обработка, 63–55 % — собственно прокатка и отделка.

Основную массу производимого холоднокатаного листа составляют автомобильный лист, электротехнические и нержавеющие стали. Кузов автомобиля изготовлен холодной штамповкой (и точечной сваркой) из тонкого (0,5–3 мм) листа. На производство 45 млн. автомобилей в год в мире расходуется 80 млн. т холоднокатаного листа из низкоуглеродистой стали.

Обычно до толщины около 2 мм лист доводят горячей прокаткой на непрерывном широкополосном стане, затем окалину удаляют травлением. После холодной прокатки до конечной толщины полосу отжигают.

Более 1 млн. т тонкого (0,50, 0,35 или 0,27 мм, за рубежом до 0,23 мм) холоднокатаного листа составляют электротехническая (трансформаторная) и динамная стали. Пакеты пластин трансформаторной стали собирают в замкнутое ярмо — сердечник трансформатора; из динамной стали вырубают диски со многими пазами по радиусу, собирают их в пакеты (статор и ротор электромотора), а в пазы укладывают обмотку.

Лист и трубы из нержавеющей стали — основной материал для резервуаров и аппаратуры химической и пищевой промышленности, криогенной и бытовой техники (баки стиральных машин, посуда и кухонные агрегаты).

Технико-экономические показатели работы листовых прокатных станов следующие.

Расход металла. При горячей прокатке толстолистовой стали расход металла определяется его потерями в виде окалины при нагреве и прокатке, в виде обрези боковых кромок, обрези

переднего и заднего концов. В зависимости от состава стали, размеров листа, требований, предъявляемых к готовым листам, коэффициент расхода металла составляет 1,05–1,25.

Расход электроэнергии на листовых прокатных станах зависит от степени уменьшения площади поперечного сечения, температуры прокатки, химического состава стали, совершенства конструкции главной линии прокатного стана и вспомогательного оборудования. При горячей прокатке на широкополосном стане на 1 т проката расходуется 218 МДж, при холодной прокатке расход электроэнергии составляет 360–1080 МДж.

Расход тепла при нагреве слябов 2100–2520 МДж/т; в термических отделениях цехов холодной прокатки листов расходуется 1100 МДж/т.

Расход валков на листовых прокатных станах от 0,8 до 1,5 кг/т.

Расход воды на листовых прокатных станах горячей прокатки 2600–7500 $м^3$/ч.

3.5. СОРТОПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

В России сортопрокатное производство, как было сказано ранее, занимает доминирующее положение по количеству выпускаемой прокатной продукции. В прошлые годы сортопрокатные цехи строили с узкой специализацией станов, иногда с большой единичной мощностью (табл. 22).

Таблица 22

Годовая производительность сортопрокатных станов, тыс. т

Тип стана	Годы				
	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000
Крупносортные балочные	800	1000	1500	2000	2500
Среднесортные балочные	600	1000	1500	1800	2000
Мелкосортные, мелкосортно-среднесортные	500	800	900	1000	1200
Проволочные	500	800	900	1200	1600

Для повышения конкурентоспособности продукции на мировом и внутреннем рынках в этом секторе прокатного производства проводятся мероприятия с целью снижения энерго-, материало- и трудоемкости производства. Основным направлением при этом является использование непрерывнолитых заготовок для производства сортовых изделий.

В последнее десятилетие существенно изменилась область применения МНРС. Ранее они специализировались на производстве заготовок из углеродистых сталей для сортового проката общего назначения. Но в связи с тем, что на рынке стали преобладать требования машиностроителей, в первую очередь автомобилестроителей, а не строительных фирм, было проведено значительное усовершенствование непрерывной разливки, что позволило освоить производство мелкосортных заготовок широкого сортамента для изготовления металлопродукции ответственного назначения.

Главным потребителем крупносортового проката (балки, швеллер, двутавр) является промышленное строительство (фермы, колонны и перекрытия зданий и сооружений), мосто- и судостроение.

Протяженность железных дорог России составляет 87 тыс. км, на них приходится 3/4 мирового грузооборота. При таком грузопотоке рельс служит всего несколько лет, поэтому около 2 млн. т рельсов заменяются ежегодно.

В рельсобалочных цехах производят железнодорожные рельсы массой до 75 кг на метр длины, двутавровые балки высотой до 400 мм, швеллеры, угловой профиль до 230×230 мм, круглый прокат диаметром 120–350 мм. Заготовкой для рельсобалочного стана является блюм. Масса блюма 2–4 т. Нагрев блюмов осуществляют в методических печах.

Блюмы для прокатки рельсов нагревают до 1180–1200 °С. Через торцовое окно методической печи они выдаются на подводящий рольганг обжимной клети. В обжимной клети за пять проходов получают заготовку, имеющую грубую форму рельса. В следующей прокатной трехвалковой клети за три—четыре прохода производят дальнейшее уменьшение площади поперечного сечения и приближение его к форме рельса. Четыре рабочие клети рельсобалочного стана расположены в линию (линейная

схема). Последняя рабочая клеть двухвалковая, в ней за один проход придают прокату окончательную форму. Из одного блюма получают два рельса длиной 25 м. В зависимости от массы метр длины рельса прокатывают за 12–14 проходов.

3.6. ТРУБОПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Трубы являются одним из самых сложных видов металлопродукции, так как в отличие от большинства других видов проката имеют наружную и внутреннюю поверхности, которые часто одновременно могут быть рабочими, что обусловливает высокие требования к их качеству.

Россия имеет самые большие в мире мощности по производству стальных, чугунных труб и баллонов, основные из которых сосредоточены на 15 крупных предприятиях металлургического комплекса. Более 70 малых предприятий (участков, цехов) производят электросварные трубы малого и среднего диаметров. В целом производственные мощности основных предприятий металлургического комплекса России имеют потенциальные возможности выпуска 13 млн. т в год стальных труб, а с учетом малых предприятий — более 15 млн. т.

В составе производственных мощностей около 110 трубопрокатных и трубосварочных станов и 15 цехов и участков по производству особо точных холоднодеформированных труб.

Несмотря на имеющийся потенциал по производству этого вида изделий существует стабильный дефицит некоторых видов труб: насосно-компрессорных, высокопрочных, коррозионностойких, повышенной хладостойкости и пластичности; горячедеформированных общего назначения; тонкостенных холоднодеформированных углеродистых и легированных.

Техническое состояние большинства цехов по производству бесшовных труб не отвечает современному уровню техники и технологии: агрегаты были введены в эксплуатацию в 1930–1940-е гг.; износ ряда основных производственных фондов превышает 50 %.

В технически развитых странах до 95 % бесшовных труб изготавливают из непрерывнолитой заготовки, что обеспечивает экономию металла и улучшение качества. В России подавляю-

щее количество горячедеформированных труб производится из металла мартеновского производства (слитки, катаная заготовка), что приводит к значительному перерасходу металла (примерно 100 кг на 1 т готовой трубы).

На Западе около 65 % горячедеформированных труб производится на непрерывных станах, в том числе 35 % — на станах с удерживаемой оправкой, 15 % — на реечных станах, 15 % — на специализированных станах. Многие станы отличаются большой маневренностью и позволяют производить трубы широкого марочного и размерного сортамента. В России более половины горячедеформированных труб изготавливают на агрегатах с автомат- и пилигримовыми станами, которые в основном ориентированы на выпуск крупнотоннажных партий труб относительно узкого сортамента и не обеспечивают жестких требований по допускам и чистоте поверхности.

Одним из современных является Волжский трубный завод, на котором в 1990 г. установлен трубопрокатный агрегат с непрерывным станом, обеспечивающий производство бесшовных труб нефтяного сортамента на уровне мировых стандартов.

Основным потребителем трубной продукции является нефтегазовый комплекс России, в который входят 46,8 тыс. км нефтяных и 150 тыс. км газовых магистральных трубопроводов (65 % составляют газопроводы диаметром 1020–1420 мм). В 1998 г. российские трубные заводы поставили “Газпрому” металлопродукции на сумму 1,3 млрд. руб. (61,3 % общей поставки труб). До 20 % импорта составляют прямошовные трубы диаметром 1020, 1220 и 1420 мм из Германии, Японии и Украины, поскольку в России такие трубы не производят. Основным недостатком сварных труб отечественного производства является то, что металлургические заводы не могут в массовом количестве выплавлять металл, из которого можно было бы производить лист повышенной хладостойкости и прочности.

Кроме нефтегазовой промышленности трубы используют в качестве магистралей для передачи горячей воды и пара, широко используют как конструкционный материал в авиационной промышленности.

Трубы получают горячей и холодной прокаткой, прессованием, волочением, формовкой из листов и полос с дальнейшей

сваркой шва. Горячей деформацией производят трубы диаметром от 20 до 1200 мм при толщине стенки 1,7–100 мм из углеродистых, легированных и высоколегированных сталей, а также биметаллические и многослойные трубы. Трубы большего диаметра (до 2000 мм) получают методом сварки.

Горячая прокатка труб состоит из следующих операций: получение толстостенной гильзы из круглой заготовки или слитка; прокатка гильзы в трубу; отделка готовой трубы.

В настоящее время в практике трубного производства применяют следующие способы получения гильз: прошивка заготовки на двухвалковом стане и прошивка заготовки на прессе в толстостенный стакан с последующей его раскаткой. Основным агрегатом для получения гильзы требуемого качества остается стан винтовой прокатки. При массовом производстве предпочтительным является процесс винтовой прошивки, так как скорость прокатки на современных прошивных станах составляет 1,0–1,4 м/с, скорость при прошивке на прессе (гидравлическом) обычно 0,1–0,4 м/с. Цикл прокатки составляет 8–12 с при прошивке гильз длиной 5–7 м на станах с осевой выдачей, а цикл прессования — 20–40 с при прошивке гильз длиной 0,5–0,8 м. Процесс прошивки производится на прошивных станах валкового, грибовидного или дискового типа на конической оправке (рис. 55).

Основная масса бесшовных труб получается прокаткой на автоматических трубопрокатных станах. Исходным материалом для прокатки труб на автоматическом стане является заготовка круглого сечения диаметром 70–350 мм. Зона деформации образуется калибром и оправкой (рис. 56), зазор между ними определяет толщину стенки трубы.

Прокатка производится в несколько пропусков с поворотом оправки вместе с трубой на 90° после каждого пропуска. В конце каждого пропуска труба полностью выходит из валков рабочей клети и оказывается на оправке. При поднятом верхнем валке рабочей клети труба роликами возвращается на переднюю сторону рабочей клети, и процесс прокатки повторяется.

Ролики обратной подачи работают синхронно с валками рабочей клети. При прокатке трубы нижний ролик опускается, и труба свободно проходит на оправку. После окончания прокатки, когда труба полностью оказывается на оправке, нижний

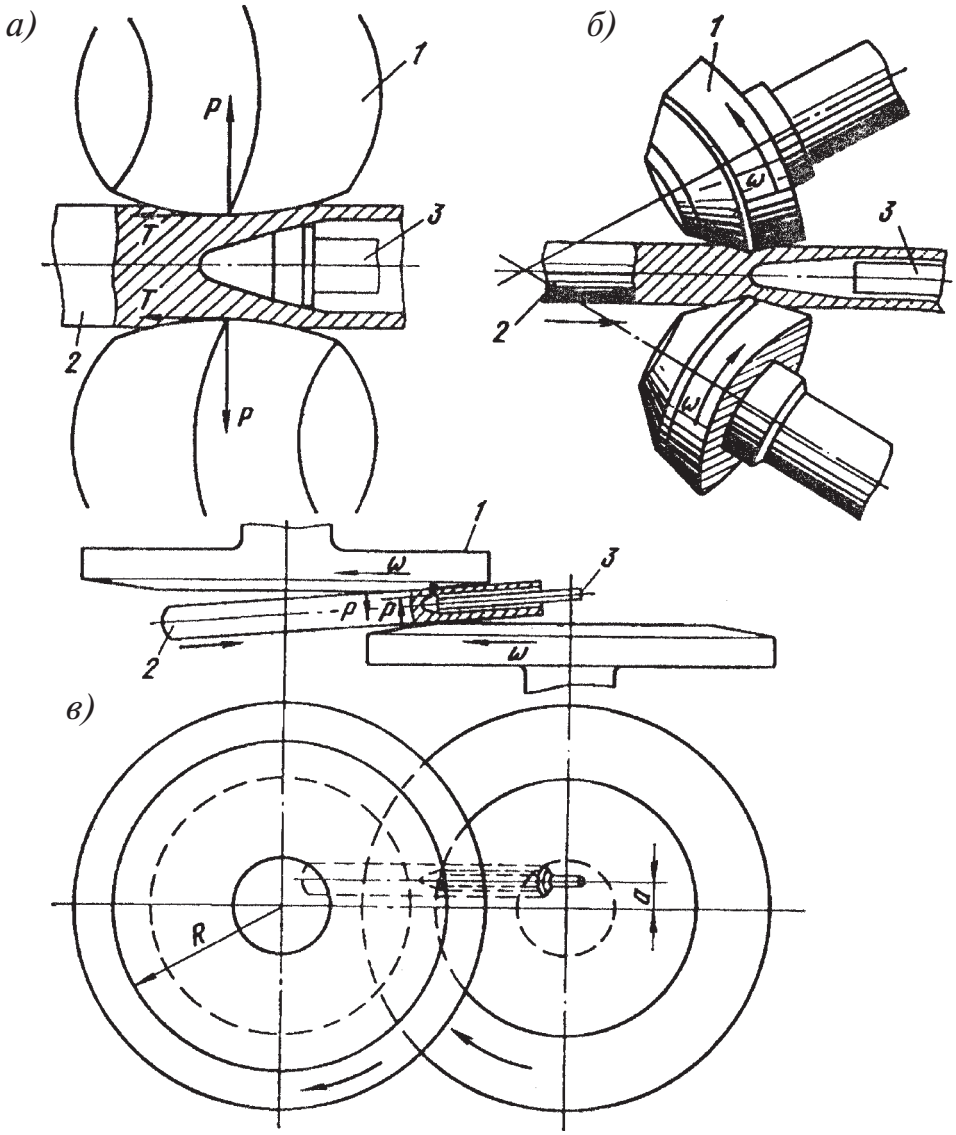


Рис. 55. Схема прошивки заготовки на валковых (*а*), грибовидных (*б*) и дисковых (*в*) станах

ролик поднимается и прижимает трубу к верхнему ролику, вследствие чего труба возвращается на переднюю сторону рабочей клети для повторной прокатки. Трубная заготовка после автоматического стана поступает на обкатные станы.

Прокатка на обкатном стане производится в клетях с конусными валками. Прокатка труб ведется на пробке, укрепленной на стержне. Труба получает поступательное движение и одновременно вращается вокруг своей оси. На обкатном стане устраняется овальность и разностепенность трубы. Обкатные станы

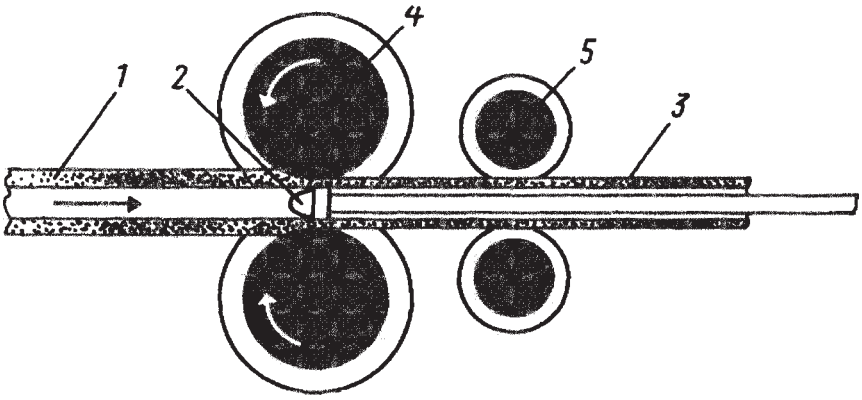


Рис. 56. Схема раскатки трубы
на автоматическом стане:
1 — гильза; *2* — оправка; *3* — труба;
4 — рабочие валки; *5* — ролики обратной подачи

устанавливаются после автоматических и выполняют операцию калибровки перед окончательной прокаткой труб.

Окончательная прокатка труб производится на непрерывном семиклетьевом стане горячей прокатки с чередующимися двухвалковыми клетями с горизонтальным и вертикальным расположением валков.

Готовые трубы диаметром 60–430 и толщиной стенки 3–60 мм поступают в холодильник. В дальнейшем трубы правятся на правильных машинах с геликоидальными роликами, проходят холодную калибровку по диаметру. В отделении отделки труб производится нарезка резьбы, навинчиваются соединительные муфты, осуществляются контроль и упаковка.

Кроме автоматических для производства труб применяют непрерывные, пилигримовые, реечные станы.

Холоднодеформированные трубы производятся из различных сталей и сплавов наружным диаметром от 0,3 до 450 мм и более и толщиной стенки от 0,05 до 60 мм и более. Способом холодной прокатки в России производят около 50 %, а за рубежом около 25 % холоднодеформированных труб.

К основным преимуществам способа прокатки труб на оправке относятся: практически полное отсутствие потерь металла; возможность получения высоких обжатий по стенке (до 75–85 %) и по диаметру (до 65 %) трубы с доведением суммарного обжатия до 95 %; значительное снижение колебания толщины

стенки трубы; возможность использования толстостенных исходных заготовок; высокое качество наружной и внутренней поверхностей труб.

Станы холодной прокатки подразделяют на валковые (ХПТ), роликовые (ХПТР) и станы поперечной прокатки труб (ППТ). Последние используют для получения прецизионных труб с малой степенью деформации.

По количеству одновременно прокатываемых труб станы могут быть одно-, двух- и трехниточные. Для прокатки труб из черных металлов применяют одно- и двухниточные станы, производительность которых в 1,6–1,7 раза больше, чем однониточных.

По своей конструкции стан ХПТ представляет собой двухвалковый стан периодического действия, в котором рабочая клеть в процессе прокатки совершает возвратно-поступательное движение при помощи кривошипно-шатунного механизма.

Установленные на опорах клети рабочие валки посредством шестерен, насаженных на их шейки и входящих в зацепление с зубчатыми рейками на боковых стенках станины, совершают вместе с клетью возвратно-поступательное движение и одновременно синхронно поворачиваются на некоторый угол вокруг своих осей. Переменный по ширине и глубине калибр валков формует трубу на неподвижной конической оправке (рис. 57). Подача и поворот заготовки осуществляются поворотно-подающим механизмом.

Стан ХПТР предназначен для холодной прокатки труб с тонкими стенками (до 0,10 мм) диаметром от 4 до 120 мм с D/S до 500.

В конструкциях станов ХПТР и ХПТ много общего. В стан ХПТР входят рабочая клеть, приводной механизм, механизм зажима патрона заготовки, механизм ускоренного отвода патрона заготовки, которая раскатывается на цилиндрической оправке.

Станы ХПТР имеют следующие преимущества перед станами ХПТ:

1) значительно меньшие диаметры рабочих валков, что приводит к снижению усилий прокатки, а следовательно, и упругой деформации рабочей клети и валков;

2) простота рабочего инструмента (валков и направляющих планок) и небольшая его масса;

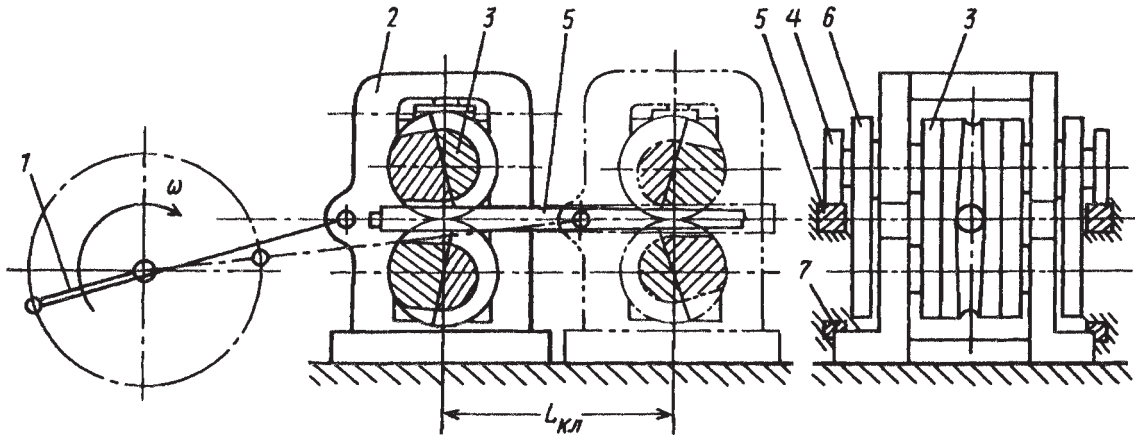


Рис. 57. Схема прокатки труб на стане ХПТ:
1 — кривошипно-шатунный механизм; *2* — рабочая клеть;
3 — рабочие валки; *4* — ведущие шестерни; *5* — рейки;
6 — ведомые шестерни; *7* — направляющие

3) значительно меньшая масса рабочей каретки, что позволяет увеличить число ее ходов в минуту;

4) минимальное скольжение металла в валках;

5) более полный охват деформируемого материала тремя роликами, что дает возможность прокатывать труднодеформируемые стали и сплавы.

Наличие возвратно-поступательного движения массивной рабочей клети в станах ХПТ и ХПТР наряду с большими усилиями прокатки вызывает большие динамические нагрузки на оборудование стана и его быстрый износ. С целью совершенствования конструкции и устранения недостатков в МИСиСе создан стан холодной прокатки труб со стационарной рабочей клетью. Двухниточный стан холодной прокатки труб со стационарной предварительно-напряженной рабочей клетью (2ХПТС) предназначен для производства труб и прутков повышенной точности из самых разнообразных металлов и сплавов, в том числе труднодеформируемых и склонных к налипанию, например, сплавов вольфрама, молибдена, циркония, титана и др.

Станы 2ХПТС имеют минимальное время переналадки (20—30 мин) на другой типоразмер и могут эффективно использоваться при изготовлении труб широкого сортамента.

Наиболее существенными преимуществами станов со стационарной клетью являются:

высокая степень деформации заготовки за проход (до 95 %) из-за деформации только при прямом ходе и создании в очаге напряженного состояния металла, близкого к всестороннему сжатию; благодаря этому в 2–3 раза по сравнению со станами ХПТ сокращается количество технологических операций, снижаются требования к исходной заготовке, повышается эффективность способа прокатки труб и на 20–30 % снижается их себестоимость;

повышенная в 1,5–2 раза по сравнению со станами ХПТ точность получаемых труб благодаря наличию стационарной предварительно-напряженной клети высокой жесткости и малой погрешности подачи; на станах 2ХПТС возможна прокатка труб повышенной точности с допусками: ±0,3 % по наружному диаметру; ±3 % по толщине стенки;

в 2–3 раза по сравнению со станами ХПТ повышенная производительность вследствие прокатки одновременно двух труб с быстроходностью до 150–180 двойных ходов в минуту.

Способы производства **сварных** труб различаются:

1) **температурой формуемого металла**: формовка холодного листа (все виды современных трубоэлектросварочных агрегатов); формовка горячего листа (агрегаты непрерывной печной сварки труб);

2) **способом получения готовых труб** окончательных размеров: на калибровочных клетях формовочно-сварочных агрегатов; получение на трубоэлектросварочных агрегатах труб-заготовок ограниченного числа размеров и окончательное формирование диаметра и толщины стенки на редукционно-растяжных станах горячего или холодного деформирования;

3) **характером протекания процесса**: непрерывный и дискретный;

4) **числом и направлением швов на трубах**: одношовные, двухшовные, прямошовные и спиральношовные;

5) **способом формовки листа в трубную заготовку**: валковая, прессовая, на машинах валкового или полувтулочного типа;

6) **способом сварки**: печная, дуговая под слоем флюса, электрическая сопротивлением, индукционная, токами высокой частоты, электрическая в среде инертных газов, электронно-лучевая постоянным током, плазменная и ультразвуковая;

7) **количеством слоев металла в трубе**: один, два или несколько.

Сваркой получают трубы диаметром 6–2520 мм с толщиной стенки 0,4–25,0 мм.

В зависимости от технических требований к трубам, их сортамента, возможностей получения исходной заготовки и необходимой производительности агрегатов используют тот или иной способ сварки и формовки заготовки, выбирают наиболее целесообразные процесс и конструкцию труб.

Рассмотрим одну из основных операций всех технологических процессов производства сварных труб — **формовку (сворачивание)** плоской заготовки (ленты, листа, штрипса).

Этот процесс менее энергоемкий, чем прокатка. Формовка трубной заготовки в горячем состоянии применяется при непрерывной печной сварке труб и осуществляется в приводных валках. В результате высокой пластичности нагретого металла возможно сворачивание штрипса в трубу в двух парах валков с малой длиной очага деформации.

Формовку в вальцах и на прессах (рис. 58) применяют при производстве труб большого диаметра (более 426 мм) из листов. Более современным способом формовки прямошовных труб большого диаметра является формовка на прессах, которая может производиться как из одной цилиндрической заготовки с предварительной подгибкой кромок на валковом стане, так и из двух полуцилиндрических заготовок при сварке труб из двух листов.

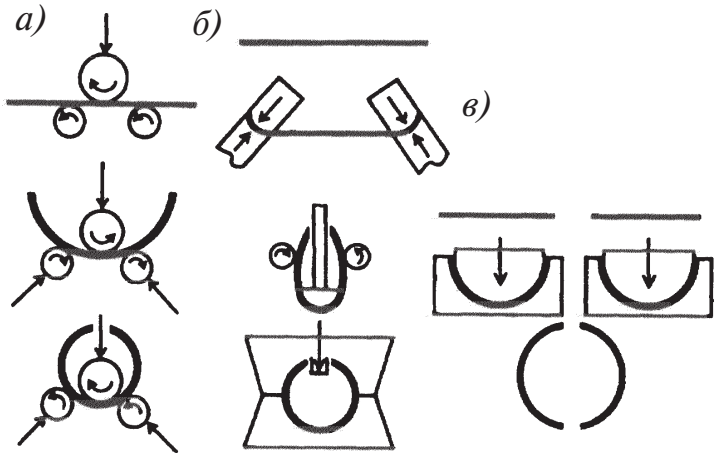


Рис. 58. Схема формовки трубной заготовки в гибочных вальцах (*а*) и на прессах при производстве труб с одним (*б*) и двумя (*в*) швами

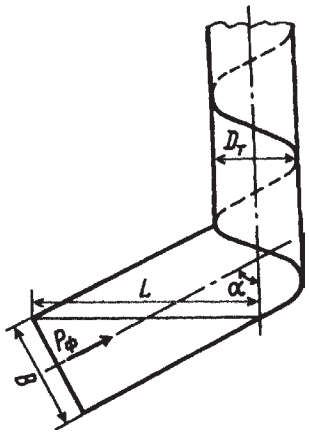


Рис. 59. Схема формовки трубной заготовки при спиральной сварке труб

При производстве спиральношовных труб трубную заготовку формуют путем пластического изгиба полосы в плоскости, расположенной под некоторым углом к продольной оси листа (рис. 59).

Таким образом, из полосы одной ширины можно получать трубы различного диаметра, свертывая ее в спираль под различными углами. Обычно сварку спиральношовных труб так же, как и прямошовных труб большого диаметра, осуществляют расходуемым электродом под слоем флюса.

На практике используют большое количество калибровок формующих валков (рис. 60). Выбор вида калибровки зависит от технологичности, возможности интенсификации процесса гиба и формовки тонкостенных труб, износа валков, сложности их изготовления и габаритов.

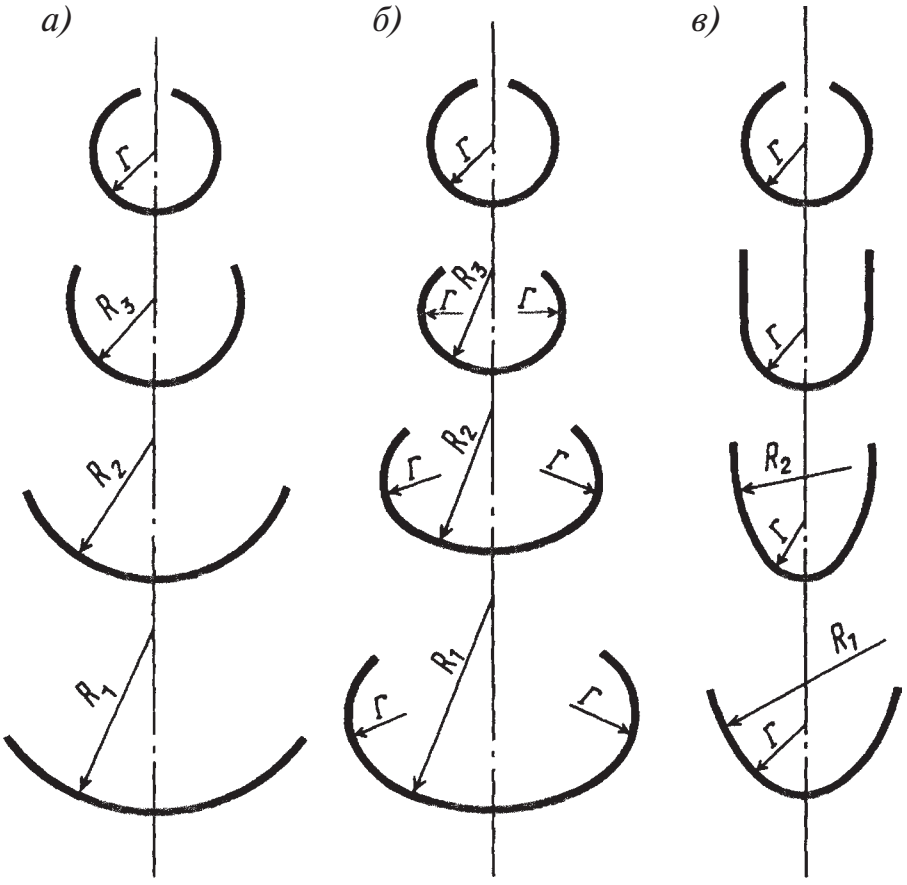


Рис. 60. Типы калибровок формовочных станов:
а — однорадиусный; *б* — двухрадиусный с радиусом периферийных участков; *в* — двухрадиусный с радиусом центрального участка

Сейчас Россия испытывает дефицит труб диаметром более 1420 мм для магистральных трубопроводов, поэтому перед металлургами стоит задача создания новых и реконструкции действующих предприятий по производству качественного широкого листа и труб.

3.7. ГНУТЫЕ ПРОФИЛИ ПРОКАТА И ПРОКАТ С ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Особой разновидностью станов являются профилегибочные станы. Гнутые профили можно изготавливать и штамповкой, но этот способ менее производителен и ограничивает длину профиля.

Этот вид продукции производится из рулонной листовой стали, цветных металлов и сплавов методом холодной гибки. Оборудование профилегибочных станов менее сложное, чем прокатное, его обслуживание проще и легче, поэтому капиталовложения и эксплуатационные расходы также ниже, чем при организации производства на горячекатаных станах, и окупаются в короткий срок.

Гнутые профили имеют большое разнообразие типов и профилеразмеров и подразделяются на гнутые профили общего назначения и специальные (рис. 61).

К профилям общего назначения относятся гнутые профили простой конфигурации, часто используемые в конструкциях и машинах и применяемые во всех отраслях промышленности: уголки равнобокие и неравнобокие, швеллеры (в том числе несимметричные и с изогнутой стенкой), С-образные, Z-образные, корытообразные профили, прямоугольные и круглые несварные и сварные, желобчатые профили.

Рис. 61. Некоторые виды гнутых профилей:
1 — равнобокая угловая сталь; *2* — специальная угловая сталь; *3* — швеллер; *4* — Г-образный; *5* — корытообразный; *6* — С-образный; *7* — оконно-рамный; *8* — для ограждения; *9* — для транспортного машиностроения

Специальные профили — это профили сложной конфигурации, применяемые в железнодорожном машиностроении, авто- и тракторостроении, оконно-рамные профили и др.

Профилегибочные станы по характеру работы делятся на два вида: **непрерывного действия; периодического действия, или штучного профилирования**. На станах непрерывного действия заготовка применяется в виде рулонов, и в большинстве случаев перед станами устанавливается стыкосварочная машина для сварки концов рулонов ленты, поступающей для формовки. Профилирование идет непрерывно во всех клетях стана, готовые профили разрезают на мерные длины после выхода из последней клети. На станах периодического действия или штучного профилирования заготовка перед профилированием разрезается на мерные длины и каждая заготовка (штука) формуется отдельно.

Дальнейшее развитие процессов прокатки связано с повышением производительности станов, улучшением качества труб. Для достижения этих целей необходимо совершенствование конструкций станов, рабочих инструментов; автоматизация процессов, разработка и внедрение новых процессов и оборудования.

Для борьбы с коррозией черных металлов наиболее экономически целесообразны и эффективны защитные покрытия (металлические и неметаллические). В технически развитых странах доля листов с покрытиями составляет около 70 % выпуска холоднокатаных листов, в России — менее 30 %.

Основными потребителями листов с покрытиями являются строительная, автомобильная промышленность, производство бытовых электроприборов. Эффективность использования такого металла связана с более низкой, по сравнению с прокатом из нержавеющей стали и цветными металлами, стоимостью, а также с повышением надежности и увеличением срока службы изделий. Если принять стоимость листовой холоднокатаной стали за 1, то стоимость листовой горячеоцинкованной стали составит 1,3; листовой алюминированной стали — 1,4; листовой стали с полимерными покрытиями — 2,4; листовой холоднокатаной нержавеющей стали — 5,7.

Фирмы-изготовители автомобилей в Европе обеспечивают трехлетнюю гарантию в отношении косметической и шестилетнюю в отношении сквозной коррозии кузова без дополнитель-

ной антикоррозионной обработки. В Канаде и США эти сроки соответственно увеличены до 5 и 10 лет. Это заставляет автомобилестроительные и металлургические фирмы идти на значительные капиталовложения для совершенствования производства и применения новых прогрессивных материалов — прежде всего сталей с различными видами защитных покрытий.

Типичные толщины покрытия: 7,5 и 10 мкм для электроцинкового покрытия; 2, 3, 5 и 6 мкм для покрытий сплавами цинк—никель; 7,5 и 10 мкм для горячего оцинкования.

В России в настоящее время используется около 40 кг стали с покрытием на каждый автомобиль. В основном это горяче- и электролитически оцинкованная сталь для некоторых деталей кузова и двигателя, освинцованная сталь для бензобаков, опытные партии алюминированной стали для выхлопных труб и глушителей.

Отсутствует производство сталей с покрытиями особо сложной вытяжки для основных кузовных деталей, что сокращает срок службы автомобилей и снижает их конкурентоспособность на мировом рынке. Для решения этой проблемы нужна организация производства электролитической оцинкованной стали необходимого сортамента и горячеоцинкованной стали с высокими пластическими свойствами.

В процессе эксплуатации трубы подвергаются различным видам коррозии: почвенной, атмосферной, высокотемпературной, морской и др. Поскольку они используются во многих отраслях промышленности, их качество определяет надежность и эффективность соответствующих производств.

По назначению защитные покрытия делятся на **консервационные** и **эксплуатационные**. Консервационные покрытия предназначены для защиты труб от атмосферной коррозии на период транспортировки и хранения на складах. Для увеличения срока службы при работе в агрессивных средах, защиты от отложения солей и парафина при транспортировке различных продуктов, повышения пропускной способности на трубы наносятся эксплуатационные покрытия.

Консервационные покрытия (окраска) наносятся на наружную или внутреннюю поверхность труб в один или несколько слоев. Для окраски наружной поверхности труб нефтяного сор-

тамента применяют различные битумные лаки, глифталевую эмаль и др.

Покрытия наносят путем окунания или облива, пневматического или безвоздушного распыления или распыления в электростатическом поле. Для равномерного облива (в специальных камерах) и экономичного расходования лакокрасочный материал перед подачей в спрейер смешивается со сжатым воздухом. Сушка труб может быть естественной на воздухе или в специальных газовых камерах.

Эксплуатационная защита труб обеспечивается нанесением на их поверхность металлических (цинк, алюминий, хром), силикатных (эмали, стекло) и полимерных материалов. Испытания насосно-компрессорных труб с цинковым покрытием в скважинах, содержащих сероводород, показали, что их стойкость повышается в 10 раз.

Алюминиевые покрытия используют для защиты труб из углеродистых сталей от атмосферной, высокотемпературной, сернистой и других видов коррозии. Нанесение покрытия на трубы производится из расплава (алюминирование) и диффузионным методом с применением порошковых смесей (алитирование). Коррозионная стойкость труб на воздухе, в морской воде, газах, содержащих сернистый ангидрид, и других агрессивных средах повышается в 3–10 раз.

Трубы из дорогостоящих коррозионностойких сталей успешно заменяются углеродистыми трубами с эмалевыми, стеклоэмалевыми и стеклянными покрытиями. Технология эмалирования труб предусматривает подготовку поверхности, нанесение эмали, сушку покрытия, обжиг и контроль качества. Подготовка поверхности производится термическим обезжириванием при температуре 800 °С с последующим травлением в растворе серной и соляной кислот. Травление может быть заменено пескоструйной или дробеструйной обработкой. Эмалевое покрытие наносят на поверхность трубы методом облива или обсыпания порошком. После нанесения покрытия его сушат в электрических сушилках при 80–140 °С с продувкой холодным или подогретым до 40–50 °С воздухом. Обжиг производят в электроиндукционных и газовых печах при температуре 600–980 °С в зависимости от состава эмали.

Стеклокристаллическое покрытие на основе эмалей имеет более высокие эксплуатационные свойства: термостойкость до 400–600 °С, механическая прочность в 3–6 раз выше, износоустойчивость в 1,5–2 раза выше. Технология нанесения этих покрытий отличается от обычной технологии эмалирования только термической обработкой. Стеклянные покрытия на внутреннюю поверхность труб наносятся баллонным, порошковым, шликерным, центробежным методами.

Более надежными являются системы полиэтиленовых (ПЭ) покрытий, которые используются для магистральных газопроводов и в сетях водогазоснабжения. ПЭ-покрытия эксплуатируются в малоагрессивных и агрессивных средах (водные растворы кислот, щелочей, солей 70 %-ной концентрации) при температуре до 60 °С. С повышением температуры до 80 °С стойкость ПЭ-покрытий снижается. Из полимеров, применяемых для внутренних покрытий труб, широкое распространение получили порошковые и жидкие материалы на основе эпоксидных смол.

Трубы с внутренним покрытием предназначены для транспортировки сред с высокой коррозионной активностью — высокоминерализованной воды с присутствием кислорода, углекислоты, сероводорода (пластовых, сточных вод) в широком диапазоне pH среды, с температурой транспортируемой жидкой среды до 95 °С, а для сухих сред — до 120 °С. Покрытие имеет высокую абразивную стойкость, стойкость к нефтепродуктам и различным химическим реагентам. Срок службы труб с покрытием превышает срок службы непокрытых труб в пять и более раз. Разработаны системы покрытий для трубопроводов холодной и горячей воды.

Использование труб с внутренним полимерным покрытием не только обеспечивает эффективную защиту от коррозии, но и позволяет увеличить пропускную способность трубопроводов (на 5–10 % и более), а также значительно снизить отложения на их внутренней поверхности. Трубопроводы с внутренними полимерными покрытиями значительно реже нуждаются в очистке и сохраняют первоначальную пропускную способность на протяжении длительного срока эксплуатации.

3.8. КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Технология кузнечно-штамповочного производства основана на получении заданной формы деталей или заготовок за счет рационального перераспределения металла. В этом состоит прогрессивность и эффективность этой технологии по сравнению с обработкой резанием, при которой часть металла удаляется в стружку.

Кузнечное ремесло и кузнечное производство имеют многовековую историю. Человеку давно были известны простейшие кузнечные инструменты для ковки: молот, клещи и наковальня, а также и простейшее нагревательное оборудование — горн.

Первая механизация процессов ковки относится к XVI в., когда стали применять механические рычажные, вододействующие молоты. При отсутствии гидроэнергии применялись копровые (падающие) молоты. В 1842 г. Д. Несмит построил первый паровой молот, а в 1846 г. Армстронг — первый паровой гидрокомплекс. В том же XIX в. стали применять приводные механические и пневматические молоты, получили развитие кривошипные прессы и другие кривошипные кузнечно-штамповочные машины.

3.8.1. Классификация кузнечно-штамповочных машин

В России выпускаются практически все виды оборудования для различных технологических процессов обработки материалов давлением: для разделительных операций листовой, холодной и объемной горячей штамповки; свободной ковки; гибки; правки; профилирования и др.

По назначению и области применения оборудование подразделяется на универсальное и специальное. **Универсальное** — оборудование для изготовления деталей различной конструкции в установленном диапазоне габаритных размеров и главного параметра. **Специальное** — оборудование, осваиваемое при единичных заказах, предназначено для изготовления однотипных

деталей. В его конструкции учтены индивидуальные технологические требования потребителя.

По уровню автоматизации оборудование различается по категориям:

машины со средствами механизации и автоматизации;

автоматические комплексы, представляющие собой сочетание кузнечно-прессовой машины (КПМ) со средствами автоматизации;

роботизированные комплексы, оснащенные одним или несколькими промышленными роботами;

кузнечно-прессовые автоматы со встроенными в конструкцию средствами автоматической подачи исходной заготовки, подачи ее с позиции на позицию обработки и выдачи изделия;

автоматические линии, предназначенные для выполнения взаимосвязанных функций в заданной последовательности технологических операций;

роторно-конвейерные линии, в состав которых входят отдельные роторные машины и устройства для транспортирования предметов обработки;

гибкие производственные модули — оборудование с программным управлением, автономно функционирующее.

По характеру воздействия на заготовку кузнечно-штамповочные машины разделяются на пять основных классов: **прессы**, **молоты**, **ротационные**, **импульсные машины**, **станы**.

Главным параметром прессов является номинальное усилие. **По виду энергии** привода прессы разделяются на **гидравлические** и **механические** (кривошипные и кулачковые, винтовые). В гидравлических прессах передача энергии деформирующим органом производится с помощью давления жидкости. **По расположению инструмента** прессы делятся на **вертикальные** и **горизонтальные**.

Принцип работы гидравлического пресса основан на законе Паскаля. Прессы в зависимости от технологического назначения отличаются конструкцией основных узлов, их расположением и количеством.

Кроме того, гидравлические прессы подразделяют на прессы для металла (рис. 62,*а*) и для неметаллических материалов (рис. 62,*б*). В свою очередь прессы для металла разделяют на

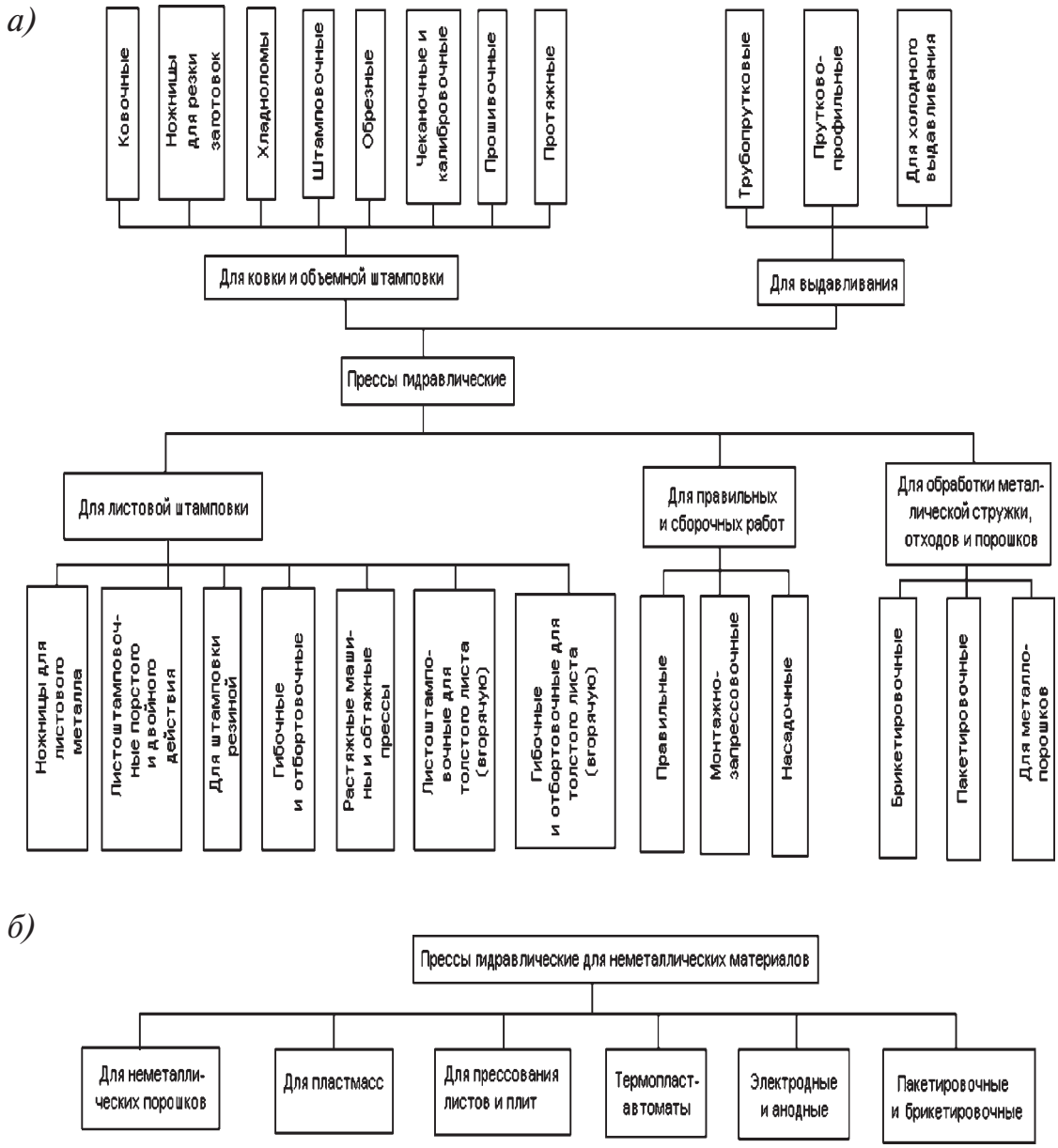


Рис. 62. Классификация гидравлических прессов по технологическому назначению:
а — для металла; *б* — для неметаллических материалов

пять групп: для ковки и штамповки; для выдавливания; для листовой штамповки; для плавильных и сборочных работ и для обработки металлических отходов.

На гидравлических ковочных прессах производят различные операции свободной ковки (вытяжку, осадку, проглаживание, прошивку, рубку и т. д.), а также объемную штамповку в подкладных штампах.

Штамповкой на гидравлических прессах получают стальные поковки, например, поковки колес железнодорожных вагонов, тепловозов, паровозов и т. д.

Штамповка в закрытых штампах на гидравлических прессах получила широкое применение при изготовлении крупногабаритных поковок из легких металлов: алюминия, магния и их сплавов, имеющих относительно низкую температуру ковки (~450 °С).

Штамповочные прессы при одинаковом номинальном усилии с ковочными прессами имеют меньшие ход и высоту штамповочного пространства. Прутки, трубы, проволока и профили из цветных металлов и их сплавов изготавливают прессованием на гидравлических прессах.

Особенности технологического процесса определяют конструкцию пресса, поэтому общепринятой является классификация прессов по технологическому признаку (см. рис. 62).

Несмотря на наличие сравнительно большого числа видов прессов, различных по технологическому назначению, можно утверждать, что 90 % всего парка кривошипных машин составляют кривошипные прессы общего назначения (рис. 63).

На рис. 64 приведена классификация кривошипных прессов общего назначения (универсальных прессов). В зависимости от конструктивного оформления станины различают открытые и закрытые прессы. В открытых прессах станина имеет С-образную форму, к штамповому пространству есть доступ с трех сторон, что удобно для обслуживания. Однако несимметричное нагружение станины обусловливает ее значительные деформации и возникновение перекосов штампа. В закрытых прессах применяют станину в виде симметричной рамы, что обеспечивает снижение деформаций и при центральной нагрузке исключает перекосы.

Наибольшее распространение в промышленности получили открытые прессы — до 80–85 % парка кривошипных прессов составляют эти сравнительно простые и удобные в эксплуатации прессы. Закрытые прессы по сравнению с открытыми имеют небольшие технологические возможности и, как правило, меньшее число ходов и бóльшую длину хода.

Развитие кузнечно-прессового производства способствует появлению новых видов и типов машин, поскольку кузнечно-

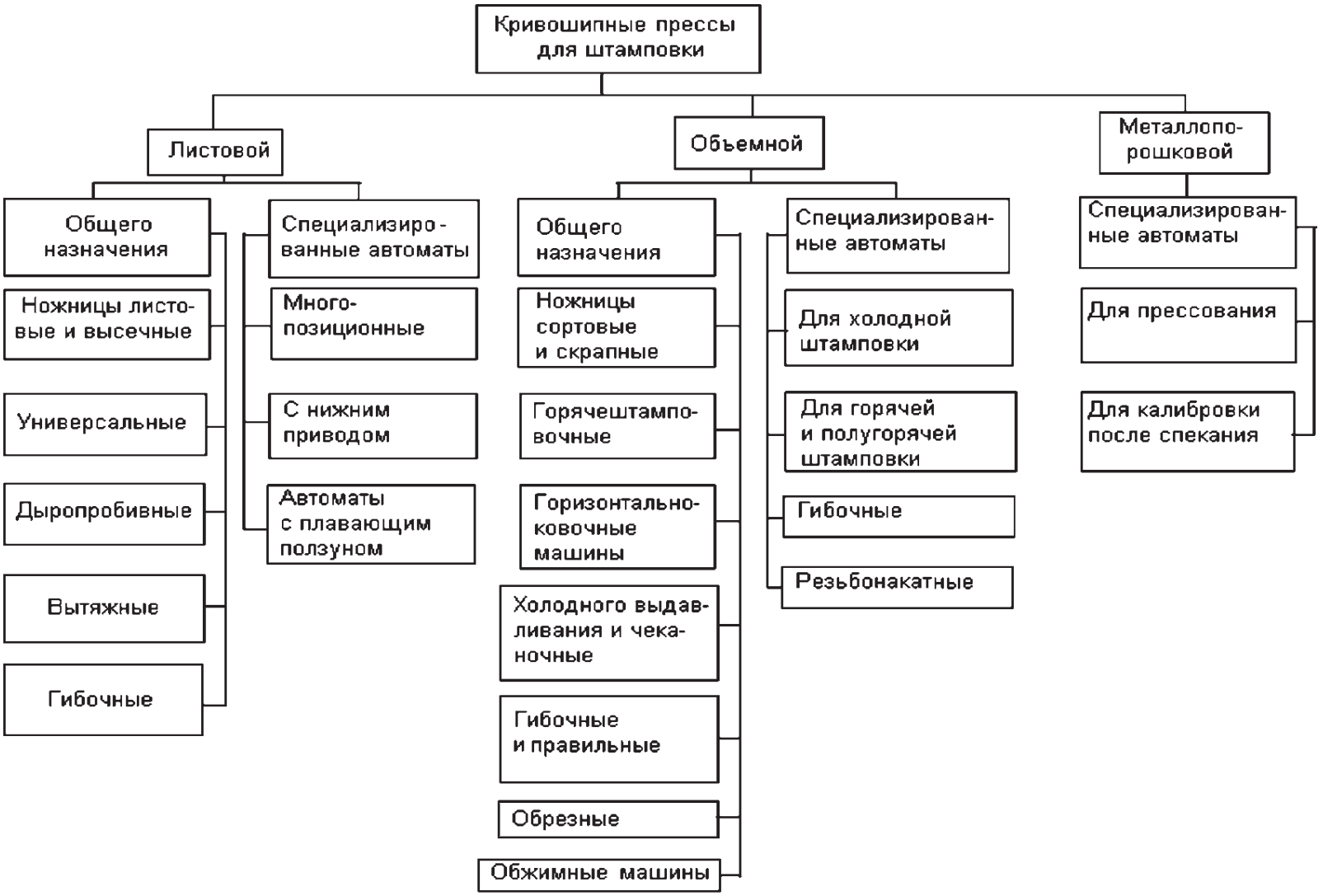


Рис. 63. Классификация кривошипных прессов по технологическому назначению

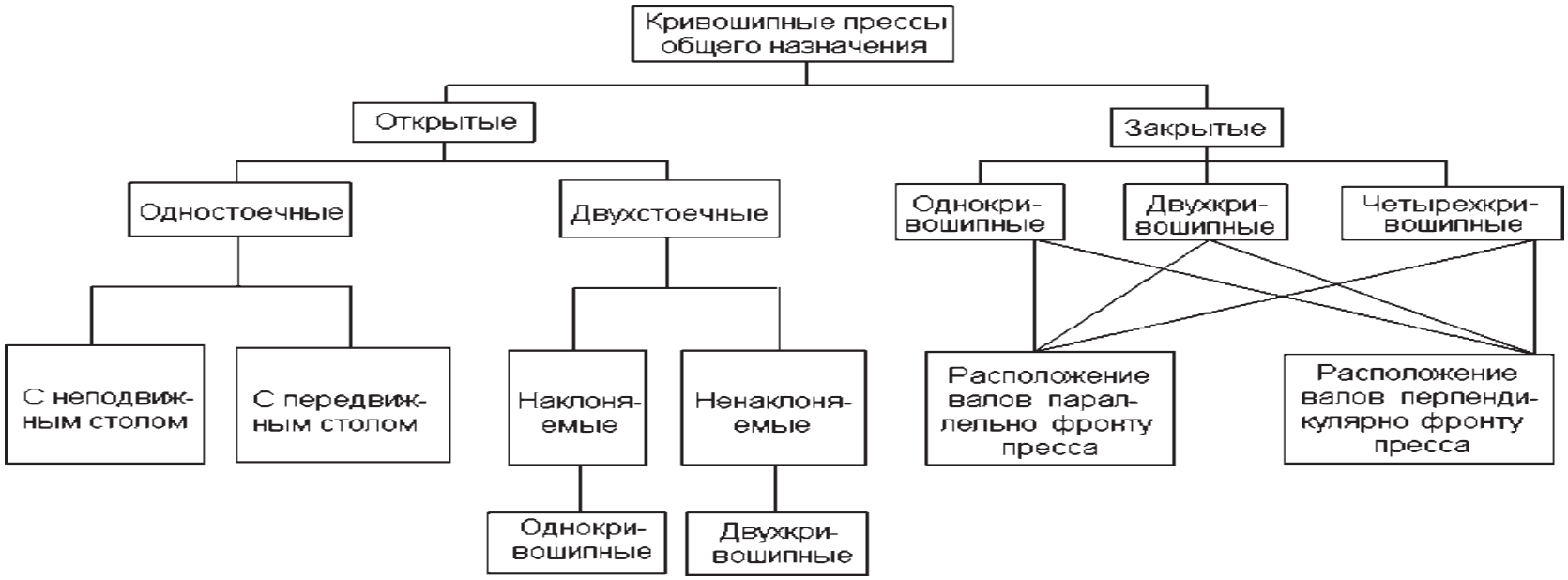


Рис. 64. Классификация конструкций универсальных прессов

прессовая технология совершенствуется и внедряется в новые для нее отрасли техники, в связи с этим классификация машин постоянно обновляется.

Молотами называются машины ударного действия, в которых энергия привода перед ударом преобразуется в кинетическую энергию линейного движения рабочих масс с закрепленным на них инструментом, а во время удара — в полезную работу деформирования поковки. Для привода молотов используют пар, сжатый воздух или газ, жидкость под давлением, горючую смесь, взрывчатые вещества, электромагнитное и гравитационное поля.

Молоты классифицируют по трем основным признакам: технологическому назначению, типу и кратности действия привода и конструктивному исполнению (рис. 65). **Паровоздушные** молоты приводятся в действие паром или сжатым воздухом, подающимся от котлов или компрессоров.

Пневматические также используют сжатый воздух от компрессора, встроенного в молот. Воздух, поступающий из атмосферы, представляет собой упругую среду (пружину) между поршнем компрессора и рабочим поршнем и является рабочим телом.

В **электромеханических** молотах подвижные части через преобразующие механизмы связаны с приводом, в качестве которого используют электродвигатели.

В **газовых** молотах на поршень действует давление газов, возникающее при вспышке горючего.

В **гидравлических** энергоносителем является жидкость, сжатая под давлением и поступающая от насоса.

Энергоносителем во **взрывных** молотах выступают твердые взрывчатые вещества и их смеси.

Специфика работы молотов и эффективность их действия были оценены еще в прошлом: молоты нашли свое достойное место даже на гербах русских городов. Так, на гербе г. Алапаевска, принятом в 1783 г., изображен механический молот для ковки железа, на гербе г. Александрова (1781) — слесарные тиски и наковальня, на гербе г. Кузнецка размещены (1804) кузнечные инструменты и кузница. Два перекрещенных клинка, ружейный ствол и два молота украшают герб г. Тулы, созданный более 200 лет назад (1778).

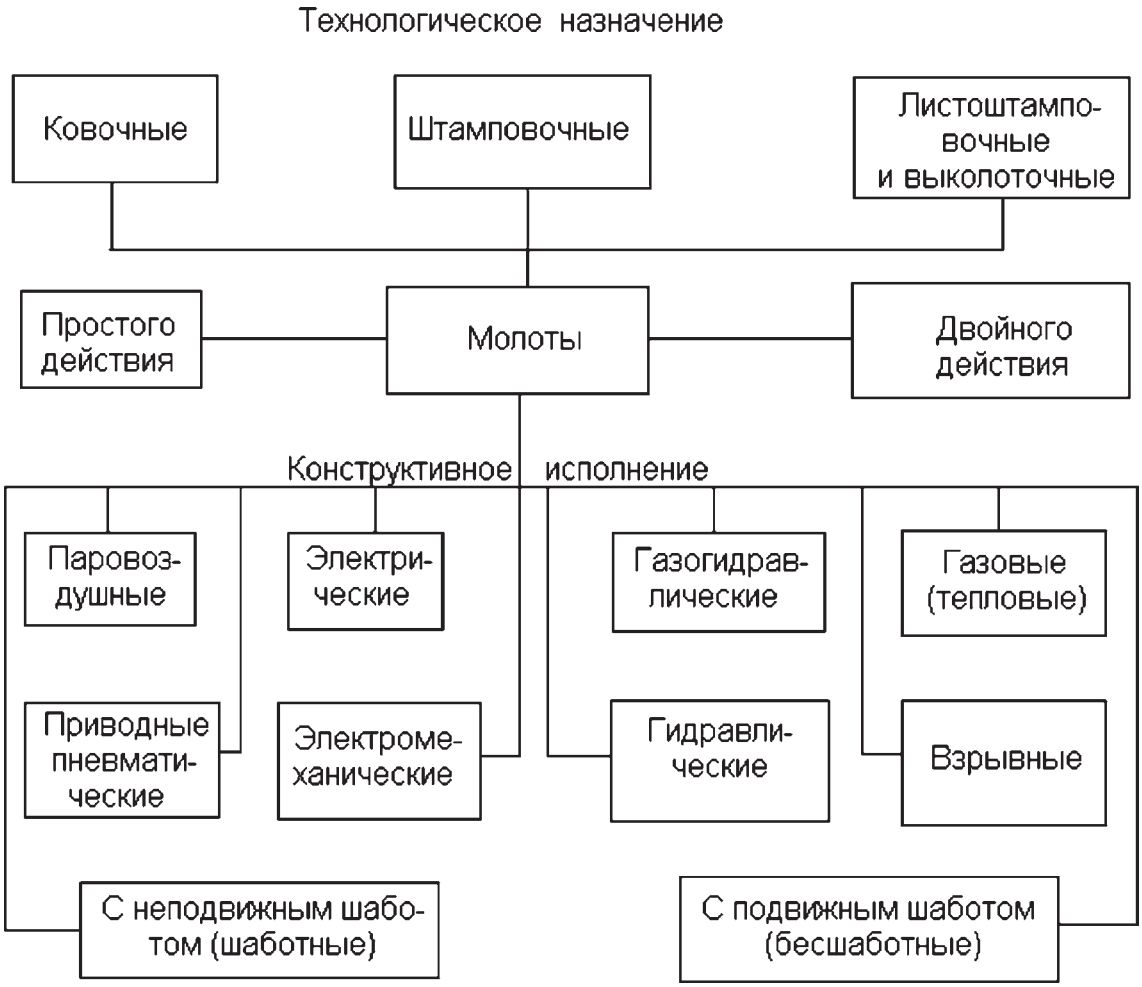


Рис. 65. Классификация молотов

По **технологическому назначению** паровоздушные молоты классифицируют на ковочные (для свободной ковки), штамповочные (для объемной штамповки), листоштамповочные (для штамповки из листовой заготовки), выколоточные (для локальной формовки листовой заготовки по шаблону серией ударов).

Паровоздушные молоты **по конструкции станин** подразделяют на вертикальные и горизонтальные, одностоечные, двухстоечные, арочные и мостовые, а по схеме соударения рабочих масс — с неподвижным шаботом (шаботные), с нижним ударом (движением рабочей массы вниз) и с верхним ударом (с движением вверх); с подвижным шаботом (с встречным движением разных по величине ударных масс) и бесшаботные (с встречным движением одинаковых масс). Наибольшее распространение в промышленнос-

ти получили шаботные паровоздушные штамповочные молоты с нижним ударом и вертикальной двухстоечной станиной.

Гидравлические молоты по принципу действия и назначению аналогичны паровоздушным. Применение гидропривода позволяет увеличить КПД, использовать программное управление, увеличить производительность и улучшить санитарно-технические условия труда штамповщика.

Фундаменты молотов представляют собой массивные железобетонные блоки, которые служат основаниями для установки молотов. Опорные фундаменты воспринимают статические и небольшие динамические нагрузки, а шаботные — предназначены для восприятия ударных, динамических нагрузок (рис. 66).

Среди различных типов кузнечно-штамповочных автоматов наиболее обширную группу составляют автоматы для объемной штамповки.

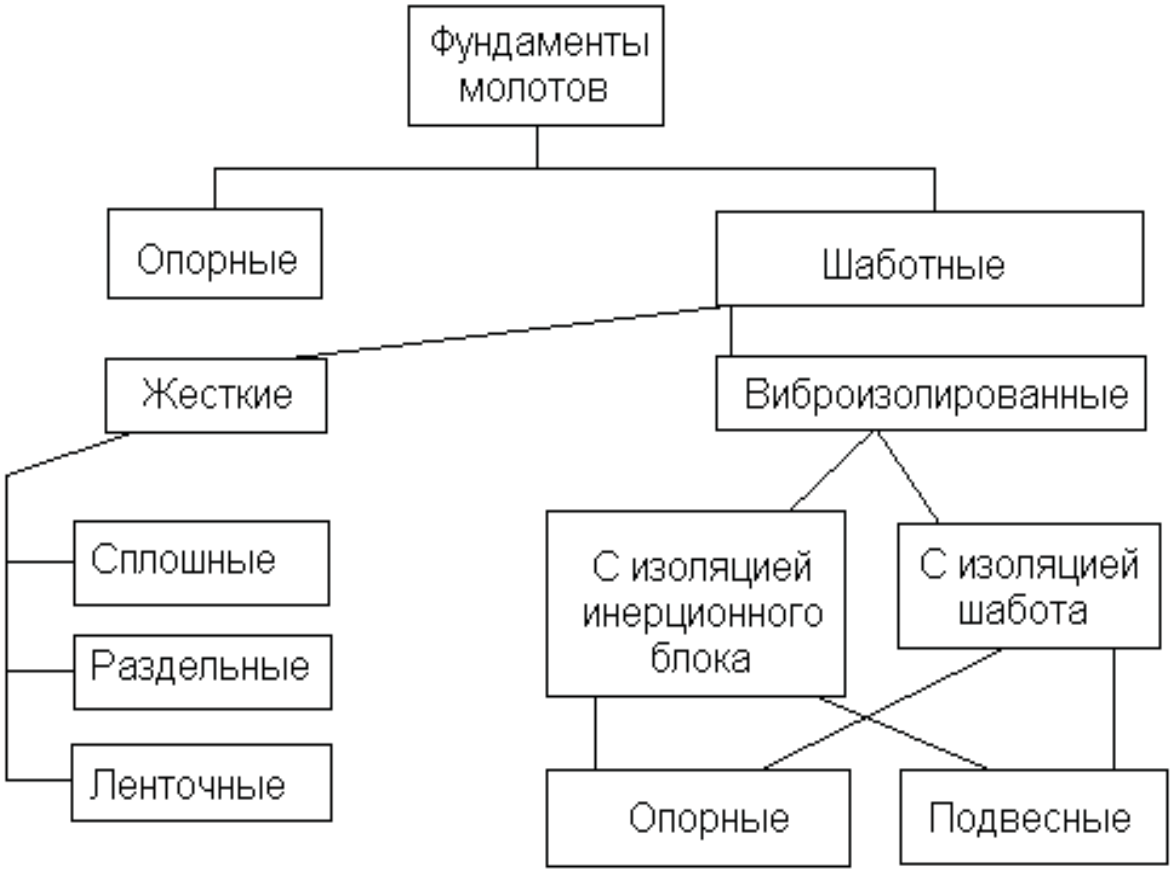


Рис. 66. Классификация фундаментов молотов

Автоматом называется такая машина, в которой все технологические переходы, связанные с изготовлением той или иной штамповки (полуфабриката) или готовой детали, осуществляются без непосредственного участия человека, т. е. автоматически. Роль человека при обслуживании автомата сводится к выполнению следующих действий: загрузке автомата сырьем (бунтовой материал, пруток, штучная заготовка, полуфабрикаты, засыпаемые в бункер и т. п.), наладке, смене инструмента по мере его износа или перехода на изготовление другого изделия, контролю (соответствие чертежу) и наблюдению за его работой (избежание аварийных положений), а также периодическому удалению штамповок при отсутствии их автоматического отвода. Все эти операции (за исключением наблюдения) являются внецикловыми. Совершенство автомата определяют по степени автоматизации внецикловых операций. Наиболее совершенный автомат тот, у которого автоматизированы и все внецикловые операции, включая смену инструмента.

На этих автоматах можно изготавливать разнообразные крепежные изделия и заготовки: болты, винты, заклепки, гвозди, шарики, ролики к подшипникам качения, различные типы гаек, заготовки колец шарикоподшипников и другие детали и заготовки, используемые в автотракторной, авиационной, машиностроительной и других отраслях промышленности. Эти автоматы **по методу обработки** подразделяют на **автоматы для холодной и горячей объемной штамповки**, а по **технологическим возможностям** — на **одно- и многопозиционные** (по числу штамповочных матриц-позиций).

Профиле- и резьбонакатные автоматы подразделяют на три вида: **с плоскими плашками, роликовые и с роликом и сегментом**.

Гибочные автоматы также представляют одну из наиболее обширных групп кузнечно-штамповочных автоматов. **По методу обработки** их подразделяют на **автоматы для холодной и горячей гибки**.

Листоштамповочные автоматы предназначены для последовательной многопереходной холодной штамповки различных деталей автотракторной и электротехнической промышленности, предметов бытового обихода и т. д.

По технологическим признакам листоштамповочные автоматы можно подразделить на две группы: к первой относятся автоматы, работающие на полосовом, рулонном или штучном материале

с передачей заготовки между позициями: ко второй — автоматы, работающие на полосовом и рулонном материале, в которых штамповку производят непосредственно в материале (с отделением заготовки только на последующей позиции штамповки). К первой группе относятся многопозиционные автоматы, ко второй — все автоматы с нижним приводом, дыропробивные автоматы и специальные автоматы для изготовления магнитоприводов.

Горизонтально-ковочные машины (ГКМ) применяют во многих отраслях промышленности при изготовлении самых различных заготовок, требующих технологических переходов высадки, прошивки, просечки, пережима заготовки, выдавливания, гибки и отрезки, т. е. отделения штамповки от прутка.

Широкое распространение этих машин в различных отраслях промышленности обусловлено их следующими преимуществами:

1) высокой производительностью при изготовлении относительно небольших партий;

2) экономичным расходом металла по сравнению со штамповкой на молотах;

3) высокой точностью получаемых поковок, что в сочетании с малыми припусками и уклонами обеспечивает незначительные отходы при дальнейшей обработке на металлорежущих станах;

4) широкими технологическими возможностями, по которым они близки к автоматам для горячей объемной штамповки;

5) возможностью проведения автоматизации штамповки при изготовлении крупных партий однотипных деталей.

Классификация ГКМ приведена на рис. 67. Главное преимущество машин с горизонтальной плоскостью разъема матриц состоит в том, что при раскрытых матрицах зев станины полностью открыт для движения заготовок по всей длине матричного блока, что безусловно облегчает и упрощает автоматизацию.

Ротационное обжатие — это изменение формы заготовки путем периодического обжатия матрицами (бойками) с удлинением ее вдоль оси при сохранении постоянного объема. Ротационному обжатию подвергают материалы, обладающие достаточной пластичностью, и материалы, плохо поддающиеся обработке давлением. Этот процесс применяют для производства различного рода цилиндрических и ступенчатых валков, велосипедных спиц, для обжима труб и валов.

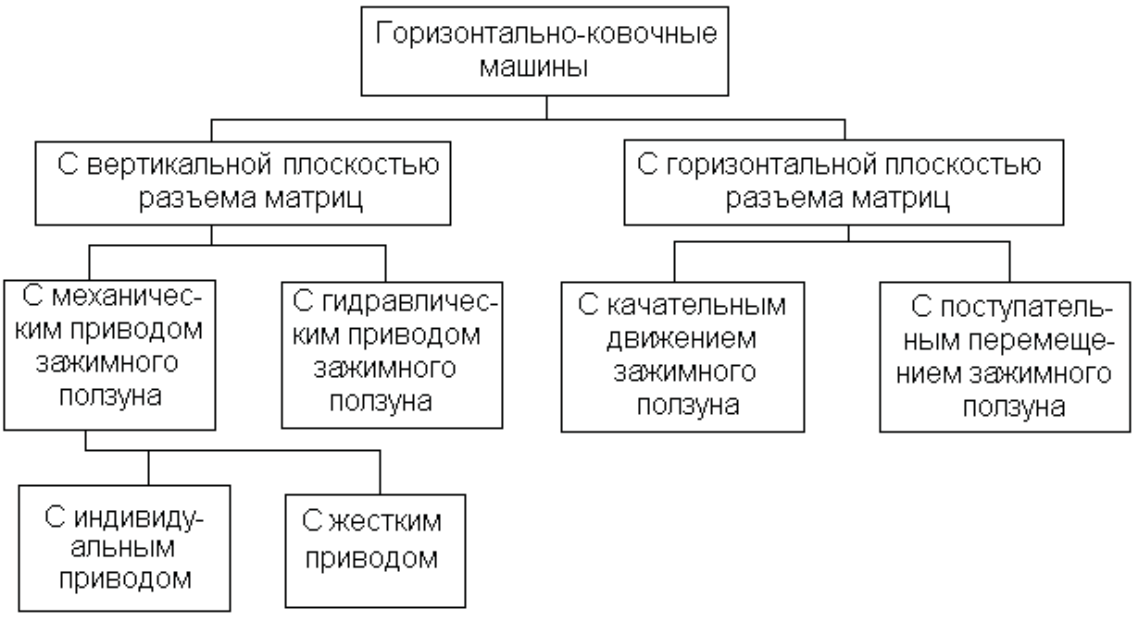


Рис. 67. Классификация горизонтально-ковочных машин

Ротационное обжатие с успехом заменяет токарную обработку. При этом по сравнению с токарной обработкой увеличивается производительность, наблюдается экономия металла, повышается точность обработки, уменьшается шероховатость поверхности и улучшается качество металла (волокна не перерезаются, прочностные характеристики металла повышаются). На рис. 68 приведена классификация обжимных машин.

По направлению подачи заготовки в зону обработки машины подразделяют на горизонтальные и вертикальные. По степени автоматизации все обжимные машины можно разделить на три группы: машины с ручной загрузкой и ручной подачей заготовок; полуавтоматы, в которых загрузка заготовок в подающее устройство осуществляется вручную, а подача и обработка изделий производятся автоматически; автоматы, у которых и загрузка и обработка изделий происходят автоматически.

В **ротационно-обжимных машинах** шпиндель, несущий инструмент, или обойма с роликами совершает вращение вокруг обрабатываемой заготовки. В **радиально-обжимных машинах** сам инструмент и приводящие его в действие узлы не вращаются вокруг заготовки, а движение инструмента происходит по радиусу от периферии к центру и обратно. В машинах **простого действия** все рабочие органы осуществляют обработку одновременно с равной

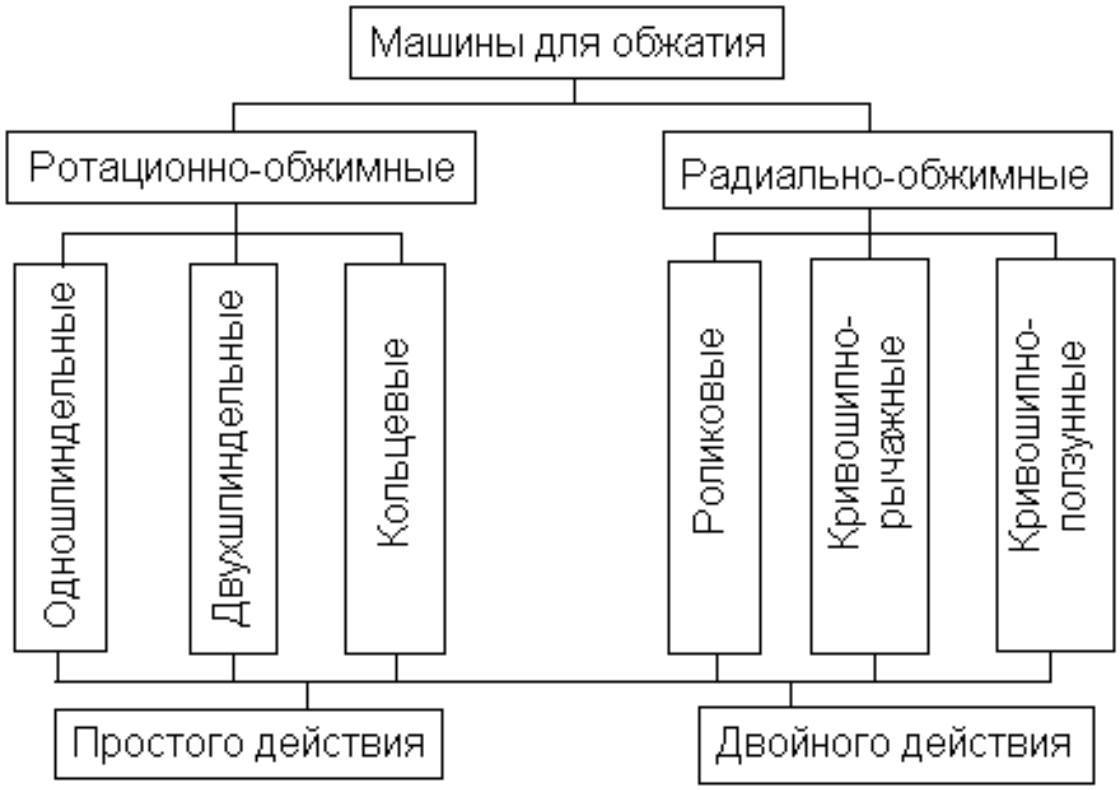


Рис. 68. Классификация машин для обжатия

степенью обжатия, что обусловливает простоту их конструкции. В машинах двойного действия имеются две пары рабочих органов, производящих обработку в заданной последовательности с различной степенью обжатия. При этом движение рабочих органов осуществляется от двух различных по конструкции приводов.

Радиально-обжимные машины применяют для ковки—обжима крупных поковок. Большим преимуществом обработки на радиально-обжимной машине является хорошая проковка металла и отсутствие рыхлот. Подобную проковку под молотом получить нельзя.

По технологическому назначению ротационные машины можно разделить на две группы (рис. 69).

Машины ротационного типа **по виду рабочего органа** (инструмента) могут быть подразделены на **валковые, роликовые, сегментные и дисковые**.

Несколько обособленную группу составляют **гибочные машины** с поворотной траверсой (профилегибочные) и поворотным столом. Для машин этого типа характерно то, что операции в них совершаются во время транспортировки заготовки, поэто-

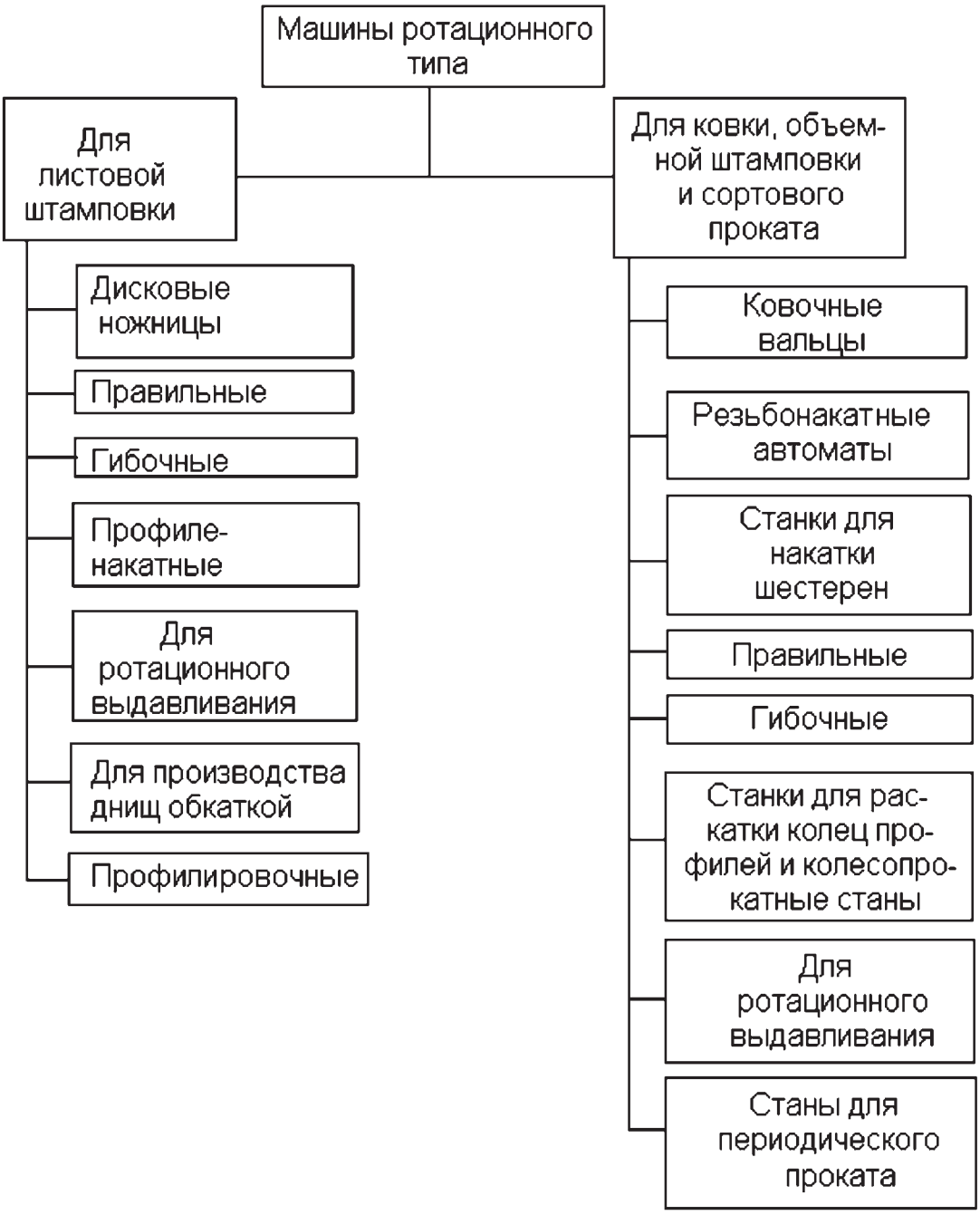


Рис. 69. Классификация машин ротационного типа

му полнее используется цикл их работы (по времени); для этого необходимо лишь автоматизировать подачу заготовок.

В отличие от машин ротационного типа молоты и прессы используют в качестве рабочего хода лишь небольшую часть всего хода и, как правило, не используют обратный ход (т. е. в этих машинах используется лишь небольшая часть цикла работы). Еще

одним преимуществом этих машин является возможность осуществления непрерывного процесса обработки заготовки.

В представленной классификации нашли отражение лишь некоторые виды из применяемых в промышленности кузнечно-штамповочных машин.

3.8.2. Краткая характеристика кузнечно-штамповочных процессов

Прессованием называют процесс выдавливания (экструзии) находящегося в полости контейнера металла через выходное отверстие. Этот процесс получил большое распространение при серийном и массовом производстве профилей и труб различного сечения как из цветных, так и из черных металлов.

Для успешного процесса выдавливания необходима весьма тщательная обработка поверхностей контейнера и матрицы, соприкасающихся с деформируемым металлом, для снижения контактных напряжений. При прессовании цветных металлов, сталей и труднодеформируемых сплавов для снижения теплового градиента между более холодным инструментом и горячим металлом применяются различные графитовые пасты (с наполнителями), жидкое стекло особых составов и др. Это приводит к тому, что коэффициент трения при прессовании обычно значительно ниже предельных значений.

При прессовании характер течения металла в начале и конце процесса резко различается (в отличие от других процессов обработки металлов давлением). Это связано с резким изменением соотношения диаметра и длины заготовки, распределения усилий в зоне деформации, температуры. На характер течения влияют: фазовый состав сплава, его теплопроводность, трение о стенки контейнера, конструкция матрицы.

Из-за неравномерности течения металла из конечной части пресс-изделия получается расслоение металла, или неплотность, называемая пресс-утяжкой. **Пресс-утяжка** — основной и наиболее распространенный дефект пресс-изделий.

К основным деталям прессового инструмента относятся: **контейнер**, **матрица**, **пуансон** (штемпель), **игла** и **иглодержатель** (при прессовании полых профилей и труб).

Представляет интерес использование горячего гидродинамического выдавливания для чугуна, поскольку обычные способы пластического формообразования изделий не позволяют получать качественные детали из него. Предлагаемая технология состоит в следующем: электронагрев заготовок, горячее выдавливание их без пресс-остатка с одновременной калибровкой, правка и термообработка на выходе из штампа с последующим низкотемпературным отпуском.

Горячим выдавливанием можно так сориентировать включения графита относительно внешней нагрузки, что они станут препятствием для зарождения и распространения трещин в чугуне.

В **зависимости от конструкции** детали из чугуна, изготавливаемого этим методом, можно разделить на три группы (рис. 70): 1) **прутки и профили**; 2) **пустотелые изделия**; 3) **изделия сложной формы**.

Эта технология позволяет:

увеличить коэффициент использования металла в 3—10 раз;

уменьшить объем механической обработки, так как припуск под обработку минимален.

Прессование по сравнению с прокаткой имеет преимущества и недостатки, и в каждом отдельном случае лишь технико-экономические расчеты позволяют решать вопрос о целесообразности того или иного метода.

Преимущества прессования следующие.

1. Вид напряженного состояния (в основном трехосное сжатие), значительно повышающий пластичность металла и позволяющий вести обработку с большими степенями деформации.

2. Более быстрый переход от изготовления изделий одного размера и формы к другим.

3. Возможность получения сплошных и полых профилей самых сложных конфигураций постоянного, а также переменного или периодического сечения по длине профиля.

4. Возможность изготовления изделия из металлов и сплавов, не поддающихся или трудно поддающихся прокатке.

5. Удобство при производстве малых серий, так как переход с одного размера на другой проходит быстро.

6. Допуски поперечных линейных размеров прессованных полуфабрикатов меньше, чем катаных.

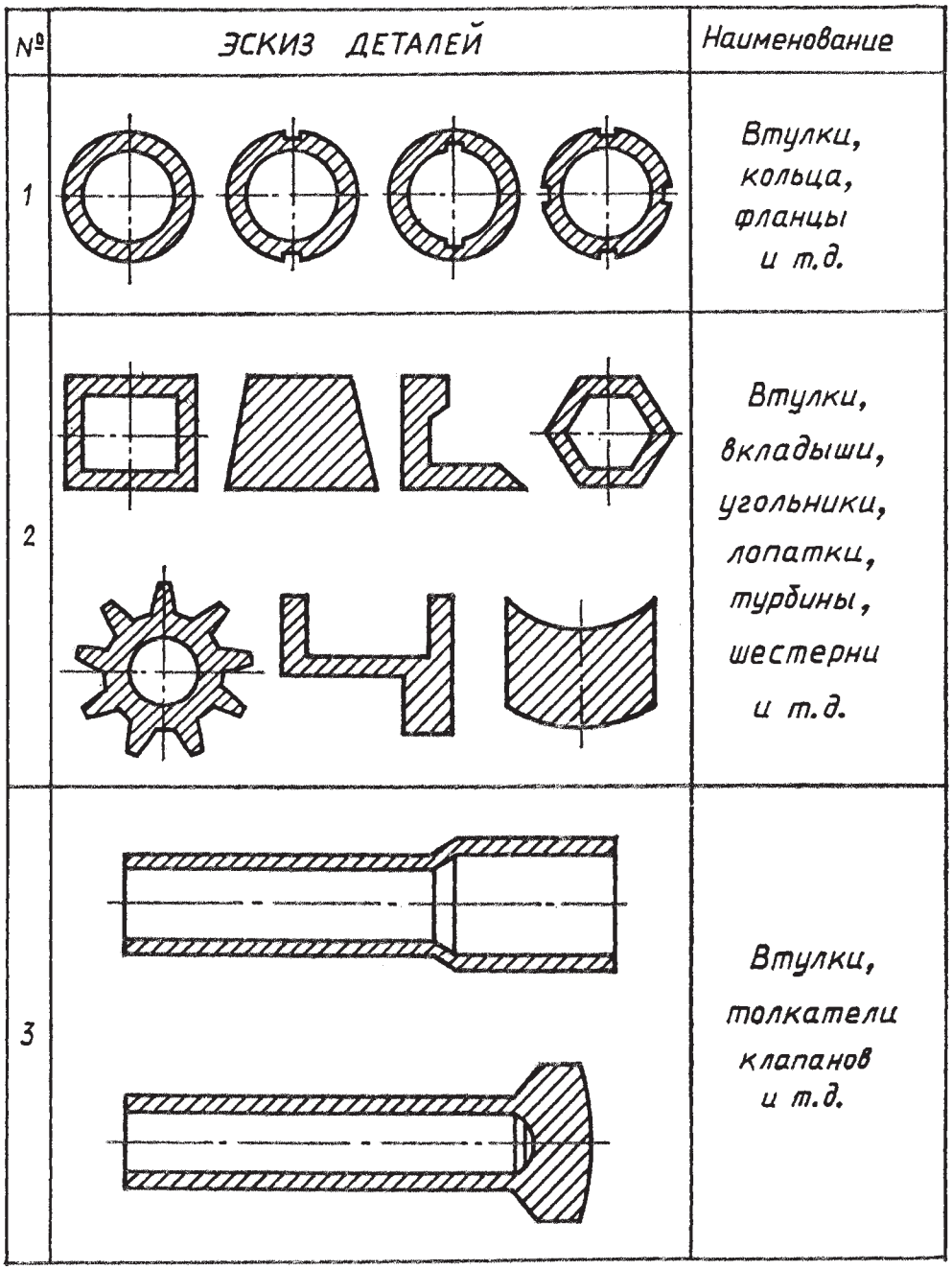


Рис. 70. Группы сложности деталей машин, полученных методом горячего гидродинамического выдавливания

Недостатки прессования следующие.

1. Значительно более высокие потери на отходах, главным образом в виде пресс-остатка и пресс-утяжки.

2. Большая неравномерность механических свойств по длине и поперечному сечению прессованного изделия.

3. Сравнительно небольшие скорости истечения, а следовательно, и производительность процесса.

Свободная ковка. Свободной ковкой можно изготавливать заготовки практически всех марок деформируемых конструкционных металлов и сплавов. В настоящее время около 15 % выплавляемой стали перерабатывается ковкой.

Свободной ковкой называется способ горячей обработки металлов давлением, осуществляемый при помощи удара или нажатия бойка. При этом течение металла происходит в направлениях, не ограниченных поверхностями инструмента. Свободная ковка применяется в мелкосерийном, а также индивидуальном производстве и в настоящее время является единственным способом изготовления тяжелых поковок типа валов гидрогенераторов, турбинных дисков и т. д.

В качестве исходной заготовки для свободной ковки используются слитки массой до 420 т, непрерывнолитые заготовки, а также прокат квадратного, круглого или прямоугольного сечений. Применяемые для свободной ковки слитки могут иметь различную форму сечения.

При обработке металла ковкой, кроме придания поковке необходимой формы и геометрических размеров, стараются устранить дефекты исходной заготовки: уплотнить металл в зонах пористости, заварить трещины, раздробить дендритную крупнозернистую структуру и неметаллические включения.

Свободная ковка — не только один из видов обработки металлов давлением, это еще и самый древний способ, которому, наверное, не меньше десяти тысяч лет. Ведь на самородки золота и серебра, на куски метеоритного железа человек переносил известный ему уже метод обработки материалов — удары камнем. Слитки металлов изменяли свою форму — это и была ковка.

В течение многих веков у всех народов профессия кузнеца была священной. И сегодня кузнец, занимающийся ручной ковкой, работает почти так же, как многие сотни лет назад.

Свободная машинная ковка производится на молотах и прессах. Операции, которым подвергается металл при ковке, следу-

ющие: **осадка, прошивка, гибка, закручивание, рубка**. При этом процессе деформирование металла происходит в течение очень короткого времени — порядка сотых (тысячных) долей секунды. Количество ударов определяется в основном размерами и материалом поковки.

Обычная технологическая схема ковки: **нагрев заготовки** (слитка), **беллетировка** (превращение конического слитка в цилиндрический), **протяжка, подогрев и последующая ковка в размер, разрубка на мерные длины, охлаждение и термообработка, осмотр, обмер, зачистка дефектов, отрезка образцов на механические испытания, сдача**. После беллетировки производят обрубку донной и прибыльной частей. Кроме этого отхода металла, есть отход на угар (2–3 % массы слитка при нагреве и до 2 % на каждый подогрев), так как процесс ковки многооперационный. Эти потери намного больше, чем при прокатке, объемной и листовой штамповке.

Современные автоматизированные ковочные комплексы оснащены компьютерной техникой и позволяют выполнять заданные технологические параметры ковки.

К основным преимуществам свободной ковки относятся следующие.

1. Получение металла высоких качества и свойств по сравнению с отливками.

2. Возможность получения крупных поковок по массе и габаритам, что другими способами либо недостижимо, либо экономически нецелесообразно.

3. Для изготовления крупных поковок требуются сравнительно небольшие усилия, так как обработка осуществляется обжатием отдельных небольших участков, а отдельные усилия невелики из-за относительно свободного течения металла в стороны.

4. Применение универсального оборудования и инструмента резко снижает затраты производства, особенно мелкосерийного.

Недостатки свободной ковки следующие.

1. Низкая производительность по сравнению с горячей штамповкой.

2. Большие нагрузки на поковки, что требует большого объема последующей обработки. Большие допуски и припуски, осо-

бенно на крупных поковках, вызывают повышение отходов металла в стружку.

Несмотря на это в ряде случаев, особенно при единичном и мелкосерийном производстве, а также при изготовлении уникальных по габаритам заготовок (например, в тяжелом машиностроении) свободная ковка оказывается экономически более целесообразным способом получения деформированных заготовок.

Объемная штамповка. Штамповка — это способ изготовления изделий давлением с помощью специального инструмента (штампов), рабочая полость которых определяет конфигурацию получаемого изделия. Выбор варианта технологического процесса и типов штампов должен определяться технико-экономической эффективностью изготовления детали в данных условиях производства.

Для большинства штампованных поковок заготовкой служит сортовой прокат круглого и квадратного поперечного сечения. Кроме сортового проката, применяют также прессованные прутки и трубные заготовки (из цветных металлов и сплавов), литые заготовки, профильный прокат для определенных поковок (крестообразный, полосовой с выступами и др.) и прокат периодического профиля.

Технологический процесс изготовления детали зависит от ее формы и размеров, технических требований к детали, штампуемости материала, годовой программы выпуска, конкретных условий производства и других факторов.

Штамповки по своим размерам, точности, допускам и припускам значительно лучше аналогичных деталей, полученных свободной ковкой и литьем.

Штампуемые детали отличаются большим разнообразием форм и размеров. Кроме того, одна и та же деталь может изготавливаться разными способами штамповки в зависимости от программы выпуска, штампуемости материала, точности размеров и других факторов.

В массовом и крупносерийном производстве штамповку производят на высокопроизводительном специализированном оборудовании — роторных и конвейерных линиях, обрабатывающих центрах, автоматах, многопозиционных прессах с автоматическими подачей заготовок и съемом деталей.

В серийном производстве штамповку производят в основном на универсальных прессах или специализированном оборудовании с различной степенью автоматизации.

При штамповке в мелкосерийном и единичном производстве используют специальные способы штамповки: поэлементная штамповка; штамповка пинцетными, пластинчатыми, универсально-сборными и переналаживаемыми штампами; штамповка на координатно-револьверных, универсально-гибочных прессах, лазерных установках; ротационные способы обработки металлов давлением; штамповка эластичными средами; гидростатические и импульсные способы штамповки и др.

При штамповке мелких деталей для повышения производительности и экономии металла используют многорядные последовательные штампы, изготавливающие за один ход пресса несколько деталей; последовательную штамповку в ленте и др.

Механизация и автоматизация штамповочных работ проводится не только для повышения производительности, но и для исключения травматизма, улучшения условий труда. Выбираемый тип автоматической подачи зависит от размеров и точности штампуемой детали, толщины материала, шага подачи, производительности, обусловленной производственной программой.

Детали можно штамповать в горячем и холодном состояниях на различных типах оборудования. Сущность процесса **горячей объемной штамповки** состоит в том, что нагретая до определенной температуры заготовка помещается в полость одной из половин штампа, где при воздействии второй половины она приобретает заданную форму. Горячей объемной штамповке подвергаются деформируемые металлы и сплавы: сталь различных марок и многие труднодеформируемые материалы на основе алюминия, магния, меди, титана. **В зависимости от типа штампа** штамповку подразделяют **на штамповку в открытых штампах, в закрытых штампах, в штампах для выдавливания**. Тип штампа определяет течение металла, поэтому данное разделение является основным. В последнее время нашла применение **сферодвижная штамповка**, сочетающая элементы штамповки и прокатки.

Штамповка в открытых штампах характеризуется тем, что плоскость разъема верхнего и нижнего штампов перпендикулярна направлению деформирующей силы и зазор между верхним

и нижним штампами переменный. Этот вид штамповки получил наибольшее распространение.

Штамповка в закрытых штампах характеризуется тем, что штамп в процессе деформирования остается закрытым. Зазор между подвижной и неподвижной частями штампа в процессе деформирования постоянный и относительно небольшой. Он служит только для создания подвижности одной части штампа относительно другой и предохраняет штампы от заклинивания. Через него в конце штамповки металл может вытекать в торцовый заусенец.

При расчете объема заготовок его увеличивают по сравнению с объемом готовой штамповки на величину **облоя**. Для получения облоя в верхнем ручье вытачивается специальная канавка. Штамповка в закрытых штампах производится без облоя.

В зависимости от оборудования различают следующие разновидности процесса: штамповка на молотах, штамповка на прессах (кривошипных, гидравлических, винтовых), штамповка на горизонтально-ковочных машинах, штамповка на специализированном оборудовании (вальцовка на ковочных вальцах, раскатка на раскатных машинах, редуцирование на ротационных машинах, штамповка на автоматах, сферодвижная штамповка и др.).

Для обеспечения наиболее рационального процесса штамповки необходимыми параметрами являются: минимальная необходимая деформирующая сила для получения качественной поковки; минимальный расход металла, соответственно минимальный избыток, главным образом на облой; максимальная стойкость штампов; максимальная производительность; необходимое качество поковки. Все эти факторы взаимосвязаны.

Основным видом заготовок для изготовления машиностроительных деталей различной конфигурации и массы с высокими механическими свойствами являются поковки.

На необходимую силу для штамповки влияют: размеры и конфигурация поковки; размеры облойной канавки; избыток металла в заготовке; форма и размеры заготовки; коэффициент трения металла по стенкам полости штампа (наличие смазки, окалины); неравномерность распределения температуры и деформации в поковке; скорость деформирования и др.

Размеры и конфигурация поковки обусловливаются готовой деталью и стандартами на допуски, припуски, радиусы скруглений и штамповочные уклоны, и в большинстве случаев их нельзя существенно изменить. Все они основаны на данных практики.

Технологическая схема процесса горячей объемной штамповки поковок состоит из следующих операций: разделка исходного металла (проката) на мерные заготовки; нагрев заготовок; формообразование поковки; обрезка облоя по наружному контуру и проколка перемычки у поковок с отверстиями; термическая обработка поковок (правка, калибровка).

Разделка металла на мерные заготовки может производиться на пресс-ножницах, кривошипных прессах, ломкой на хладноломах, резкой на металлорежущих, анодно-механических абразивных станках, газовой резкой. При этом необходимо обеспечить высокую точность длины и ровные торцы заготовки.

Резка на ножницах и прессах является основным и наиболее производительным способом получения заготовок в цехах горячей объемной штамповки. Точность и качество резки на ножницах зависит от величины зазора между ножами.

Резка на пилах применяется для разделки прутков из цветных металлов и их сплавов, а также периодического проката и заготовок из труб. При этом обеспечивается хорошее качество резания и высокая точность.

Основным способом нагрева в горячештамповочных цехах является пламенный, который позволяет нагревать заготовки различной массы, размеров и формы. В крупносерийном и массовом производстве нагрев заготовок осуществляется в полуметодических и методических печах. При крупносерийном производстве широко применяются толкательные, периодического действия (полуметодические) печи, печи с вращающимся подом, обеспечивающие нагрев заготовок с меньшим окислением поверхности. При мелкосерийном производстве возможность использования печей непрерывного (методического) действия ограничена, и приходится применять печи с заслонкой или щелевые.

Конструкции и размеры печи выбираются в зависимости от формы, размеров заготовок и требуемой производительности.

Нагревательные устройства, как правило, устанавливаются у каждого штамповочного агрегата. Их размеры и производительность определяются производительностью штамповочного оборудования и технологическими требованиями к нагреву металла.

В современных цехах горячей штамповки получил распространение индукционный нагрев, благодаря технологическим преимуществам по сравнению с обычным пламенным (нагрев заготовок с минимальной окалиной, обеспечение постоянства температуры и любого темпа нагрева, быстрый пуск и останов нагревателя, возможность механизации и автоматизации процесса и т. п.).

Основным этапом разработки технологического процесса штамповки является чертеж поковки, который составляют на основании чертежа чистовой детали, получаемой из поковки. Чертеж горячей поковки составляется по чертежу холодной. Номинальные размеры горячей и холодной поковок отличаются между собой на величину тепловой усадки, разной для различных металлов и сплавов. Для ориентировочных расчетов температуру окончания штамповки стали принимают равной 900–1000 °С. Получив чертеж готовой детали и технические условия на ее изготовление, технолог выбирает метод штамповки, оборудование и делает чертеж поковки.

Штамповку на молотах в открытых штампах производят в одноручьевых и многоручьевых штампах. Одноручьевые штампы применяют для штамповки поковок простой конфигурации (шестерни, диски, втулки, прямые рычаги, не имеющие резких изменений поперечных сечений по длине), а также для штамповки тонких быстроостывающих турбинных и компрессорных лопаток, слесарного и хирургического инструмента, не требующих выполнения заготовительных операций (протяжки, подкатки, гибки и др.).

Многоручьевые штампы применяют для штамповки поковок сложной конфигурации и поковок, у которых поперечные сечения вдоль оси резко отличаются друг от друга (рычаги, шатуны и др.).

Ручьи молотового штампа разделяются на **штамповочные и заготовительные**. К штамповочным относятся чистовой, или

окончательный, и черновой, или предварительный, к заготовительным — пережимной, протяжной, подкатной, формовочный, гибочный, площадка для осадки. Отрубной нож применяют для отделения отштампованной поковки от прутка.

В открытых штампах на молотах изготовляют 30–40 % всего объема крупных поковок (кольца, фланцы, шестерни, барабаны и т. д.). Большую часть из них получают прогрессивной малоотходной техникой без штамповочных уклонов (**безуклонной штамповкой**). Ее особенность состоит в получении на молоте поковок предварительной формы без напусков металла на уклоны, необходимые для свободного удаления поковки из полости штампа по обычной технологии. При таком способе экономия металла достигает 10–20 %.

Среди различных технологий горячештамповочного производства важное место занимает изготовление поковок на молотах в закрытых штампах (**безоблойная штамповка**). Наряду с экономией металла, которая в зависимости от конфигурации поковок достигает 10–30 % и более, снижается трудоемкость и себестоимость изготовления поковки за счет устранения операции обрезки облоя, высвобождаются обрезные прессы, отпадает необходимость использовать дорогостоящий обрезной инструмент, уменьшается трудоемкость обработки на металлорежущих станках.

Точность получаемых в закрытых штампах поковок по величине припусков и допусков выше, чем при штамповке в открытых штампах, и они более высокого качества. Кроме того, при штамповке в закрытых штампах из-за наличия схемы всестороннего неравномерного сжатия можно штамповать труднодеформируемые сплавы и стали, имеющие пониженную пластичность, и получать поковки с хорошими механическими свойствами.

Так как штамп имеет высокую стоимость и является пригодным для изготовления поковки только данной конфигурации, штамповка становится рентабельной только в условиях массового и крупносерийного производства. Объем производства некоторых кузнечно-штамповочных цехов достигает 100 000–150 000 и более тонн поковок в год.

Стоимость штампованных деталей с последующей обработкой резанием в 2–2,5 раза ниже стоимости тех же деталей, изготовленных только резанием.

Важным преимуществом процессов горячей объемной штамповки является возможность получения поковок различных конфигурации и массы, обладающих после термообработки наивысшими механическими свойствами, которые возможно придать металлу данного химического состава. Этот процесс находит широкое применение в производстве автомобилей и тракторов, сельскохозяйственных и дорожных машин, слесарного и медицинского инструмента, в вагоностроении и тепловозостроении, производстве бытовых изделий и многих других производствах.

Преимуществом **холодной объемной штамповки** является возможность исключения из техпроцесса нагрева металла, приводящего к окалинообразованию, что обеспечивает высокое качество поверхности и точность размеров. В результате этого существенно сокращается трудоемкость последующих операций мехобработки, уменьшаются отходы металла и повышается производительность процесса.

Холодную штамповку применяют не только в массовом и крупносерийном производствах, но и мелкосерийном. Этот метод позволяет получать поковки с тонкими сечениями, что недостижимо в нагретом состоянии из-за быстрого охлаждения, но практически неприменимо для изготовления крупных изделий. Наибольшие размеры деталей, изготовливаемых холодной объемной штамповкой, составляют в поперечном сечении не более 75—100 мм.

Технологические процессы холодной штамповки можно представить в виде основных операций, при одновременном или последовательном применении которых получаются любые сложные детали (рис. 71).

Отрезку заготовок из сортового, трубного и листового прокатов осуществляют многими способами на металлорежущих станках, пилах, лазером, в штампах и др. Для холодной объемной штамповки наиболее дешевой, производительной и металлосберегающей является отрезка в штампах.

Осадка (высадка) — технологическая операция, в процессе которой происходит уменьшение высоты всей (части) заготовки. В холодной объемной штамповке осадку применяют, если диаметр отрезанной заготовки меньше диаметра контейнера (мат-

Рис. 71. Классификация операций холодной объемной штамповки

рицы); высадку — для образования буртов или утолщений концевых частей стержневых заготовок.

Прямое выдавливание (прессование) — технологическая операция штамповки, в процессе которой происходит истечение металла, заключенного в замкнутую полость, в направлении движения пуансона через отверстие (очко матрицы), форма которого определяет поперечное сечение выдавливаемой части деформируемой заготовки. Прямое выдавливание применяют для изготовления изделий из сортового и трубного прокатов.

Обратное выдавливание (прошивка в закрытой матрице) — технологическая операция штамповки, в процессе которой происходит истечение металла из замкнутой полости в направлении, обратном (встречном) движению пуансона. Обратное выдавливание применяют для изготовления поковок с полостями типа стаканов: корпуса карданного подшипника, поршневого кольца, корпуса шпульки швейной машины и др. В процессе обратного выдавливания только часть заготовки, расположенной ниже торца пуансона, находится в пластическом состоянии. Недеформируемый объем остается неподвижным, благодаря чему деформирующая сила на большей части хода остается постоянной.

Радиальное выдавливание — технологическая операция штамповки, в процессе которой происходит истечение металла из замкнутой цилиндрической полости (контейнера) через щель, расположенную по периметру боковой поверхности. Радиальное выдавливание применяют для штамповки поковок с фланцами.

Боковое выдавливание (поперечное) — технологическая операция штамповки, в процессе которой происходит истечение металла из замкнутой полости (контейнера) через отверстие в боковой поверхности в боковые полости. Боковое выдавливание применяют для штамповки поковок типа крестовин, корпуса газосварочной головки, тройников и др.

Скручивание — технологическая операция, в процессе которой происходит поворот поперечных сечений вокруг продольной оси заготовки. Штамповку скручиванием совмещают с осадкой для изготовления поковок типа дисков с тонким полотном. Совмещение операций скручивания и осадки позволяет существенно снижать деформирующую силу, необходимую для осадки, в результате приложения к заготовке крутящего момента.

Протяжка (вытяжка с утонением стенки) — технологическая операция штамповки, в результате которой происходят увеличение высоты и уменьшение толщины стенки цилиндрического стакана при проталкивании его через очко матрицы. Эту операцию применяют для изготовления тонкостенных стаканов.

Гибка (изгиб) — технологическая операция штамповки, в процессе которой изготовливают поковки с криволинейной осью.

Раскатка — технологическая операция штамповки, в процессе которой поэтапное формирование заготовки осуществляют вращающиеся и одновременно сближающиеся валки. Раскатка может быть радиальной и торцовой. Раскатку применяют для изготовления различного рода колец и втулок с фланцами в шарикоподшипниковой, автомобильной и других отраслях промышленности.

Сферодвижная штамповка — технологическая операция, в процессе которой поэтапное деформирование заготовки осуществляют рабочим инструментом (пуансоном или матрицей), совершающим качательное или поступательное по отношению к заготовке перемещение.

В настоящее время раскатку и сферодвижную штамповку применяют для изготовления разнообразных полых и стержне-

вых деталей с буртами или развитыми фланцами, деталей типа стаканов с внутренними буртами, раструбов с элементами разных диаметров, с переходными участками и др.

Разновидностью холодной штамповки является **холодное выдавливание**. Технология холодного выдавливания позволяет быстро и экономично изготовлять детали, обладающие высокими механическими свойствами и точностью размеров, причем последующая механическая обработка резанием либо не нужна, либо сведена к минимуму, что приводит к экономии материала. Этот процесс в массовом производстве, обеспечивая высокую производительность, находит все большее распространение для изготовления деталей (взамен механической обработки резанием).

Исходными материалами для изготовления заготовок служат обычно прутки или штанги соответствующего диаметра, изготовленные либо горячей прокаткой, либо протяжкой в зависимости от имеющегося оборудования и экономических показателей. В некоторых случаях пруток подвергают обдирке, поскольку чем лучше поверхность исходной заготовки, тем меньше разброс размеров и выше качество поверхности детали. Горячекатаные прутки, как правило, не используют, поскольку они имеют очень низкое качество поверхности.

Непосредственно перед выдавливанием заготовку термически обрабатывают в печи с защитной атмосферой для того, чтобы не произошло ухудшения качества поверхности заготовки.

Перед отрезкой заготовки смазывают. Хороший смазочный материал часто имеет особое значение, способствуя даже течению металла относительно инструмента.

Выдавливание применяют как для получения относительно длинных полуфабрикатов с круглым или другим поперечным сечением, так и для небольших деталей, требующих в дальнейшем незначительной мехобработки.

Холодное выдавливание нашло широкое распространение для изготовления в первую очередь осесимметричных деталей.

Прогрессивным методом изготовления полых деталей из обрезков труб является гидравлическая штамповка. **Гидравлической штамповкой** называют процессы холодного пластического изменения формы трубчатой заготовки, при которых часть силовой схемы создается высоким гидростатическим давлением, воз-

действующим, как правило, непосредственно на внутреннюю поверхность заготовки. Жидкость здесь играет роль универсального формообразующего инструмента.

Полые детали, получаемые по этой технологии, разнообразны и делятся на пять групп.

1. Полые детали с отводами — фитинги трубопроводов, тройники и крестовины, корпуса гидроаппаратов, детали велосипедных рам.

2. Полые осесимметричные детали ступенчатого профиля — переходы трубопроводов, полые оси и валы, корпуса различных устройств, сосуды, детали автомобилей.

3. Полые асимметричные детали ступенчатого профиля — эксцентриковые переходы трубопроводов, эксцентриковые и кулачковые полые валы и оси, патрубки и т. д.

4. Полые детали со ступенчатой осью — угольники трубопроводов, полые коленчатые валы.

5. Полые поперечно-гофрированные детали — сильфоны, шкивы, гофрированные компенсаторы трубопроводов.

Холодная объемная штамповка широко применяется в сборочном производстве, занимающем второе место после мехобработки по трудоемкости изготовления изделий. Ее использование приводит к уменьшению числа составляющих узел соединений деталей и упрощает его конструкцию, экономит сопутствующие металлообработке материалы (припои, присадочные материалы при сварке и др.), создает условия для автоматизации процессов сборки.

Операции холодной штамповки применяют для изготовления стыковых, нахлесточных тавровых и угловых соединений деталей из различных металлов. Прямым выдавливанием жидкостью **(гидроэкструзией)** получают биметаллические изделия с тонким наружным слоем (алюминиевые шины, проволока с медным покрытием).

В качестве изоляторов в электротехнических изделиях эффективным является применение стеклопластиков. При этом использование полимерных изоляторов в линиях высоковольтных передач позволяет в 5—10 раз снизить массу изолирующей подвески, сократить расход металла на опоры высоковольтных линий, уменьшить стоимость транспортных и монтажных работ,

повысить надежность линий, снижая аварийность при гололеде и сильных ветрах.

Соединение металлического наконечника (типа толстостенного стакана) со стержнем из стеклопластика производится операцией холодной объемной штамповки по способу, разработанному в СПбГПУ. Сравнение этого способа с ранее известными показало, что по прочности, защите от коррозии, трудоемкости процесса и затратам он более предпочтителен.

Листовая штамповка является одним из наиболее прогрессивных методов получения изделий из листовых материалов, широко применяется во всех отраслях машино-, приборостроительной, металлообрабатывающей и электротехнической промышленности.

> *В Киевской Руси элементы штамповки листового металла применяли при чеканке монет, при штамповке металлических украшений, при изготовлении части колец кольчуг и т. п. Однако все эти достижения относились к ремесленному изготовлению деталей в основном вручную.*
>
> *Промышленное применение холодной штамповки с использованием кузнечно-штамповочных машин началось с конца XIX в. В начале XX в. холодная штамповка широко использовалась в патронно-гильзовом и метизном производстве , в электротехнической промышленности и т. п. Особенно интенсивно она стала применяться с развитием крупного автотракторного и авиационного производства.*

Листовая штамповка позволяет получать плоские и пространственные детали самых разнообразных размеров и конфигураций с минимальной металлоемкостью при заданной их прочности и жесткости, а также обеспечивает высокую производительность труда и низкую себестоимость в условиях различной серийности производства.

Исходной заготовкой для листовой штамповки является лист, полоса или лента, толщина которой существенно меньше поперечных размеров.

Листовую штамповку в зависимости от толщины листа (заготовки) условно делят на тонколистовую (< 4 мм) и толсто-

листовую. Листовой металл толщиной свыше 15–20 мм обычно штампуют в горячем состоянии. В горячем состоянии приходится также штамповать и менее толстые материалы (3–6 мм), например из хромистых сталей. Во всех остальных случаях штамповка деталей из листового материала производится в холодном состоянии.

Материал для изготовления штампованной детали выбирают в зависимости от ее назначения, требуемой точности, напряжений, испытываемых деталью при эксплуатации и изготовлении, условий работы (температура, давление, среда и др.). При разработке техпроцесса изготовления детали стремятся к выбору наиболее экономичного варианта в соответствии с чертежом, программой выпуска и техническими условиями. В связи с этим важным является уровень технологичности.

Технологичность детали — это такое сочетание основных элементов ее конструкции (форма и размеры), которое обеспечивает наиболее простое и экономное ее изготовление и высокие эксплуатационные свойства. При этом обеспечивается соответствие параметров данной детали возможностям операций листовой штамповки, которые должны быть применены при ее изготовлении. Показателями технологичности являются: наименьший расход материала; наименьшее число операций и их низкая трудоемкость; наименьшее количество оборудования, оснастки и производственных площадей; увеличение стойкости штампов; повышение производительности операций.

Наименьшая себестоимость штампуемых деталей (обобщающий показатель технологичности детали) — это наиболее экономное расходование материала при минимуме операций и снижении трудоемкости работ.

Для изготовления деталей рассматриваемым способом используются разнообразные металлические и неметаллические материалы, при выборе которых учитываются химический состав, механические свойства, необходимость термообработки, степень деформации и др.

В зависимости от **способа действия внешних сил и характера напряженно-деформированного состояния** операции листовой штамповки делят на **разъединительные** (**разделительные**), **формоизменяющие**, **прессовочные**, **комбинированные** и **штампово-сборочные**.

К **разъединительным (разделительным)** операциям, связанным с отделением одной части материала от другой по замкнутому или незамкнутому контуру, относятся следующие: отрезка, вырубка—вырезка, пробивка, надрезка, разрезка, обрезка, зачистка и просечка.

К **формоизменяющим** операциям, заключающимся в превращении плоской или полой заготовки в пространственную деталь требуемой формы, относятся следующие: гибка и закатка края, вытяжка, правка, рельефная штамповка, отбортовка, формовка, обжим и раздача, а также вытяжка с утонением материала стенок.

К **прессовочным** операциям, связанным с изменением толщины листового материала, относятся: чеканка, клеймение—маркировка, разметка—кернение и холодное выдавливание.

Комбинированная холодная штамповка представляет собой совмещение в одной объединительной операции двух или нескольких технологически различных отдельных операций штамповки, например: отрезки и гибки, вырубки и вытяжки, вытяжки и рельефной штамповки и других технологически возможных комбинаций.

Штампово-сборочные операции, предназначенные для соединения нескольких деталей в одно изделие (узел), основаны на применении процессов гибки, запрессовки, клепки, закатки, холодной пластической сварки и др.

Под **раскроем** понимается отыскание наиболее рационального (эффективного) размещения плоских заготовок в листе (полосе, ленте) относительно друг друга и кромок листового проката.

По экономичности и количеству технологических отходов способы раскроя делятся на три группы:

1) раскрой с отходами, когда вырубка производится по всему контуру детали, а перемычка имеет замкнутую форму;

2) малоотходный раскрой, когда вырубается или отрезается только часть контура детали, а в отход идет или перемычка между двумя деталями, или только боковая перемычка;

3) безотходный раскрой, когда вырубаемую деталь получают путем прямолинейной или криволинейной отрезки без образования перемычек.

Экономичность раскроя зависит от правильно выбранной величины перемычек, служащих для компенсации погрешности

подачи материала и фиксации его в штампе, чтобы обеспечить полную вырубку детали по всему контуру и предотвратить получение бракованных деталей. Величина перемычки выбирается с учетом толщины и твердости материала, размеров и конфигурации изготавливаемых деталей, способа подачи полосы (с боковым прижимом или без него) и др.

Резку листового металла производят ножницами или на прессах при помощи отрезных штампов. Чаще всего применяются ножницы трех типов:

1) с параллельными ножами;
2) с наклонными ножами (гильотинные);
3) дисковые (роликовые).

Отрезка — полное отделение одной части заготовки от другой по незамкнутому контуру. Применяется как заготовительная операция для получения полос или карт из листового металла для последующей штамповки.

Вырезкой называют операцию отделения части заготовки по замкнутому контуру ножницами. Для вырезки применяют ножницы с вращательным движением режущих кромок (дисковые) и с поступательным движением режущих кромок (вибрационные).

При **вырубке** и **пробивке** происходит полное отделение материала по замкнутому контуру, причем при вырубке отделяемая часть материала является либо деталью, либо заготовкой для последующей обработки, а при пробивке — отходом. Вырубку или пробивку осуществляют в штампе, где под действием пуансона и матрицы происходит отделение детали от заготовки.

Гибка — техническая операция листовой штамповки, в результате которой из плоской или изогнутой заготовки при помощи штампов получается пространственная деталь.

В зависимости от размеров, формы деталей, профиля исходной заготовки, характера производства гибка осуществляется в штампах на кривошипных, эксцентриковых, фрикционных, гидравлических прессах, на специальных ручных, механизированных установках и на специальных гибочных и профилировочных станах. Гибку мелких и средних по размерам заготовок с малыми радиусами осуществляют, как правило, в штампах. Обычно гибке подвергаются заготовки, получаемые вырубкой или отрезкой в штампах или резкой ножницами. Гибка может

производиться одновременно и с другими операциями: отрезкой, вырубкой, пробивкой.

К конструктивно-технологическим элементам гибочных штампов относятся: зазоры, радиусы закругления пуансона, глубины полости матрицы и др. От их правильного выбора зависят нормальный ход процесса гибки и качество получаемых деталей.

Схемы гибки показаны на рис. 72. При наиболее универсальной свободной гибке (см. рис. 72, *а*) заготовка контактирует с инструментом только в трех точках, не прилегая к поверхности пуансона и матрицы. Требуемый угол изгиба обеспечивается регулированием хода пуансона. Заготовка при свободной гибке значительно пружинит. При одноугловой гибке с правкой детали в конце хода (см. рис. 72, *б*) обеспечивается большая точность; двухугловая гибка выполняется с прижимом металла (см. рис. 72, *в*).

Разновидностью процессов гибки является получение профильных заготовок, имеющих постоянную по длине пространственную форму поперечного сечения, получаемую из плоской заготовки. Существует много способов и специализированных гибочных машин для получения профильных заготовок из листового металла. Наиболее распространенными способами профилирования листового металла являются: гибка на гибочных прессах с поступательным движением ползуна и гибка на роликовых профилировочных станках.

Вытяжка — операция, с помощью которой из плоской заготовки получают полое изделие. Вытяжкой является и последую-

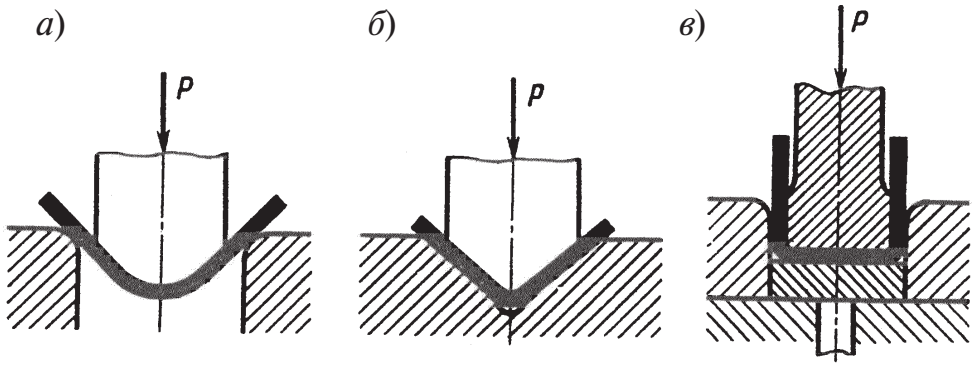


Рис. 72. Схема гибки:
а — свободная, *б* — одноугловая, *в* — двухугловая

щее формоизменение полого изделия, при котором увеличивается его высота путем уменьшения диаметра.

При разработке технологического процесса вытяжки необходимо знать, за какое количество операций может быть изготовлено изделие. Количество операций, обеспечивающих получение готовой детали, зависит от высоты и диаметра изделия, относительной толщины заготовки и механических свойств материала.

С помощью **рельефной формовки** путем местного растяжения и утонения материала на плоских, криволинейных и наклонных поверхностях заготовки в листовых деталях получают выпуклости, углубления, рифты, ребра жесткости и рельефы под контактную сварку.

Отбортовка (рис. 73, *а*) — изменение формы краевых поверхностей заготовки, в результате чего по наружному или внутреннему контуру детали образуются кромки (борта) цилиндрической либо другой формы (рис. 73, *б*, *в*), высота которых $H \geq (8-10)s$, где s — толщина листа, P — усилие отбортовки. При отбортовке, в отличие от гибки, металл растягивается в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях.

Обжим (рис. 74, *а*) — операция, с помощью которой уменьшают диаметр D полой заготовки, получая на конце детали меньший диаметр d и коническую переходную часть, а также выполняют плоское или сферическое дно у полых заготовок. Путем обжима изготовляют детали ступенчатой либо фасонной формы (рис. 74, *б*) из полой цилиндрической заготовки или трубы.

Раздача (рис. 75, *а*) — местное или общее увеличение диаметральных размеров полой заготовки, в результате чего получают

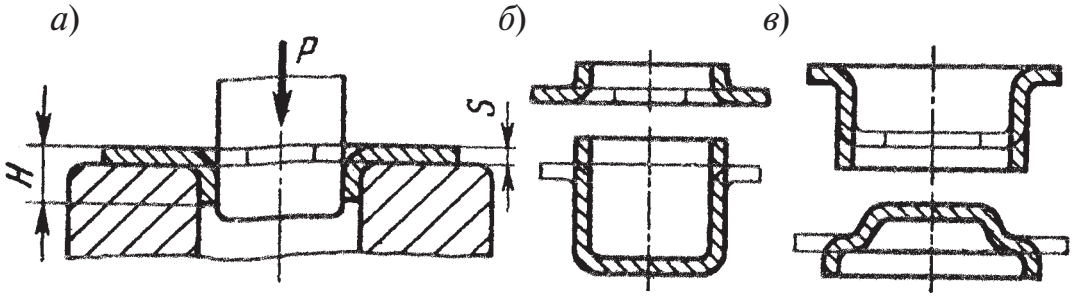


Рис. 73. Схема отбортовки (*а*) и полученные при этом детали (*б*, *в*)

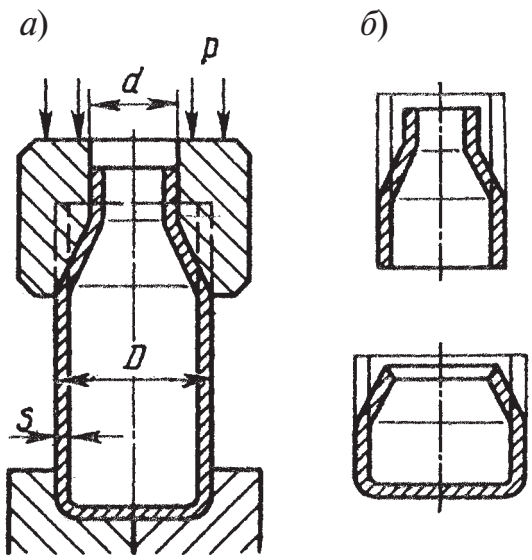


Рис. 74. Схема обжима (*а*) и полученные при этом детали (*б*): *P* — усилие обжима

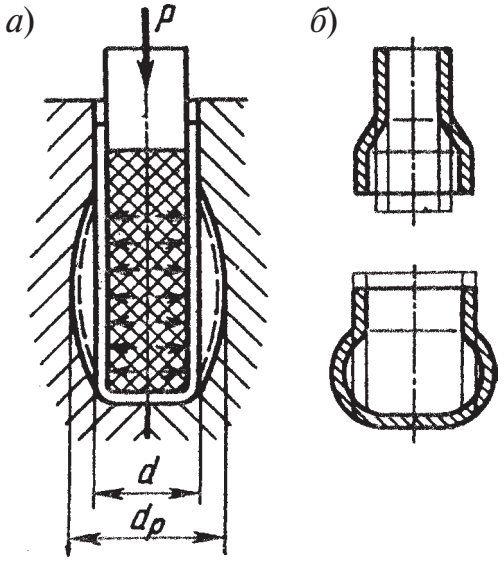


Рис. 75. Схема раздачи (*а*) и полученные при этом детали (*б*): *P* — усиление раздачи; *d* и d_p — диаметры заготовки соответственно до и после раздачи

ступенчатые и фасонные детали — раструбы, воронки, переходники и др. (рис. 75, *б*) из предварительно вытянутой трубчатой либо сварной заготовки взамен многопозиционной вытяжки, что значительно сокращает технологический цикл и расход металла.

Правка — отделочная операция, с помощью которой устраняют искривления детали, возникшие после вырубки, обрезки, гибки и других операций, и придают ей требуемую по чертежу конфигурацию. Правкой устраняют также дефекты детали, возникшие вследствие несовершенства технологического процесса, плохого состояния штампов и др. К основным причинам, вызывающим необходимость правки деталей, относятся: анизотропия (неравномерность) свойств; повышенная жесткость исходного материала; искривление заготовки; нетехнологичность детали (недостаточная жесткость, завышенная точность изготовления, сложность конфигурации); отрезка заготовок и вырубка деталей притупленными ножами; неправильная последовательность операций штамповки при изготовлении сложных деталей; неудачная

конструкция штампов; коробление деталей в процессе термической обработки.

Операции листовой штамповки используются не только для придания заготовке формы и размеров детали, заданной к изготовлению, но и для соединения отдельных отштампованных деталей в собранное изделие.

Внедрение технологических процессов изготовления деталей методами листовой штамповки способствует повышению производительности труда, экономии металла, инструмента, сокращению необходимого количества оборудования и производственных площадей, снижению себестоимости продукции и улучшению ее качества.

Дальнейшее совершенствование процессов листовой штамповки идет в основном по пути создания новых ресурсо- и энергоемких технологических процессов, создания новых методик расчета технологических режимов штамповки.

В авиастроении, судостроении, химическом машиностроении и др. многие листовые детали не могут быть рационально изготовлены обычными методами листовой штамповки. Это объясняется сложностью их формы, высокими требованиями к допускам, механическими свойствами некоторых металлов и сплавов. Традиционные методы неэффективны также при штамповке крупногабаритных листовых деталей из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей. Поэтому получили распространение высокоскоростные способы (импульсные методы) штамповки: взрывом, электрогидравлическая (ЭГШ), электромагнитная (магнитно-импульсная обработка металлов — МИОМ). Особенностью этих методов является превращение с высокой скоростью одного вида энергии в другой, благодаря чему создается большая мощность.

При штамповке взрывом в качестве основного источника энергии применяют бризантные взрывчатые вещества (ВВ) — тротил, тетрил, гексоген, аммонит, аммонал и др., которые могут быть в виде порошка, прессованных брикетов (шашек), литых зарядов различной формы, листов и шнуров. Критерием их работоспособности является удельная теплота взрыва, которая для наиболее широко применяемых в промышленности ВВ находится в пределах от 3700 до 7500 кДж/кг (тротил — 4230 кДж/кг). Скорость детонации (скорость распространения взрыва) достигает

нескольких тысяч метров в секунду и колеблется от 3600 до 8300 м/с, например, для прессованного литого тротила она составляет 6900–7000 м/с, для гексогена — 8300, для аммонита — 3600–5300 м/с. Время детонации 20–30 мкс, т. е. на два порядка меньше, чем время деформирования заготовки.

Со взрывной силой пороха в Западной Европе и России познакомились в XIV в. В начале был открыт пироксилин и изобретен нитроглицерин — конечно, не в медицинских целях. В 1867 г. А. Нобелю был выдан патент на динамит. Появление сильных взрывчатых веществ не только перевернуло взгляд на военную технику, но и создало предпосылки для возникновения методов и инструментов для взрывной обработки металлов.

В 1886 г. Менро применил взрыв для чеканки железных пластин. С начала XX в. разрабатывается много методов формования металлов с использованием взрывчатых веществ. Прогрессивный метод штампования взрывом предложили в 40-х гг. XX в. наши соотечественники Э.В. Пихтовников и Ю.С. Навагин.

Листовую заготовку укладывают на матрицу, прижимают прижимным кольцом и на определенном расстоянии от поверхности заготовки устанавливают заряд ВВ с электродетонатором. Затем матрицу с заготовкой и зарядом опускают в бассейн, наполненный водой. Из нижней полости матрицы через клапан с помощью вакуум-насоса откачивают воздух, чтобы он не препятствовал перемещению заготовки. И наконец через электродетонатор взрывают ВВ. Образующаяся в результате взрыва ВВ ударная волна в жидкости деформирует заготовку.

Основным технологическим параметром процесса является масса заряда ВВ. Она может быть определена расчетным путем, исходя из необходимой энергии формообразования заготовки, по эмпирическим зависимостям, на основании пробных экспериментов и моделирования процесса.

Коэффициент полезного действия установки при взрыве ВВ в открытом бассейне составляет 8–10 %, а в установках закрытого типа — 12–15 %. Форма заряда определяет форму фронта ударной волны, действующей на заготовку. При сферическом заряде образуется волна сферической формы, при цилиндричес-

ком (в виде стержня) — цилиндрической, при плоском (лист или кольцевой заряд) — плоской формы. Конфигурация штампуемых деталей влияет на выбор формы заряда.

При вытяжке деталей сферической или куполообразной формы используют сферические заряды.

Для штамповки деталей небольшой высоты с плоским дном применяют заряд в виде плоской пластины, шнур, свернутый в спираль, или несколько точечных зарядов, образующих кольцо.

При раздаче трубчатых заготовок используют заряд в виде стержня. Эффективен в ряде случаев заряд конической или кольцевой формы. Дистанция взрыва влияет на профиль фронта ударной волны.

При чеканке, калибровке, правке плит применяют заряды ВВ в виде пластин, расположенных непосредственно на поверхности заготовки.

При отрезке и вырубке листового материала используют шнуровые или линейные заряды ВВ, накладываемые на заготовку вдоль линии реза.

Минимальную высоту столба воды над зарядом ВВ определяют из условия наиболее полного использования энергии взрыва и принимают равной 20–25 радиусам заряда.

К преимуществам процесса относится: простота оснастки, экономическая эффективность по сравнению со штамповкой на прессах, универсальность процесса, меньшее утонение стенки деталей и высокая их точность. Недостатки: при штамповке крупногабаритных деталей — сложность манипулирования заготовкой и оснасткой, высокая доля ручного труда; низкая производительность процесса; возможность возникновения сейсмических волн; повышенные требования к технике безопасности.

Процесс ЭГШ деталей основан на высоковольтном электрическом разряде в жидкости, при котором возникает ударная волна, деформирующая заготовку.

Импульсный разряд в жидкости, обеспечивающей создание фронта высоких давлений, принято называть электрогидравлическим эффектом (ЭГЭ). Идея реализации ЭГЭ в технологических целях (дробления горных пород, очистки литья, штамповки) принадлежит ленинградскому изобретателю Л.А.Юткину.

Одной из самых эффективных областей применения ЭГШ является изготовление из листовых медных заготовок толщиной 5–8 мм инструментов-электродов для электрокоррозионной обработки металлов.

Габаритные размеры плоских заготовок деталей сложной формы, изготовляемых ЭГШ, достигают 1500×2000 мм (табл. 23). Глубина штампуемых изделий — до 500–600 мм. На специальных электрогидравлических установках с перемещаемой одной или несколькими разрядными камерами штампуют плоские крупногабаритные (до 3–3,5 м) детали с различными рифтами либо местными рельефами, а детали сложной формы — за несколько переходов через эластичную диафрагму и с использованием многоэлектродных разрядных камер.

Таблица 23

Предельные размеры деталей, изготовляемых ЭГШ

Вид штамповки	Материал заготовки			
	Стали, титановые и высокопрочные сплавы		Алюминиевые сплавы	
	Длина (ширина)	Толщина	Длина (ширина)	Толщина
Формообразование из плоской заготовки с деформированием всего объема	1500	4	3000	5
Местное формообразование конструктивных элементов плоских или предварительно отформованных заготовок	4000	3	4000	4
Формообразование и калибровка замкнутых обечаек	2500	5	2500	8
Развальцовка труб при сборке	100	2	150	4

ЭГШ не является универсальным способом изготовления листовых деталей, хотя с ее помощью можно выполнять практически все операции листовой штамповки. Наиболее целесообразно применять ЭГШ для раздачи, вытяжки, гибки, вырубки, пробивки, а также для калибровки деталей, изготовленных другими способами. Поскольку импульсный характер приложения нагрузки позволяет деформировать малопластичные материалы и изготовлять за одну установку детали сложной формы, ЭГШ значительно расширяет технологические возможности холодной листовой штамповки.

Одним из преимуществ ЭГШ по сравнению с другими высокоскоростными методами является то, что большое количество энергии может быть направлено локально, т. е. на отдельные участки заготовки. Это преимущество используется при изготовлении сложных по форме деталей с различными конструктивными элементами — местными выштамповками, рифтами, ребрами, отверстиями и отбортовками.

Основной особенностью МИМО является создание непосредственно импульсным магнитным полем механических усилий, деформирующих заготовку без помощи промежуточных твердых, жидких или газообразных тел. **Электромагнитная штамповка** — это способ бесконтактного деформирования, при котором электрическая энергия без дополнительных преобразований расходуется на совершение работы пластической деформации.

Импульсные магнитные поля создаются с помощью магнитно-импульсных установок (МИУ) при разряде батареи конденсаторов через рабочий инструмент — индуктор, вокруг или около которого расположена заготовка. Между магнитным полем индуцированного в заготовке тока и магнитным полем тока в индукторе возникают электромеханические взаимодействия. Эти силы, носящие импульсный характер (длительность воздействия 10^{-3} с), сообщают обрабатываемой заготовке запас кинетической энергии. Скорость деформирования при этом достигает сотен метров в секунду. При соударении с матрицей, оправкой или другой деталью происходят окончательное формоизменение заготовки, ее калибровка, сборка, а при определенных условиях и сварка.

С помощью электромагнитной штамповки производят неглубокую вытяжку, формовку, отбортовку, вырубку, пробивку от-

верстий, обжим и раздачу трубчатых заготовок, а также сборочные операции по созданию неразъемных конструкций — соединение концов труб, труб с фитингами, с заглушками, опрессовка наконечников на электрокабелях, бандажирование, сборка многослойных оболочек, металлорукавов высокого давления и т. д. Получают также неразъемные соединения, к которым предъявляются повышенные требования по герметичности, по передаче крутящего момента и осевых усилий.

Импульсный характер нагружения дает возможность напрессовывать металлические трубчатые заготовки на детали из керамики, стекла, углепластика и других неметаллических материалов, обеспечивая при этом равномерное давление, заданный натяг и герметичность.

Чтобы выполнить электромагнитную штамповку, достаточно одного формоизменяющего инструмента (или пуансона, или матрицы), поскольку роль второго выполняет магнитное импульсное поле, а для большинства сборочных операций инструмент вообще не нужен. Это позволяет изготовлять детали весьма сложных форм, получение которых обычными методами невозможно или очень сложно.

По сравнению с высокоскоростными способами деформирования электромагнитная штамповка имеет ряд преимуществ: возможность более точного дозирования энергии разряда и регулировки параметров процесса; более высокая точность размеров получаемых деталей; возможность деформирования заготовок за несколько разрядов, причем первые импульсы могут служить для предварительного разогрева заготовки; возможность выполнения сборочных операций; более высокая производительность процесса; большая технологическая гибкость процесса, позволяющая с помощью одного индуктора получать различные по конфигурации детали; возможность автоматизации процесса и встраивания МИУ в автоматические и гибкие переналаживаемые линии.

Электромагнитная штамповка имеет и ряд недостатков: сложность получения деталей, требующих глубокой вытяжки; ограничение по форме и геометрическим размерам штампуемых деталей; необходимость применения “спутников” и токопроводящих покрытий при деформировании материалов с низкой электропроводностью; низкая стойкость индуктора при штамповке стальных заготовок.

3.9. ВОЛОЧИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Сущность процесса волочения состоит в деформации металла путем протягивания через сужающийся по длине канал круглого, квадратного или более сложного сечения.

Волочильный инструмент, волока (матрица, фильера) изготавливаются из закаленной стали, твердых сплавов, а для прецизионных изделий — из алмаза (вставки в металлическое кольцо).

По конструкции волоки бывают *цельными*, *составными* и *роликовыми*. Стальные волоки (доски) применяют при волочении крупных изделий: труб диаметром 16–300 мм и прутков диаметром 16–100 мм.

Исходной заготовкой для изготовления стальных волоков является горячекатаный прокат в виде круга или толстого листа. Конусный канал волоки выполняют на металлорежущих станках. После закалки и отпуска на требуемую твердость поверхности рабочий конус волоки шлифуется и полируется. Твердость поверхности после закалки должна быть не меньше HRC 60.

Твердосплавные волоки производят на основе карбида вольфрама, имеющего большую твердость. Для превращения карбида вольфрама (порошок) в монолитное твердое тело используют кобальт.

Заготовки для волок получают холодным прессованием порошкообразной смеси карбидвольфрама и кобальта в специальных матрицах. Спрессованная заготовка подвергается сушке при температуре около 100 °С в течение 24 ч и спеканию при температуре 1350–1500 °С. После спекания заготовка волоки приобретает твердость в пределах HRC 85–90 и достаточную механическую прочность. Для увеличения жесткости и прочности волоку запрессовывают в оправку или закрепляют в оправке пайкой медью. Рабочий канал твердосплавных волок шлифуется на специальных станках и полируется.

Для шлифования рабочего канала больших волок применяют шлифовальные круги. Полирование производится различными пастами с добавлением алмазной пыли. Волоки из природных или синтетических алмазов применяют при волочении проволоки диаметром менее 1 мм. Обработку канала волоки производят при помощи алмазных зерен или порошка. Алмазные волоки закрепляют в углублении оправки бронзовыми кольцевыми элементами.

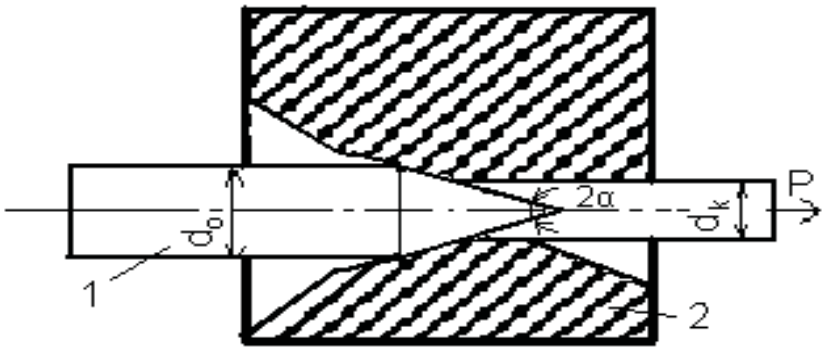


Рис. 76. Схема процесса волочения

Сущность процесса волочения заключается в следующем (рис. 76). Передний конец заготовки *1* заостряют, вставляют в коническое отверстие волоки *2*, имеющей выходное сечение меньше сечения заготовки. Приложением усилия *P* протягивают заготовку через волоку. При этом площадь сечения заготовки уменьшается, а длина увеличивается. Степень деформации при волочении ограничивается прочностью переднего конца изделия, к которому прикладывается тянущее усилие, называемое **усилием волочения**.

Усилия волочения зависят от сил трения на поверхности металл—волока, которые снижают, подбирая смазки.

К применяемым при волочении смазкам предъявляются особые требования в соответствии с условиями деформации в волоке. Смазка должна обладать большой поверхностной активностью, а сила сцепления смазки с поверхностью металла — быть такой, чтобы она проникала в зону деформации. Чем больше поверхностная активность смазки, тем большее количество проникает в зону деформации, где она подвергается большому давлению и нагревается. При этом смазка не должна разрушаться или спекаться.

При обработке металлов давлением различают следующие **виды смазок**: *металлические, твердые, консистентные, масла, водные смазочно-охлаждающие жидкости, газообразные.* При волочении стали применяют металлические, твердые, консистентные и водные смазочно-охлаждающие жидкости. Примером применения металлической смазки являются меднение, цинкование, кадмирование стали перед волочением. К твердым смазкам относится кальциевое мыло, мыльный порошок, парафин. Консистентные

смазки представляют собой смеси животных, растительных и минеральных масел с загустителями. В качестве загустителей используют мыло, церезин и др. Твердые и консистентные смазки применяют на машинах толстого и грубого волочения.

При волочении проволоки диаметром менее 3 мм в качестве смазки используют водные смазочно-охлаждающие жидкости (эмульсии). Широко применяются водные эмульсии масел и мыла, чистого мыла, олеиновой кислоты с кальцинированной содой. Для повышения поверхностной активности в эмульсию вводится сера, хлор и др. Эмульсия на проволоку и в зону деформации подается насосом, установленным у каждой машины, или от центральной станции.

Процесс волочения длительный и чередуется с большим количеством промежуточных отжигов, травлений, смазок и т. д. Отличительной особенностью этого процесса является его универсальность (простота и быстрота замены инструмента), которая способствует его широкому использованию. Волочение металлов применяют при производстве проволоки, прутков, изделий сложного сечения, труб. Проволока, имеющая небольшую площадь поперечного сечения и большую длину, может быть получена только волочением. При производстве прутков холодное волочение обеспечивает большую точность размеров и высокую чистоту поверхности. Волочение с небольшой степенью деформации для придания прутковым изделиям повышенной точности размеров сечения называется **калибровкой**.

Технологический процесс производства проволоки состоит из следующих операций: *подготовка исходного материала, волочение, термическая обработка, покрытие и отделка.*

Исходным материалом для производства стальной проволоки является катанка диаметром от 5 до 15 мм в бунтах массой до 600 кг. Перед волочением катанку подвергают травлению для удаления окалины с поверхности. Наряду с травлением в кислотных растворах окалину с поверхности катанки удаляют также механическим (изгиб катанки в рамках, дробеструйная очистка и др.) или электрохимическим способом.

Катанку из высоколегированных сталей и сплавов на основе цветных металлов для повышения пластических свойств и стабильности физико-механических свойств по длине подвергают термической обработке (**патентирование**).

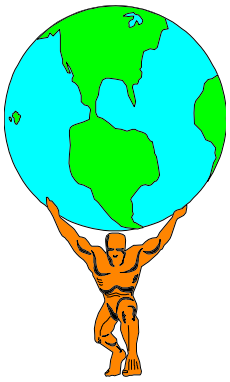
Патентирование заключается в нагреве стали до температуры однофазного состояния аустенита, выдержке в соляном растворе при температуре 450–550 °С и охлаждении на воздухе. На очищенную от окалины катанку наносят смазку. Перед подачей в волочильную машину бунты катанки укрупняют на стыкосварочной машине. Перед задачей в волоку конец катанки заостряется на острильных станках. Операция острения может проводиться перед задачей в каждую волоку, если волочение осуществляется через несколько волок.

Более 70 % проволоки производится из низкоуглеродистой стали (0,15 % С). Это проволока общего назначения, для воздушных линий, полиграфическая и др. Исходным материалом для производства проволоки диаметром 0,8–10 мм из низкоуглеродистой стали является катанка диаметром 6–13 мм.

Канатная, пружинная и инструментальная проволока производится из средне- и высокоуглеродистых сталей (0,5–1,2 % С). Особенностью производства проволоки из средне- и высокоуглеродистых сталей является заключительная регламентированная термическая обработка — закалка и отпуск для проволоки со специальными свойствами.

Для производства проволоки применяют волочильные машины: *однократные* и *многократные, без скольжения* и *со скольжением*. Машины для производства проволоки называют барабанными, если они работают с наматыванием на катушки. Однократные барабанные волочильные машины применяют при производстве проволоки диаметром менее 6 мм. Проволока диаметром менее 6 мм производится на барабанных машинах многократного волочения. **По диаметру готовой проволоки** различают машины: *толстого (3–6 мм), среднего (0,8–1,5 мм)* и *тончайшего волочения (менее 0,8 мм),* **а по кинематике —** *со скольжением проволоки относительно поверхности тяговых барабанов* и *без скольжения*.

Методом холодного волочения кроме проволоки производят прутки и профили из различных марок сталей и сплавов, а также цветных металлов. Этот метод позволяет получать фасонные профили длиной до 10 м и более любой конфигурации. Получение точного профиля сложной конфигурации возможно за 5–12 пропусков в последовательно сменяемых волоках, профиль которых постепенно приближается к профилю готового изделия.



4. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

У природы всегда в запасе какой-нибудь козырь.

А. Кларк

Любопытное изображение технологического процесса изготовления отливок из бронзы обнаружено в египетской гробнице, относящейся к середине II тыс. до н. э. Трое рабочих подносят металл к горну, где происходит плавление. Видны плавильные тигли, кучки древесного угля, корзина, в которой он доставлен в "литейный цех". Двое рабочих, обслуживающих мехи, и третий разводят и поддерживают огонь в горне. При помощи прутьев двое рабочих извлекают тигель с расплавленной бронзой из горна и переносят его к литейной форме — здесь ведется разливка. Древний художник сопроводил рисунки текстом: иероглифы поясняют, что изображена отливка больших бронзовых дверей для храма, причем металл по указанию фараона доставлен из Сирии.

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Литейное производство является основной заготовительной базой для машиностроения, приборостроения и других отраслей промышленности. Часто литье — единственно возможный способ получения заготовок сложной формы, поэтому он универсален и перспективен, позволяет получать детали любой конфигурации, размеров, практически из любого металла и сплава при минимальных затратах.

Большинство отливок изготавливают по схеме, которая имеет подготовительные, основные и заключительные операции

(рис. 77). К подготовительным операциям относятся: разработка технологии изготовления отливки, изготовление модельной оснастки, приготовление формовочных и стержневых смесей, подготовка шихтовых материалов и плавка металла. Основными операциями являются изготовление и заливка форм. В состав заключительных операций входят охлаждение, выбивка, очистка, обрубка, термообработка, грунтовка отливок; контроль качества и исправление дефектов.

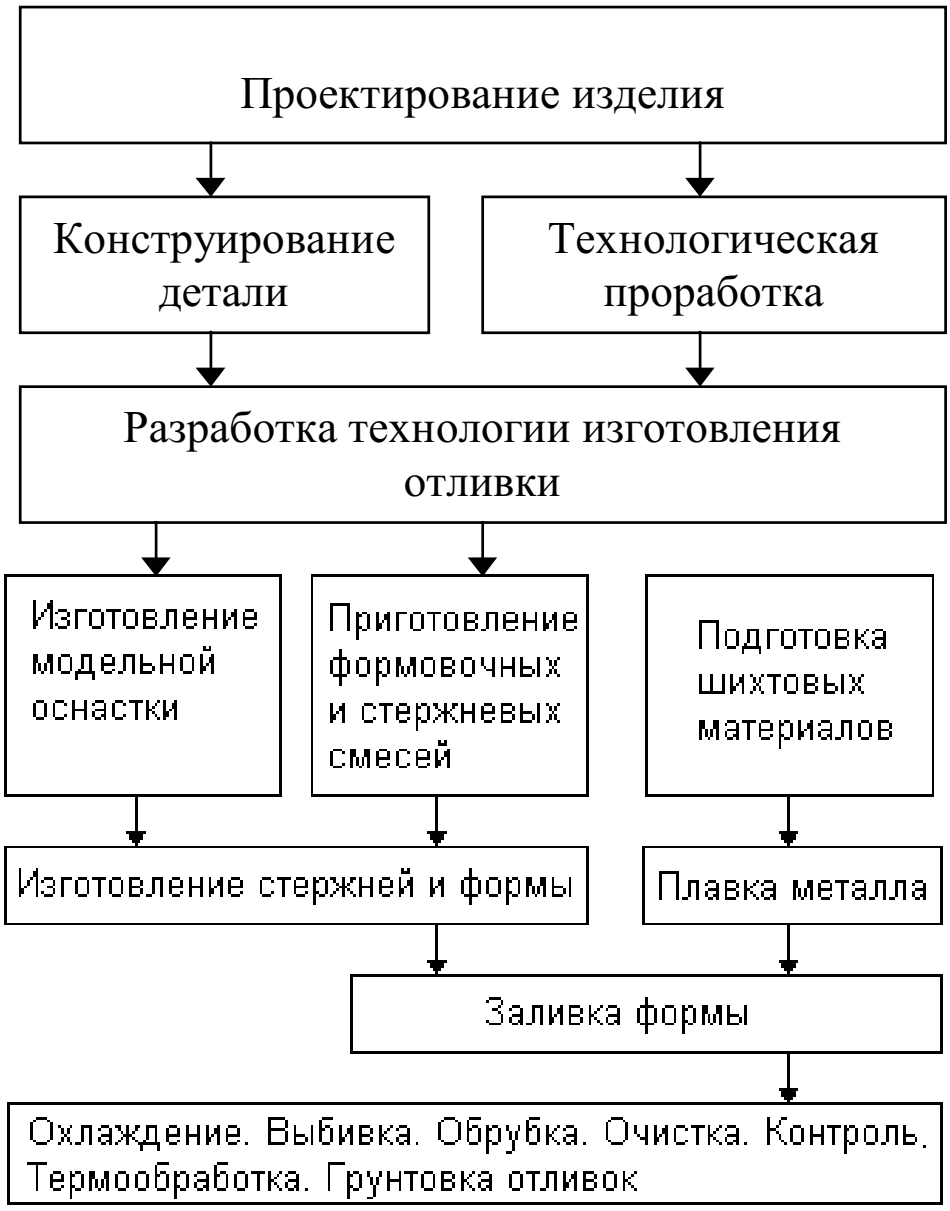


Рис. 77. Типовая технологическая схема литья в разовые песчаные формы

Литье — способ изготовления заготовки или изделия заполнением полости заданной конфигурации жидким металлом с последующим его затвердеванием. Заготовка или изделие, получаемые методом литья, называются **отливкой**.

По конфигурации различают следующие виды отливок: *плоские* (основания, рамы, коробки, крышки, плиты, планки), *тела вращения* (цилиндры, барабаны, диски, втулки, фланцы, колеса, маховики, шкивы, шестерни) и *комбинированные* (рычаги, тройники, каретки, траверсы, корпуса, кронштейны, стойки, станины).

По назначению отливки делятся на *неответственные*, предназначенные для изготовления деталей, к прочности которых не предъявляются специальные требования; *ответственные* — для деталей, работающих при статических нагрузках и в условиях трения; *особо ответственные* — для деталей, испытывающих динамические и знакопеременные нагрузки.

По массе отливки бывают *мелкие* (до 100 кг), *средние* (100—1000 кг), *крупные* (1—5 т) или *особо крупные* (более 5000 кг).

Литейные формы классифицируют:

- по количеству заливок — разовые (объемные, тонкостенные, оболочковые) и многократного использования (постоянные, полупостоянные);
- по содержанию влаги в форме — сырые, сухие, подсушенные;
- по материалу формы — песчаные, песчано-цементные, гипсовые, из высокоогнеупорных материалов, металлические и др.;
- по способу изготовления — литье в разовые песчаные формы и специальные способы литья.

4.2. ЛИТЬЕ В ПЕСЧАНЫЕ ФОРМЫ

4.2.1. Технология изготовления отливок в песчаные формы

Большинство фасонных отливок получают в разовых песчаных (песчано-глинистых) формах. При этом используется специальная **модельно-опочная оснастка**, в комплект которой входят:

- **модель отливки**, предназначенная для получения в форме отпечатка, соответствующего отливке по размерам и конфигурации;

• **стержневые ящики**, используемые для изготовления стержней, которые устанавливаются в форму с целью создания внутренних полостей или отверстий в отливке;

• **холодильники**, **жеребейки**, **приспособления** для сборки и контроля качества форм и стержней, **сушильные плиты** для сушки стержней;

• **модель литниковой системы**, необходимая для образования в форме отпечатка системы каналов, подводящих расплав в полость формы;

• **опоки**, представляющие собой рамы для удержания формовочной смеси при изготовлении форм, **штыри** для их центрирования и сборки;

• **подмодельные плиты**, на которые монтируются перечисленные приспособления.

Размеры модели по отношению к размерам отливки должны быть увеличены с учетом литейной усадки металла, при этом необходимо учитывать изменения размеров модели за счет припусков на механическую обработку отливки, формовочных уклонов и технологических припусков. Модели имеют специальные выступающие части, называемые знаковыми частями или знаками. **Знаки** формируют части литейной формы, не соприкасающиеся с жидким металлом, и служат для выполнения посадочных мест, в которых фиксируется знаковая часть стержня.

В зависимости от конструкции отливки и принятой технологии ее изготовления модели могут быть разъемными, неразъемными и с отъемными частями.

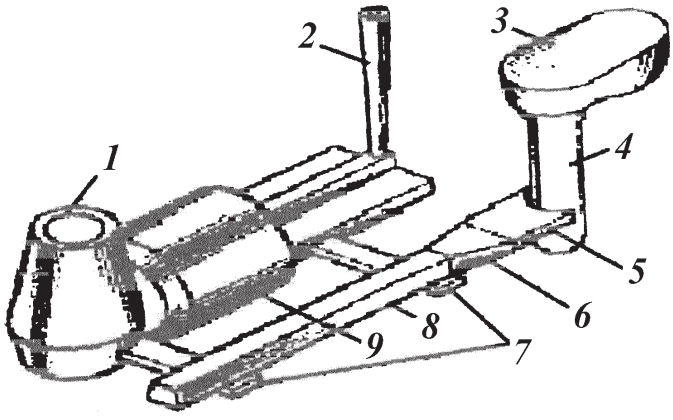


Рис. 78. Элементы литниковой системы

Элементы литниковой системы (рис. 78):

1 — **прибыль**, предназначенная для питания отливки *9* во время ее затвердевания и предупреждения образования усадочных дефектов вследствие усадки металла;

2 — **выпор**, служащий для удаления воздуха и

газов из полости формы. Устанавливают выпоры обычно на наиболее возвышенных частях формы;

3 — **литниковая воронка**, или **чаша**, служащая для приема металла из заливочного ковша; литниковая чаша также снижает динамический удар струи металла и частично или полностью удерживает шлак;

4 — **стояк**, обеспечивающий передачу металла в шлакоуловитель *8*, гашение динамической энергии потока металла за счет **зумпфа** *5*;

6 — **литниковый дроссель**, представляющий собой местное сужение для регулирования скорости заливки формы металлом;

7 — **питатели** (литники), служащие для подвода металла в полость формы;

8 — **шлакоуловитель**, предназначенный для задержания шлаковых включений и подвода металла к питателям (литникам).

Отверстия, углубления, полости и другие части сложного контура выполняются с помощью **стержней** и **болванов**. Последние могут быть висячими или опорными, для увеличения их прочности устанавливают армирующие элементы в виде деревянных колышков и проволочных крючков. **Знаки стержня** обеспечивают устойчивое положение стержня в форме, предотвращая его всплытие при заливке металла в форму. **Стержневые ящики** бывают разъемные и неразъемные (вытряхные).

Холодильники — металлические вставки для ускорения охлаждения отдельных частей отливки.

Жеребейки различных форм служат для закрепления в определенном положении стержней в форме с целью получения необходимой толщины тела отливки.

4.2.2. Приготовление формовочных и стержневых смесей

Формовочными называют материалы, предназначенные для приготовления формовочных и стержневых смесей, а бывшую в употреблении формовочную или стержневую смесь — отработанной.

Наполнители и **связующие** — основные формовочные материалы, а остальные, добавляемые в смесь для придания ей определенных технологических свойств (выбиваемость, подат-

ливость, газопроницаемость и др.) или ускорения протекающих реакций (катализаторы, отвердители), — **вспомогательные**.

Основным материалом огнеупорной основы смесей является кварцевый песок. Кроме того, используют также магнезит, хромомагнезит, шамот, циркон и др.

Связующие материалы служат для связывания частиц огнеупорной основы для придания им прочности. Хорошими связующими являются глина, жидкое стекло, термореактивные, фурановые, фенолформальдегидные, карбамидные и другие смолы.

Для улучшения технологических и физико-механических свойств смесей в них вводятся **специальные добавки**:

противопригарные — при получении чугунных отливок в сырых формах (пылевидный каменный уголь, жидкие и твердые углеродсодержащие вещества — древесный пек, мазут и др.);

улучшающие **податливость** стержней, подвергаемых сушке (древесные опилки или древесная мука);

повышающие текучесть песчано-глинистых смесей (поверхностно-активные вещества; выделяющийся при их деструкции блестящий углерод повышает противопригарные свойства смесей).

Для улучшения чистоты поверхности отливок на рабочие поверхности форм и стержней, контактирующих с жидким металлом, кистью вручную, окунанием или с помощью пульверизатора наносят **специальные противопригарные покрытия (краски)**.

Литейная форма (собранная с установленными стержнями и готовая к заливке) должна соответствовать определенным критериям качества, уровень которых в значительной степени зависит от состава и свойств формовочных и стержневых смесей, а также степени их уплотнения. Перечислим основные свойства для песчаных смесей:

• **теплофизические**, определяющие режим затвердевания залитого в форму металла и охлаждения отливки в форме;

• **механические**, характеризующиеся прочностью, твердостью, осыпаемостью, пластичностью и податливостью в уплотненном состоянии. **Прочность** обеспечивает целостность литейной формы в процессе ее изготовления, транспортировки

и заливки; **твердость** смеси на поверхности формы является косвенным показателем прочности; **осыпаемость** определяет возможность образования засоров;

• **технологические**, характеризующие способность смеси обеспечивать получение высококачественных форм и стержней при различных технологических процессах их изготовления: **влажность**; **текучесть**, обеспечивающая равномерность уплотнения; **уплотняемость** — способность смеси повышать объемную массу (формировать прочность) при заданной работе уплотнения; **формуемость** — способность смеси уплотняться при заполнении формы свободной засыпкой; **гигроскопичность** — способность формы после сушки поглощать влагу из окружающей среды; **живучесть** — способность сохранять свойства в течение необходимого времени; сопротивление **прилипаемости** к поверхности модели или стержневого ящика; способность к **регенерации** и повторному использованию; обеспечение необходимой **производительности** при изготовлении форм и стержней;

• **рабочие**, характеризующие способность литейных форм и стержней противостоять воздействию расплава в процессе заливки и формирования отливки, а также энергоемкость выбивки отливок из форм и удаления стержней из отливок: **газотворность** — способность смеси выделять газы при контакте с расплавом; **газопроницаемость** — способность смеси пропускать газы через толщу формы; **термомеханическая стойкость** — способность смеси противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах; **термохимическая устойчивость** — способность смеси не оплавляться при соприкосновении с жидким металлом и не вступать в реакции с компонентами расплава; **податливость** определяет степень сопротивления свободной усадке сплава и образование напряжений в отливке; **выбиваемость**, связанная с остаточной прочностью, — способность смеси свободно удаляться из отливки после ее охлаждения; **пригораемость** — термохимическая устойчивость и способность смеси к образованию пригара на поверхности отливки.

Механическое поведение смесей, позволяющее оценить упругие, вязкие, пластические свойства формовочных и стержневых смесей, — это их **реологические свойства**.

Состав формовочных и стержневых смесей определяется типом и маркой литейного сплава, температурой заливки в форму, размерами, массой, конфигурацией получаемых отливок, способом изготовления форм и стержней, характером производства и рядом других технико-экономических, экологических факторов.

Поскольку стержни практически всей поверхностью (за исключением знаковых частей) соприкасаются с расплавленным металлом, в то время как формы — только внутренними поверхностями, то к стержневым смесям предъявляются более высокие требования, чем к формовочным.

В зависимости от методов упрочнения и специальных методов формообразования смеси подразделяются на следующие группы:

- для изготовления форм **по-сырому** (песчано-глинистые);
- уплотняемые **тепловой сушкой** (для изготовления песчано-глинистых сухих и поверхностно-подсушенных форм; смеси песчано-глинистые и на органических связующих для подвергаемых сушке стержней всех групп сложности);
- **холоднотвердеющие** (ХТС), их классифицируют: **по типу связующего** — смеси с неорганическими (жидкое стекло, фосфаты, кристаллогидраты), органическими (синтетические смолы, лигносульфонаты (ЛСТ) и др.) и комбинированными связующими; **по способу отверждения** и **по реологическим свойствам** (пластичные, сыпучие, жидкоподвижные);
- для изготовления форм и стержней в **нагреваемой (горячей) оснастке** их подразделяют на **сухие (сыпучие)** — для изготовления оболочковых форм и стержней и **пластичные** — обладающие прочностью во влажном состоянии;
- **керамические** (специальные жидкоподвижные смеси для изготовления керамических форм способом наливной формовки с последующим прокаливанием);
- формовочные — для **специальных методов формообразования** (формовочные смеси для литья по газифицируемым моделям, для замороженных форм, огнеупорные мелкозернистые наполнители для вакуумно-пленочной формовки и др.).

Большинство отливок изготавливают в разовых сырых песчано-глинистых формах. Смеси для сырых форм имеют влажность 4–6 %, содержат 7–12 % глины, обеспечивающей достаточную прочность смеси во влажном состоянии. При использовании бетонитов содержание глины может быть снижено до 4 %. При получении отливок в сухих формах содержание прочносвязующей глины доходит до 16 %, а влажность до высушивания формы составляет 5–9 %.

Формовочные смеси подразделяются на *единые*, *облицовочные* и *наполнительные*. В массовом производстве применяют единые смеси, в единичном и мелкосерийном для изготовления крупных форм используют облицовочную, наносимую на поверхность модели, и наполнительную, заполняющую остальной объем формы, смеси. К наполнительным смесям предъявляют требования в основном только по газопроницаемости и прочности, в их состав обычно не входят свежие материалы.

До приготовления смесей составляющие их компоненты проходят предварительную подготовку: свежий песок высушивается, просеивается; комовая глина разминается, если она используется в виде порошка, то измельчается, высушивается; отработанную смесь после выбивки охлаждают, измельчают, просеивают и увлажняют.

На изготовление 1 т отливок расходуют до 5 т смесей и до 1 т песков. Проблема состоит в дефицитности формовочных песков, так как сокращаются их разведанные запасы.

Регенерация смеси — это процесс ее подготовки к повторному использованию. Основная масса формовочной смеси в опоках практически не претерпевает существенных изменений и используется повторно после частичной или полной регенерации (охлаждение после выбивки отливок, удаление включений металла (чаще всего магнитной сепарацией), размалывание комков, просеивание, обеспыливание и аэрация). Регенерация смеси важна не только с экономической и технологической, но и с экологической стороны, так как многие смеси содержат вредные вещества, хранение которых в отвалах недопустимо.

Приготовление формовочных и стержневых смесей производится в смесеприготовительных отделениях и состоит из дозирования и перемешивания компонентов, вылеживания, разрыхления, контроля качества.

4.2.3. Способы изготовления форм

Формовка — процесс изготовления литейных форм и стержней.

По способу изготовления формы процесс разделяется на формовку *уплотнением* смеси (*статические методы* — различные виды прессования, *динамические* — трамбовка, вибрация, встряхивание, пескодувный метод, пескострельный и др.) и формовку *без уплотнения* смеси (насыпная, набивная, электромагнитная, вакуумнопленочная и др.).

Встряхивание — уплотнение смеси в опоке, установленной на встряхивающем столе формовочной машины, который приподнимается под давлением воздуха и резко опускается, ударяясь о станину с частотой до 250 уд./мин.

При прессовании смесь уплотняется под давлением прессовой колодки. Разновидности прессования — *уплотнение многоплунжерной колодкой* (прессование несколькими прессовыми колодками, работающими под давлением масла или воздуха); *вибропрессование* (уплотнение формовочной смеси в опоке, которая вибрирует с большой частотой под давлением); *пескодувно-прессовый способ* (уплотнение формовочной смеси с предварительным ее наддувом и последующим прессованием); *высокоскоростное прессование* (уплотнение смеси плитой, падающей со скоростью 8 м/с).

При гравитационном уплотнении смесь свободно или под давлением сжатого воздуха падает в опоку с определенной высоты.

При пескометном способе смесь подается на быстро вращающийся ротор с ковшом, который захватывает смесь и бросает ее в опоку.

Импульсный способ — уплотнение формовочной смеси однократным мгновенным ударом (импульсом) сжатого воздуха. Разновидностью импульсного уплотнения является *уплотнение взрывом*, при котором ударная волна создается за счет взрыва газовоздушной горючей смеси.

Вакуумно-пленочная формовка — изготовление формы из сухого песка без связующего, который удерживается в опоке с помощью синтетических полимерных пленок и вакуума. При заливке металла пленка газифицируется; газ проникает в форму,

где конденсируется на холодных зернах песка, выполняя роль связующего.

По используемой модельной оснастке различают формовку по модели, по шаблону, **по наличию опок** — опочная, безопочная формовка, в съемных опоках и т. д.

Самым распространенным видом является литье в песчаные формы. Разовые формы готовят вручную (**ручная формовка**), на формовочных машинах (**машинная формовка**), **полуавтоматических** и **автоматических линиях**.

Ручная формовка. Применяется в условиях единичного, иногда мелкосерийного производства, при изготовлении уникальных отливок. Методы ручной формовки разнообразны, их используют в зависимости от сложности, массы, габаритов отливки, условий производства и т. д.

Основной технологический вариант формовки — это получение форм в парных опоках по разъемной модели (рис. 79).

Модель и опоку устанавливают на подмодельную плиту. Поверхность модели и плиты посыпают разделительным составом (сухим песком или тальком) для уменьшения прилипания смеси к оснастке. Затем заполняют опоку облицовочной смесью, потом наполнительной смесью, уплотняя ее трамбовкой. Нижнюю полуформу вместе с моделью отливки поворачивают на 180° и снимают с модельной плиты. На перевернутую опоку устанавливают вторую опоку, в которую помещают модель литниковой системы, после чего насыпают формовочную смесь и уплотняют ее. Далее снимают верхнюю полуформу с нижней, поворачивают ее на 180° и отставляют в сторону. Извлекают модель из формы. На нижнюю полуформу накладывают верхнюю полуформу и скрепляют их. Форма готова к заливке.

Крупные отливки получают почвенной формовкой в ямах и кессонах, дно которых находится ниже уровня пола цеха. Стенки и дно кессонов облицованы бетоном для того, чтобы не попали грунтовые воды.

При ручной формовке кроме песчано-глинистых возможно использование холоднотвердеющих, жидких и сыпучих самотвердеющих смесей, а также жидко-стекольных с продувкой их углекислым газом.

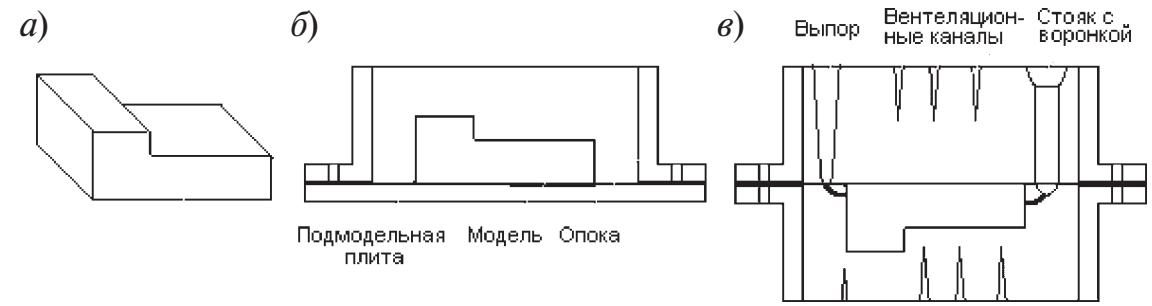


Рис. 79. Эскиз отливки (*а*), полуформа (*б*) и форма (*в*)

Машинная формовка. Для получения более точных отливок, повышения производительности труда используют машинную формовку. Существует много разновидностей формовочных машин, а на заводах массового производства (автомобильных, транспортных и др.) работают автоматические формовочные линии.

Такие линии составляют комплекс литейных машин, механизмов и подъемно-транспортных устройств, выполняющих автоматически все операции изготовления форм, подачу на заливку, охлаждение и выбивку. При этом стержни могут устанавливать вручную.

По способу **извлечения модели из формы** машины делятся на вытяжные (со штифтовым подъемом опок, с протяжкой модели); поворотно-вытяжные (с поворотным или перекидным столом); **по роду привода и способу приведения в действие** — пневматические, гидравлические, пневмогидравлические, электромагнитные, комбинированные; **по конструктивной компоновке** — одно-, двух- и многопозиционные; **по способу перемещения опок** — проходные, челночные, карусельные; **по степени автоматизации** — неавтоматические, полуавтоматические (включаемые при каждом новом цикле), автоматические.

Изготовление стержней. Процесс изготовления стержней включает в себя следующие операции: формовка, отверждение, отделка. Формовка производится либо вручную, либо на машинах с применением стержневых ящиков различной конструкции.

В общем виде процесс ручного изготовления стержня при единичном и мелкосерийном производстве таков: сначала стержневой ящик частично заполняется смесью, легко уплотняется, затем в него устанавливают каркасы (арматура из отожженной

стальной проволоки, сварная или литая из серого чугуна) для придания стержню прочности. Ящик наполняется смесью, которая постепенно уплотняется трамбовкой, на встряхивающих машинах, вибрацией или с помощью пескометов. Для улучшения вентиляции вентиляционными иглами (душниками) накалываются каналы или в стержень закладывают соломенные жгуты, восковые фитили, шнуры, которые выжигаются или выплавляются во время сушки стержней.

Крупные стержни изготавливаются с внутренними пустотами, куда закладывают наполнители — шлак или опилки. Завершающими операциями при изготовлении крупных стержней являются склеивание их частей, промазывание образовавшихся швов специальными пастами, окончательная отделка, контроль и, при необходимости, нанесение на рабочие части стержня противопригарных покрытий.

При массовом и крупносерийном производстве для формовки стержней широко используют пескодувный (реже — пескострельный) метод уплотнения смеси. Стержни постоянных сечений (круглого, квадратного и т. д.) могут изготавливаться на мундштучных машинах. В таких машинах стержневой ящик заменен сменной гильзой (мундштуком), сечение которого определяет форму стержня. Последний, причем любой длины, получают выдавливанием из мундштука машины уплотненной смеси.

Отверждение стержней может осуществляться за **счет тепловой сушки вне оснастки**, **самоотверждения** в **холодной** или **нагретой оснастке**.

Для отверждения стержней вне оснастки применяют сушку в специальных сушилах периодического или непрерывного действия. Сушка повышает прочность стержней, уменьшая их газотворность. Стержни помещаются в сушилах на сушильных плитах, температура сушки зависит от природы связующего материала, а время сушки — от конфигурации и массы стержня.

При отверждении стержней в холодной оснастке используют холоднотвердеющие смеси, отверждаемые при нормальной температуре под воздействием твердых, жидких или газообразных реагентов — отвердителей и катализаторов. В настоящее время под ХТС чаще всего подразумевают холоднотвердеющие смеси на синтетических смолах (Cold-Box process). Для изготовления

стержней широко применяется CO_2 — процесс, при котором жидкостекольная смесь засыпается в стержневой ящик и продувается углекислым газом. Для улучшения выбиваемости стержней в смесь вводят специальные добавки.

Влажные песчано-смоляные и сухие термореактивные смеси применяют для получения стержней в нагреваемой оснастке.

Окраска и сборка форм. С целью уменьшения физико-химического воздействия между металлом отливки и материалом формы в процессе заливки и последующего охлаждения для получения чистой поверхности части формы и стержней покрывают огнеупорными материалами.

Перед сборкой полуформы и стержни тщательно проверяют по внешнему состоянию. В операцию сборки входят: очистка полуформ от мусора, установка стрежней, контроль правильности их установки, накрытие верхней полуформы на нижнюю, скрепление их между собой штырями или втулками. Сверху на опоки устанавливают груз для предотвращения смещений полуформ и подъема верхней полуформы относительно нижней.

Заливка металла. Полученный металл из плавильного агрегата переливают в ковш (реже — в миксер). Из ковша расплав заливают в формы, установленные на полу цеха (в единичном производстве) или на конвейерах (в массовом производстве).

Охлаждение — процесс выдержки отливки в форме до температуры, при которой ее можно извлечь из формы без повреждений. В зависимости от массы отливки продолжительность охлаждения колеблется от нескольких секунд до нескольких суток.

Выбивка — это процесс удаления охлажденной отливки из формы и стержней из отливок. Для выбивки отливок используются выбивные решетки. При этом форма разрушается, а в атмосферу выделяется большое количество тепла, пыли и газов. Для удаления стержней из отливок применяют гидрокамеры, в которых разрушение стержней и удаление остатков стержневой смеси производятся мощной струей воды.

После извлечения отливки из формы следует финишная обработка: очистка, обрубка, зачистка, термообработка.

Обрубка литников, прибылей (элементов литниковой системы для питания отливки расплавом в период затвердевания и усадки) и выпоров (элементов литниковой системы для выво-

да газов из полости формы) осуществляется ленточными и дисковыми пилами, воздушно-дуговой резкой, при которой металл расплавляется электродугой и удаляется направленной струей сжатого воздуха.

Очистка заключается в удалении с поверхности отливки пригара, остатков формовочной и стержневой смеси. Очистка производится в дробеметных барабанах или камерах, где отливки очищаются под ударами стальной и чугунной дроби, в галтовочных барабанах — под ударами звездочек.

Зачистка неровностей выполняется ручными шлифовальными машинками или на станках.

Термообработка заключается в нагреве и охлаждении по определенному режиму отливок для улучшения их свойств.

Контроль качества. Методы контроля делятся на *разрушающие* и *неразрушающие*.

Разрушающий контроль может производиться как на специальных образцах, вырезанных из различных участков контролируемой отливки, так и на образцах, отливаемых одновременно с отливкой или являющихся частью отливки.

Неразрушающий контроль оставляет отливку годной к эксплуатации, при этом могут использоваться следующие методы: магнитный, электрический, электромагнитный, оптический, радиационный, акустический и др.

Контроль макро- и микроструктуры производят для оценки качества сплава и отливки. Контроль **макроструктуры** (макроанализ) проводят визуально или с помощью оптических приборов при небольшом увеличении. Контроль **микроструктуры** (микроанализ) осуществляют на микрошлифах, вырезанных из различных частей отливки, литых проб.

Микрорентгеноспектральный анализ используют для определения как химического состава, так и микроструктуры сплавов. Для исследования **структуры изломов** и выявления **характера разрушения** изделий применяют растровые электронные микроскопы. **Термографический анализ** используют для контроля процесса затвердевания сплава в образцах или в отливке, а на основании полученной кривой затвердевания прогнозируют структуру и свойства отливок, возникновение литейных дефектов, определяют содержание некоторых элементов.

Отливки подвергают **промежуточному контролю** на различных стадиях процесса их получения, а также **окончательному контролю** после завершения всех операций. Контроль может быть *сплошной* и *выборочный*.

Основные дефекты отливок — пригар (часть поверхности отливки загрязнена формовочной смесью); просечки (прожилки на поверхности из-за затекания металла в трещины на поверхности формы); ужимины (заполненные формовочной смесью и прикрытые слоем металла углубления из-за отслоения смеси при заливке); усадочная раковина (полость, образовавшаяся при затвердевании металла из-за усадки). После контроля одна часть бракованных отливок идет на переплавку, а другая — на доработку (заварка, пропитка специальными составами).

4.3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ЛИТЬЯ

К специальным относятся отличные от традиционного литья в разовые песчаные формы способы. Отливки, изготовленные этими способами, имеют лучшее качество поверхности, меньшие величины припусков на механическую обработку, высокие эксплуатационные свойства. Технологические процессы характеризуются меньшей материало- и энергоемкостью, более производительны, так как осуществляются, как правило, на автоматизированных или автоматических установках и линиях, а также позволяют улучшить условия труда и более чисты экологически.

Специальные способы литья можно подразделить на следующие группы:

- с заливкой и кристаллизацией металла в специальных формах в условиях естественной гравитации;
- с применением внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл;
- непрерывные и полунепрерывные;
- получение отливок со специальными свойствами.

4.3.1. Способы литья в специальные формы

Литье в кокиль. Кокиль — это литейная форма многократного использования, изготовленная из металла. Основные достоин-

ства кокилей по сравнению с песчаными формами — более высокая производительность труда, точность отливок, лучшее качество их поверхности.

Технология изготовления отливок в кокиле была известна еще в VII в. до н. э. Скифы таким образом отливали наконечники стрел для лука и различные украшения. Затем опыт был утрачен и возрожден в XVI в. в России для литья чугунных пушечных ядер и свинцовых пуль.

Материалы, используемые для изготовления кокилей, должны противостоять термическим ударам при заливке металла, хорошо обрабатываться, быть недефицитными и недорогими. Этим требованиям удовлетворяет чугун, иногда используют сталь, алюминиевые и другие сплавы. Кокиль бывает неразъемный и разъемный, одно- и многогнездовой (рис. 80).

Процесс литья в кокиль включает в себя следующие операции: очистка кокиля и нанесение на его рабочую поверхность огнеупорных покрытий (кварц, шамот, тальк); установка песчаных или металлических стержней; сборка кокиля; заливка расплава; охлаждение кокиля сжатым воздухом, водой или эмульсией; разъем кокиля и выталкивание из него отливки; обрубка и зачистка отливки.

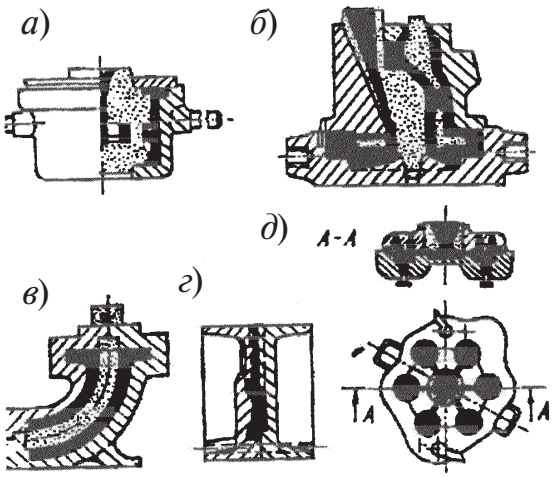


Рис. 80. Конструкции кокилей:
а — без разъема (вытряхной кокиль);
б, в — с криволинейным разъемом;
г — с вертикальным разъемом;
д — с горизонтальным разъемом

Подвод металла производят сверху, снизу (сифоном) или сбоку через щелевые питатели. Перед заливкой металла кокиль должен быть подогрет до необходимой температуры.

Литье в облицованный кокиль. Зазор между поверхностями рабочего гнезда кокиля и модели (разовой или многократного использования) заполняют составом, образующим после затвердевания облицовку, которая повышает стойкость кокиля, позволяет получить сложные стальные отливки.

Литье в оболочковые формы. Полуформы и стержни в виде тонкостенных оболочек делают из песчано-смоляных термореактивных смесей.

Их изготавливают путем отверждения на металлической нагреваемой оснастке слоя смеси, в котором связующее вначале расплавляется, а затем затвердевает, придавая оболочке необходимую прочность.

Литье по выплавляемым моделям. Сущность способа состоит в получении специальных моделей из легкоплавких материалов; в сборке их в блоки (припаиванием литниковой системы к модели); в покрытии модельных блоков огнеупорной оболочкой (окунанием в суспензию, обсыпкой зернистым материалом и сушкой до отверждения); в удалении моделей, прокаливании оболочковых форм и заливке в них жидкого металла (рис. 81).

По способам удаления из оболочек различают модели: *выплавляемые* горячим воздухом или расплавленным модельным составом (парафиновые, стеариновые, восковые модели), *растворяемые* в воде (соляные модели) и *выжигаемые* в газовых печах (пенополистироловые модели).

Литье по выплавляемым моделям позволяет получать сложные отливки из различных сплавов, в том числе труднообраба-

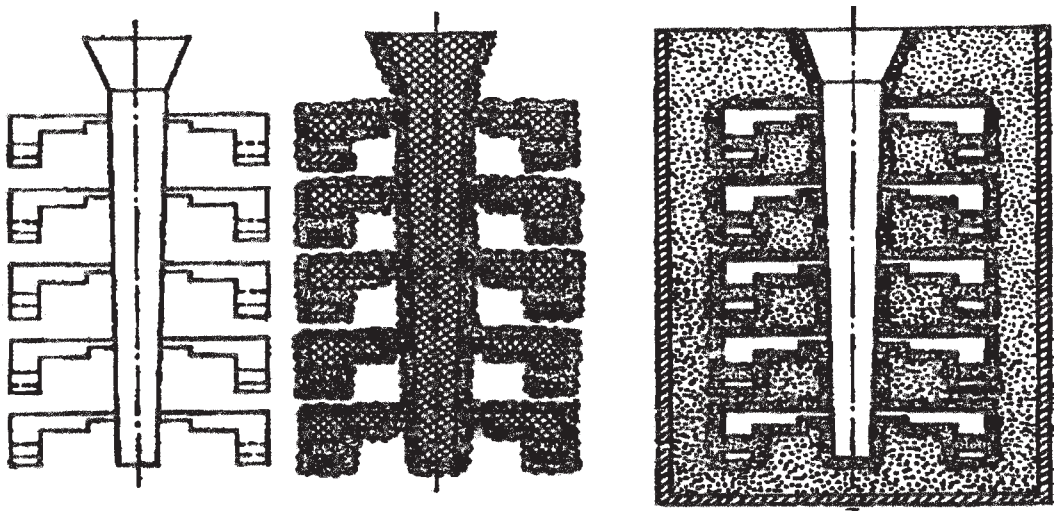


Рис. 81. Последовательность изготовления многослойной оболочковой формы по выплавляемым моделям:
а — блок моделей; *б* — блок моделей с нанесенным огнеупорным покрытием; *в* — подготовленная к заливке форма

тываемые резанием и ковкой. При этом повышается коэффициент использования металла, снижается себестоимость деталей. Этим способом получают отливки массой от нескольких граммов до 100 кг.

Изготовление Медного всадника дважды едва не завершилось провалом. Первый раз это случилось при вытапливании воска. Подмастерье, дежуривший у формы, заснул. Воск загорелся, и, если бы не Фальконе, проверявший ночью ход работы, форма была бы разрушена. Вторая авария случилась во время заливки. Прорвавшийся из формы металл вызвал большой пожар. Все разбежались, кроме литейщика Кайлова, который залил форму. В результате аварий в головах всадника и лошади образовались недоливы и намывы. Два года статуя простояла с зияющими ранами, лишь в 1777 г. ее удачно долили.

Изготовление моделей производят заливкой расплавленного модельного состава в пресс-формы, запрессовкой под давлением пастообразного состава или на машинах-автоматах.

Данный способ используется для изготовления отливок, максимально приближенных по конфигурации к готовой детали; тонкостенных отливок повышенной точности; создания сложных конструкций, объединяющих несколько деталей в один узел.

Литье по газифицируемым моделям. Модель заформовывается в песчаную неразъемную форму и не извлекается из нее. В качестве материала моделей используют пенополистирол. Во время заливки, благодаря теплу металла, материал модели испаряется, а его место занимает заливаемый в форму металл. Применение вакуума при заливке формы и охлаждении отливки позволяет создавать экологически чистые производства, что делает этот способ одним из наиболее конкурентоспособных и перспективных, в частности, при производстве отливок для автомобилестроения.

Литье выжиманием — процесс получения тонкостенных крупногабаритных отливок путем свободной заливки расплавленного металла в раскрытые металлические формы с последующим их сдвиганием и выжиманием жидкого металла. Для улучшения заполнения формы и повышения качества отливки процесс осуществляется так, чтобы геометрические размеры полости

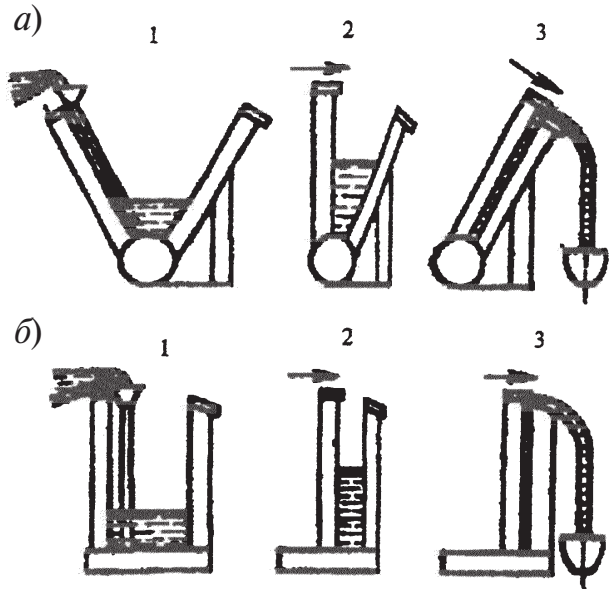


Рис. 82. Схема процесса литья выжиманием:
а — поворотом подвижной полуформы;
б — плоскопараллельным перемещением полуформ; цифрами обозначены стадии процесса

формы изменялись по мере заполнения ее расплавом и затвердевания отливки.

Процесс может быть осуществлен по двум схемам: с поворотом подвижной полуформы вокруг неподвижной оси и с плоскопараллельным перемещением одной из двух подвижных полуформ (рис. 82).

Литье в керамические формы. Существуют различные виды литья в разъемные керамические формы, изготавливаемые по постоянным моделям. Например шоу-процесс — способ получения заготовок (в том числе крупногабаритных) повышенной точности в разовых керамических формах, изготавливаемых из жидкоподвижных смесей. Смесь (суспензия) состоит из огнеупорных порошков различной зернистости, гидролизованного раствора этилсиликата и гелеотвердителя, резко ускоряющего процесс твердения. Ее выливают в оснастку, где она затвердевает. Затем форму снимают с модели и прокаливают (поджигают). Так получают отливки повышенной точности с хорошим качеством поверхности (штампы, кокиль, пресс-формы и т. д.).

ГПСМО-процесс (горячее прессование с использованием солеметаллических моделей) — способ изготовления отливок с применением прокаленных керамических форм и стержней. Изготавливать формы можно по металлическим, соляным или керамическим моделям. Для получения тонкостенной формы прессованием модельная оснастка должна состоять из модели, формирующей полость формы, контрмодели (контурной плиты), образующей контуры формы, и устройства для удаления модели. Керамическая масса, состоящая из огнеупорного по-

рошка оксидов, силикатов, солей или металлических порошков, парафина и стеарина, в нагретом до 60–65 °С (термопластичном) состоянии запрессовывается в полость между моделью и контрмоделью. Полученную форму обжигают в адсорбирующем наполнителе (глиноземе) при температуре 850–900 °С и заливают металлом.

Литье в углеродистые формы. Графитовые формы многократного использования применяют при литье титана и тугоплавких металлов, для которых графит в большинстве случаев является единственно приемлемым материалом. Кроме графитовых электродов и блоков для изготовления углеродных форм используют углеродные волокна, ткани и другие материалы, обладающие широким диапазоном теплофизических свойств.

Литье в замороженные формы. Формы и стержни получают методом низкотемпературной формовки (НТФ-процесс), при котором происходит замораживание водных вяжущих керамических суспензий. Метод основан на явлении необратимой коагуляции некоторых гидрозолей окислов металлов при охлаждении до температур ниже точки их замерзания. Особенность образующейся керамики — сравнительно высокая сквозная и ориентированная пористость, что обеспечивает хорошую газопроницаемость формы.

Литье в магнитные формы — способ изготовления отливок, при котором используются газифицируемые (пенополистироловые) модели, помещаемые в опоку — контейнер, засыпаемый стальной или чугунной дробью. Форму упрочняют с помощью постоянного магнитного поля, под действием которого дробь связывается в единое целое. При заливке модель газифицируется, полость формы заполняется расплавом. После снятия магнитного поля дробь высыпается из опоки.

4.3.2. Способы литья с применением внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл

Литье под давлением — самый быстрый и экологически чистый технологический процесс, с помощью которого получают разнообразные по сложности отливки — от элементов замка “молния” до блока цилиндров в автомобиле (рис. 83).

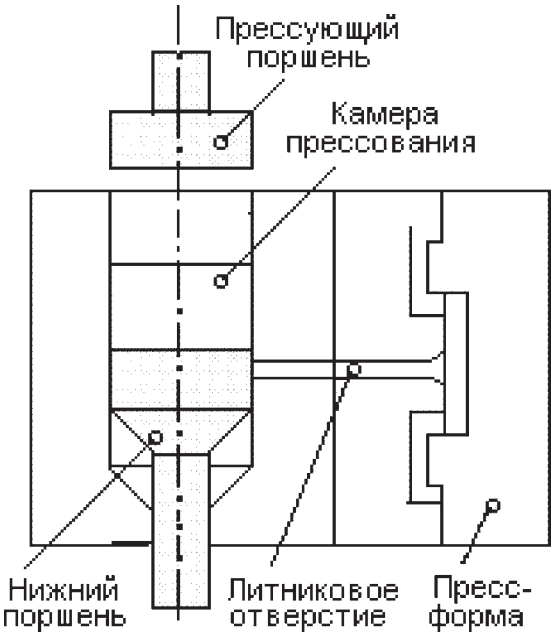


Рис. 83. Схема литья под давлением

Сущность процесса состоит в том, что расплав поступает в рабочую полость металлической формы (пресс-формы) под давлением поршня со скоростью до 140 м/с. После затвердевания металла форма раскрывается и отливка извлекается. Применяют машины для литья под давлением с холодной и горячей (вертикальной или горизонтальной) камерой прессования.

Машины с холодной камерой прессования используют для изготовления отливок из сплавов на основе алюминия, магния и меди, машины с горячей камерой прессования — из легкоплавких сплавов на основе цинка, свинца, олова.

Существуют **разновидности литья под давлением**: *под низким давлением, с противодавлением, под всесторонним газовым давлением*. Эти способы позволяют получать отливки повышенной точности, чистоты поверхности, сложной конфигурации, с более высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Если в герметической камере с формой создать вакуум, а в камере с расплавом поддерживать атмосферное давление, то заполнение формы произойдет за счет **вакуумного всасывания**.

Вакуумно-компрессионное литье совмещает предварительное вакуумное всасывание и всестороннее давление воздуха на затвердевшую отливку. Процесс осуществляется в специальных установках (рис. 84), состоящих из двух камер *А* и *Б*. В них создают вакуум, и металл дегазируется. Затем разрежение в камере *А* увеличивают, и металл по трубопроводу поступает в форму. После заполнения формы в обе камеры подают сжатый воздух, обеспечивая затвердевание металла под давлением.

Центробежным литьем (рис. 85) получают отливки — тела вращения: трубы, втулки, диски, барабаны и др. Расплав залива-

ется во вращающуюся форму (изложницу), где под действием центробежных сил он растекается по поверхности и затвердевает, образуя отливку. Изложницу вращает центробежная машина с вертикальной или горизонтальной осью вращения.

Центробежный способ литья позволяет изготавливать также двухслойные биметаллические отливки. При этом могут использоваться песчано-глинистые, металлические, керамические и графитовые формы. Преимущества данного способа: исключается необходимость изготовления стержней, из-за отсутствия литниковой системы увеличивается выход годного, повышается плотность отливок и др. Недостатки — ухудшение качества внутренней поверхности, уменьшение точности отливок, увеличение степени ликвации сплавов.

К специальным способам литья также относятся: литье с применением электромагнитного воздействия, непрерывное и электрошлаковое литье и др.

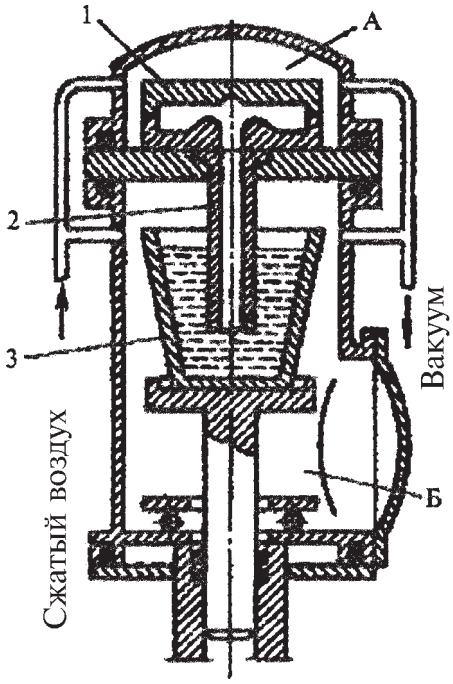


Рис. 84. Схема установки для вакуумно-компрессионного литья: *А* — камера с формой; *Б* — камера с жидким металлом; *1* — форма; *2* — металлопровод; *3* — ковш с металлом

4.3.3. Капельные технологии

Физико-механические свойства обычных металлических материалов достигли своих максимальных значений. Дальнейший прогресс связан с созданием структур, сконденсированных из кластеров, малых кристалликов и фрагментов, имеющих объем 10^2—10^4 атомов. Столь значительная фрагментация материала существен-

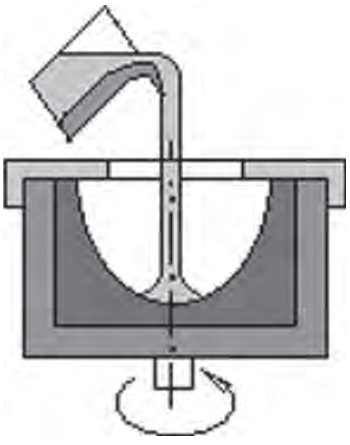


Рис. 85. Схема центробежного литья

но меняет его свойства. Материалы с подобной структурой (размер кристаллических зерен до 0,1 мкм) называют нанокристаллическими.

Монодисперсионная технология — это технология получения сферических частиц субмиллиметровых размеров, обладающих однородными свойствами. На основе монодисперсионных технологий разработаны принципиально новые способы получения конструкций. Металл или сплав нагревается выше температуры плавления, затем он подается в генератор капель, которые далее электризуются и поступают в электронную пушку. Капельный поток жидкого металла движется через систему управляющих электродов. Сталкиваясь с подложкой, капли проходят высокоскоростное охлаждение, образуя частичку изделия. Основные способы генерации капель — газовое распыление, плазменное распыление, центробежное распыление, электродинамическое распыление, вынужденный распад струи, конденсация капель из газовой фазы.

На основе гранул металла, полимера, стекла и других веществ можно создавать композиционные материалы с заданными свойствами. В настоящее время уже налажено промышленное производство высокопрочных алюминиевых сплавов, инструментальных и нержавеющих сталей, жаропрочных сплавов на основе никеля и титана, магнитных сплавов, припоев и др. Из этих материалов получают ленту и проволоку.

Генерация потока капель металла в сочетании с управлением движения подложки позволяет создавать сложные по форме изделия, постепенно “выращивая” конструкцию: капля за каплей постепенно укладывается в конструкцию. Режим движения и охлаждения капель обеспечивает прочность и устойчивость создаваемого изделия.

5. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Реальная прочность конструкции всегда ниже той, которую можно было бы от нее ожидать.

А. Гриффитс

Химик, пользуясь Периодической таблицей элементов Менделеева, может многое сказать о свойствах того или иного металла, зная только его место в ней. Металлург, имея в руках диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов, не меньше может сказать о свойствах той или иной стали, хотя он никогда и не имел с такой сталью дела.

Древний рецепт закалки кинжала: "нагревать до тех пор, пока кинжал не засветится, как восходящее в пустыне солнце, затем охладить его до цвета царского пурпура, погружая в тело мускулистого раба. Сила раба, переходя в кинжал, и придает металлу твердость".

5.1. ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СПЛАВОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Как известно, изменение структуры сплава в большой степени определяется его химическим составом. Но, используя различные технологические приемы, при одинаковом составе сплава можно в широком диапазоне изменять структуру, а значит, и свойства. К таким технологическим приемам относится **термическая** и **химико-термическая обработка** металлов и сплавов.

Термическая обработка (ТО) наиболее широко применяется на практике, так как оказывает существенное влияние на изменение свойств материалов. С ее помощью изменяют твердость, прочность и пластичность; она влияет на формирование коррозионной стойкости, жаропрочности и многих других свойств. Различные виды ТО представляют собой довольно сложные технологические процессы.

Любая ТО состоит из нагрева и охлаждения с заданной скоростью, а ее характеристика может быть выражена с помощью диаграммы, на одной оси которой откладываются температуры нагрева, а на другой — время. Такие диаграммы (рис. 86) называются графиками ТО.

Изменение свойств в результате ТО зависит от изменений во внутреннем строении металла или сплава, от изменения его фазового состава, размера и взаимного расположения фаз.

Итак, **ТО — совокупность технологических операций, связанных с нагревом, выдержкой и охлаждением для изменения свойств металлов и металлических сплавов в результате изменения их внутреннего строения.**

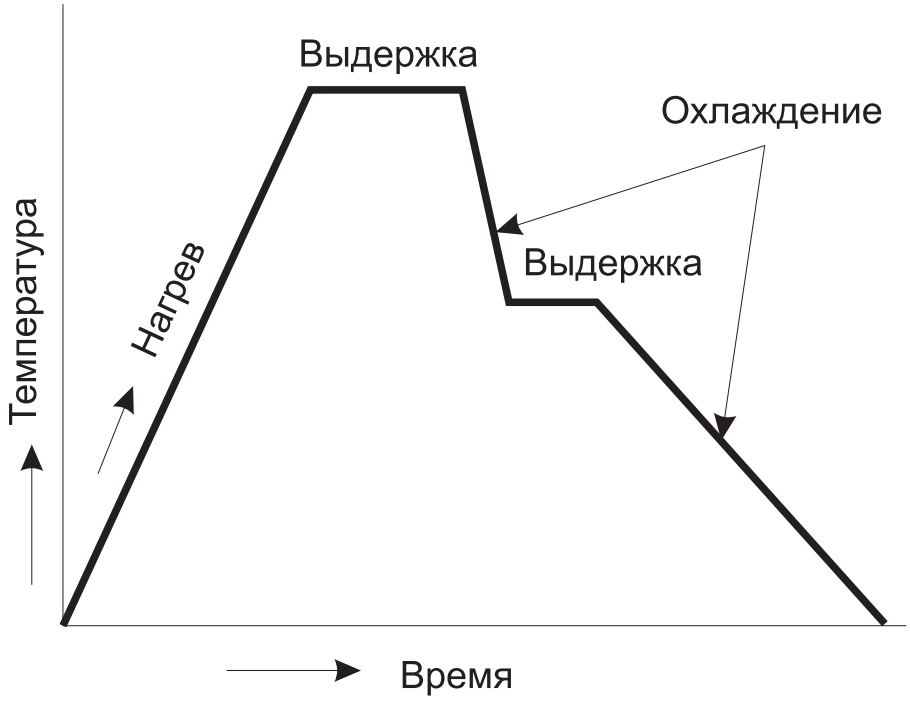


Рис. 86. График термической обработки

Все операции ТО (рис. 87) проводят по заранее разработанной технологии. ТО можно считать эффективной, если достигнутые в результате ее проведения свойства материалов сохраняются длительное время.

ТО может быть как промежуточной операцией, предназначенной для улучшения технологических свойств (облегчения ковки, штамповки, прокатки), так и окончательной — для обеспечения в материале или изделиях требуемого комплекса свойств.

Существование одного металла в нескольких кристаллических формах (в зависимости от температуры и давления) называются **полиморфизмом** или **аллотропией**, различные кристаллические формы одного вещества — полиморфными или аллотропическими модификациями.

За основу ТО чугуна и стали приняты полиморфные превращения железа, сопровождающиеся перекристаллизацией, и процессы, связанные с изменением растворимости в железе. В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях: α- и γ-железо. α-железо, имеющее кубическую объемноцентрированную кристаллическую решетку (**феррит**) устойчиво в двух интервалах температур: ниже 911 °С и от 1392 до 1539 °С. Высокотемпературную модификацию α-железа обычно обозначают δ-железо. В температурном интервале 911–1392 °С устойчиво γ-железо (аустенит), имеющее кубическую гранецентрированную кристаллическую решетку. Поскольку железо, кроме того

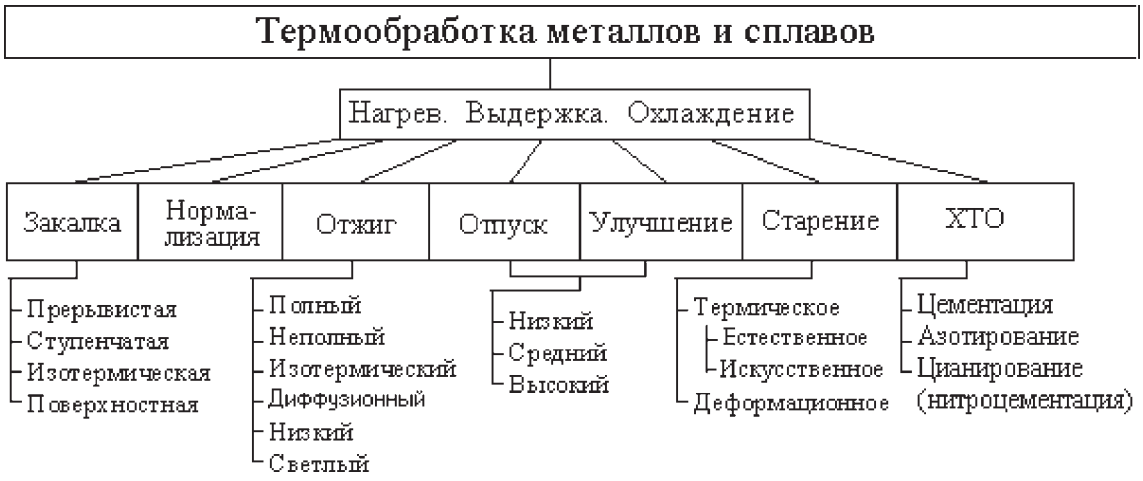


Рис. 87. Обобщенная схема видов термической обработки

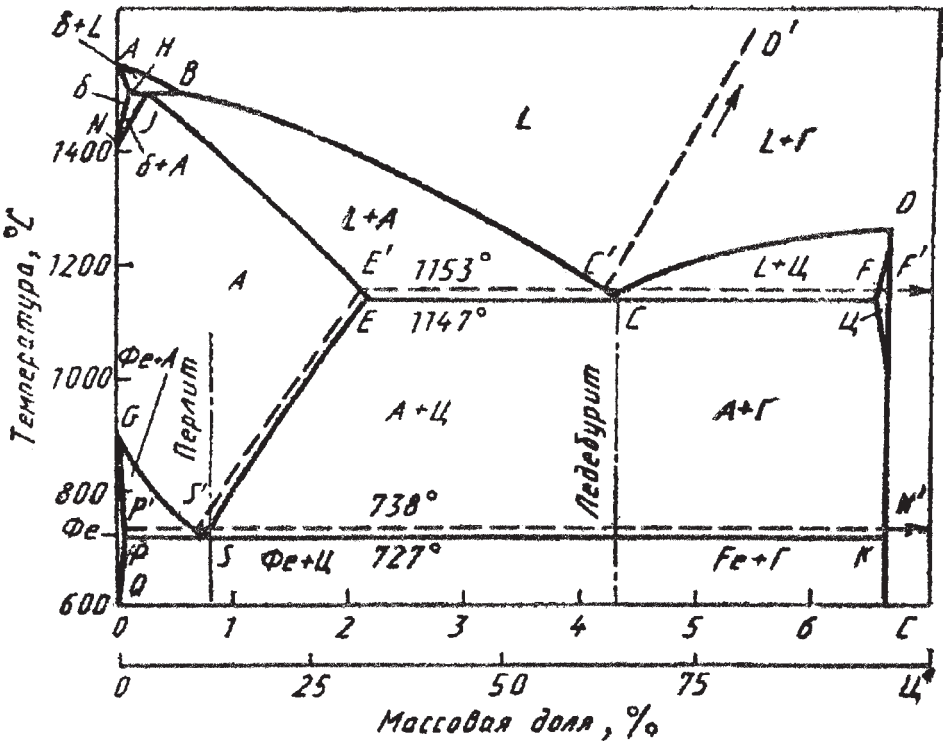


Рис. 88. Диаграмма состояния сплавов железо—углерод: штриховые линии — система железо—графит, сплошные линии — система железо—цементит; *L* — расплав; А — аустенит; Г — графит; Ц — цементит

что образует химическое соединение Fe_3C, имеет две аллотропические формы (α и γ), то в системе железо—углерод существуют различные фазовые состояния железоуглеродистых сплавов в зависимости от состава и температуры (рис. 88).

Нагрев. Для чистого железа температура аллотропического превращения составляет 911 °С. При наличии углерода она снижается до 723 °С (ее обозначают A_1).

Если нагреть железоуглеродистый сплав выше температуры 723 °С, то начнется аллотропическое превращение железа: феррит заменяется аустенитом. В образующихся кристаллах аустенита будет растворяться цементит. Атомы железа участвуют в построении кристаллической решетки, а атомы углерода размещаются в ее межатомных промежутках. Этот процесс завершится при температуре A_3 ($723° < A_3 < 911°$), зависящей от количества углерода в сплаве. Если металл очень долго выдерживать при такой температуре или нагревать значительно выше ее, то начнется объединение мелких зерен аустенита в более круп-

ные, многократно превосходящие исходные. Таким образом, **в результате нагрева до определенной температуры в металле происходят фазовые превращения**. В рассматриваемом случае две фазы (феррит и цементит) заменились одной новой (аустенитом). Выдержка при температуре нагрева необходима для полного завершения фазового превращения, но время ее должно быть ограничено во избежание укрупнения кристаллов образовавшейся фазы.

Охлаждение. При охлаждении протекают процессы, обратные происходящим при нагреве, т. е. имеет место аллотропическое превращение: аустенит заменяется ферритом. При этом из решетки должны выделиться избыточные атомы углерода, которые, соединяясь с атомами железа, образуют цементит, поскольку растворимость углерода в аустените значительно выше, чем в феррите. Такие процессы происходят за счет диффузии атомов, зависящей от температуры и размера атомов (при одинаковой температуре диффузия больше у атомов углерода, размер которых меньше, чем размер атомов железа). Следовательно, протекание процессов при охлаждении в наибольшей степени обусловлено интервалом температур (скоростью охлаждения). При прочих равных условиях (химический состав стали, температура нагрева) именно **скорость охлаждения** является фактором, определяющим строение охлажденного металла.

При охлаждении с аустенитом происходит следующее. Если температура ниже 723 °С, аустенит сохраняется некоторое время без видимых внешних изменений. Это инкубационный, или скрытый, период распада. В зависимости от температуры его длительность меняется от нескольких секунд до 5–15 мин. Чем ниже температура, при которой происходит распад аустенита, тем мельче кристаллы вновь образовавшихся фаз. При этом в интервале температур 550–723 °С образуются ферритоцементитные смеси пластинчатого строения, в интервале 220–550 °С — смеси игольчатого строения, а при более низких температурах — игольчатая однофазная структура, не являющаяся ферритоцементитной смесью.

Процесс распада аустенита изображается с помощью диаграммы, характер которой зависит от состава стали (рис. 89).

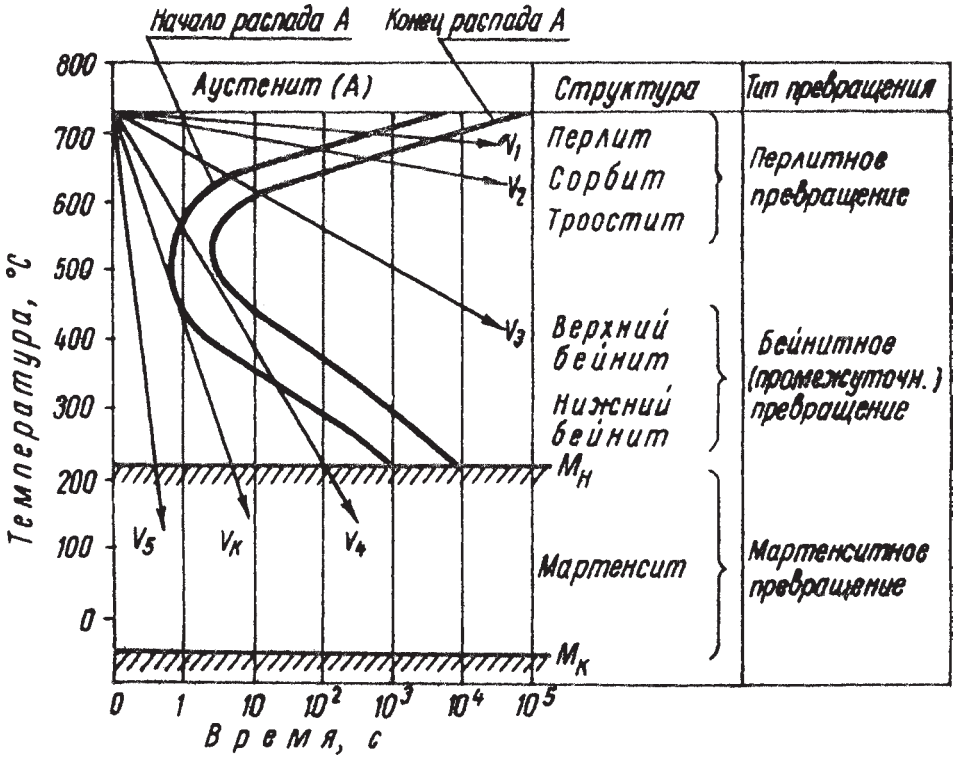


Рис. 89. Диаграмма распада аустенита для стали, содержащей 0,8 % углерода: $M_н$ и $M_к$ — температура соответственно начала и конца мартенситного превращения

Образование различных структур связано с интенсивностью диффузионных процессов при тех или иных температурах. При относительно небольших степенях переохлаждения (до температуры 500—550 °С) распад аустенита осуществляется за счет диффузии атомов как углерода, так и железа. Этот тип превращения называется **перлитным**. В результате перлитного превращения образуются смеси феррита с цементитом: *перлит*, *сорбит*, *троостит*. Первая смесь получается при наименьших, а последующие — при увеличивающихся степенях переохлаждения аустенита. Смеси отличаются друг от друга размерами зерен (пластин) и свойствами. Перлит наиболее мягок и пластичен. Зерна троостита мельче, а твердость значительно выше, чем у перлита.

При переохлаждении до температуры 220—500 °С распад аустенита протекает главным образом за счет диффузии атомов углерода (диффузионная способность атомов железа резко снижается).

Кристаллическая решетка железа перестраивается почти бездиффузионно, поэтому кристаллы сильно измельчаются и приобретают игольчатый вид. Твердость и прочность стали при этом увеличиваются, а пластичность снижается. Такой тип превращения называют **бейнитным** или **промежуточным**.

Переохлаждение ниже температуры 200 °С приводит к бездиффузионному превращению аустенита в пересыщенный углеродом раствор, называемый **мартенситом** (тип превращения — **мартенситный**). Причем мартенсит — очень твердая хрупкая игольчатая структура. Таким образом, чем ниже температура, при которой происходит распад аустенита, тем сталь тверже, прочнее, тем ниже ее пластичность.

При нагреве мартенсита выше температуры 250 °С образующаяся смесь феррита с цементитом имеет по сравнению с мартенситом значительно меньшую твердость, меньшие пределы прочности и текучести, но более высокую пластичность. Предел упругости достигает максимального значения при нагреве мартенсита до температуры 300 °С. Полученные в результате распада мартенсита смеси феррита с цементитом имеют зернистое строение. Этим они отличаются от аналогичных смесей, полученных при превращении аустенита. Структуры, имеющие зернистое строение, обладают лучшим комплексом механических свойств.

Аналогичные процессы могут иметь место и при ТО некоторых других сплавов (медь с бериллием, алюминий с кремнием, титановые, магниевые сплавы и т. д.).

5.2. ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Отжиг и нормализация

Часто необходимо привести сплав в состояние, близкое к структурному и фазовому равновесию (например, для облегчения механической или пластической обработки).

ТО, приближающая сплав к состоянию фазового и структурного равновесия, называется **отжигом**, т. е. нагрев сплава выше температуры фазового превращения, выдержка при этой температуре для завершения превращения и медленное охлаждение, когда металл остается в выключенной печи (охлаждение с печью).

Назначение отжига — снятие наклепа (изменение структуры металла после деформирования в холодном состоянии, после которого повышается прочность, но снижается пластичность), смягчение металла, повышение его пластичности и ударной вязкости, изменение структуры, придание определенных электрических, магнитных и других свойств, снятие напряжений.

Если фазовое превращение произошло полностью, отжиг является *полным*, если частично — то *неполным*.

Полный отжиг (прокат, поковки, фасонные отливки и т. п.) производится со скоростью нагрева около 100 °С/ч, выдержкой от 0,5 до 1 ч/т, с медленным охлажденим (10−100 °С/ч — для легированных, 150—200 °С/ч — для углеродистых сталей).

Неполный отжиг необходим для снятия внутренних напряжений и улучшения обрабатываемости резанием в том случае, когда предварительная горячая механообработка не привела к образованию крупного зерна.

Иногда охлаждение металла проводят следующим образом. После нагрева и выдержки металл переносят в другую печь, которая нагрета до температуры ниже фазовых превращений, выдерживают в этой печи до завершения образования новой, более равновесной структуры, после чего охлаждают на воздухе. Такой отжиг называется **изотермическим**. Его применяют для небольших деталей с целью экономии времени.

Диффузионный отжиг (гомогенизация) используют для обработки отливок и слитков, которые нагревают до температуры 1100−1200 °С со скоростью 100−150 °С/ч, так как при этом наиболее полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания химического состава в отдельных объемах стали.

Продолжительность выдержки зависит от состава стали и массы садки. После гомогенизации крупное зерно измельчается последующей обработкой давлением или обычным полным отжигом.

Низкий отжиг необходим для углеродистых и легированных сталей перед механообработкой. Вначале производят нагрев до температуры 650−680 °С со скоростью 100−150 °С/ч, после выдержки отливку охлаждают на воздухе.

Светлый отжиг производят по режимам полного или неполного отжига с применением защитных атмосфер или в печах

с частичным вакуумом. Применяют для обработки холоднокатаной ленты, прутков, проволоки и т. д., а также для деталей, подвергаемых гальванопокрытиям для защиты от окисления и обезуглероживания.

Нормализация — это нагрев до температуры 800–950 °С и последующее охлаждение в спокойном воздухе. После нормализации сталь приобретает мелкозернистую однородную структуру. Эта операция является как бы переходной ступенью от отжига к закалке. Для низкоуглеродистой стали нормализация может заменить отжиг, а для средне- и высокоуглеродистой стали — закалку и высокий отпуск.

Кроме измельчения зерен в структуре стали нормализация улучшает обрабатываемость резанием, механические свойства, снижает порог хладноломкости.

Закалка

Закалкой называется операция ТО, включающая в себя нагрев выше температур фазовых превращений, выдержку при этой температуре и последующее быстрое охлаждение. При охлаждении с большой скоростью в металле не успевают произойти диффузионные процессы, и в результате создается так называемое неравновесное структурное состояние (не свойственное данному металлу при комнатной температуре).

При закалке фиксируются метастабильные структуры, т. е. относительно устойчивые. Это означает, что при нормальной температуре они практически устойчивы, но при нагреве распадаются и сплав переходит в более устойчивое состояние.

Закалке подвергаются очень многие сплавы на основе железа, меди, алюминия, титана, магния и др.

Как правило, закалка является подготовительной операцией термической обработки, так как после нее свойства сплава еще не оптимальны. Например, железоуглеродистые сплавы приобретают излишнюю хрупкость, сплавы многих цветных металлов (алюминий, магний, титан) значительно повышают прочность, только будучи подвергнуты после закалки дополнительному нагреву.

В то же время закалка является одним из важнейших видов ТО, так как следующая за ней обработка обеспечивает получе-

ние в сплаве такого состояния с широким диапазоном оптимально сочетающихся свойств, которые невозможно получить в результате отжига или нормализации.

Изменения свойств в результате закалки чрезвычайно разнообразны, но в среднем твердость различных металлов повышается, как правило, в два—три раза.

В практике термообработки может применяться закалка различных видов (рис. 90): *прерывистая* (или закалка в двух охладителях); *ступенчатая*; *изотермическая*; *поверхностная* (в основном за счет индукционного нагрева).

Прерывистая закалка в двух охладителях заключается в быстром охлаждении изделия в диапазоне температур 700—400 °С, например, в воде, а при снижении температуры изделия до 400—300°С его продолжают охлаждать, но уже медленно, на воздухе или в масле. Это приводит к уменьшению закалочных напряжений и коробления.

При ступенчатой закалке изделие охлаждают с большой скоростью только до некоторой температуры, при которой оно выдерживается до выравнивания этой температуры по толщине изделия (ступень), а затем охлаждается медленно с образованием в структуре мартенсита. Ступенчатая закалка дает минимум брака по трещинам и короблению.

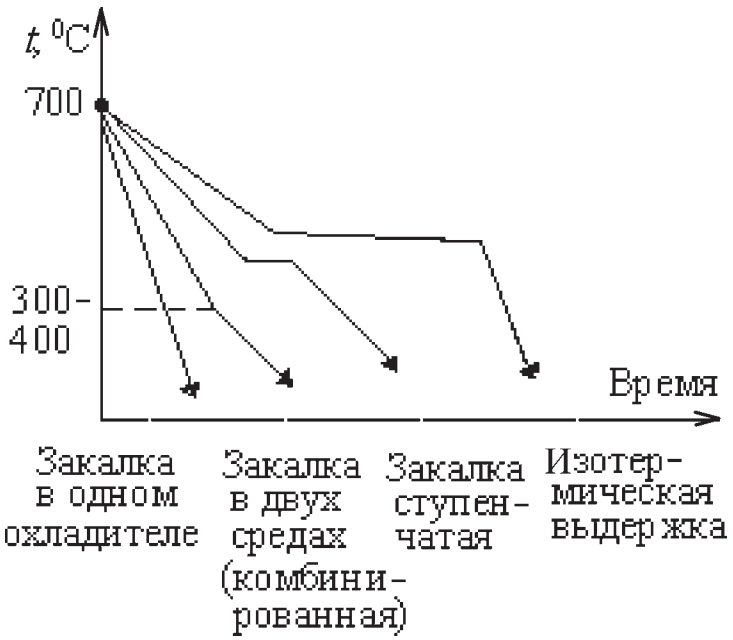


Рис. 90. Виды закалки

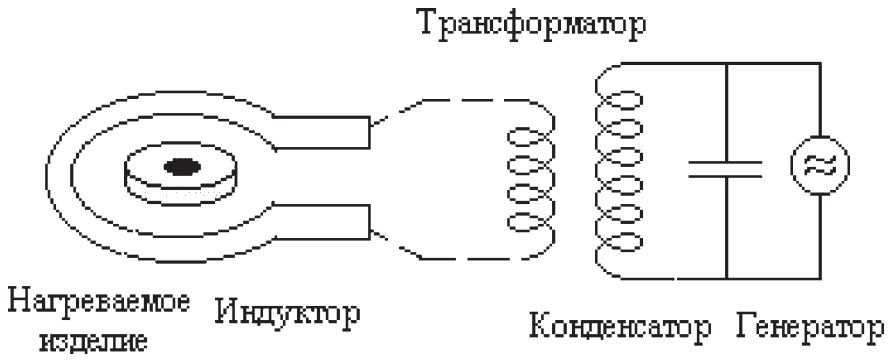


Рис. 91. Схема поверхностной закалки

Изотермическая закалка — быстрое охлаждение изделия до температуры 400−200 °С с последующей некоторой (в зависимости от марки металла) изотермической выдержкой в закалочной среде. В результате получают микроструктуру также игольчатого типа — бейнит, обладающую меньшей твердостью, чем мартенсит, но достаточной для многих целей пластичностью (например, так закаляют пружины, рессоры, болты, работающие под большой нагрузкой). Коробление изделий при этой закалке незначительно.

При поверхностной закалке используют индукционный нагрев (путем индуктирования токов в металлоизделиях — рис. 91). При этом мартенситные структуры распространяются на незначительную заданную глубину (1−5 мм), достигается повышение твердости, усталостной прочности и износостойкости поверхностных слоев изделия с незначительным изменением его формы и размеров.

Широкому распространению поверхностной закалки способствует то, что она экономически выгодна (не расходуется энергия на нагрев всего изделия) и легко поддается автоматизации. Во всех случаях, как правило, после закалки стали следует отпуск, снимающий в некоторой степени напряжение, повышающий прочность и вязкость, но снижающий твердость.

Отпуск и старение

Для повышения пластичности, вязкости, снижения твердости и уменьшения внутренних напряжений металлические сплавы после закалки подвергаются нагреву. Температура нагрева — ниже температуры фазовых превращений и колеблется, как

и время выдержки, в довольно широких пределах в зависимости от состава сплава и характера ожидаемой структуры. Такой нагрев для сталей называется **отпуском**. Это конечная операция, следующая за закалкой. Отпуск используют для уменьшения внутренних напряжений и получения более равновесной структуры. Стальные изделия в закаленном (неотпущенном) состоянии не применяют из-за хрупкости и малой пластичности.

Напряжения в закаленных изделиях снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска и меньше скорость охлаждения. С повышением температуры отпуска твердость и прочность снижаются, а пластичность и ударная вязкость увеличиваются. Поэтому в зависимости от условий эксплуатации и требуемых свойств применяют различные виды отпуска: *низкий, средний, высокий (улучшение)*.

Низкий отпуск состоит в нагреве закаленной стали до температуры 120–250 °С. При этом твердость почти не снижается, но, благодаря выделению из мартенсита части углерода, хрупкость стали существенно уменьшается. Такому отпуску подвергаются инструменты. Кроме того, этот вид ТО уменьшает остаточные напряжения в изделии, повышает сопротивление хрупкому разрушению.

Средний отпуск (нагрев до температуры 300–400 °С) увеличивает упругость стали. Такой отпуск проходят рессоры, пружины, торсионы.

При температуре 500–680 °С происходит **высокий отпуск**. Мартенсит распадается на ферритоцементитную смесь, имеющую зернистое строение, — сорбит отпуска. Назначение этого вида ТО состоит в получении максимальной вязкости при сохранении относительно высоких значений пределов прочности, текучести и повышенного сопротивления хрупкому разрушению, а также для практически полного снятия остаточных напряжений. Такому отпуску подвергаются детали машин, испытывающие в работе большие динамические и вибрационные нагрузки, так как сорбит отпуска обладает наиболее благоприятным комплексом механических свойств. Поэтому закалку с последующим высокотемпературным отпуском называют **улучшением стали**. Для сравнения можно рассмотреть значения механических свойств для хромистой стали в отожженном, нормализованном и улучшенном состояниях (табл. 24).

Таблица 24

Прочностные и пластические характеристики стали, содержащей 0,4% углерода и 1% хрома, после различных видов термической обработки

Свойство	Состояние		
	после отжига	после нормализации	после улучшения
Предел прочности, кг/мм^2	65	75	87
Предел текучести, кг/мм^2	36	45	76
Относительное удлинение, %	21	21	22
Относительное сужение, %	53	56	67
Ударная вязкость, кг·м/см^2	5,5	8	17

Старение заключается в переходе сплава от неустойчивого к более устойчивому состоянию. Такой процесс протекает и без нагрева (естественное старение), но в этом случае он растягивается на значительный срок — иногда до нескольких лет. Гораздо интенсивнее протекают процессы старения при повышенных температурах. Принципиальных отличий в процессах, происходящих при отпуске и старении, не наблюдается. Для сталей термины “старение” и “искусственное старение” применяются обычно при обозначении нагрева после наклепа изделия и в тех случаях, когда небольшому нагреву подвергаются незакаленные детали. Старение закаленных цветных сплавов обычно приводит к значительному повышению их механических свойств. Некоторые сплавы алюминия (дуралюмин) имеют прочность после отжига 20 кг/мм^2, после закалки — 25 кг/мм^2, а после старения — 40−45 кг/мм^2.

Старением добиваются повышения прочности и твердости при снижении пластичности и вязкости (для станин станков, оснований мерительных приборов и т. д.).

Химико-термическая обработка

В зависимости от требований, предъявляемых к детали, иногда возникает необходимость изменения химического состава не

на всей детали целиком, а только ее поверхностного слоя или отдельных участков этого слоя.

Например, зуб шестерни должен иметь высокую твердость рабочей поверхности, а центральная зона — сохранять пластичность и вязкость. Только при таком сочетании свойств по сечению зуба шестерни будет обеспечена долговечность. Для выполнения этого условия в качестве материала шестерни применяется сталь с малым содержанием углерода. В поверхностном же слое содержание углерода повышается в результате использования специальных технологических приемов. После дополнительной обработки и этот слой приобретает нужную твердость.

Процесс насыщения поверхностного слоя металла каким-либо элементом за счет диффузии его из внешней среды при высокой температуре называется **химико-термической обработкой (ХТО)**.

Разновидностями ХТО являются *цементация*, *азотирование*, *нитроцементация*, *борирование*, *хромирование*, *алитирование* и др. Для увеличения твердости поверхности, износостойкости, задиростойкости, контактной выносливости и изгибной усталостной прочности применяют цементацию, азотирование, нитроцементацию; для повышения сопротивления абразивному изнашиванию — борирование и хромирование; для защиты поверхности деталей от коррозии при комнатной и повышенной температурах в различных агрессивных средах — алитирование, хромирование, силицирование и т. д.

Основные элементарные процессы любого вида ХТО:

1. Диссоциация — распад молекул и образование активных атомов диффундирующего элемента, например диссоциация окиси углерода $2CO \rightleftarrows CO_2 + C$ или аммиака $2HN_3 \rightleftarrows 3H_2 + 2N$.

2. Адсорбция, т. е. контактирование атомов диффундирующего элемента с поверхностью стального изделия и образование химических связей с атомами металлов.

3. Диффузия, т. е. проникновение насыщенного элемента в глубь металла.

Цементация — процесс насыщения поверхностного слоя металла в углеродсодержащей среде (карбюризатор) при нагреве до температуры 930–950 °С. Существует два основных вида цементации: в газовой и твердой средах. **Газовая цементация**

(рис. 92) является основным процессом для отливок массового производства. Она проходит быстрее, чем твердая, так как не требует времени на прогрев ящика и карбюризатора. Слой толщиной 1 мм образуется за 6–7 ч.

Твердая цементация производится в специальных ящиках, куда детали укладываются вместе с карбюризатором. В течение 8–10 ч образуется слой толщиной около 1 мм.

Глубину цементации контролируют по куску стали, имеющей такой же химический состав. Этот кусок, называемый свидетелем, закладывают в цементационный ящик. Контрольный кусок можно подвергнуть такой же ТО, разрезать и исследовать результаты цементации.

После цементации наблюдается неравномерное распределение углерода по сечению детали, поэтому детали после ХТО подвергают закалке с низким отпуском.

Азотирование — насыщение поверхности стали азотом в среде аммиака при температуре 480–650 °С. При этих температурах по реакции $2NH_3 \rightleftarrows 2N + 3H_2$ выделяется азот, который диффундирует в поверхностные слои металла.

Азотирование применяют для среднеуглеродистых сталей, содержащих хром, вольфрам, молибден, ванадий, алюминий, с которыми азот образует устойчивые нитриды с приданием азотированному слою высокой твердости.

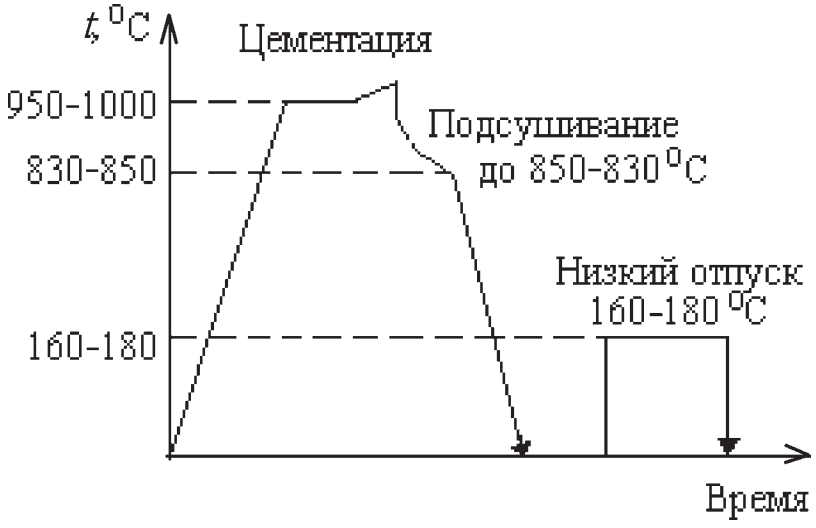


Рис. 92. Схема цементации

Перед азотированием детали подвергают закалке и высокотемпературному отпуску, т. е. улучшению.

В XVIII в. на железоделательных заводах Урала возник способ закалки "скотинным рогом с солью", позволявший получать металл весьма высокого качества. Изготовленные таким способом топоры, ножи или сабли подолгу не теряли своей остроты да и к тому же не подвергались ржавчине.

Суть дела была не в самой закалке, а в предшествовавшем ей длительном томлении стали, полученной в кричных горнах. Вместе с рогами и солью стальные изделия укладывали в специальные ящики-тигли и выдерживали в особых печах при высоких температурах без доступа воздуха. Затем обработанную таким образом сталь подвергали обычной закалке.

Что происходило при совместном пребывании железа со "скотинным рогом" в томильных ящиках, никто тогда не знал. А происходило не что иное, как азотирование стали. Так почти за два столетия до открытия и научной разработки технологии азотирования уральские металлурги широко пользовались этим надежным способом повышения износостойкости и коррозионной стойкости стальных изделий.

По сравнению с цементацией азотирование имеет следующие преимущества: более высокие твердость, износостойкость поверхностного слоя и коррозионные свойства. Кроме того, после азотирования не требуется закалка.

Недостатком является более высокая длительность процесса. Используется для обработки ответственных деталей из легированных сталей, к качеству поверхностного слоя которых предъявляются повышенные требования (зубчатых колес, шестерен, втулок, коленчатых валов и др.).

Цианирование (нитроцементация) — процесс одновременного насыщения поверхности деталей азотом и углеродом. Нагрев производится либо в расплавленных цианистых солях (NaCN, KCN), либо в газовой среде, состоящей из смеси CH_4 и NH_3.

После цианирования детали охлаждают на воздухе, повторно нагревают для закалки и проводят низкотемпературный отпуск

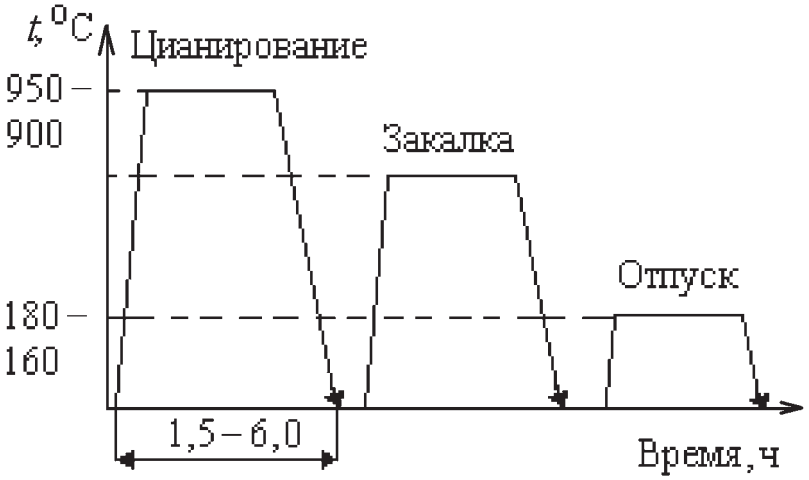
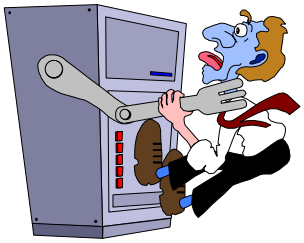


Рис. 93. Схема цианирования

(рис. 93). Чем больше требуется глубина цианируемого солях, тем больше время цианирования. Преимущества глубокого цианирования — меньшая деформация, более высокие износостойкость и усталостная прочность. Недостатком является высокая стоимость процесса, связанная с необходимостью строгого соблюдения правил техники безопасности из-за высокой токсичности цианистых солей.



6. ЦВЕТНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Человеческая цивилизация имеет перспективу выжить, если она будет основываться на металлах, наиболее распространенных в земной коре. Такими металлами являются алюминий, магний, железо и титан.

В.И. Вернадский

Историков всегда интересовал вопрос, где на нашей планете начала развиваться металлургия, где человек впервые сумел выплавить из руды железо, медь и другие металлы. Интересные результаты были получены группой ученых из ФРГ, которые тщательно обследовали территорию юга Иордании — между Мертвым морем и заливом Акаба. Здесь, вблизи поселка Фенак, им удалось обнаружить один из древнейших медных рудников, действовавший шесть тысячелетий назад. Глубокие, до 20 м, шахты и огромные отвалы пустой породы (их масса, по подсчетам специалистов, достигает 150 тыс. т) свидетельствуют о поистине индустриальных масштабах добычи руды и выплавки меди. Видимо, отсюда медные слитки отправлялись водным путем в другие государства древнего мира.

Цветная металлургия в значительной степени определяет жизнеспособность экономики России, так как совместно с черной металлургией производит 95 % конструкционных материалов, без которых невозможны функционирование и технический прогресс в машиностроении, химии, атомной энергетике, оборонном комплексе, строительстве. Продукция цветной металлургии России является одной из основных статей экспорта, обеспечивающей получение валютной выручки, и фактически

формирует золото-алмазный запас государства. Специфической особенностью отрасли является тесная “привязка” к природному сырьевому фактору. Из других особенностей следует отметить:

• комплексность и большое разнообразие перерабатываемого сырья, предопределяющие сложность структуры отрасли;

• многоступенчатый цикл производства;

• высокие материало-, капитало-, фондо- и энергоемкость большинства производств;

• значительную инерционность и длительность цикла строительство—освоение производства;

• высокую экологическую нагрузку.

Значительное число предприятий цветной металлургии являются градообразующими, что обусловливает высокую значимость социального фактора. Развитие цветной металлургии в большой степени определяет экономическую безопасность России в области производства металлопродукции, ее индустриальный и оборонный потенциал и в итоге — политическую независимость и социальную стабильность.

К цветным металлам относят алюминий, магний, титан, медь, свинец, цинк, никель, кобальт, олово, вольфрам, молибден, висмут, сурьму, ртуть, мышьяк, редкие металлы — литий, бериллий, ниобий, тантал, цирконий, иттрий, стронций. К рассеянным элементам относят скандий, германий, рубидий, цезий, кадмий, индий, таллий, селен, теллур, гафний, рений. Благородными металлами считают золото, серебро, платину и платиноиды. Радиоактивными металлами являются радий и торий.

Цветная металлургия России обладает мощным производственным потенциалом по производству металлопродукции, запасам руд и включает в себя следующие **подотрасли**: *алюминиевую, медную, никель-кобальтовую, свинцово-молибденовую, оловянную, редких металлов и полупроводниковых материалов, сурьмяно-ртутную, золотодобывающую, обработку цветных металлов и сплавов, алмазодобывающую.*

Все используемые в цветной металлургии процессы делятся на следующие группы: *пирометаллургические, гидрометаллургические* и *электрометаллургические (электролиз).* К пирометаллургическим процессам относятся обжиг, плавка. Они проходят при

высоких температурах с полным или частичным расплавлением металла, гидрометаллургические — в водных средах. К ним относятся выщелачивание и экстракция. Электролиз представляет собой совокупность процессов, проходящих при протекании постоянного электрического тока через раствор.

Такие свойства цветных металлов, как электропроводность, теплопроводность, жаропрочность, антикоррозионность, небольшой удельный вес, позволяют широко использовать их в различных областях народного хозяйства.

6.1. СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Главный недостаток изделий из стали заключается в том, что они ржавеют. Ежегодно ржавчина "съедает" 10–15 % массы металлофонда. Детали транспорта, металлоконструкций из-за ржавления требуют замены и ремонта, а следовательно, огромных трудозатрат обслуживающего персонала. Из-за большого удельного веса чугуна и стали детали транспорта оказываются слишком массивными, что снижает его грузоподъемность. Выход из этой ситуации — в переходе на использование алюминия, титана, магния и других цветных металлов, что позволяет снизить массу автомобиля в три и более раз.

Медь является вторым по значимости (после железа) металлом, обладает высокой электропроводностью и ковкостью, легко поддается прокатке и вытягиванию.

> *По мнению ученых-египтологов, во II тыс. до н. э. металлургия меди достигла в Древнем Египте солидных масштабов: в стране в то время действовало не менее тысячи медеплавильных печей. Однако затем, как свидетельствуют исторические документы, производство этого металла резко сократилось. Неужели египтяне перестали нуждаться в меди? Долгое время этот факт представлял для ученых неразрешимую загадку. Но вот недавно ее удалось решить с помощью археологов: раскопки показали, что древнеегипетская медная "промышленность" пострадала от... энергетического кризиса, охватившего в те далекие времена данный регион. Используемые*

в качестве топлива для медеплавильных печей пальмы и белые акации, росшие по берегам дельты Нила, были полностью вырублены и сожжены. Потеря оказалась невосполнимой, и выплавка меди постепенно сошла на нет.

Разведанные запасы меди — более 668 млн. т. Более половины их находится в Северной и Южной Америке. Крупнейшие месторождения имеются в США, Чили, Канаде, Перу, Панаме, Мексике, Бразилии, а также в России (ведущее место в мире), Казахстане, ЮАР, Польше, Заире. Основными потребителями меди являются развитые страны (авиационная, электротехническая, машиностроительная, приборостроительная, химическая промышленность).

К сплавам на медной основе относятся *латуни* и *бронзы*. Латуни подразделяют на простые (состоящие из меди и цинка) и специальные (с добавкой алюминия, свинца, кремния, марганца, олова). Бронзы — сплавы, в которых цинк не является основным легирующим элементом. К бронзам относятся практически все медные сплавы, за исключением латуни.

Кроме латуней и бронз широкое применение находят сплавы с никелем и цинком (мельхиор). Ниже будут рассмотрены получение и области использования меди и сплавов на ее основе.

Цинк на воздухе покрывается защитной пленкой оксида, противостоящей дальнейшему атмосферному воздействию. Используется для покрытия железных листов, труб, проводов для предохранения их от окисления, а также в производстве щелочных аккумуляторов.

Основные месторождения цинка находятся в России, Австралии, Казахстане, Канаде, США, Китае, Индии, Перу, Польше, Ирландии, Мексике. Крупнейшие производители рафинированного цинка — это Китай, Канада, Япония, Германия, Австралия, Франция.

Никель и большинство его сплавов обладают высокой коррозионной стойкостью, прочностью и пластичностью. Из никелевых сплавов широко известны нихромы (15–20 % хрома, остальное — никель), используемые для нагревателей электропечей. Из медно-никелевых сплавов наиболее известен монель-металл с высокой коррозийной стойкостью и прочностью.

Трущиеся детали машин постоянно нуждаются в смазке, но при работе не всегда удается обеспечить их смазочными материалами в нужном количестве. Ученые института "Гипроникель" (Санкт-Петербург) нашли оригинальное решение этой проблемы: они создали своеобразные пилюли, избавляющие детали от преждевременного старения.

Микроскопические дозы смазывающего вещества одеваются в тончайшие никелевые оболочки. Затем порошок, состоящий из этих крохотных шариков-капсул, путем плазменного напыления наносится на трущиеся поверхности. Во время работы никелевые "рубашки" одна за другой протираются, и все новые порции смазки вовлекаются в процесс, уменьшая трение и, следовательно, предотвращая преждевременный износ деталей. Так, благодаря новому "лекарству", удалось втрое продлить "жизнь" поршневых колец.

В современных турбинах и реактивных двигателях лопатки и диски работают при высоких температурах и больших напряжениях, что выдерживают только никелевые сплавы (нимоник). Его классический состав — никель с хромом (20 %), алюминием (1 %), титаном (2 %). Для связывания углерода, снижающего механические свойства сплава, в дисперсные карбиды добавляют ниобий, цирконий, иногда гафний. Основной способ повышения жаропрочности никелевых сплавов — увеличение степени их легирования.

Никель применяют также для производства аккумуляторов, аппаратуры для химических исследований, для антикоррозионных покрытий, в качестве легирующего в черной металлургии. Мировые запасы никеля превышают 55 млн. т. Почти три пятых их заключено в силикатных и две пятых — в сульфидных рудах. Крупнейшие месторождения никеля имеются в России, Новой Каледонии, Канаде, Индонезии, Кубе, ЮАР.

Алюминий обладает высокой электро- и теплопроводностью, устойчивостью против коррозии. Для алюминиевых сплавов характерны высокая прочность и малый удельный вес. Он почти втрое легче железа и меди, в 1,7 раза легче титана, поэтому вытесняет чугун и сталь, в электропромышленности — медь.

Первый, кому удалось получить металлический алюминий, — датский ученый Ханс Кристиан Эрстед (1825). В дальнейшем получением его занялся немецкий химик Велер, который опубликовал свой метод в 1827 г. Этот метод позволял выделять алюминий лишь в виде зерен величиной не более булавочной головки, но ученый продолжал эксперименты до тех пор, пока не сумел наконец разработать способ получения алюминия в виде компактной массы, на что ему потребовалось 18 лет.

Спустя еще десятилетие, в 1855 г., на Всемирной выставке в Париже было представлено "серебро из глины", которое произвело большую сенсацию. Это были пластины и слитки алюминия, полученные французским ученым и промышленником Сент-Клер Девилем.

Более подробно свойства, получение и область применения алюминия будут рассмотрены далее.

Для **свинца** характерны высокая пластичность и коррозионная стойкость во многих агрессивных средах, поэтому свинцовые трубы и листы широко используются в химической промышленности. Свинец входит как основной элемент в баббиты, припои, типографские сплавы.

В падении Рима повинно отравление свинцом, так считают некоторые ученые-токсикологи. По их мнению, использование посуды из свинца и свинцовых косметических красок было причиной быстрого вымирания римской аристократии. Из-за систематического отравления малыми дозами свинца средняя продолжительность жизни римских патрициев не превышала 25 лет. Люди низших сословий, согласно этой теории, в меньшей степени подвергались отравлению свинцом, поскольку они не имели дорогой посуды и не употребляли косметических средств. Но и они пользовались знаменитым водопроводом, сработанным еще рабами Рима, а трубы его были сделаны из свинца.

Люди вымирали, империя чахла. Разумеется, виноват в этом был не только свинец. Существовали и более серьезные причины — политические, социальные, экономические. И все же доля истины в рассуждениях ученых безусловно

есть: обнаруживаемые при раскопках останки древних римлян содержат значительное количество свинца.

Из свинца изготавливаются оболочки кабеля, защитные экраны от γ-излучения, краски и химикаты, антидетонаторные присадки для повышения качества бензина.

Основные запасы свинца разведаны в США, Австралии, Канаде, Казахстане, Мексике, ЮАР, Китае, России.

Титан обладает исключительно ценными свойствами. В нем сочетается легкость с прочностью стали; он необычайно стоек к воздействию кислот, щелочей и морской воды. В настоящее время в мире выпускается около 100 000 т титановых полуфабрикатов. В земной коре титан по содержанию (0,6 %) уступает только алюминию, железу и магнию. Титан имеет низкую плотность, высокую температуру плавления (1672 °С) и две аллотропические модификации: низко- и высокотемпературную. Для легирования титана используют алюминий, ванадий, хром, никель, молибден, железо и др.

Титан и его сплавы — важнейшие конструкционные материалы в авиа-, ракето- и кораблестроении.

С момента открытия титана до его получения в чистом виде прошло больше ста лет. Только в XX в. (1910) американскому химику М. Хантеру удалось получить несколько граммов металлического титана.

Производить чистый титан очень трудно, так как титановая губка поглощает газы, соединяется с азотом и углеродом, а загрязненный примесями титан становится хрупким и ломким. Поэтому он долгое время не вызывал интереса у инженеров и считался бесполезным металлом.

Согласно мифам титан отличался "своенравием" и упорно сопротивлялся попыткам приручить его. Только после того, как была разработана промышленная технология получения чистого титана, стали проявляться его замечательные качества.

В химическом машиностроении титан используется всюду, где коррозия может привести к повреждениям и авариям (реакторы, трубопроводы, насосы).

Порошкообразный титан применяется в электротехнике и радиотехнике в качестве геттера — вещества, поглощающего

газы. Это позволяет сохранять вакуум в лампах. Большая часть титана идет на изготовление белил, а также линолеума, искусственного шелка, цветного стекла, глазури, используется при окраске кож и тканей.

Титан добывается в Канаде, Норвегии, Китае, Австралии, Малайзии, на Украине, в Индии, Сьерра-Лионе, ЮАР, США. Россия занимает одно из первых мест по разведанным запасам титана, но уступает по их качеству и технологичности.

Магний среди металлов занимает третье место по распространенности в земной коре после алюминия и железа. Это горючий металл, он воспламеняется при температуре 550–600 °С и быстро сгорает ослепительно ярким пламенем. Еще не так давно фотографы использовали для вспышки магниевый порошок, так же широко он использовался в пиротехнике.

Недостаток магния в организме человека приводит к инфаркту миокарда, ткани нервной системы также содержат его. Английская соль $MgSO_4$ является слабительным и желчегонным средством. Углекислый магний $MgCO_3$ входит в состав зубного порошка и устраняет изжогу. Самое "уязвимое место" этого металла — пониженная коррозионная стойкость, особенно в морской воде. Но, в отличие от титана, магний устойчив к плавиковой кислоте HF, поэтому из него изготавливают сосуды для ее хранения.

Поскольку магний в 1,5 раза легче алюминия, замена им алюминиевых деталей в самолетах экономит в весе 20–70 % и более, кроме того, магниевые конструкции очень устойчивы против вибрации. В промышленности применяют сплавы магния с алюминием и цинком, особенно для изготовления точных деталей литьем под давлением.

Олово — древнейший металл, сохраняющий и по сей день большое значение, хотя области его применения изменились. Это один из наиболее дорогих и дефицитных металлов. В бронзовом веке олово вместе с медью было важнейшим металлическим материалом. Оловянной посудой пользовались повсюду в средневековье и даже в прошлом столетии. С развитием консервной промышленности олово получило новое важное применение — многие миллиарды консервных банок делают из белой жести,

т. е. из луженой (покрытой оловом) тонколистовой стали. Сегодня для этой цели употребляют почти половину мирового производства олова.

Обычное олово устойчиво при температуре выше −13 °С, ниже такой температуры происходит перекристаллизация олова, оно сильно увеличивается в объеме и поэтому рассыпается в пыль.

Еще в середине XIX в. обладатели оловянной посуды замечали, что на морозе она покрывалась "язвами", которые постепенно разрастались, и в конце концов посуда буквально рассыпалась в порошок. В конце прошлого столетия из Голландии в Россию был отправлен железнодорожный состав, груженный брусками олова. Когда прибывшие в Москву вагоны открыли, то вместо долгожданного металла в них обнаружили серый, ни на что не пригодный порошок — русская зима сыграла с получателями "посылки" злую шутку.

В начале XX в. в Петербурге на складе военного обмундирования произошла скандальная история: во время ревизии, к ужасу интенданта, выяснилось, что оловянные пуговицы для солдатских мундиров исчезли, а ящики, в которых они хранились, доверху заполнены серым порошком. И хотя на складе был лютый холод, горе-интенданту стало жарко. Еще бы: его, конечно, заподозрят в краже, а это ничего, кроме каторжных работ, не сулит. Спасло бедолагу заключение химической лаборатории, куда ревизоры направили содержимое ящиков: «Присланное вами для анализа вещество, несомненно, олово. Очевидно, в данном случае имело место явление, известное в химии под названием "оловянная чума"».

Олово легко куется и прокатывается в тончайшую фольгу, оно входит в состав бронз, легкоплавких сплавов, типографских и подшипниковых материалов. Особенно много олова идет на производство припоев.

Бериллий имеет температуру плавления 1284 °С — значительно выше, чем у магния и алюминия, а удельный вес его почти равен удельному весу магния. Это большое преимущество, так как авиация будущего — авиация высоких скоростей, а значит, и высоких температур. Бериллий абсолютно непрозрачен для рентгеновских

лучей. Самые ответственные детали механизмов — пружины, контакты, шестерни и подшипники, работающие при больших скоростях, высоких температурах и давлениях, изготавливают из бериллиевых бронз. В металлургии он применяется в качестве легирующего элемента, а также для насыщения поверхностных слоев стальных изделий, когда им надо придать особую твердость и стойкость против окисления при температуре до 800 °С.

Вольфрам — очень тяжелый и наиболее тугоплавкий металл.

Почти сто лет со времени открытия вольфрам был бесполезен. Только в 1864 г. англичанин Роберт Мюшет впервые ввел вольфрам в сталь. Почти 5,5 % вольфрама содержит такая сталь, названная "самокал Мюшета". И это было вторым рождением металла. До сих пор скорость резания металла не превышала 5 м/мин. Резцы, сделанные из "самокала Мюшета", позволяли увеличить скорость в полтора раза. Через 40 лет появилась быстрорежущая сталь, и скорость резания выросла сначала до 18 м/мин, а в дальнейшем до 35 м/мин.

В 1907 г. создан первый "твердый" сплав. В нем по существу не было железа — только вольфрам, хром и кобальт. Этот сплав дал возможность увеличить увеличить скорость резания до 45 м/мин. Современные твердые металлорежущие сплавы подняли эту цифру до тысячи метров в минуту. И в них основным составляющим является карбид вольфрама.

Вольфрам был первой легирующей добавкой к стали и на сегодняшний день остается важнейшим легирующим элементом. Сплавы вольфрама с молибденом, танталом, рением и ниобием находят применение в электронике, ракетной технике и других отраслях. Замена медных контактов на электроконтакты из сплава вольфрама с медью повышает срок их службы в 20—30 раз. Из сплава вольфрама с железом и никелем изготовляются контейнеры для хранения радиоактивных веществ, из чистого вольфрама вытягивают нити накаливания электроламп.

Серебро — самый дешевый из благородных металлов. Это очень пластичный металл: 1 г серебра можно вытянуть в проволочку длиной почти 2 км. Особое значение имеют такие свойства серебра, как электропроводность и высокая коррозионная стойкость.

Уникальный случай названия реки и целого государства в честь металла связан с серебром. Это произошло более четырехсот пятидесяти лет назад. В начале XVI в. испанский мореплаватель Хуан Диас де Солис, проходя вдоль восточных берегов Южной Америки, обнаружил устье большой реки, которую вскоре стали называть его именем. Спустя 10 лет вверх по течению этой реки довелось плыть капитану Себастьяну Каботу. Он был поражен количеством серебра, которое его матросы награбили у местных жителей, и потому решил назвать реку Ла-Платой, т. е. серебряной (по-испански "плата" — серебро). Отсюда впоследствии произошло и название всей страны. В начале XIX в. испанское владычество закончилось, и, чтобы не вспоминать об этом печальном периоде, жители страны изменили ее название. Так на географических картах появилось слово "Аргентина" (как известно, серебро по-латыни — "аргентум").

Серебро обладает бактерицидным действием, убивая болезнетворные и гнилостные бактерии. По этой причине его применяют для покрытия трубопроводов, арматуры и резервуаров в молочной и других отраслях пищевой промышленности. Превосходными качествами обладают серебряные припои.

6.2. КРАТКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ОТРАСЛИ

После девальвации 1998 г. отрасль резко увеличила темпы роста объемов производства. На период с августа 1998-го по июль 2000-го средняя скорость прироста объемов производства достигла 1,2–1,4 % в месяц, что явилось наилучшим показателем за последние десять лет. Кроме того, такой прирост объемов производства наложился на благоприятную внешнюю конъюнктуру, когда цены на все базовые металлы повышались (благодаря увеличившемуся спросу и некоторому дефициту наличного металла) на несколько процентов в месяц, что позволило отечественным производителям цветных металлов получать огромные валютные поступления от экспорта. После снижения эффекта девальвации, падения спроса со стороны основных потребителей и снижения цен на металлы в отрасли ситуация ухудшилась.

Главной проблемой, определяющей показатели работы отрасли, является состояние основных производственных фондов. Износ составил 61 % при общей загрузке оборудования 64 %. Воспроизводство основных фондов также осуществляется с существенным отставанием от нормативов, поэтому выбытие составляет 1 % против необходимых 3,5–4 % (за рубежом данный показатель равен 6–7 %). По некоторым металлургическим предприятиям возраст основных фондов доходит до 60–70 лет при нормативном сроке 25 лет. Главная причина такого положения — недостаточность объемов инвестирования средств обновление основных фондов.

По оценкам экспертов, российские предприятия цветной металлургии в 2001 г. недополучили из-за снижения объемов экспорта и цен на международных рынках до 5 млрд. дол. Так, по сравнению с 2000 г. объем производства меди снизился на 6,5 %, алюминия — на 5,1 %, а общий стоимостной объем российского экспорта основных цветных металлов (алюминий, медь и никель) уменьшился на 20 %.

С другой стороны, идет процесс увеличения доли отечественных потребителей на продукцию отрасли и выравнивания экспортных и внутренних цен, что является положительным моментом и будет способствовать компенсации потерь от ухода с иностранных рынков.

До 90-х гг. XX в. на экспорт поставлялось только 15–17 % объема заготавливаемого в стране лома цветных металлов. В начале 90-х гг. XX в., благодаря процессам либерализации торговли и ослабления государственного контроля, быстро возрос экспорт из России вторичных цветных металлов: по данным официальной статистики, экспорт лома цветных металлов с 1994 по 2000 г. увеличился в 130 раз, в том числе меди — в 50 раз. При этом рентабельность экспорта иногда составляла 200 %. Пик экспорта был достигнут в 1998 г. и составил более 800 тыс. т (в том числе 356,5 тыс. т меди, 367,3 тыс. т алюминия).

Потом началась борьба государства за снижение экспорта цветного лома путем увеличения экспортных пошлин (до 50 %), а в апреле 2001-го был принят закон о запрете экспорта цветных металлов до 1 января 2005 г. Эти меры были вызваны воровством цветных металлов с промышленных и коммунальных объектов.

Основными импортерами лома из России являются Германия и Китай. Постоянный рост цен на продукцию отраслей-монополистов (топливно-энергетического и транспортного комплекса) приводит к росту затрат на производство и реализацию продукции, снижая рентабельность производств (табл. 25).

После распада СССР объем и структура сырьевой базы цветной металлургии существенно изменилась. За пределами России оказались высококачественные месторождения марганца, хрома, титана, урана, свинца, циркония, редких и рассеянных элементов, графита, барита, плавикового шпата. Низкий уровень технической, технологической и организационной структур добывающих и перерабатывающих компаний обусловили высокий уровень затрат. При этом перешли в режим падающей добычи уникальные месторождения цветных металлов, а также ухудшились горнотехнические условия, увеличились глубины и протяженность горных выработок. Как правило, руды цветных металлов являются бедными. Поэтому достаточно высок расход руды на 1 т товарной продукции (для получения 1 т алюминия необходимо переработать от 5 до 10 т руды, 1 т меди — 200 т руды, 1 кг золота — 7 тыс. т руды).

За прошедшее десятилетие добыча меди, титана, вольфрама, молибдена сократилась на 11–63 %; никеля, редкоземельных металлов — более чем на 90 %. Внутреннее потребление минеральных ресурсов снизилось в еще больших размерах — примерно в 10 раз. Российские компании последние десять лет “проедали” разведанные в советское время запасы, и прежде всего запасы стратегических видов минерального сырья. Вообще, по разведанным запасам основных металлов в мире Россия входит в первую десятку, а по запасам никеля, олова, цинка и титана ей принадлежит первое место. В России сосредоточено 77 % (от общих разведанных в бывшем СССР) запасов бокситов, 52,8 — меди, 34,4 — свинца, 48,4 — цинка, 95,3 — никеля, 91 — олова, 58,8 — титана, 39,5 — вольфрама и 42,1 % — молибдена.

В настоящее время практически каждая подотрасль цветной металлургии располагает рядом крупных, а иногда и крупнейших в мире резервных разведанных месторождений. К сожалению, минерально-сырьевые ресурсы цветной металлургии России по своему качеству уступают зарубежным (это касается

Таблица 25

Динамика затрат на производство и реализацию продукции (работ, услуг) на предприятиях цветной металлургии, % к 1995г.

Статьи затрат	1996 г.	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.
Затраты на производство и реализацию продукции (работ, услуг)	123,5	130,6	158,5	333,3	544,3
Материальные затраты	115,4	126,0	151,7	342,4	540,7
В том числе:					
сырье и материалы	110,7	123,0	151,2	359,6	656,3
работы и услуги производственного характера, выполненные сторонними организациями	115,6	125,8	210,7	600,3	553,2
транспортировка грузов	240,7	253,8	243,7	288,8	670,8
топливо	124,0	147,7	134,1	206,7	396,9
энергия	120,4	126,5	138,7	246,2	347,7
Затраты на оплату труда	146,6	157,5	182,5	324,9	593,7
Отчисления на социальные нужды	145,0	153,7	178,2	310,0	634,9
Амортизация основных средств	221,4	186,3	189,9	208,7	318,4
Прочие затраты	97,7	101,7	148,5	352,4	562,3
Отчисления во внебюджетные фонды	34,7	38,1	51,0	165,3	235,4

практически всех металлов, за исключением меди, никеля и титана). Так, содержание свинца и цинка в разрабатываемых месторождениях в 2,5 раза ниже, чем в аналогичных месторождениях стран дальнего зарубежья, олова — в 2,3, триоксида вольфрама — в 2,2, молибдена — в 2 раза. Это обстоятельство обусловливает высокую себестоимость производства соответствующих металлов.

Несмотря на наличие в недрах России значительного количества разведанных сырьевых запасов, степень их промышленного

освоения, т. е. доля запасов, приходящаяся на эксплуатируемые месторождения, довольно низкая. Она составляет: по бокситам — 32,6, по нефелиновым рудам — 55,4, по меди — 49,0, по цинку — 16,6, по олову — 42,0, по молибдену — 31,5 %. На эксплуатируемые месторождения приходится менее 10 % разведанных запасов свинца, титана и ртути (соответственно 8,8; 1,3 и 5,9 %). И только по никелю, вольфраму и сурьме степень промышленного освоения запасов сравнительно высокая — более 70 %.

Наиболее развитыми горнорудными районами цветной металлургии являются Кольский полуостров (медь, никель, кобальт, ниобий, тантал, редкоземельные металлы), Северный Кавказ (медь, свинец, цинк, вольфрам, молибден), Урал (медь, цинк, никель, кобальт, бокситы), Восточная Сибирь (медь, никель, кобальт, свинец, цинк, вольфрам, молибден) и Дальний Восток (олово, свинец, цинк, вольфрам, плавиковый шпат). В настоящее время добычу и переработку руд цветных металлов осуществляют 43 предприятия, включающие в себя 53 подземных рудника, 14 карьеров, 52 обогатительные фабрики и 5 заводов по производству глинозема.

В целом по отрасли реальную угрозу ее развитию в будущем создают следующие проблемы:

• структурное несовершенство и технологическая отсталость (только 10 % применяемых технологических схем соответствуют современному мировому уровню);

• прогрессирующее старение основных производственных фондов, а также низкая конкурентоспособность большинства видов металлопродукции на мировом рынке;

• повышенный расход ресурсов на единицу продукции (энергии примерно на 20–30 %, а трудозатрат в 2,5–3,0 раза выше, чем в США, Германии, Японии);

• низкая экологичность применяемых технологических схем, предопределяющая высокие затраты на охрану окружающей среды; наличие больших накоплений техногенных продуктов, являющихся ценными и в то же время вредными;

• резкое сокращение финансируемых государством геологоразведочных работ, поставившее на грань выживания многие отечественные геолого-разведочные и геофизические предприятия. Ухудшение положения с технико-технологическим обеспе-

чением геолого-разведочного производства привело практически к полной потере его производственной базы;

• тяжелое финансовое состояние предприятий в результате завышенных цен на продукцию отраслей-монополистов, большого бремени налогов, жесткой бюджетной и финансово-кредитной политики.

6.3. ПРОИЗВОДСТВО АЛЮМИНИЯ

Алюминиевая промышленность состоит из четырех переделов. Сырьевой передел осуществляет добычу бокситов и нефелитов, производство глиноземов и фтористых солей. Для производства глинозема из бокситов используют способ Байер-спекания, а при производстве глинозема из нефелинов (40 % производства в России) — способ спекания нефелиновых руд с известняком и последующую переработку спека гидрохимическим способом.

Передел первичного алюминия обеспечивает получение металла через электрохимический процесс — электролиз глинозема, растворенного в расплавленных фтористых солях натрия и алюминия.

Передел полуфабрикатов осуществляет переработку первичного алюминия и его сплавов в различные виды продукции: плиты, листы, полосы, профили, прутки, штамповки, проволоку и др.

Передел конечной продукции производит товары производственного назначения: строительные конструкции, фольга, тара, упаковка, бытовые приборы, порошки, пудра.

Объем производства алюминия опережает выпуск всех остальных цветных металлов, так как он нашел широчайшее применение в народном хозяйстве. Алюминиевая промышленность России занимает доминирующее положение в стране и по выпуску металла находится на втором месте в мире.

Извлечение глинозема производят щелочным мокрым или сухим способом. При мокром способе бокситы сушат, загружают в автоклав с концентрированной щелочью, выдерживают 2—3 ч при температуре 150—250 °С под давлением. Раствор алюмината натрия в виде горячей пульпы идет на дальнейшую переработку. Оксиды и другие примеси, не растворяющиеся

в щелочах, выпадают в осадок — шлам. Пульпа после фильтрации и разбавления водой сливается в отстойники, где из алюминатного раствора выпадает в осадок гидрооксид алюминия. Его фильтруют и прокаливают при температуре 1200 °С в трубчатых вращающихся печах.

Технологическая цепочка операций от бокситов до алюминия включает в себя: дробление боксита; нагрев во вращающейся трубчатой печи; дробление в мельнице; смешение с натриевым щелоком; обработку в автоклаве (получение алюмината и красного шлама); разбавление водой; фильтрацию (разделение алюмината и красного шлама); выделение гидрооксида алюминия и остаточного щелока; обезвоживание во вращающейся трубчатой печи (получение безводного глинозема); электролиз.

Сухой щелочной способ, или способ спекания, состоит в прокаливании при температуре 1200–1300 °С смеси боксита, соды, извести, приводящем к образованию спека, в котором содержится нерастворимый алюминат натрия. Алюминат выщелачивают из спека горячей водой, а полученный раствор продувают углекислотой. Осадок промывают и прокаливают, получая глинозем.

В настоящее время в промышленности алюминий получают электролизом раствора глинозема Al_2O_3 в расплавленном криолите. Взаимодействие алюминия с электролитом приводит к растворению металла в солевом растворе и к переносу продуктов растворения к аноду, где они окисляются электрохимически на поверхности анода или химически анодными газами. При растворении алюминия в криолитоглиноземных расплавах происходит две реакции: взаимодействие алюминия с фторидом алюминия с образованием субфторида алюминия; обмен фторида натрия с алюминием. Течение этих реакций в значительной степени определяется активностью фторидов алюминия и натрия в расплаве.

Глинозем должен быть достаточно чистым, поскольку из выплавленного алюминия примеси удаляются с большим трудом. Температура плавления Al_2O_3 около 2050 °С, а криолита — 1100 °С. Электролизу подвергают расплавленную смесь криолита и Al_2O_3, содержащую около 10 мас. % Al_2O_3, которая плавится при температуре 960 °С и обладает электрической проводимостью, плотно-

стью и вязкостью, наиболее благоприятствующими проведению процесса. При добавлении AlF_3, CaF_2 и MgF_2 проведение электролиза оказывается возможным при температуре 950 °С.

Электролизер для выплавки алюминия представляет собой железный кожух, выложенный изнутри огнеупорным кирпичом. Его дно (подина), собранное из блоков спрессованного угля, служит катодом. Аноды располагаются сверху; это алюминиевые каркасы, заполненные угольными брикетами:

$$Al_2O_3 = Al^{3+} + AlO^{3-}.$$

На катоде выделяется жидкий **алюминий**:

$$Al^{3+} + 3e = Al\ .$$

Алюминий собирается на подине печи, откуда периодически выпускается. На аноде выделяется кислород:

$$4AlO_3^{3-} + 12e = 2Al_2O_3 + 3O_2.$$

Кислород окисляет графит до оксидов углерода. По мере сгорания углерода анод наращивают.

На 1 т получаемого алюминия расходуется: 1925–1930 кг глинозема; 500–600 — угольного анода; 50–70 кг фтористых солей. Расход электроэнергии 14,5–17,5 МВт·ч на 1 т металла.

Помимо глинозема по способу спекания получают цемент, соду, поташ, сульфат калия, галлий, строительные материалы и др. Эксплуатационные расходы на получение этих продуктов из нефелинового сырья существенно меньше суммарных затрат на их производство из обычных видов сырья традиционными методами. Производство соды и поташа из карбонатных растворов нефелинового производства значительно проще и эффективнее, чем их получение в отдельности аммиачным способом из соляного раствора через бикарбонат натрия (способ Сальве) и электролизом раствора хлорида калия. Сода из нефелинового сырья имеет в 1,5 раза большую насыпную массу, чем полученная аммиачным способом. При получении портландцемента на основе нефелинового шлама расход известняка сокращается на 50–60 %, а топлива — на 20–25 %, производительность вращающихся печей повышается на 25–30 %. У гидроксида алюминия, получаемого по способу спекания, белизна выше 94 %, и, в отличие от получае-

мого по способу Байера, его можно использовать для химических целей без очистки от окрашивающих примесей.

Комплексная переработка щелочного алюмосиликатного сырья практически исключает твердые и жидкие отходы, присущие способу Байера и традиционным технологиям получения сопутствующих продуктов. Это достигается за счет полного использования вводимых в процесс материалов, широкого ассортимента выпускаемой продукции и разнообразия термических и гидрохимических переделов. Так, при получении соды из щелочного алюмосиликатного сырья, по сравнению с аммиачным способом, исключаются хлоридные стоки и шлам от очистки рассола суммарным объемом до 10 $м^3$ с содержанием твердой фазы до 2 т на 1 т прокаленного продукта, а также операции улавливания и регенерации аммиака.

В последние годы предприятия, перерабатывающие щелочное алюмосиликатное сырье по способу спекания, столкнулись с определенными трудностями. В условиях перехода на новые формы хозяйствования и интеграции глиноземной отрасли стран СНГ в мировую экономику эта технология становится все менее конкурентоспособной по сравнению со способом Байера, что связано в первую очередь с более высокими, чем при плановой экономике, ценами на сырье и топливо, а номенклатура выпускаемых попутных продуктов уже недостаточна для компенсации таких затрат. Вместе с тем недостаточный выпуск глинозема (только около 40 % мощности алюминиевых заводов России обеспечены отечественным глиноземом), большая потребность в относительно дешевой соде для стекольной и металлургической промышленности и необходимость стратегически важных производств поташа и галлия требуют не только поддерживать, но и наращивать мощности по переработке данного вида сырья, чему способствуют уникальные сырьевые возможности.

Глинозем классифицируют на крупнозернистый (выпускается предприятиями, работающими по американской технологии), мелкозернистый (выпускается предприятиями, работающими по европейкой технологии) и промежуточного типа (недообожженный). Для производства качественного алюминия с наименьшими издержками необходим глинозем высокого качества — крупнозернистый (или песочный). К основным его преимуществам

относится повышенная скорость растворения в электролите, высокая адсорбционная способность по отношению к фтору, пониженный пылеунос, повышенная производительность электролизера.

Проблемой российской промышленности является низкое содержание алюминия в добываемых рудах. Известные мировые месторождения Гвинеи, Бразилии, Индии и Австралии имеют очень высокое содержание алюминия в бокситах. Бедные руды разрабатываются только в России, поэтому технология их использования была реализована на отечественных предприятиях. Ее особенностью является комплексная переработка нефелинового концентрата с получением наряду с глиноземом цемента, соды и поташа. Причем на 1 т глинозема производится 9 т цемента и 1 т соды и поташа. Рентабельность технологического процесса достигается только за счет реализации сопутствующих продуктов. Сдерживающим фактором оказывается значительный выпуск цемента, при реализации которого возникают трудности. Например, Ачинский глиноземный комбинат не удается запустить на полную мощность именно из-за сдерживания со стороны рынка цемента.

Технология производства в ПО “Глинозем” базируется на использовании нефелинового концентрата с Кольского месторождения, где ПО “Апатиты” получает нефелиновый концентрат как отходы основного производства. Он проходит обогащение и отгружается в ПО “Пикалево”.

Комплексная технология получения глинозема из нефелинового сырья включает в себя производство кальцинированной соды и поташа из содово-поташного раствора, поступающего из отделения карбонизации алюминатного раствора.

Выделение соды и поташа — сложный технологический комплекс, в основе которого — метод политермического разделения солей.

Соду получают в процессе многостадийного упаривания содово-поташного раствора с последующим разделением твердой и жидкой фаз и сушкой готового продукта во вращающихся печах.

Из маточного раствора процесса выделения соды выделяют двойную соль — остаточную соду в соединении с поташом.

Осаждение производят в противоточных выпарных батареях. Твердая фаза после отделения на центрифугах возвращается обратно в процесс производства соды, где репульпируется раствором после стадии концентрирования. Жидкая фаза — слив с центрифуг — направляется на производство поташа.

Поташ получают в батареях кристаллизаторов, в которых при водяном охлаждении растворы разлагаются с выделением кристаллического осадка. Получают несколько видов поташа, различающихся степенью очистки от примесей: очищенный кальцинированный (содержание примесей до 0,4 %), первого сорта (до 2 %), третьего сорта (содержание примесей до 10 %). В зависимости от вида производимой продукции применяют различные аппаратурно-технологические схемы.

Исходный раствор разделяют на две части, одну направляют на кристаллизацию поташа первого сорта, другую — на производство поташа. Процесс выделения очищенного кальцинированного поташа проводят в два этапа.

1. Раствор смешивают с водой и производят осаждение примесей в батарее кристаллизаторов. Полученную пульпу фильтруют, отделяя твердый осадок, а осветленный раствор направляют на вторую стадию.

2. Раствор выпаривают в двухкорпусных выпарных батареях, удаляя добавленную на первом этапе воду. Упаренный раствор поступает в батарею кристаллизаторов, где происходит его разложение. Твердый осадок отделяют от жидкой фазы на центрифугах и направляют на сушку во вращающиеся печи, где получают готовый очищенный поташ. Слив с центрифуг поступает на производство поташа третьего сорта или возвращается на выпарные батареи для выделения двойной соли.

Для производства поташа первого сорта используют часть исходного маточного раствора, полученного в процессе выделения двойной соли. Раствор поступает в батарею кристаллизаторов, где происходит выделение твердой фазы. Осадок (поташа первого сорта) отделяется на центрифугах и направляется в печь, а маточник сливается в сборную мешалку и из нее поступает на производство поташа третьего сорта.

Раствор, направляемый на получение поташа третьего сорта, предварительно упаривается в однокорпусной выпарной батарее.

Кристаллический осадок выделяется в кристаллизаторах с коническим днищем и направляется на центрифуги для получения готового продукта, который затем подсушивается во вращающейся печи. Слив с центрифуг делят на две части: одна идет на производство галлия, другая — на производство сульфата калия.

Сульфат калия получают следующим образом. Сухой остаток, получаемый при производстве глинозема из бокситового сырья с высоким содержанием металлосульфатов, репульпируют содово-поташным раствором. Полученная суспензия смешивается с поташным раствором в отношении 1:1, при этом образуется раствор сульфата калия, который направляется в батарею кристаллизаторов. После выделения из раствора сульфата калия в процессе сгущения в сгустителях и фильтрации на центрифугах готовый продукт сушится во вращающихся печах. Слив со сгустителей направляется в глиноземное производство, а слив с центрифуг возвращается в первый кристаллизатор (начало процесса).

Исходным сырьем для получения алюминия служит боксит (похожая на глину порода). **Боксит** содержит в основном глинозем (оксид алюминия), связанный с водой, кремнезем и оксиды железа и титана. Возможны два способа извлечения глинозема: щелочной мокрый (рис. 94) и сухой.

Для проектирования предприятий по производству глинозема используют типовые модульные решения. Они включают в себя следующее оборудование:

мельницы размола боксита (100–150 т/ч);

автоклавные батареи (до 900 $м^3$/ч по бокситовой пульпе);

нитки сгущения и промывки красного шлама;

автоматизированные фильтры контрольной фильтрации;

установки вакуумного охлаждения алюминатного раствора;

декомпозеры с механическим перемешиванием пульпы;

установки классификации гидратной пульпы в схеме производства крупнозернистого глинозема;

специальные дисковые вакуум-фильтры для фильтрации заправочного и продукционного гидрата;

тарельчатые вакуум-фильтры для промывки продукционного гидрата;

стационарные печи для кальцинации глинозема;

выпарные батареи.

Применение модулей позволяет сократить сроки проектирования заводов.

В настоящее время основным способом получения алюминия является электролиз глинозема в расплавленном криолите (рис. 95). Процесс происходит в электролизере, который представляет собой металлический футерованный кожух (ванну).

Электролит — расплав криолита с небольшим избытком фторида алюминия, в котором растворен глинозем. Сверху в ванну опущены угольные аноды, катодом служит дно ванны, собранное из блоков спрессованного угля вместе с расплавленным алюминием.

На жидком алюминиевом катоде выделяется алюминий, который периодически выливается с помощью вакуум-ковша и направляется в литейное отделение на разливку или миксер, где в зависимости от дальнейшего назначения металла готовятся сплавы с кремнием, магнием, марганцем, медью или проводится рафинирование. На аноде происходит окисление выделяющимся кислородом углерода. Отходящий анодный газ представляет собой смесь CO_2 и CO. Аноды по мере сгорания наращивают.

Современные электролизеры оборудованы системой автоматического питания глиноземом (АПГ) с периодом загрузки 10–30 мин.

В Китае находится гробница известного полководца Чжоу Чжу, умершего в начале III в. Недавно некоторые элементы орнамента этой гробницы подвергли спектральному анализу. К удивлению исследователей, сплав, из которого был выполнен орнамент, содержал 85 % алюминия. Остается загадкой получение этого металла в III в., ведь электричество тогда было неизвестно. Видимо, в те далекие времена существовал другой способ получения металла, который в дальнейшем был утрачен.

Первичный алюминий, получаемый в электролизерах, имеет чистоту 99,3–99,9 %, при повторном электролитическом рафинировании получают алюминий высокой чистоты (99,99 % и более), особо чистый (более 99,9999 %) — зонной плавкой в небольших количествах для полупроводниковой промышленности.

Рассмотренный способ получения алюминия имеет ряд недостатков: высокий удельный расход электроэнергии, низкие удельный съем металла и срок службы электролизеров, большие

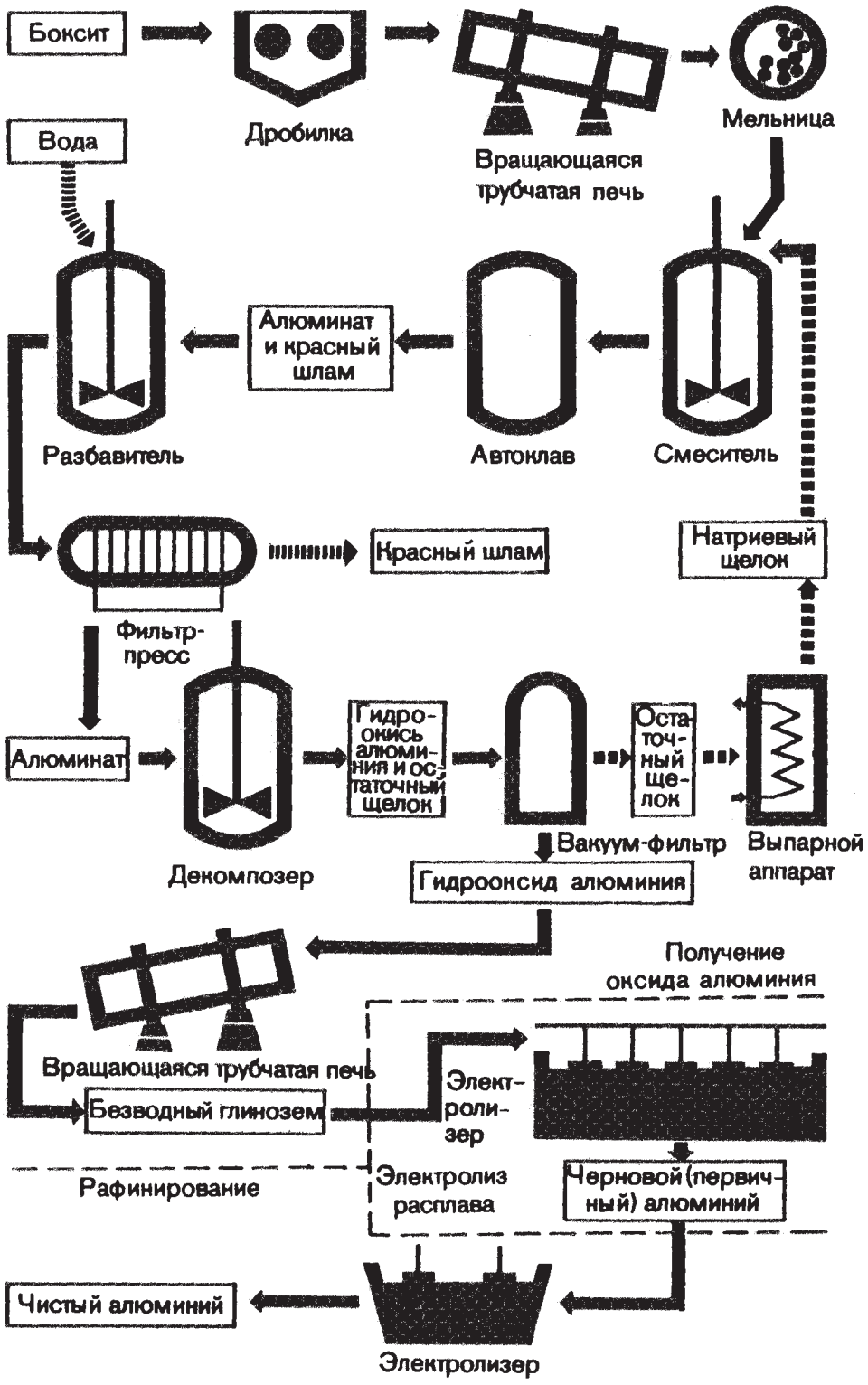


Рис. 94. Схема получения алюминия из боксита

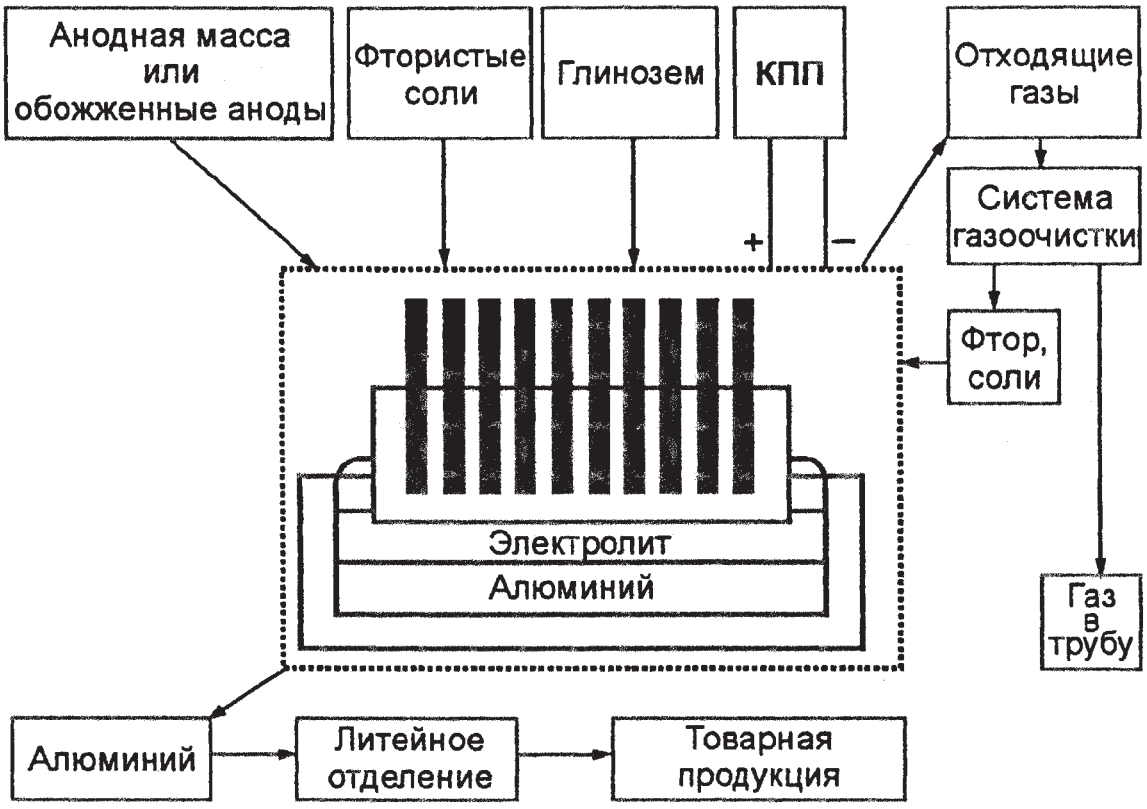


Рис. 95. Схема производства алюминия из глинозема

трудовые и капитальные затраты, выделение веществ в атмосферу и др.

Крупнейшими предприятиями России, производящими первичный алюминий, являются Красноярский, Саянский, Волховский, Волгоградский, Богословский, Братский, Сосновоборский и Надвоицкий алюминиевые заводы.

В конце 90-х гг. XX в. созданы мегахолдинги — "Русский алюминий", "СУАЛ-холдинг", "Сибирский алюминий", в состав которых входит ряд предприятий и ГЭС.

До 1990 г. стоимость 1 т алюминия в зависимости от его качества определялась прейскурантом, который утверждался Государственным комитетом цен Совета Министров СССР. Сейчас основной биржей, осуществляющей торговые операции с алюминием, является Лондонская биржа металлов. Она обеспечивает поставки с более чем 40 складов, расположенных по всему миру. Расчет по сделкам биржи производится в Лондонской торговой палате. Цена алюминия зависит от изменений

Таблица 26

Цены и стоимость переработки глинозема (дол./т алюминия)

Показатель	Год			
	1994	1995	1996	1997
Цена первичного алюминия	1480	1808	1508	1600
Цена глинозема	120	270	180	205
Стоимость 1,95 т глинозема, необходимого для производства 1 т алюминия	234	525,3	351	399,8
Доля глинозема в себестоимости 1 т алюминия, %	15,8	29,12	23,28	24,99

в экономике крупных стран, цен на сопряженные товары, появления новых технологий и материалов.

Колебания цен вызывают ограничения производства, консервацию или ввод в действие производственных мощностей.

Расход сырья, материалов, электроэнергии, затраты на капитальный ремонт, заработанная плата зависят от типа основного оборудования, состояния технологии, региона расположения завода и других факторов.

Поскольку более 80 % производимого алюминия направляется на экспорт, а собственное производство глинозема удовлетворяет потребность в этом виде сырья на 30–35 %, уровень мировых цен на алюминий и глинозем (табл. 26) определяет экономическую ситуацию в алюминиевой промышленности России.

Применение алюминия

Около 80 % общего объема производства составляют **деформируемые** и 20 % **литейные сплавы**. Деформируемые сплавы делятся на два класса: неупрочняемые и термически упрочняемые.

К неупрочняемым сплавам относятся различные сорта технического алюминия и многие сплавы, упрочнение которых может быть достигнуто путем нагартовки из отожженного состо-

яния. Термическое упрочнение заключается в их термической обработке (отжиг, закалка и старение).

Алюминиевую фольгу, исключительно важный и широко используемый полуфабрикат, выпускают в промышленном масштабе из алюминия и термически неупрочняемых сплавов.

Плакированные полуфабрикаты, у которых с одной или обеих сторон основное изделие покрыто слоем алюминия или алюминиевого сплава, предназначены для химической защиты сердцевины. Такими полуфабрикатами являются листы и плиты, иногда — проволока, трубы, при этом толщина плакирующего слоя составляет от 1,5 до 10 % толщины основного сплава.

Полуфабрикаты для автомобильной промышленности предназначаются в основном для изготовления бамперов, панелей кузовов, элементов внутренней отделки салона.

Сплавы для авиации созданы для снижения массы авиационных конструкций, из них делают плиты, листы и другую продукцию.

Листы для изготовления жестких контейнеров применяют в основном для изготовления деталей донышек и обечаек консервных банок. Донышки банок изготавливают из сплава с содержанием 4,5 % меди и 0,35 % марганца, который имеет высокую прочность и хорошую формуемость. Обечайки банок получают ударной штамповкой или глубокой вытяжкой.

Сплавы для блестящих поверхностей изготавливают для последующей обработки готовых изделий методом горячего анодирования. Такие детали используются в товарах народного потребления.

Полуфабрикаты со специальной отделкой поверхности находят широкое применение в строительных конструкциях, для отделки которых используют анодирование, позволяющее достичь гаммы оттенков от серого до черного. Полуфабрикаты из деформируемых сплавов получают различными способами горячей и холодной обработки давлением.

Отливки из алюминиевых сплавов изготавливают всеми существующими способами литья: под давлением, в кокиль, в песчаные формы, литье по выплавляемым моделям и пр. По содержанию легирующих элементов литейные сплавы делятся на пять групп: I — система Al—Si—Mg; II — система Al—Si—Cu;

III — система Al—Cu; IV — система Al—Mg; V — система Al—прочие компоненты.

Наиболее широко применяются силумины (система Al—Si сплавов). Эти сплавы обладают хорошей свариваемостью, коррозионной стойкостью и хорошо обрабатываются механически. Сплавы системы Al—Cu применяют для изготовления высококачественных литых деталей в самолето- и ракетостроении.

В электротехнике алюминий используют не только для получения проводниковой продукции, но и для изготовления электродвигателей небольшой мощности. Обмотка почти всех короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей выполняется из алюминия, кабели в оболочках из алюминия обладают хорошими антикоррозионными свойствами.

Алюминий в виде фольги толщиной 0,00635 мм используют в сильноточных статических конденсаторах для улучшения коэффициента мощности, для изготовления телефонных кабелей, в радиаторах для охлаждения крупных полупроводниковых выпрямителей и во многих других изделиях. Потребление алюминия для электротехнических целей достигает 7 % его мирового производства.

Алюминий сохраняет свои прочностные характеристики при низких температурах, поэтому изделия из него (емкости для хранения криогенных жидкостей, радиаторы, трубки для теплообменных аппаратов и пр.) используют при криогенных температурах.

Постоянно расширяется сфера применения сплавов из первичного и вторичного алюминия для производства товаров народного потребления (пылесосов, стиральных и посудомоечных машин, холодильников, утюгов, предметов кухонной утвари и др.).

Металлические листы, фольга, слоистые материалы с использованием алюминиевой фольги служат для производства тары, упаковочных материалов. Так, для упаковки чая используется фольга с наклеенной бумагой, а для упаковки медицинских препаратов, зубной пасты, кремов и пр. широкое распространение получили тубы различной емкости.

Для целей военно-промышленного комплекса кроме авиационной и ракетной техники, осветительных ракет, дымовых бомб применяют алюминий для производства понтонов, корпу-

сов крупногабаритных тягачей, автоцистерн, автомобилей специального назначения.

Практический интерес представляют алюминиевые порошки и частицы разнообразных форм и размеров (сферической, в виде тонких чешуек и частиц неправильной формы). Порошки в качестве легирующих добавок используют в металлургии, путем прессования и спекания из них изготавливают полуфабрикаты и детали, используют во взрывчатых веществах и в ракетном твердом топливе.

Спеченные алюминиевые сплавы имеют уникальные характеристики, поэтому область их применения постоянно расширяется; в ряде случаев они заменяют такие металлы, как титан, и высокопрочные марки стали.

6.4. ПРОИЗВОДСТВО МЕДИ

Медь является самым древним из добываемых в массовом количестве металлов. Уникальные технологические и физические характеристики, наличие в земной коре практически всех континентов, а также в воде обусловили ее интенсивное использование. Мировые ресурсы меди оцениваются в 1,6 млрд. т.

Распределение мировых запасов по странам мира следующее: Чили — 22 %; США — 12; Китай — 6; Казахстан — 5; Индонезия, Польша — по 4; Россия, Замбия — по 3; Узбекистан, Бразилия, Мексика, Австралия — по 2; Филиппины, ЮАР — по 1; другие страны — 31 %.

В 2002 г. мировая добыча меди в руде составила 13,4 млн. т (табл. 27).

Минерально-сырьевая база России сосредоточена в Уральском и Восточно-Сибирском регионах и представлена в основном медно-никелевыми и медно-колчеданными месторождениями. Сырьевая база Восточно-Сибирского региона состоит из месторождений сульфидных медно-никелевых руд, эксплуатируемых компаниями “Норильского никеля”, которые и перерабатывают весь объем добытой руды. Уральский регион представлен производителями Свердловской и Челябинской областей. Свердловская область имеет полный технологический комплекс для добычи и производства меди. В этом регионе оперирует

Таблица 27

Динамика мирового производства медной руды (по содержанию меди), тыс. т

Страна	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.	2002 г.
Мир в целом	11 485	12 270	12 739	13 189	13 570	13 400
В том числе:						
Чили	3392	3686,9	4391,2	4602	4739	4537
США	1939,6	1859,4	1600,9	1467	1355	1318
Индонезия	548,3	809,1	790,3	1005	1047	1013
Австралия	558	607	739	829	895	816
Перу	506,5	483,3	536,4	553,9	722	916
Канада	659,5	705,8	620,1	633,9	624	623
Польша	414,8	435,8	463,2	454,1	475	422
Россия	505	500	510	525	545	524

“УГМК-Холдинг” — второй по величине производитель меди в России, являющийся главным поставщиком меди на российский рынок. Основной объем сырья для компании поставляет Гайский горно-обогатительный комбинат. Большие запасы медных руд расположены в зоне Байкало-Амурской магистрали (Удоканское рудное месторождение в Читинской области).

В 2002 г. мировой выпуск рафинированной меди составил более 15 млн. т (табл. 28).

На долю России приходится 6 % мировой выплавки. Основными производителями черновой меди являются Среднеуральский медеплавильный завод (в 2002 г. выпущено 100 тыс. т), Святогор (70 тыс. т), Уралэлектромедь (58,6 тыс. т), а также Кировоградский медеплавильный комбинат и Карабашмедь. Крупнейшим производителем рафинированной меди является “Норильский никель”, на долю которого приходится 50 % российского выпуска меди. Среди структурных подразделений компании лидером является Североникель, 78 % продукции которого идет на экспорт. Вторым по величине производителем является Уралэлектромедь (УГМК), третьим — Кыштымский медеэлектролитный завод.

Таблица 28

Динамика мирового производства рафинированной меди, тыс. т

Страна	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.	2002 г.
Мир в целом	13 599,4	14 148,8	14 456,2	14 785	15 478	15 356
В том числе:						
Канада	560,6	562,3	548,6	551,6	569	512
Чили	2116,6	2334,9	2666,4	2668,3	2882,2	4087
США	2465,4	2489,3	2118,6	1794	1794	2282
Австралия	271,1	285	416	487	808	548
Китай	1179,4	1211,3	1174	1371	1426,5	1665
Япония	1278,7	1277,4	1341,5	1437,4	1426	1393
Германия	673,7	695,8	695,6	709,4	694	808
Польша	440,6	446,8	470,5	486	498	437
Россия	639,9	655,9	736,6	816	869	851

До революции на месте одного из комбинатов "Норильского никеля" находились лишь руины медеплавильной печи, сооруженной в 1872 г. нелегально. А произошло следующее.

О том, что на Таймыре есть медные руды, было известно давно, но медеплавильная промышленность не могла здесь развиваться из-за дороговизны строительных материалов, особенно кирпича. В 1863 г. купец Киприян Сотников сделал ход конем. Он попросил у губернатора разрешение построить в селе Дудинка на собственные средства деревянную церковь. Разумеется, губернатор не мог отказать в такой просьбе, и вскоре в Дудинку пришел положительный ответ.

Губернской канцелярии, находившейся за тысячи верст от Дудинки, не было известно, что там уже есть церковь, притом каменная. Поэтому быстро построив деревянную церковь, находчивый купец разобрал каменную и из "святых" кирпичей соорудил шахтную печь для выплавки меди — "прабабушку" норильского комбината.

Рынок меди — один из самых организованных и стабильных рынков цветных металлов, хотя и подвержен колебаниям в зависимости от различных факторов.

По химическому составу медные руды делятся на сульфидные и окисленные. Сульфидные руды (халькопирит, ковеллин, халькозин, пирит и др.) подвергаются обогащению с получением медного концентрата. Он отправляется на **пирометаллургическую переработку**. Окисленные руды (малахит, куприт, азурит) трудно поддаются обогащению и перерабатываются **гидрометаллургическим способом**.

Медные руды часто содержат другие ценные металлы, поэтому в результате обработки кроме медного получают целый ряд концентратов: цинковый, кобальтовый, молибденовый и т. д.

Основным способом производства меди является пирометаллургический (рис. 96). В результате флотационного обогащения, сгущения и фильтрации получается медный концентрат, содержащий 10–25 % меди, 15–40 — железа, 25–40 — серы, 8–10 % — остальные примеси и вода.

Цель окислительного обжига — частичное удаление серы и перевод железа из сульфидной формы в оксидную для того, чтобы при последующей плавке **огарка** оно переходило в шлак. Окислительный обжиг включает в себя следующие стадии: нагрев и сушка шихты, разложение неустойчивых соединений (термическая диссоциация), воспламенение и горение (окисление сульфидов). Обжиг производят в печах кипящего слоя. При этом в под печи встроены специальные сопла, сквозь которые вдувают воздух. Струи воздуха поддерживают во взвешенном состоянии насыщенный порошок шихты. Смесь воздуха с твердым веществом приобретает свойства жидкости. Такой кипящий слой обладает большой теплопроводностью, в нем происходит активное перемешивание вещества. Площадь пода печи 12–40 м^2; диаметр печи 4,5–6 м; высота слоя 1,5–2 м, скорость воздуха 60–65 м/с. Продуктами обжига являются огарок, пыль, газ. Последний содержит до 15 % оксида серы и используется для производства серной кислоты.

При отражательной плавке шихта расплавляется за счет тепла от сжигания топлива в рабочем пространстве печи над слоем расплава. В результате получаются два жидких продукта: богатый по содержанию меди **штейн** и **шлак**, содержащий пустую породу. Они практически не смешиваются друг с другом, поэтому их разделяют отстаиванием. Печи имеют длину около 30 м, шири-

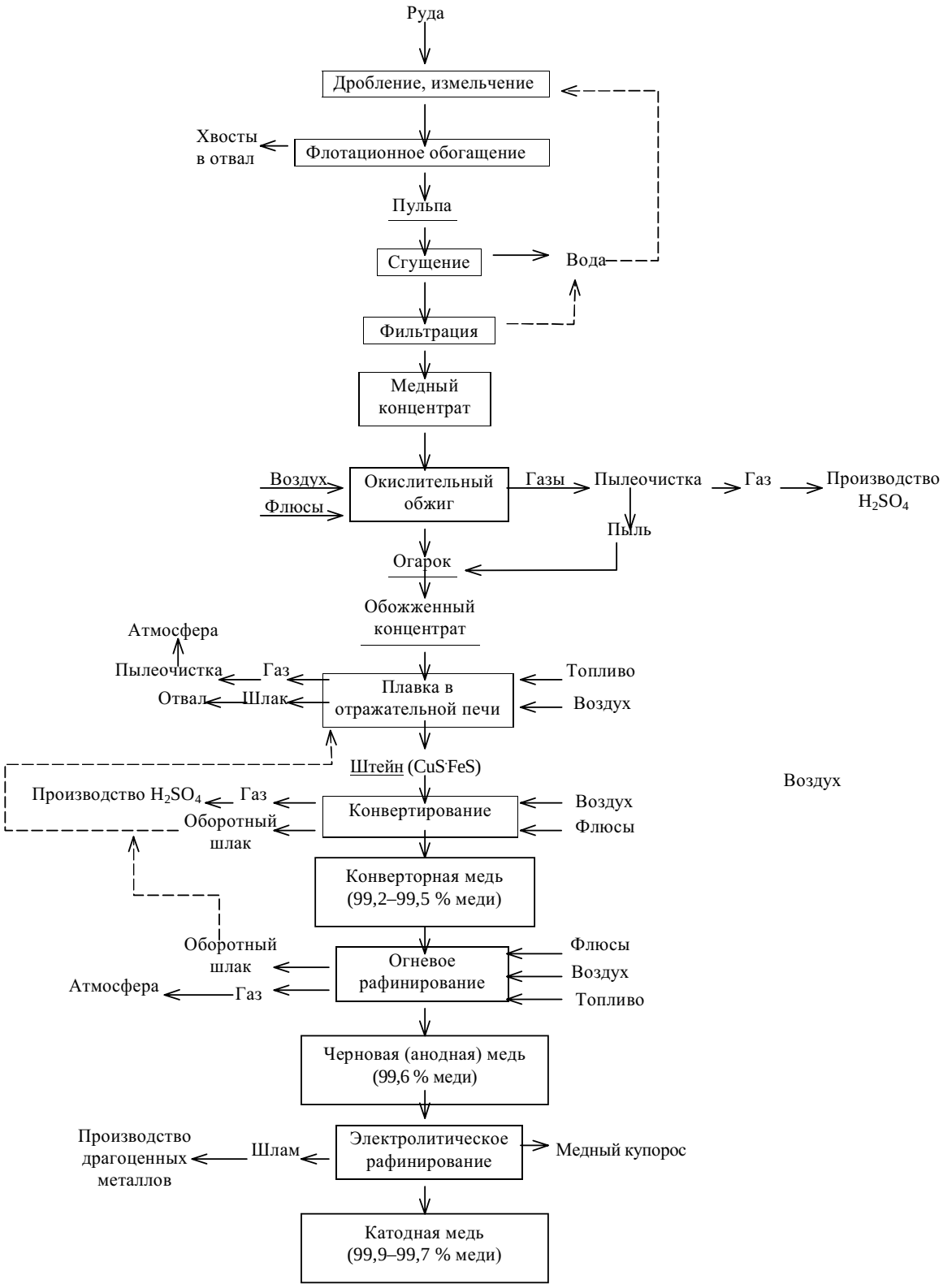


Рис. 96. Технологическая схема переработки сульфидных медных руд

ну — 8–10 м; площадь пода 240–330 м^2; температура в плавильной зоне достигает 1500–1550 °С; топливо — мазут, природный газ, угольная пыль; производительность печи 1000–1500 т шихты в сутки.

Цель процесса **конвертирования** медных штейнов — удаление Fe и S для получения черновой меди. Полученная при конвертировании черновая медь подвергается огневому рафинированию для удаления примесей и получения плотных анодов для последующего электролитического рафинирования. Огневое рафинирование производится при температуре 1150–1200 °С в несколько стадий: загрузка печи, разогрев, окислительная продувка, съем шлака, дразнение, разливка меди в аноды, которые представляют собой пластинчатые отливки с усиками шириной 800–900 мм, высотой 1000 мм, толщиной 35–40 мм, массой 300–350 кг.

Электролитическое рафинирование происходит в электролизере, который представляет собой ванну высотой 1,0 м, шириной 1 м, длиной 4–6 м. Внутри ванны устанавливают 30–45 анодов и 31–46 катодов. Температура электролита 55–60 °С, плотность тока 120–300 А/м^2. В результате электролиза медь восстанавливается, а примеси переходят в раствор.

Альтернативой традиционной схеме рафинирования меди, отличающейся высокими потерями цветных металлов, а также периодичностью и многостадийностью, являются технологические схемы производства меди электроэкстракцией, которые в настоящее время получили широкое распространение и практически вытеснили традиционное рафинирование применительно как к бедному, так и к комплексному сырью, такому как медно-кобальтовое и медно-никелевое.

Основным отличием новой технологии является то, что используемое сырье не подвергается предварительной гидрометаллургической переработке. Электроэкстракцией можно получать медь из медного огарка (рис. 97).

Наиболее вредными для механических свойств меди примесями являются висмут и свинец. При кристаллизации, выделяясь в виде тонких прослоек между зернами, они делают медь хрупкой и ломкой: электропроводимость меди особенно сильно снижают примеси фосфора, мышьяка и сурьмы.

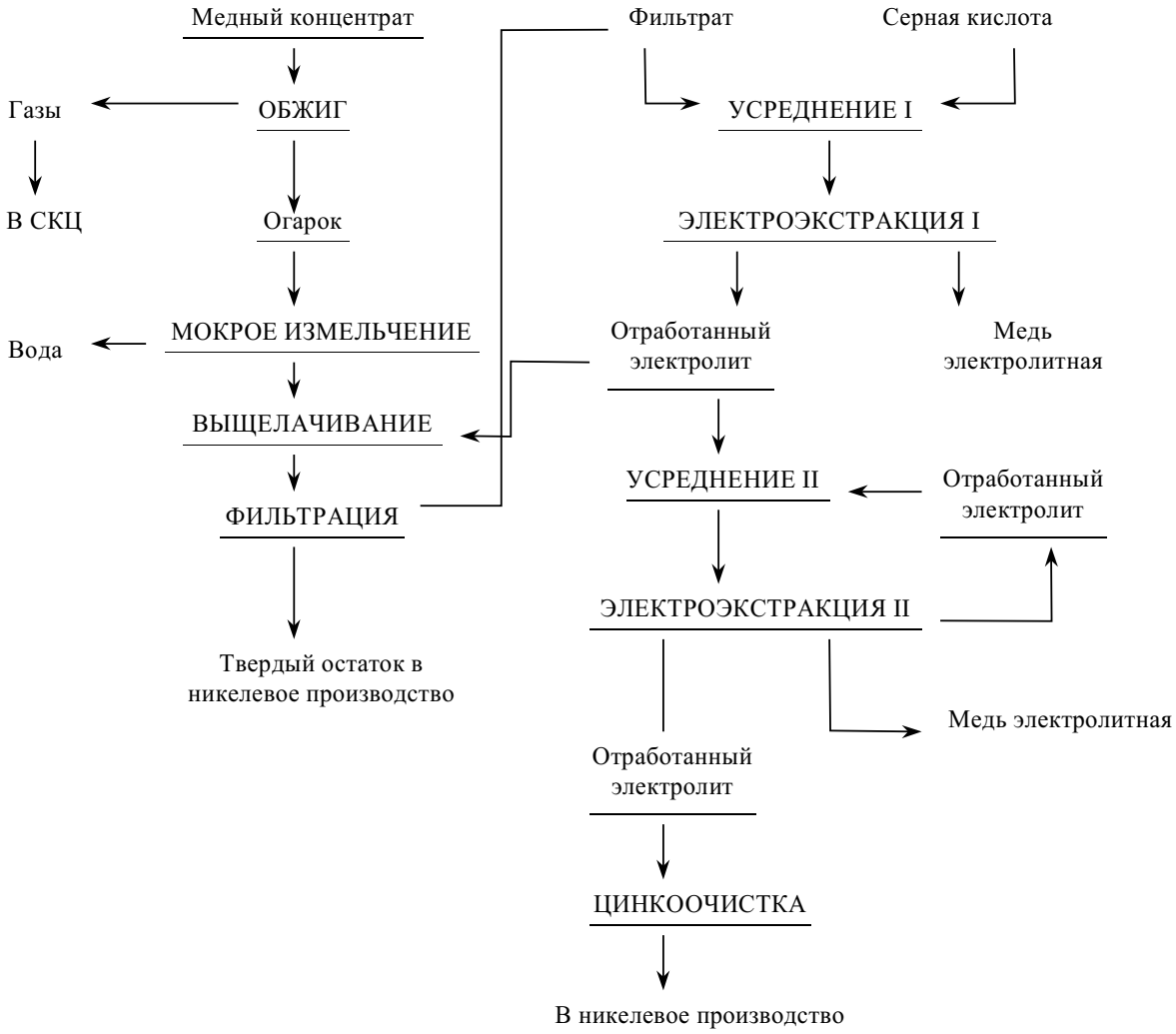


Рис. 97. Принципиальная технологическая схема производства меди из медного огарка электроэкстракцией

Медь можно встретить в трансформаторе и автомобильном двигателе, в телевизоре и радиоприемнике, в сложнейших электронных устройствах и металлообрабатывающих станках. Из нее изготавливают детали химической аппаратуры и инструмент для работы с взрывоопасными или легковоспламеняющимися веществами, где нельзя применять искрометную сталь.

Сплавы меди

Двойные или многокомпонентные сплавы меди с оловом, алюминием, свинцом, бериллием, хромом и другими элементами, среди которых цинк не является основным легирующим,

называются **бронзами**. По сравнению с чистой медью этот сплав обладает рядом преимуществ: большей твердостью и прочностью, упругостью, он меньше подвержен коррозии, лучше заполняет литейную форму.

Человек познакомился с бронзой, по-видимому, в IV тыс. до н. э.: именно так датируют ученые самые ранние бронзовые орудия, найденные в Иране, Турции, Месопотамии. Однако свое название бронза получила значительно позже. Один из древнейших морских портов Италии Бриндизи в античные времена (тогда он назывался Брундизием) был конечным пунктом Аппиевой дороги, по которой в порт поступала добываемая в стране медь различных месторождений. Отсюда начинался путь этого металла во многие государства. Но медь редко была чистой; как правило, металл представлял собой сплав меди с оловом. Он мог получаться естественным путем в процессе плавки, поскольку в тех месторождениях, откуда была "родом" медь, ей обычно сопутствовало олово. Кроме того, в порт постоянно заходили греческие суда, перевозившие олово с Британских островов; вполне вероятно, здешние металлурги подметили, что сплав двух металлов, пути которых пересекались в Брундизии, обладает хорошими свойствами, и освоили его массовое производство. Вскоре этот сплав — "медь из Брундизия" (по-латыни "эс Брундизи") — повсюду стали именовать бронзой.

Особенно широко используются в машиностроении оловянные бронзы, которые делятся на две большие группы: первая — деформируемые бронзы, содержащие не более 7–8 % Sn (предназначены для обработки давлением), вторая — литейные бронзы. Они отлично заполняют литейные формы, дают небольшую усадку.

Из безоловянных бронз (олово — дорогой металл, поэтому ему ищут замену в производстве бронз) наибольшее применение получили алюминиевые, кремнистые и бериллиевые бронзы. Из алюминиевых бронз изготавливают втулки, фланцы, шестерни и другие ответственные детали. Кремнистые бронзы превосходят оловянистые по коррозионной стойкости и механическим свойствам. Поэтому из них делают детали, работающие при нагреве до 500 °С и в таких агрессивных средах, как морская вода.

Бериллиевая бронза выдерживает нагрузку на растяжение до 130–150 кг/мм^2, хорошо сопротивляется коррозии, сваривается и обрабатывается резанием. Она используется для изготовления ответственных деталей — мембран, пружин, контактов.

С давних времен бронзу использовали для создания скульптуры. Некоторые статуи имели гигантские размеры. В начале III в. до н. э. был создан Колосс Родосский — 32-метровая статуя, возвышавшаяся у входа в гавань, считалась одним из чудес света. Медный всадник, статуя Свободы в Нью-Йорке, "Дискобол", фигура Будды в японском храме — образцы выдающегося мастерства.

В начале XVI в. в Москве работали такие "оборонные предприятия", как Пушечная изба и Пушечный двор, где отливали бронзовые орудия разных калибров. В отливке орудий русские мастера достигли совершенства. Шедевром литейного искусства по сей день считается 40-тонная Царь-пушка, отлитая из бронзы в 1586 г. Андреем Чоховым. Другой замечательный памятник техники — бронзовый Царь-колокол массой более 200 т — был отлит в 1735 г. мастерами отцом и сыном Маториными и предназначался для колокольни Ивана Великого. Кстати, купол этого памятника архитектуры XVI в. покрыт позолоченными листами из чистой меди. Южная дверь Успенского собора — главного храма Древней Руси — также отделана медными листами.

Из каких только металлов и сплавов не пробовали люди отливать колокола — из стали, чугуна, латуни, алюминия и даже из золота и серебра, но ни один из них не мог конкурировать с бронзой по силе и продолжительности звучания. До наших дней дошло множество старинных бронзовых колоколов — от маленьких бубенчиков до набатных исполинов. Колокольным звоном — тревожным и радостным, праздничным и печальным — на протяжении столетий сопровождались важнейшие события русской жизни.

Двойные или многокомпонентные сплавы меди, в которых основным легирующим элементом является цинк, называют **латунями**. Они обладают достаточной прочностью, хорошо обрабатываются давлением, широко используются в машиностроении.

Об этом сплаве упоминали в своих рукописях еще египетские жрецы, которые, видимо, были первыми в истории науки алхимиками: в рукописях, найденных при раскопках одной из гробниц в Фивах, содержались секреты "получения" золота из меди. Как утверждали авторы священно-химических "монографий", стоило добавить к меди цинк — и она тут же превращалась в золото (по внешнему виду латунь действительно напоминает золото). Правда, у такого "золота" был один недостаток: на его поверхности появлялись зеленоватые "язвы" и "сыпь" (в отличие от золота, латунь не могла сопротивляться вредному воздействию кислорода). Чтобы устранить это "заболевание", по мнению жрецов, требовались усердные молитвы и сильнодействующие заклинания.

Латуни, содержащие наибольшие количества меди — более 90 %, называются томпаками. Они обладают такой высокой коррозионной стойкостью, что их стали применять для покрытия других металлов с целью предохранения от ржавления. Такие латуни по цвету подобны золоту. Из них делают ювелирные украшения. Латуни, содержащие до 38 % цинка, хорошо поддаются холодной прокатке. А если они содержат больше 38 % цинка, то чаще всего идут или на изготовление деталей отливкой, или на обработку давлением в горячем состоянии.

Деформируемые латуни применяют для получения труб, прутков, полос, проволоки. Литейные латуни идут на изготовление арматуры и деталей для судостроения, гаек нажимных болтов, работающих в сложных условиях, втулок, вкладышей и т. д.

Существует большое количество медных сплавов и порошков из меди. Основные методы получения таких порошков представлены в табл. 29. Порошки латуни и бронзы получают в основном распылением.

Электролизом изготавливают высокочистые порошки, обладающие уникальными свойствами. Высокая чистота порошков во многом определяется исходным сырьем — катодной медью с низким содержанием примесей. Недостатком метода является большая энергоемкость, а следовательно, и высокая стоимость порошка. Кроме того, порошки дендритной формы обладают

Таблица 29

Основные способы промышленного производства порошков меди и ее сплавов

Метод	Сущность метода	Сырье	Размер частиц, мкм	Форма частиц
Механическое измельчение	Размол в шаровых и вибромельницах	Катодная медь, бронза	20–400	Осколочная, чешуйчатая
Восстановление оксидов	Обработка при 400–700 °С, размол, рассев	Окалина, гидратные кеки	10–100	Конгломераты
Распыление водой высокого давления	Диспергирование расплава, сушка, рассев	Высокосортный лом, катодная медь, латунь, бронза	20–400	Округлая, осколочная
Распыление сжатым воздухом	Дробление струи расплава, сушка, рассев	Катодная медь, бронза	50–100	Округлая, сферическая
Электрохимическое осаждение	Электролиз водных растворов	Катодная медь	1–30	Дендритная
Автоклавный	Восстановление при повышенных температурах водородом	Медьсодержащие растворы	10–200	Развитая равноосная
Цементация	Извлечение меди из растворов более активными металлами	Медьсодержащие растворы	5–50	Губчатая

малой, в ряде случаев нулевой текучестью, что ограничивает их применение для производства изделий.

Основные достоинства автоклавного метода — возможность использования дешевого первичного, а также вторичного сырья, высокая интенсивность процесса, малые трудозатраты,

в результате — низкая себестоимость порошка. Свойства порошка удается варьировать в широких пределах изменением параметров технологического режима.

Из порошков меди и ее сплавов изготовляют разнообразные материалы, среди которых конструкционные, электротехнические, антифрикционные, пористые, фрикционные и некоторые другие.

Электротехнические материалы. Наиболее широко в электротехнике применяют контакты скользящего и разрывного типов. Эти контакты, полученные методом порошковой металлургии, имеют уникальный состав и структуру, которые не достигаются никакими другими методами, одновременно значительно экономятся дорогостоящие металлы — серебро, вольфрам, медь.

Скользящие электрические контакты (электрощетки) изготовляют в основном из порошков электролитической меди либо бронзы и графита, иногда с добавками свинца и олова, улучшающих контактные свойства изделий. Медно- и бронзографитовые щетки устанавливают в низковольтных генераторах, рассчитанных на большую силу тока, а также в тяговых двигателях низкого напряжения, в коллекторах синхронных и асинхронных двигателей с высокими плотностями тока.

К деталям электротехнического назначения относят токосъемные устройства, работающие при силе тока до 3000 А и плотности его до 40 А/мм^2. Чистые металлы не могут обеспечить работу со столь высокими токовыми нагрузками, поэтому изделия содержат 85 % Cu, 7 % Pb, 5 % Fe, Ni + MoS_2 + C = 3 %. Также для таких материалов характерна коррозионная износостойкость.

Конструкционные материалы. По сравнению с порошковыми конструкционными деталями, изготовленными из порошка железа и на его основе, изделия на медной основе производят в меньших количествах ввиду их меньшей прочности и твердости. Но при изготовлении деталей, к которым предъявляют повышенные характеристики тепло- и электропроводности, коррозионной стойкости, а также для декоративных целей используют порошки меди и ее сплавов.

Медные изделия конструкционного назначения обычно изготовляют из электролитических порошков с дендритной формой

и размером частиц 160 мкм. Такие порошки обладают повышенными характеристиками формуемости и уплотняемости.

Антифрикционные материалы. К ним предъявляют следующие основные требования: низкий коэффициент трения, высокая износостойкость, хорошая прирабатываемость, высокая теплопроводность при достаточной прочности и незначительном тепловом расширении. Практически всем этим требованиям отвечают спеченные материалы на медной основе, которые получили широкое распространение в машиностроении, в частности при изготовлении элементов узлов трения: подшипников скольжения, втулок, вкладышей, шайб, подпятников и других изделий. Наиболее популярными антифрикционными материалами на основе порошков меди являются пористая бронза, в том числе легированная свинцом и фосфором, бронзографит, биметаллы из стальной полосы с покрытием из бронзы и медно-графитовые композиции.

Фрикционные материалы. Фрикционные материалы на медной основе применяют в муфтах сцепления и тормозных системах с тяжелым режимом работы. В качестве материалов основы широко используют композиции на основе оловянистой бронзы, а также медные сплавы с марганцем, никелем, кобальтом, хромом. Такие материалы применяют в авиа- и машиностроении, в узлах тяжело нагруженных и ответственных тормозных устройств и др.

Для работы с масляной смазкой используют бронзографитовые фрикционные материалы, их применяют в автоматических коробках передач автомобилей, для металлообрабатывающих станков и др. Эти материалы обладают высоким коэффициентом трения, при торможении он достигает 25–30 %.

6.5. ПРОИЗВОДСТВО ТИТАНА

По распространенности в природе титан (от греч. Titanes) занимает среди металлов четвертое место (после алюминия, железа и магния); в земной коре его находится втрое больше, чем меди, цинка, никеля, ванадия, хрома и марганца, вместе взятых.

Если бы титану пришлось заполнять анкету, то в графе “Меняли ли вы фамилию?” он вынужден был бы

указать, что до 1795 г. назывался менакином. Такое название дал этому элементу открывший его в 1791 г. английский священник Уильям Грегор, в свободное от работы время с увлечением занимавшийся минералогией и химией. Вблизи своего прихода в местечке Менакан в Корнуолле он увидел минерал в виде темного крупного песка. В нем-то и был обнаружен неизвестный ранее элемент. Грегор окрестил минерал менаканитом, а новый элемент — менакином. Но, видимо, это имя пришлось элементу не по вкусу, и при первой же возможности (а она предоставилась в 1795 г., когда немецкий химик Мартин Клапрот вторично открыл элемент — в минерале рутиле) он сменил его на красивое, ко многому обязывающее имя "титан". В древнегреческой мифологии титанами звали сыновей Геи — богини Земли.

Спустя два года выяснилось, что Грегор и Клапрот открыли один и тот же элемент, за которым с тех пор и утвердилось гордое название "титан".

Ни один конструкционный материал не знал такой длительной истории исследований, как титан. Долгое время его даже считали непригодным для использования в качестве конструкционного материала, так как он был хрупким из-за большой концентрации примесей. Только в 40-х гг. XX в. было получено несколько килограммов чистого титана, а промышленное производство его началось в 1957 г. Стоимость его составляла 10 000 дол. за 1 т, тем не менее выпуск металлического титана шел такими гигантскими темпами, каких не знало другое металлургическое производство.

Важнейшие минералы титана в основном входят в состав пяти характерных групп — *рутила*, *ильменита*, *перовскита*, *лопарита*, *сфена*. Наибольшее практическое значение имеют группы рутила и ильменита.

Рутил представляет собой оксид титана TiO_2, обычно содержащий оксиды двух- и трехвалентного железа (до 10 %), а иногда и ильменита. В качестве примесей встречаются ванадий, ниобий и тантал. Из-за ограниченности разведанных запасов рутиловых руд этот вид сырья не может являться основным для бурно развивающейся титановой промышленности, поэтому

все большее значение приобретают ильменитовые руды, запасы которых достаточно велики. Ильменит представляет собой сложный твердый раствор состава 52,63 % TiO_2 и 47,37 % FeO.

Ильменит — наиболее распространенный из всех минералов титана. Огромная масса титана, содержащегося в земной коре, сосредоточена в ильмените. В настоящее время ильменитовые руды являются основным видом сырья для производства металлического титана и его диоксида.

Из других распространенных титановых минералов необходимо отметить три: перовскит, который представляет собой титанат кальция $CaTiO_3$, лопарит — комплексный минерал, содержащий до 39 % TiO_2, 11 % Nb_2O_5 + Ta_2O_5 и до 34 % суммы оксидов редких земель, а также сфен, относящийся к группе силикатокальциевых минералов титана $CaO \cdot TiO_2 \cdot SiO_2$.

Титановые месторождения находятся в США, ЮАР, Канаде, России (Урал, Кольский полуостров, Забайкалье, Карелия), Норвегии, Финляндии, Австралии, Индии и других странах.

Технический способ производства чистого титана был разработан В. Кроллем, работавшим в Германии и США. Переработка природных титановых концентратов для получения из него чистого титана — очень трудоемкая технологическая операция. По сути дела, это не один, а несколько химико-металлургических переделов концентрата, требующих больших затрат энергии, дорогостоящего оборудования и реагентов. В результате из сравнительно дешевого, довольно распространенного природного сырья получают металл значительно более дорогой, чем сталь, алюминий, магний, свинец, цинк, медь и другие цветные металлы.

Из природных концентратов сразу на хлорирование могут направляться только рутиловые концентраты, содержащие 94–96 % TiO_2. Но этих концентратов сравнительно мало (около 10 % массы всего природного титанового сырья), поэтому в основном на металлургическую переработку идут ильменитовые концентраты, содержащие от 35 до 65 % TiO_2. Хлорировать такие концентраты невыгодно, так как значительная часть хлора пойдет на образование хлоридов других металлов, в основном железа. Поэтому природные ильменитовые концентраты металлургическими методами вначале обогащают до содержания TiO_2 не менее 70–95 %. Такие высокотитановые искусственные продукты полу-

чают двумя путями: химико-гидрометаллургическим переделом ильменитовых концентратов на искусственный рутил, содержащий 95–98 % TiO_2, или электроплавкой концентратов на титановый шлак, содержащий 70–85 % TiO_2.

Технологический процесс производства искусственного рутила состоит в основном из двух переделов природного ильменитового концентрата. Вначале этот концентрат подвергают восстановительному обжигу.

За счет удаления части кислорода из зерен ильменита они становятся пористыми, рыхлыми, их удельная поверхность многократно увеличивается, и реакционная способность повышается. Обожженный концентрат подвергают магнитной сепарации в слабом поле для удаления магнитного железа, а немагнитную фракцию обрабатывают слабым раствором соляной кислоты, в которой растворяется все железо. Нерастворимый остаток после декантации фильтрата, обесшламливания, промывки и сушки представляет собой легкий пористый порошок, в котором содержание TiO_2 составляет не менее 95 %. Полученный порошок искусственного рутила является хорошим сырьем для получения титановой губки.

Наиболее распространенным способом подготовки природных ильменитовых концентратов к хлорированию в целях повышения содержания TiO_2 в исходном сырье является его плавка на шлак.

Для разделения оксидов титана и железа, входящих в состав ильменитовых концентратов, в промышленности используется восстановительная руднотермическая электроплавка этих концентратов. В результате оксиды титана и некоторые элементы-примеси переходят в легкотекучий шлак, а оксиды железа, восстанавливаясь до металла, — в чугун. Затем шлак и чугун легко отделяются друг от друга. Этот процесс имеет значительные преимущества. Во-первых, он может осуществляться в электропечах единичной мощности и производительности, а во-вторых, представляет собой практически безотходное производство, так как дает сразу два товарных продукта — высокотитанистый шлак и легированное титаном и другими элементами железо (чугун).

В отечественной практике для выплавки титановых шлаков используются цилиндрические трехэлектродные руднотермические печи открытого и закрытого типов. Печь представляет собой

ванну, выложенную огнеупорным магнезитовым кирпичом, в которую опущены почти до дна графитированные электроды.

Печь загружают шихтой из тонкоизмельченного концентрата и антрацита. После разогрева шихты до температуры 900–1200 °С она расплавляется, и за 2–3 ч (в зависимости от мощности печи) происходит сначала образование, а затем, в течение 1–1,5 ч, доводка шлака, отстой и перегрев шлака в печи. Затем расплав шлака выпускают в изложницы и через 20–40 мин перевозят для остывания на специальную площадку, где он находится 6–8 ч. Остывшие слитки шлака извлекаются из изложниц мостовым краном и доставляются на склад горячего шлака.

После полного остывания шлак дробится, измельчается и подвергается магнитной сепарации для удаления корольков железа.

Расплавленный железный сплав из нижней части печной ванны разливается в песчаные формы, откуда после охлаждения извлекается, дробится и в железнодорожных вагонах отправляется предприятиям черной металлургии.

Процесс плавки шихты титанового концентрата продолжается 4,5–6,5 ч. В печь загружается примерно 28 т шихты, выход готового титанового шлака составляет 51–52 % загруженной шихты. В шлак извлекается 90–95 % титана.

Для получения четыреххлористого титана диоксид титана смешивают с коксом или древесным углем, в качестве связующего добавляют каменноугольную смолу и из полученной смеси прессуют брикеты. После прокаливания при температуре 800 °С пористые брикеты подвергают хлорированию в герметизированных электрических печах — хлораторах. В реакционной зоне происходит реакция

$$TiO_2 + 2Cl_2 + C = TiCl_4 + CO_2.$$

Преимущество данного метода состоит в том, что хлориды металлов имеют более низкую температуру плавления и кипения, чем оксиды или другие их соединения. Кроме того, хлориды металлов отличаются друг от друга по физическим свойствам: температурам кипения, плавления, сублимации. Это позволяет выделять из сложного по составу природного сырья хлориды различных металлов при более низких температурах, т. е. со

значительной экономией энергозатрат и по более простой технологии.

Хлоратор — стальной цилиндр, внутренние стенки которого выложены особо стойким кирпичом. Сверху через загрузочный бункер и дозатор в хлоратор подают брикеты шихты и с помощью электронагревательных элементов доводят температуру до 800–850 °С. Через специальные хлорные коллекторы в нагретую шихту снизу подают хлор, и в нижнем, нагретом слое шихты начинается процесс хлорирования.

Четыреххлористый титан имеет температуру кипения 136 °С, поэтому он находится в парообразном состоянии. Для отделения от углекислого газа его направляют в конденсатор, где он переходит в жидкое состояние, а затем подвергается очистке от примесей. Очищенный $TiCl_4$ — это бесцветная прозрачная жидкость.

Восстановление титана обычно производят в специальных реакторах. Выбор восстановителя определяется технологическими и экономическими соображениями, наличием соответствующего сырья и опыта производства того или иного металла. Так, в Англии, где магниевое сырье практически отсутствует, но развито производство натрия, титановое производство базируется на натриетермическом способе. А в общем, в мировой практике, в том числе в России, лидирующее положение занимал магниетермический способ получения титана (рис. 99).

Реактор представляет собой герметичную реторту из коррозионно-стойкой стали, имеющую систему слива хлористого магния и помещенную в шахтную электропечь. В реторту загружают слитки чистого магния, затем ее герметизируют, откачивают воздух, заполняют очищенным аргоном и помещают в печь. При температуре около 700 °С магний расплавляется, после чего температуру в реакторе доводят до 800°С и подают жидкий очищенный четыреххлористый титан, который взаимодействует с магнием по реакции

$$TiCl_4 + 2Mg = Ti + 2MgCl_2.$$

Процесс идет с выделением тепла, поэтому электрообогрев выключают. Температуру в реторте регулируют подачей четыреххлористого титана и обдувом воздуха от вентилятора. Температура не должна превышать 950–1000 °С, так как иначе может начаться

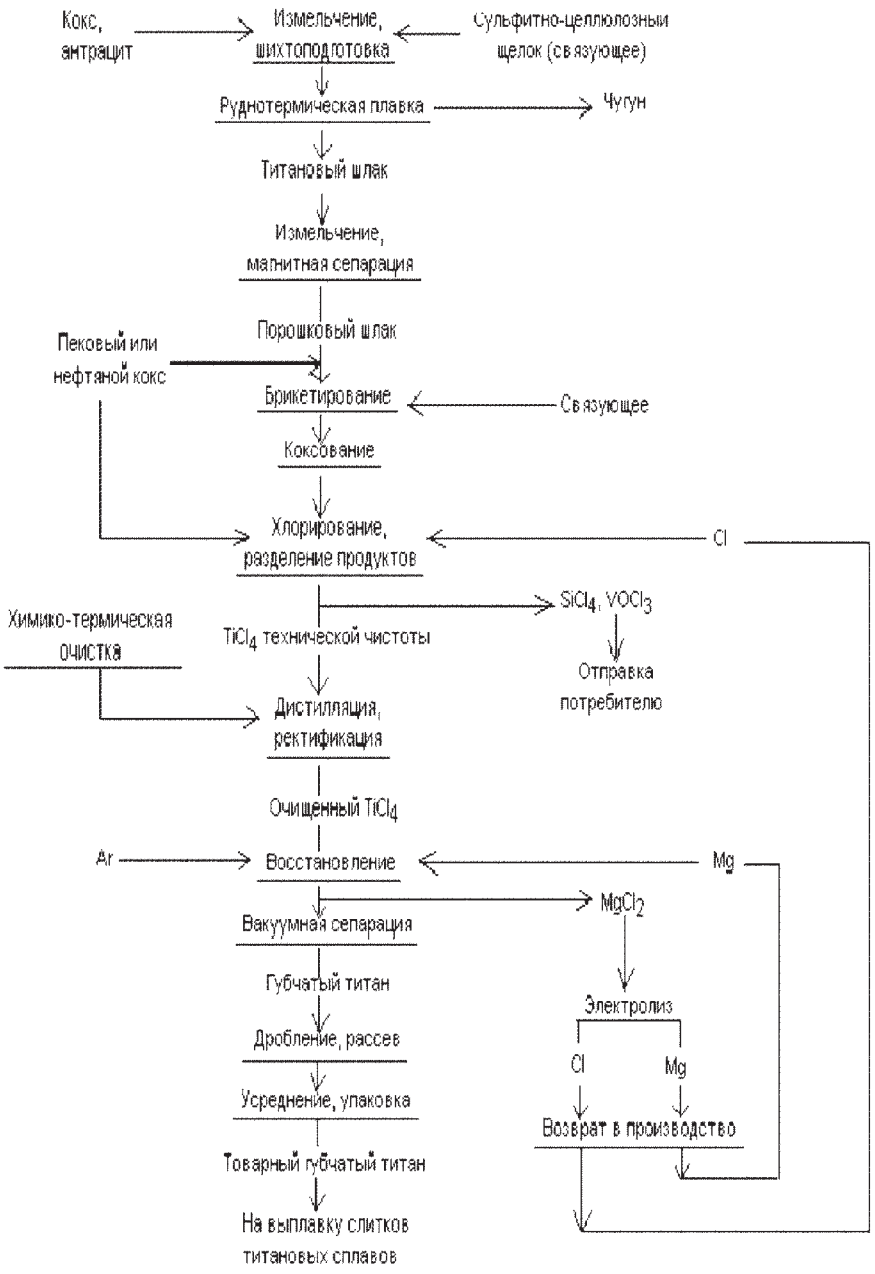


Рис. 99. Общая технологическая схема магниетермического получения титана

взаимодействие титана со стальными стенками реторты. Образующийся жидкий хлористый магний периодически сливают.

Восстановленный титан выделяется на стенках реактора в виде губчатой массы, пропитанной хлористым магнием и магнием. Она содержит около 55–60 % Ti, 25–30 % Mg, 10–15 % $MgCl_2$. Для рафинирования губчатой массы реторту вакуумируют при температуре 900–950 °С в течение 25–40 ч и прово-

дят отгонку паров примесей магния и хлористого магния, которые осаждаются в конденсаторе. Затем реторту охлаждают и извлекают из нее титановую губку, которая представляет собой рыхлую запекшуюся массу пепельно-серого цвета, похожую на застывшую лаву, с многочисленными порами, пустотами, хрупкую, легко крошащуюся на мелкие куски. В целом это уже практически чистый металл, но некомпактный, хрупкий, к обработке непригодный, содержащий остатки хлористого титана. Остатки хлоридов интенсивно поглощают воду из воздуха, что ухудшает качество металла. Поэтому все операции по сбору, обработке губки ведут в помещениях с сухим воздухом, а перевозят ее в герметичных контейнерах.

Титановая губка, очищенная от примесей, является исходным материалом для получения компактного металлического титана в виде слитков, листов, лент, прутков и т. п.

Высокая активность титана по отношению к кислороду и азоту воздуха, а также почти ко всем огнеупорным материалам, обусловила создание специальной вакуумной плавки для получения слитков.

В начале в титановой промышленности применяли только индукционную плавку. Однако вскоре пришлось отказаться от этого способа в связи с трудностями подбора материала тигля, который бы не взаимодействовал с расплавленным титаном.

Наиболее приемлемой оказалась плавка дугой в металлической охлаждаемой форме — кристаллизаторе. В процессе плавления на поверхности кристаллизатора образуется слой твердого металла, который не взаимодействует с материалом формы. Широкое распространение получила дуговая вакуумная плавка с нерасходуемым электродом. В качестве последнего использовали вольфрам или графит. Однако и этот способ плавки оказался непригоден из-за загрязнения переплавляемого металла материалом электрода. Тогда стали применять расходуемый электрод из титановой губки.

Современная технологическая схема производства слитков титановых сплавов включает в себя следующие операции: подготовка шихты, прессование расходуемых электродов, первый пе-

реплав, обработка слитков первого переплава, второй переплав, механическая обработка слитков, контроль их качества.

Подготовка шихты. Для плавки слитков шихта состоит из губчатого титана, лигатур и легирующих элементов в чистом виде, отходов.

Введение легирующих элементов в чистом виде или в виде лигатур определяется в основном возможностью их растворения в металле в процессе плавки. Лигатуры выбирают так, чтобы их температура плавления и плотность в наибольшей степени были близки к этим показателям титана.

В чистом виде применяют следующие легирующие компоненты титановых сплавов: алюминий, марганец, цирконий, железо, кремний, иногда хром. Ванадий, молибден вводят в виде лигатур с алюминием. Применяют также комплексные лигатуры.

Перед использованием в шихте легирующие компоненты измельчают. Хрупкие металлы и лигатуры (хром, марганец, алюминий—молибден, алюминий—ванадий и др.) дробят на щековых или молотковых дробилках. Слитки (чушки) алюминия и лигатуру алюминий—олово переводят в стружку на строгальных станках.

В шихте используют следующие виды отходов: листовую обрезь, кусковые отходы от кованых или прессованных изделий, стружку. Предварительно отходы необходимо измельчить и удалить с их поверхности слой, содержащий повышенное количество газовых примесей. Для этого листовые отходы предварительно травят, измельчают на механических ножницах и эксцентриковых прессах до размеров 60×60 мм и затем обезжиривают. Кусковые отходы куют и рубят в нагретом состоянии на куски размером не более 60×60×80 мм, а затем очищают в галтовочных барабанах для удаления слоя оксидов.

Прессование электродов. Для получения расходуемых электродов применяют порционное прессование в проходную коническую матрицу круглого сечения. Прессование ведут на мощных горизонтальных или вертикальных гидравлических прессах. Применение вертикальных прессов предпочтительнее, так как в этом случае распределение компонентов шихты по горизонтальному и вертикальному сечению электродов более равномерное. Шихта засыпается из бункера по шихтопроводу в лоток-приемник шихты. Пресс-штемпель (пуансон) посредством пресс-

шайбы (надставки) толкает шихту в конусную матрицу, которая установлена в направляющей втулке. Порция шихты спрессовывается, пресс-штемпель отводится в исходное положение, и загружается очередная порция шихты. Для уменьшения усилий прессования матрица подогревается до температуры 250–300 °С. Для того чтобы порции шихты в электроде соединялись между собой, пресс-шайба имеет фигурную поверхность торца.

Состав каждой порции прессования по соотношению компонентов должен соответствовать расчетному составу шихты. Величина порции определяется диаметром прессуемого электрода. Расчетами и на практике установлено, что она должна быть равна 1/2 массы ванны жидкого металла при плавке слитка первого переплава.

Дозирование и подача порции на прессование осуществляются обычно автоматическими устройствами.

Плавление слитков. Выплавку слитков первого и второго переплавов производят в однотипных печах (рис. 98). Основные узлы печи — изложница, поддон, электрододержатель, рабочая камера, вакуумная система.

Плавление слитков происходит следующим образом. Расходуемый электрод загружают в печь и сваривают с огарком. Затем, подняв электрод, зажигают дугу между нижним торцом электрода и поддоном. При выплавке крупных слитков второго переплава на поддон обычно кладут темплет из того же сплава для защиты поддона от прямого воздействия дуги. Конец электрода разогревается дугой до температуры, превышающей температуру плавления, на торце образуются капли жидкого

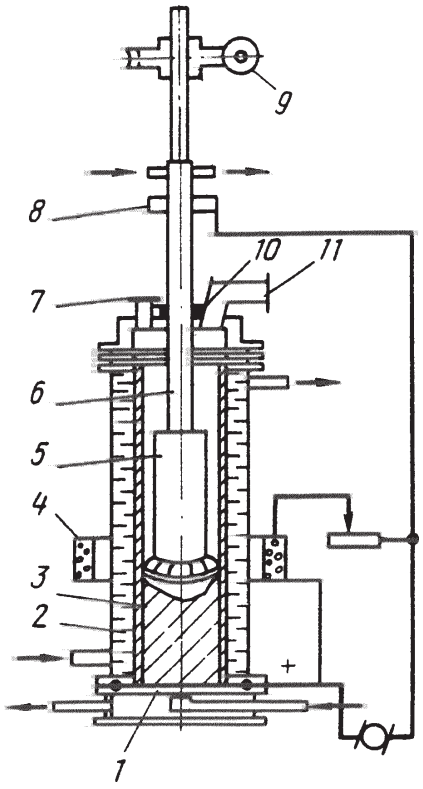


Рис. 98. Схема вакуумной дуговой печи для плавки титана: *1* — поддон; *2* — изложница; *3* — слиток; *4* — соленоид; *5* — расходуемый электрод; *6* — электрододержатель; *7* — смотровое стекло; *8* — токопроводящий контакт; *9* — подающий механизм; *10* — подвижное уплотнение; *11* — патрубок к насосу

металла. Когда масса капли превысит силы поверхностного натяжения, капля отрывается и падает на поддон. Постепенно электрод подают вниз, а слиток нарастает вверх, при этом в верхней части слитка образуется ванна жидкого металла. Таким образом, одновременно идут плавление и кристаллизация слитка.

Слитки первого переплава, выгруженные из печи горячими (400–500 °С), чистят в проточной воде металлическими щетками для удаления возгонов солей с их поверхностей. Затем на токарном станке отрезают корону.

Слитки первого переплава сваривают один за другим внепечной аргоно-дуговой сваркой и используют в качестве расходуемого электрода для второго переплава. В последнее время большое распространение получила технология плавки "слиток в слиток", заключающаяся в использовании для второго переплава длинного слитка первого переплава. Эта технология исключает вредное влияние сварного шва, который приводит к образованию неоднородности в выплавляемых слитках.

Основная задача второго переплава — получение однородного слитка с качественной поверхностью.

Механическая обработка слитков. Полученные двухкратной плавкой слитки обтачивают для удаления поверхностного слоя, который имеет неслитины и поры. Механическую обработку производят на токарных станках резцами с напайками твердого сплава. Зону резания охлаждают сжатым воздухом, чтобы при последующем использовании стружки в шихте ее не приходилось обезжиривать. Высокопрочные сплавы для уменьшения усилий при обточке обрабатывают в горячем состоянии, непосредственно после выгрузки из печи.

Контроль качества слитков состоит из определения химического состава выплавленного металла, испытания его механических свойств и ультразвукового контроля, выявляющего внутренние дефекты в металле.

К качеству губчатого титана предъявляются высокие требования. Параметры качества — концентрация основных примесей (железо, углерод, кислород, азот, кремний, никель, хлор), твердость, фракционный состав, отсутствие или наличие кусков с дефектными включениями, однородность металла товарной партии.

Одно из самых жестких требований — полное отсутствие в товарных партиях металла кусков губчатого титана с дефектами, отличающимися по цвету или яркости от технически чистого титана. Это различие в окраске и оттенках возникает вследствие повышенной концентрации примесей, особенно азота и кислорода. Куски губчатого титана с дефектами подразделяются на пять видов: 1) горелые (слои оксида или оксинитрида); 2) окисленные (ярко выраженные цвета побежалости, от желтого до синего); 3) имеющие налеты или включения хлоридов; 4) шламистые; 5) обогащенные железом и сопутствующими элементами (со следами оплавления и образованием плотной литой структуры ферротитана).

Контроль отсутствия дефектных кусков осуществляют на сортировочном транспортере вручную на основе визуального сравнения с образцами.

Технологический процесс переработки блоков губчатого титана в товарную продукцию организуют по принципу поточного производства с механизацией трудоемких подготовительных и заключительных операций.

Учитывая особенности строения губчатого титана, его физико-химические и механические свойства, при его переработке в товарную продукцию необходимо выполнять следующие условия:

1) предотвращать контакт губки и ее кусков с возможными источниками загрязнения: окалиной, маслом с оборудования, обломками инструмента, грязью на транспортных средствах и пр.;

2) рационально разделывать блок губки на категории, отличающиеся качеством;

3) предотвращать смешивание разных категорий дробленой губки, различающейся химическим составом и однородностью;

4) предотвращать россыпь губки; защищать движущиеся и трущиеся части механизма от попадания мелких кусочков губки и титановой пыли;

5) ограничивать крупность кусков, направляемых на каждую стадию измельчения (организация работы дробильных установок в замкнутом цикле).

С целью совершенствования процесса сортировки разработаны методы фотометрической сортировки, основанные на бесконтактном измерении физических свойств (коэффициент отражения, яркость, коэффициент термо-ЭДС).

Фотометрическая сортировка включает в себя ряд операций: подача куска в зону осмотра, освещение всей его поверхности, преобразование полученного результата в электронный сигнал, сравнение полученного сигнала с граничной величиной разделения металла, выдача сигнала на соответствие или несоответствие оптического свойства регламентированному для товарной продукции, удаление некондиционного куска.

Наибольших успехов в автоматизации титанового производства было достигнуто в управлении локальными технологическими процессами (восстановление и сепарация). В то же время актуальны задачи по управлению технологическим переделом, комплексом и группой агрегатов основного производства.

Рассмотрим схему материальных потоков в цехе (рис. 100). В отделение восстановления поступают жидкий Mg, $TiCl_4$ и готовые смонтированные аппараты восстановления. Из отделения увозят периодически сливаемый $MgCl_2$. Аппараты восстановления, в которых закончен процесс, без охлаждения (при 800–900 °С) передают на монтажный участок, где монтируют сверху оборотные (пустые) реторты. Полученные аппараты сепарации загружают далее в печи. После окончания сепарации аппараты передают в холодильники, а после охлаждения — опять на монтажный участок, где аппарат разделяют на оборотную реторту с конденсатом и реторту с титановой губкой. Первую

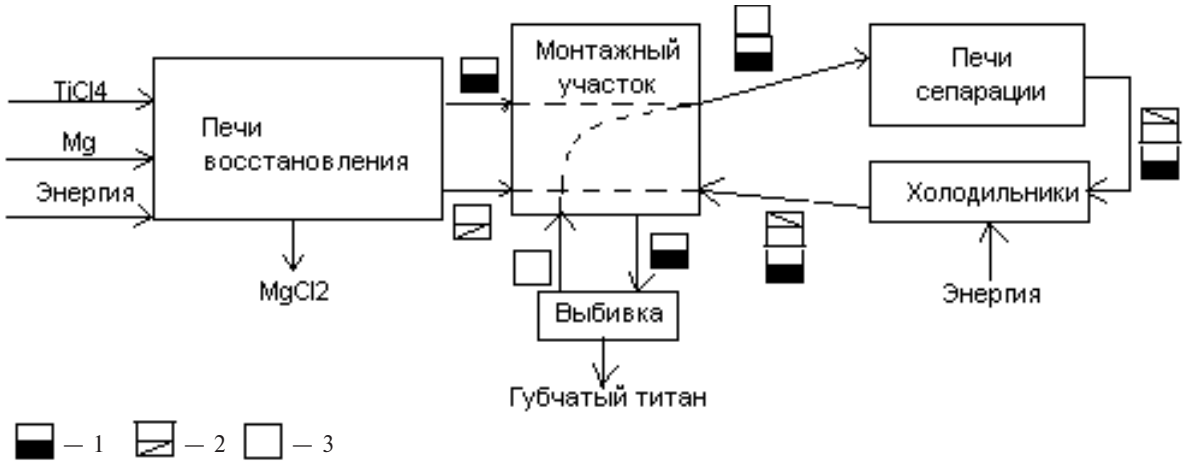


Рис. 100. Схема материальных потоков в цехе восстановления титана:
1 — пустая реторта; *2* — реторта с титановой губкой;
3 — оборотная реторта с конденсатом

транспортируют для подготовки очередного аппарата восстановления, а второго — на участок выбивки. После выпрессовки титановой губки пустые реторты передают на монтажный участок для подготовки новых аппаратов сепарации.

Специфика и сложность рассмотренного производства свидетельствуют о том, что для нормальной организации работы в цехе необходимо внедрение экономико-математических методов управления.

Применение титана

Титан называют вечным, космическим, металлом века. Он оправдывает эти названия, поскольку может применяться в различных областях техники, промышленности, медицины, быту благодаря своим уникальным свойствам.

Авиация, ракетостроение, космическая техника. Когда в конце 40—начале 50-х гг. XX в. стали создаваться реактивные самолеты со звуковыми и сверхзвуковыми скоростями, возникла необходимость в новом конструкционном материале для корпусов, обшивки, двигателей. Благодаря титану самолеты становятся легче, а значит, увеличивается их грузоподъемность.

Широко используется титан в пассажирских сверхзвуковых и сверхвместительных самолетах — аэробусах. Без применения титановых сплавов, значительно облегчивших массу самолета, создать такие гигантские аэробусы было бы практически невозможно.

Из титановых сплавов изготовляют обшивку фюзеляжа, крепежные детали, детали шасси, силовой набор (шпангоуты, лонжероны и другие элементы жесткости). Необходимо отметить, что применение титановых сплавов в летательных аппаратах диктуется еще и температурным режимом эксплуатации. Так, при скорости, которая в три раза превышает скорость звука, передние кромки плоскости нагреваются до температуры 300 °С и выше. Это предельная температура эксплуатации для алюминиевых сплавов. При более высокой температуре теряется прочность. Титановые сплавы в этих условиях в 15 раз прочнее алюминиевых.

Американские космические корабли “Аполлон” содержали 60 т различных деталей и агрегатов, сделанных из

титана и его сплавов. Каждый из них насчитывал около 40 титановых емкостей с различными химически активными компонентами. Цилиндры, хранящие под давлением 200 атм воздух для вентиляции кабины, тоже были сделаны из титана. Лунный модуль, отделявшийся от космического корабля "Аполлон" и опускавшийся на поверхность Луны, имел титановую камеру сгорания жидкостного ракетного двигателя. Почти полностью из титана и его сплавов были сделаны кабины первых космических кораблей США серии "Меркурий", запускавшихся в космос в 1961–1963 гг., и "Джемини" (1964–1965).

В ракетостроении первыми выполненными из титановых сплавов деталями были баллоны сжатого воздуха. Их конструкция оказалась легче на 30 %. В настоящее время из сплавов титана изготовляют корпуса ракет, силовой набор, топливные баки и некоторые детали двигательной установки и корпуса двигателей твердого топлива.

Судостроение. Малая плотность, феноменальная коррозионная стойкость металла и его сплавов в морской воде, стойкость к эрозии и кавитации делают их незаменимыми материалами для обшивки судов, производства деталей насосов, трубопроводов и других целей морского судостроения.

Из чугуна, нержавеющей стали и титана изготовили три насоса для перекачки агрессивных жидкостей. Первый был "съеден" через 3 суток, второй продержался 10 дней, а третий (титановый) и через полгода непрерывной работы оставался цел и невредим.

Малая плотность позволяет снижать массу корабля, что повышает его маневренность и дальность хода. Обшитые листами титана корпуса судов никогда не потребуют окраски, так как они десятилетиями не ржавеют и не разрушаются в морской воде. Эрозионная и кавитационная стойкость позволит в море судам набирать большие скорости: взвешенные в морской воде мириады песчинок не страшны титановым рулям, винтам, корпусу.

На подводных лодках титан используется для изготовления различных деталей палубной арматуры, антенн, приборов, рукояток, постоянно погруженных в морскую воду. Они способны

служить вечно, не требуя покраски и ремонта. Возможно широкое использование титана для строительства обитаемых экспериментальных жилищ под водой.

Слабые магнитные свойства титана и его сплавов позволяют применять их для создания самых разнообразных навигационных приборов, устранять девиацию, т. е. влияние металлических частей корабля на навигационные приборы. Так, участники арктической экспедиции газеты "Советская Россия", преодолевшие в 1983 г. на собачьих упряжках более 10 тыс. км по побережью Ледовитого океана, везли на немагнитных титановых нартах уникальный прибор — магнитометр для работы в условиях Севера.

Перспективной областью применения сплавов титана является глубокое и сверхглубокое бурение. Благодаря применению труб из такого материала скважины могут достигать глубины более 20 км.

Машиностроение. Из титановых сплавов серийно изготавливаются запорная и перекачивающая аппаратура, предназначенная для работы с высокоагрессивными жидкостями и парогазовыми смесями. Это различные башни из листового титана, специальной конструкции адсорберы — барботажные, ректификационные, распылительные и др.

Широко используются титан и его сплавы при изготовлении теплообменной аппаратуры, применяемой в промышленности для подогрева, кипячения, испарения, конденсации и охлаждения различных агрессивных сред — жидких, газо-, паро-, пастообразных и даже твердых. Выпускают теплообменники с самой различной площадью теплообмена — от 2 до 160 м^2, холодильники — от 30 до 150 м^2. Для всех типов этих аппаратов титан и его сплавы позволяют повысить коррозионную стойкость и эффективность теплообмена при минимальной толщине стенок.

Эффективно использование титановых сплавов в фильтровальных аппаратах. Так, применение в автоматических фильтр-прессах деталей, соприкасающихся с агрессивной средой, из титановых сплавов повышает производительность единицы фильтрующей поверхности в 4–15 раз. При этом титановые фильтр-прессы могут использоваться для фильтрации суспензий с температурой до 300–350 °С и с использованием взвешенных частиц от 5 до 600 г/м^3. Из

титановых сплавов выпускаются также дисковые и ленточные вакуум-фильтры, патронные, керамические фильтры для осветительной и сгустительной фильтраций.

Используются сплавы титана и в автомобилестроении. В производстве гоночных автомобилей такие сплавы применяются уже много лет. Это детали шатунно-поршневой группы, крепежные детали, несущая рама и т. д. Замена стальных деталей на титановые снижает инерционные нагрузки (для вращающихся деталей), увеличивает срок службы вследствие лучшей коррозионной стойкости, уменьшает массу, дает экономию горючего и ряд других положительных эффектов.

Широкое применение получил титан при производстве твердых сплавов для режущих инструментов. Тончайшее покрытие из карбида титана значительно повышает режущие свойства инструмента, улучшает качество поверхности обработанных изделий.

Титановое оборудование эксплуатируется в самых трудных режимах работы, в агрессивных средах и длительное время не требует замены. В черной металлургии оборудование из титана применяется в коксохимических, металлургических, сталеплавильных и ферросплавных производствах. Например, срок службы труб-нейтрализаторов из титана 5–10 лет, а из углеродистой стали — 0,5–1,5 года.

В травильных участках сталепрокатных, трубопрокатных и других цехов, где удаляется окалина с поверхности металлов, оборудование из нержавеющей стали выдерживает всего два-три года эксплуатации, а из титана — в несколько раз больше. Срок службы титановых трубопроводов травильных участков — десятки лет, скорость коррозии титановых труб травильными растворами составляет всего 0,01–0,05 мм/год. Вообще, металлургия — один из основных потребителей титана. Можно насчитать сотни марок сталей и сплавов, в состав которых в том или ином количестве входит этот элемент. В нержавеющие стали его вводят для предотвращения межкристаллитной коррозии. В жаростойких высокохромистых сплавах он уменьшает размер зерна, делая структуру металла однородной и мелкокристаллической. В других жаростойких сплавах титан служит упрочняющим элементом.

Высокое сродство титана с кислородом позволяет использовать его для раскисления стали: по раскислительной способнос-

ти титан примерно в 10 раз превосходит кремний — один из основных раскислителей. Такова же роль титана и по отношению к азоту. Очистка стали от газов повышает ее механические свойства, улучшает коррозионную стойкость.

В цветной металлургии титан успешно применяется во многих производствах. Наибольшее распространение имеет титановое оборудование на предприятиях никель-кобальтовой и титано-магниевой подотраслей. Здесь используется около 200 наименований различных аппаратов и установок из титана (емкостей, автоклавов, реакторов, экстракторов, насосов, вентиляторов). Отстойники шламов, поступающих с титановых хлораторов, газоходы и другое титановое оборудование имеют срок службы в 20—30 раз больший, чем стальное. Практически на всех титано-магниевых заводах трубопроводы, насосы, вентили и другое стандартное оборудование — из титана.

В медной подотрасли цветной металлургии титаном заменяются другие металлы в фасонных частях кислотопроводов, деталях насосов и электрофильтров; отстойники, промывные башни, запорная арматура, циклоны и другое оборудование изготовлены из титана.

В производстве свинца и цинка применяются титановые вентиляторы, газоотходы, дроссели, детали электрофильтров, а при производстве цинка, кроме того, электролитные ванны из титана, насосы, трубопроводы, емкости, змеевики-теплообменники.

Большим разнообразием технологических процессов и агрессивных сред отличается производство вольфрама и молибдена. В реакторах непрерывного осаждения оксида молибдена вместо стальных гуммированных труб для охлаждения применяются титановые, срок службы которых во много раз дольше. Используются также атмосферные одновальцовые сушилки из титана, титановые детали к рукавным фильтрам, центробежные насосы и вентиляторы, поддоны к рамным фильтр-прессам. В гидрометаллургическом производстве вольфрамового ангидрида и молибдено-кислого аммония применяются центробежные насосы из титана при перекачке горячих (80 °С) солянокислых пульп. С содержанием 40—45 г/л соляной кислоты эксплуатируются титановые трубопроводы, газоходы, вентиляторы, работающие в парах соляной кислоты, используют-

ся титановая баковая и теплообменная аппаратура, бункера, поддоны, решетки и др.

При производстве ртути успешно работают в течение многих лет титановые конденсаторы, в которых происходит улавливание ртути из обжиговых газов трубчатых печей кипящего слоя. Конденсационная система из стали, работающая в среде кислоты при температуре 200–300 °С, не выдерживает обычно одного-двух лет, в то время как титановая работает несколько лет.

Широко применяется титан и при обработке цветных металлов, главным образом для изготовления травильного оборудования. Ведь почти все полуфабрикаты цветных металлов (ленты, листы, прутки, трубки и т. п.) после прокатки, прессования, штамповки подвергаются травлению в горячей 5–15 %-ной серной кислоте, и нет лучшего материала для травильных ванн, чем сплавы титана.

Высокая коррозионная стойкость позволила широко внедрить титан в **целлюлозно-бумажную**, **пищевую** и **нефтехимическую промышленность**.

Основные процессы целлюлозно-бумажного производства — получение вторичной кислоты, варка сульфитной целлюлозы, приготовление белильных растворов, отбеливание целлюлозной массы — требуют оборудования и аппаратов со специальной антикоррозионной защитой. Многие из них очень сложны в изготовлении и недолговечны.

В пищевой промышленности, где коррозия недопустима как по техническим соображениям, так и по требованиям санитарно-гигиеническим, титановые сплавы успешно заменяют нержавеющие стали типа Х18Н9Т. Несмотря на сравнительно высокую стоимость титановых сплавов (цена титановых сплавов на порядок выше, чем сталей типа Х18Н9Т), применять их экономически выгодно: они, как правило, повышают долговечность изделия в 1,5–2,0 раза.

В отечественной химической промышленности сплавы титана начали применять с 1960 г. Это, прежде всего, оборудование, используемое в производстве кислот и аммиака, в перегонке нефти (емкостная и теплообменная аппаратура, фильтры, насосы, детали трубопроводных систем, запорные и регулирующие устройства, ректификационные колонны, выпарные аппараты

и другие сборочные единицы, работающие в особо агрессивных средах). Сплавы титана в химической промышленности нашли применение более чем в 100 отраслях производства.

В нашей стране и за рубежом действуют десятки тысяч опреснителей морской воды различных конструкций.

В **энергомашиностроении** используются титановые сплавы для производства роторов и лопаток турбин, дисков компрессов, кожухов камер сгорания, трубопроводов.

Например, применение титановых шатунов, обладающих лучшей, чем стальные, удельной прочностью, позволяет снизить на 30 % нагрузки на шатунные подшипники. Тем самым значительно повышается их надежность и долговечность, на 20 % уменьшается усилие на элементы крепления (болты, шпильки) прицепного шатуна, несущего большую нагрузку. В клапанных механизмах детали из титановых сплавов снижают напряжение в них на 25 %, уменьшают силу удара клапана на 30 %, увеличивают запас усилия пружин по отношению к силам инерции с 1,6 до 2,1.

Титан и его сплавы используются в **медицинской промышленности** для изготовления не только хирургических инструментов, но и наркозно-дыхательных аппаратов, искусственных сердца, легких, почек, защитных устройств радиологической аппаратуры.

Из титановых сплавов изготавливаются зажимы, пинцеты, крючки, зеркала, ранорасширители, щипцы, детали наружных и внутренних протезов, стержни, спицы, гвозди, болты, скобы, внутрикостные фиксаторы, а также протезы бедренных костей, тазобедренных суставов и челюстно-лицевых костей.

Главное преимущество титановых хирургических инструментов — легкость, коррозионная стойкость в любых средах и высокие стерилизационные свойства. Наборы таких инструментов незаменимы в экспедиционных условиях: во время плаванья, в море, в военно-полевых условиях. Особо ценными свойствами титановых инструментов для медицины являются их устойчивость к морской воде, по составу похожей на человеческую лимфу, ко всем стерилизующим агентам (перекись водорода, фенол, формальдегид и др.) и инертность к биологической среде.

Врач Юрий Сенкевич — участник интернациональной экспедиции под руководством известного норвежского путешественника Тура Хейердала на папирусном судне "Ра" — брал с собой титановые хирургические инструменты.

Титан хорошо переносится человеческим организмом, обрастает костной и мышечной тканью, не корродирует в агрессивных средах человеческого тела (в лимфе, крови, желудочном соке), структура окружающей титановый элемент ткани не изменяется на протяжении десятилетий.

Главными потребителями титана являются **лакокрасочная промышленность**, использующая 60–65 % производимой двуокиси титана, **бумажная промышленность** (12–16 %) и **производство пластмассы** (10–14 %). Остальное используется химической промышленностью для производства химволокна, резинотехнических изделий, искусственной кожи.

Титановые белила — самые лучшие водоэмульсионные краски и эмали — обладают высокой кроющей способностью, яркостью, сохранностью цвета длительное время.

Двуокись титана применяют в изготовлении бумаги высших сортов для словарей, энциклопедий, каталогов высокой степени белизны и непрозрачности, тонких и легких видов. Кроме того, пигментная двуокись титана годится для производства силикатных эмалей, глазурей и тугоплавких стекол, фарфоровых масс и люминесцентных покрытий, она входит в состав высших сортов мыла, медицинских и косметических препаратов, применяется в стоматологии при изготовлении искусственных зубов с особой белизной, может служить исходным сырьем для получения искусственных драгоценных камней типа фабулита (титанат стронция), не отличимых по своим оптическим свойствам от алмаза.

Двуокись титана, являясь хорошим изолятором, может применяться в электрорадиотехнике. Кроме того, этот ускоритель химических реакций используется при переработке нефти и в химическом производстве. Двуокись титана используется также для покрытий сварочных электродов, дающих высокое качество сварки вследствие хорошей защиты сварочной дуги от вредного воздействия воздуха.

Первым опытом применения титана в художественных целях является облицовка обелиска в честь запуска первого

в мире искусственного спутника Земли, осуществленного в нашей стране.

В 1980 г. в Москве воздвигнут памятник Юрию Гагарину — 12-метровая фигура первого космонавта планеты на высокой колонне-постаменте и модель космического корабля “Восток”, на котором был совершен исторический полет, выполнены из титана.

Двадцативосьмиметровый монумент, символизирующий стремление человека проникнуть в космические дали, украшает парк Дворца наций в Женеве. Колокола, отлитые из этого металла, обладают необычным, очень красивым звучанием. Применяется титан в колокольчиках для электрозвонков.

Одна из областей применения титана связана с его удивительным свойством — “памятью”. Сплав, обладающий таким эффектом, носит название “нитинол” и содержит 50 % титана и 50 % никеля. Впервые такой сплав был использован в антеннах для искусственных спутников Земли. Многометровая антенна обрабатывается при определенной температуре и затем в свернутом состоянии (например, намотанная на катушку) устанавливается на спутнике. В космосе солнце нагревает антенну, и сплав, “вспоминая” форму, которую ему придали на земле при обработке, в точности принимает ее. Медики используют это свойство для бескровных операций на сосудах: в больной, суженный сосуд вводится проволочка из титанового сплава, а потом она, разогреваясь до температуры тела, скручивается в первоначальную пружинку и расширяет сосуд.

Были созданы наборы инструментов, предназначенных для извлечения камней из мочеточников и желчных путей, а также инородных тел из других внутренних органов. Клиническая практика доказала высокую эффективность таких устройств по сравнению с ранее известными методами. Кроме того, эффекты обратимого изменения формы и обратной памяти используют для оптимизации цикла работы теплового двигателя. Из таких сплавов изготовлены рабочие элементы устройств для преобразования тепловой энергии в механическую работу.

Титан также применяется:

в **атомной энергетике** (оболочки реакторов на быстрых нейтронах, конструктивные детали ядерных реакторов с водяным охлаждением, футеровка реакторов тонкими пористыми или

перфорированными листами титана, электроды в плазменных установках);

в **приборостроении** (нетускнеющие зеркала телескопов, затворы кино- и фотокамер, мембраны телефонов, гибкие трубки для бронирования кабелей);

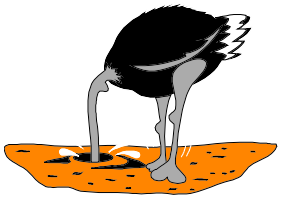
в **электронике** (создание вакуума в электронно-лучевых трубках, катоды поляризационных электролитических конденсаторов, сетки электронных ламп с минимальной эмиссией, тонкопленочные интегральные схемы и тонкопленочные конденсаторы; электронные трубки микроскопических размеров);

в **военной технике** (опорные плиты минометов, лафеты, кронштейны, станки орудий, пламегасители, атомные орудия малой мощности, облегченная броня, равная по снарядостойкости стальной броне, детали танкостроения, многие виды оружия и снаряжения для десантных войск);

в **экспедиционном и спортивном снаряжении** (инвентарь для антарктических и других экспедиций, снаряжение для альпинистов и пожарных, ружья для подводной охоты, мачты гоночных яхт, лыжные палки, теннисные ракетки, шары и клюшки для гольфа и др.);

в **бытовой технике и приборах** (кухонные приборы, садовые инструменты, шариковые и перьевые авторучки).

Развитие порошковой металлургии титановых сплавов, и в частности порошковой металлургии переохлажденных расплавов, привело к созданию основы для новых жаропрочных и конструкционных титановых сплавов с повышенным комплексом свойств, а также дисперсно-упроченных сплавов и композиционных материалов на титановой основе.



7. ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Почти всякая цель достигается окольными путями, а прямая дорога к ней делается ясной для ума лишь тогда, когда цель достигнута.

И. Сеченов

Первые опыты получения железа из окалины в нашей стране относятся к XVIII в. Возрождение технологии порошковой металлургии связано с именем М.В. Ломоносова, построившего в Усть-Рудице фабрику по производству цветных стекол, мозаичных смальт, бисера и стекляруса. Для их окрашивания использовали порошки цветных металлов. Им было проведено свыше 2000 опытов при подборе составов для мозаичных смальт различных расцветок и тонов. В созданной М.В. Ломоносовым физико-химической лаборатории (первой в мире) проводились исследования по изучению механизма разрушения твердых тел, размолу их в порошок.

7.1. ПРОДУКЦИЯ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Порошковой металлургией называют область техники, содержащую в себе методы изготовления порошков металлов и металлоподобных соединений, полуфабрикатов и изделий из них или их смесей с неметаллическими порошками без расплавления основного компонента. Она занимает особое место в отраслевой структуре экономики страны, так как включает в себя последовательное осуществление в едином цикле операций получения порошка и формирования его в изделие.

К преимуществам порошковой металлургии относятся:

• сокращение потерь металла до 3–7 % (при металлообработке и прокатке в стружку теряется до 50–70 % металла);

• повышение химической однородности порошков, способствующее улучшению служебных свойств сложнолегированных сталей и сплавов и надежности изделий из них;

• возможность получения изделий со специальными, часто уникальными свойствами (новое поколение керамических и композиционных материалов), чего нельзя добиться другими методами;

• снижение трудозатрат за счет сокращения количества работающих и трудоемкости производства (вместо 30–40 производственных операций необходимо всего 4–6);

• высвобождение металлорежущих станков, поскольку отсутствует необходимость в механической обработке;

• снижение энергозатрат на выпуск единицы продукции (при производстве 1 т порошковых изделий расход электроэнергии составляет 3200–3500 кВт·ч, а при традиционном литье и последующей мехобработке — 3600–5900 кВт·ч);

• возможность соединения металлических и неметаллических порошков, чего нельзя добиться, используя, например, плавление (из-за разных температур плавления материалов);

• увеличение срока службы изделий за счет порошковых покрытий (1 т металлического порошка, израсходованного на создание износостойких и жаростойких покрытий, сохраняет до 40–50 т стали, чугуна и цветных металлов);

• снижение загрязнения окружающей среды (газов, вредных выбросов).

Порошковая металлургия имеет и недостатки, тормозящие ее развитие: сравнительно высокая стоимость металлических порошков; необходимость спекания в защитной атмосфере, что также увеличивает себестоимость изделий порошковой металлургии; трудность изготовления в некоторых случаях изделий и заготовок больших размеров; сложность получения металлов и сплавов в компактном состоянии; необходимость применения чистых исходных порошков для получения чистых металлов.

Методами порошковой металлургии изготовляют антифрикционные детали узлов трения приборов и машин (втулки, вкла-

дыши, опорные шайбы, подшипники и т. д.); конструкционные детали (шестерни, кулачки и др.); фрикционные детали (диски, колодки и др.); инструментальные материалы (резцы, пластины резцов, сверла и др.); электротехнические детали (контакты, магниты, ферриты, электрощетки и др.) для электронной и радиотехнической промышленности; композиционные (жаропрочные и др.) материалы; пористые ленты для производства фильтров тонкой очистки, пористые полосы для изготовления уплотнительных элементов компрессоров, газовых турбин и для воздушных лабиринтов сопловых аппаратов, работающих при температуре 900 °С; пластины и ленты из различных металлов.

Методы порошковой металлургии начали разрабатывать в XX в. для металлов, не допускающих обработки обычными способами. Например, вольфрам невозможно плавить и обрабатывать обычными методами литья, так как температура его плавления очень высока (3410 °С). Поэтому вольфрамовую нить для электрических ламп накаливания вытягивают из вольфрамовых штапиков, полученных прессованием и спеканием вольфрамового порошка. Порошки карбидов вольфрама, тантала и титана смешиваются с порошкообразным кобальтом и никелем, затем формуются холодным прессованием и спекаются. В итоге получают металлокерамические материалы (цементированные карбиды) для обработки металлов резанием и бурения горных пород. Самосмазывающиеся бронзовые подшипники могут быть изготовлены только методом порошковой металлургии.

Широта номенклатуры продукции порошковой металлургии обусловливает сложную систему ее классификации, предусматривающую несколько уровней разнородных признаков в классификации видов продукции (рис. 101).

На верхнем уровне выделяются пять классов продукции: порошок, прокат, заготовка, деталь, материалы специального назначения.

Включение сюда наряду с изделиями особого класса “**Порошок**” вызвано использованием непосредственно порошка как товарной продукции порошковой металлургии. Металлические порошки применяют для нанесения износо- и коррозионно-

Рис. 101. Классификация продукции порошковой металлургии

стойких покрытий, используют как сырье для сварочной технологии и специальных видов печати, как вспомогательный материал в процессах сепарации семян, как элемент магнитных порошковых муфт и др.

Класс “**Порошок**” делится на группы, отличающиеся способом получения. В свою очередь, группы включают в себя разновидности, учитывающие варианты способов получения порошков. Порошки разных марок характеризуются различным химическим и гранулометрическим составом.

Класс “**Прокат**” в зависимости от сферы назначения также делится на группы. Каждая из групп подразделяется на типоразмеры в зависимости от марки порошка и размеров проката. Типоразмеры проката могут отличаться видом используемых легирующих добавок к порошку основной марки.

Класс “**Заготовка**” объединяет группы однородной и биметаллической заготовок. В зависимости от применяемого технологического процесса пластической обработки различают разновидности заготовок. На следующем уровне классификатора в составе разновидностей выделяют типоразмеры заготовки.

Наиболее широким классом изделий порошковой металлургии является класс “**Деталь**”. В его состав входят группы с учетом производственного назначения. Классификационными признаками внутри групп деталей служат пористость, используемый материал и конфигурация.

В классе **материалов специального назначения**, включающем в себя инструментальные материалы, пористые проницаемые изделия, а также изделия из уплотнительных, тугоплавких и твердых износостойких материалов, наиболее представительной является группа инструментальных материалов, используемых для изготовления металлорежущего, бурильного и прессового инструмента, а также деталей, работающих в условиях интенсивного изнашивания.

Технологический процесс производства изделий методом порошковой металлургии состоит из следующих основных операций: получение металлического порошка или смеси порошков разнородных материалов, формование, спекание и дополнительная обработка порошковых заготовок и изделий.

7.2. ПРОИЗВОДСТВО ПОРОШКОВ

Металлический порошок — совокупность частиц металла, сплава или металлоподобного соединения размерами до миллиметра, находящихся во взаимном контакте. Производство металлического порошка является первой из основных технологических операций, характеризующих сущность порошковой металлургии.

В промышленном масштабе изготавливаются порошки таких металлов, как железо и его сплавы, никель, медь, кобальт, алюминий, титан, олово, цинк, свинец, магний, вольфрам, молибден, тантал, ниобий и др. Размеры частиц порошка обычно составляют от 0,1 мкм до 0,1 мм. Более крупные фракции называются гранулами, а более мелкие — пудрой.

Основные свойства порошков условно можно разделить на две группы: частные (форма, удельная поверхность, плотность и химический состав) и общие (гранулометрический состав, сыпучесть, насыпная плотность, прессуемость, формуемость, плотность утряски, коэффициент межчастичного трения).

Существуют различные методы производства порошков, при этом условно принято их подразделять на физико-химические и механические. **Физико-химические методы** связаны с глубокими физико-химическими превращениями исходного сырья, к ним относятся методы восстановления, электролиз и термическая диссоциация карбонилов. В результате получаемый порошок по химическому составу и структуре существенно отличается от исходного материала.

Механические методы обеспечивают превращение исходного материала в порошок без существенного изменения его химического состава. Чаще всего применяют размол, дробление, обработку металлов резанием, диспергирование расплавов (распыление и грануляцию).

При выборе метода получения металлического порошка необходимо учитывать требования, предъявляемые к изготавливаемой из него конечной продукции, себестоимость порошка и стоимость дальнейшей переработки в изделие. Поскольку основными способами получения порошков являются распыление, восстановление и механическое измельчение, кратко рассмотрим суть этих методов.

Распыление и грануляция жидких металлов является наиболее простым и дешевым способом изготовления порошков металлов (алюминия, железа, сталей, меди, цинка, свинца, никеля и др.) с температурой плавления до 1600 °С. Процесс характеризуется высокими производительностью (до 10 т/ч), технологичностью, степенью автоматизации и экологической чистотой, сравнительно малыми энергозатратами.

В зависимости от свойств расплава и требований к качеству порошка распыление производят разными способами, которые различаются по **виду энергии** для его создания (нагрев индукционный или косвенный, электродуговой, электронный, лазерный, плазменный и др.), **виду силового воздействия** на него при диспергировании (механическое, энергия газовых и водяных потоков, силы гравитационные, центробежные или магнитогидродинамические, воздействие ультразвука и т. д.) и **по типу среды** для его создания (восстановительная, окислительная, инертная, вакуум или какая-либо иная среда заданного состава).

Распыление воздухом — самый экономичный способ изготовления порошков, при этом охлаждающей средой для распыленной струи может быть вода, газ, органическая жидкость (рис. 102, 103). При различных условиях проведения процесса получают частички порошка разных форм: каплеобразной, шарообразной и др. размером от 0,01 до 1 мм.

При **бесконтактных методах** распыления расплава чаще используют мощные импульсы тока или электромагнитные поля. При этом ток большой силы, проходя по тонкой металлической проволоке, мгновенно ее нагревает, и она распыляется с разлетом капель со скоростью до 1000 м/с.

Восстановление оксидов является одним из распространенных методов получения металлических порошков. Восстановление — это процесс превращения оксида в элемент или низший оксид путем отнятия кислорода при помощи другого вещества — восстановителя. При исследовании процесса получения восстановленного железного порошка необходимо выделять две основные стадии: получение губчатого железа и выпуск железного порошка. На первой стадии заданным в переработку материалом является восстанавливаемое сырье, на второй — полученное ранее губчатое железо (рис. 104).

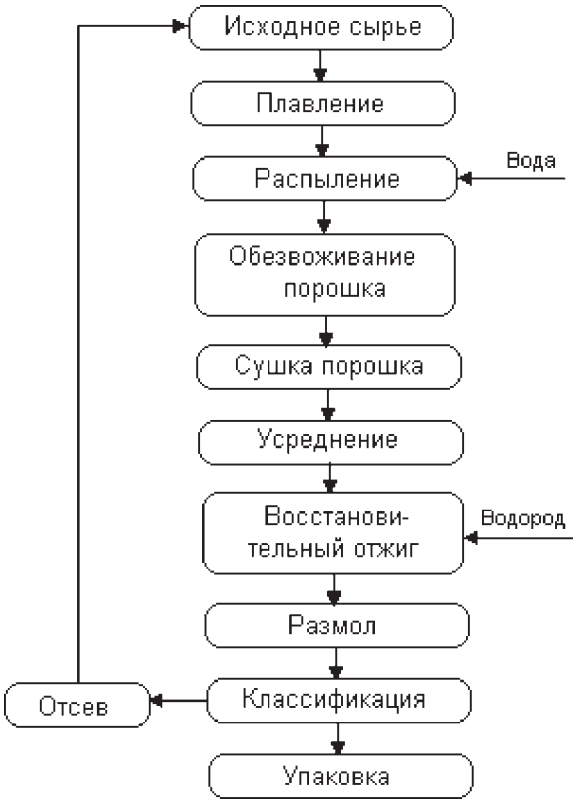


Рис. 102. Технологическая схема получения железных порошков распылением жидкого металла водой

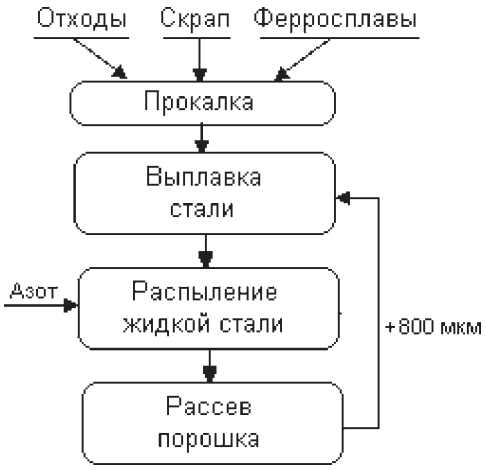


Рис. 103. Технологическая схема получения порошка распылением расплава азотом высокого давления

Около 80 % мирового производства металлических порошков составляют порошки железа и сплавов на его основе. Химически чистые оксиды железа в качестве сырья применяют редко, только для изготовления некоторых специальных материалов, так как получаемый в этом случае железный порошок очень дорог. Самым

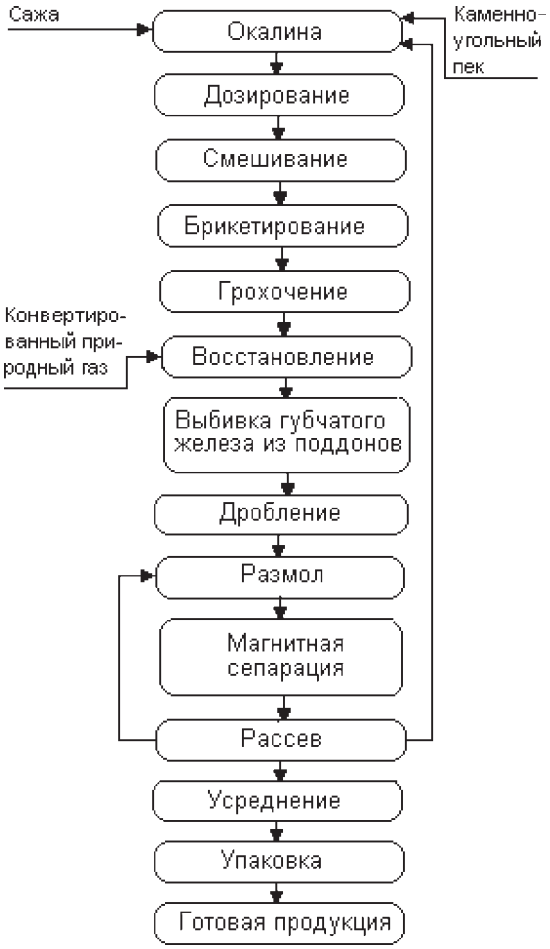


Рис. 104. Технологическая схема получения железного порошка восстановлением

распространенным сырьем являются концентраты окисленных руд железа и прокатная окалина (рис. 105).

Кроме железа методом восстановления получают порошки вольфрама, молибдена, титана, циркония, тантала, ниобия, легированных сталей и сплавов.

Качество восстановленного порошка выше распыленного в условиях сопоставимых марок, однако потенциально возможный уровень затрат по распылению представляется более низким, чем по восстановлению. Связано это с необходимостью двукратного применения операций нагрева и дробления при восстановлении, в результате за один цикл производства дважды учитываются затраты в повышение энергетического потенциала основного материала и на разрушение внутренних связей частиц.

В процессе распыления нагрев (расплавление) и разделение как основные операции выполняются однократно. При этом получение расплава связано с более высокими температурами, чем в процессе восстановления, но одновременно разделение расплава энергетически более выгодно, чем разделение твердого спека в процессе восстановления. Кроме того, экономически невыгодными при восстановлении являются применение дорогостоящего энергоносителя (водорода) и большое число операций, каждая из которых требует специального оборудования и обслуживающего персонала.

Механическое измельчение наиболее целесообразно применять при производстве порошков хрупких металлов и сплавов, таких как кремний, бериллий, хром, марганец, ферросплавы, сплавы алюминия с магнием и др., а также пластичных материа-

Восстановление окислов железа

<table>
<tr><td colspan="2">Твердым углеродом</td><td colspan="2">Газом</td><td colspan="2">Комбинированным способом</td></tr>
<tr><td colspan="3">Сыпучая шихта</td><td colspan="3">Брикетированная шихта</td></tr>
<tr><td colspan="2">Взвешенное состояние</td><td colspan="2">Кипящий слой</td><td colspan="2">Стационарный слой</td></tr>
<tr><td>Специальные агрегаты</td><td>Туннельная печь</td><td>Муфельная проходная печь</td><td>Шахтная печь</td><td>Печь с шагающим подом</td><td>Вращающая печь</td><td>Кольцевая печь</td></tr>
<tr><td colspan="2">При умеренном давлении восстановительного газа (4–6 атм.)</td><td colspan="2">При повышенном давлении восстановительного газа (20–40 атм.)</td><td colspan="2">При нормальном давлении восстановительного газа</td></tr>
<tr><td colspan="2">При повышенных температурах (800–850 °С)</td><td colspan="2">При умеренных температурах (500–600 °С)</td><td colspan="2">При высоких температурах (более 1000 °С)</td></tr>
</table>

Рис. 105. Классификация методов восстановления оксидов железа

лов, склонных к наклепу. Размол вязких пластичных металлов (цинк, медь, алюминий и др.) затруднен, так как они чаще расплющиваются, а не разрушаются. Наибольшая экономическая эффективность достигается при использовании в качестве сырья отходов, образующихся при механической обработке металлов.

Предельный размер частиц, которого можно достичь в процессах тонкого измельчения хрупких тел, составляет обычно 0,1 мкм. Операцию механического измельчения часто совмещают с процессом приготовления смесей порошков. Наибольшее распространение среди методов измельчения получили: обработка металлов резанием с образованием мелкой стружки или опилок; измельчение металла в шаровых, вихревых, молотковых и других типах мельниц, в щековых, валковых и конусных дробилках; ультразвуковое диспергирование.

Возросшая масса лома приводит к необходимости разработки мероприятий по увеличению степени утилизации отходов, совершенствованию методов их переработки, повышению качества получаемого продукта. В настоящее время основным технологическим способом переработки металлического лома является его переплав, однако этот процесс имеет ряд недостатков: невысокий коэффициент полезного использования (около 40 %), безвозвратные потери металла в виде угара (10–15 %), высокая температура процесса (1500–1600 °С). Одной из возможных альтернатив процессу переплава может быть технология порошковой металлургии, включающая в себя процесс дробления металлического лома до порошка. Процесс дробления, протекающий при обычных температурах, не сопровождается потерями металла и более предпочтителен с экологической точки зрения. Однако следует иметь в виду, что при переработке отходов металла дроблением предъявляются более высокие требования к чистоте исходного продукта. Необходимы обязательная предварительная его сортировка по маркам и тщательная промывка.

7.3. ФОРМОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Формование порошка предназначено для придания заготовкам из порошка формы, размеров, плотности и механической прочности, необходимых для последующего изготовления изделий. Фор-

мование включает в себя следующие операции: отжиг, классификация, приготовление смеси, дозирование и формование.

Отжиг порошков применяют для повышения их пластичности и прессуемости за счет восстановления остаточных оксидов и снятия наклепа. Нагрев осуществляют в защитной среде (восстановительной, инертной или вакууме) при температуре 0,4–0,6 абсолютной температуры плавления металла порошка. Наиболее часто отжигают порошки, полученные механическим измельчением, электролизом и разложением карбонилов.

Классификация порошков — это процесс разделения порошков по величине частиц. Порошки с различной величиной частиц используют для составления смеси, содержащей требуемый процент каждого размера. Классификацию частиц размером более 40 мкм производят в проволочных ситах. Если свободный просев затруднен, то применяют протирочные сита. Более мелкие порошки классифицируют на воздушных сепараторах.

Приготовление смесей. Часто при производстве изделий используют смеси порошков разных металлов. В технологическом процессе смешивание порошков является одной из важнейших операций: она служит для обеспечения однородности смеси. Наиболее часто применяют механическое перемешивание компонентов в шаровых мельницах и смесителях для измельчения компонентов. Соотношение шихты и шаров по массе 1:1. Смешивание без измельчения проводят в барабанных, шнековых, лопастных, центробежных, планетарных, конусных смесителях и установках непрерывного действия.

Чтобы происходило равномерное и быстрое распределение частиц порошков в объеме смеси, абсолютные величины плотности смешиваемых компонентов не должны сильно различаться, так как при большой разнице абсолютных величин плотностей наступает расслоение компонентов. В этом случае полезно применять раздельную загрузку компонентов по частям: сначала более легкие с каким-либо более тяжелым, затем остальные компоненты. Смешивание всегда лучше происходит в жидкой среде, что не всегда экономически целесообразно из-за усложнения технологического процесса.

При приготовлении шихты некоторых металлических порошков высокой прочности (вольфрама, карбидов металлов)

для повышения формуемости в смесь добавляют пластификаторы — вещества, смачивающие поверхность частиц. Пластификаторы должны обладать высокой смачивающей способностью, выгорать при нагреве без остатка, легко растворяться в органических растворителях. Обычно раствор пластификатора заливают в перемешиваемый порошок, затем смесь сушат для удаления растворителя. Высушенную смесь просеивают через сито.

Дозирование — это процесс отделения определенных объемов смеси порошка. Различают объемное дозирование и дозирование по массе. Объемное дозирование используют при автоматизированном формовании изделий. Дозирование по массе — наиболее точный способ, обеспечивающий одинаковую плотность формуемых заготовок.

Для формования изделий из порошков применяют различные способы прессования, прокатку порошков, шликерное формование. Выбор того или иного вида формования имеет важное значение в связи с тем, что форма, размеры и требуемые свойства получаемых изделий определяются процессом прессования.

Прессование в стальной пресс-форме происходит в закрытом объеме и состоит из трех стадий: увеличение плотности за счет перемещения частиц порошка относительно друг друга; деформация частиц порошка и увеличение контакта между ними за счет разрушения пленки оксидов на поверхности частиц; деформация отдельных зон внутри частиц, их упрочнение (наклеп). В результате прессования получается заготовка, имеющая форму и размеры, соответствующие готовой детали с припусками на последующую обработку.

Такой процесс может быть одно- и двусторонним. Двустороннее прессование может производиться по-разному, например двумя подвижными пуансонами при неподвижной матрице или при неподвижном нижнем пуансоне и подвижных верхнем пуансоне и матрице. Холодное прессование в закрытых формах требует больших давлений. При прессовании сложных изделий (с неодинаковыми размерами в направлении прессования) используют несколько пуансонов, через которые прикладывают к порошку различные усилия. Иногда, при изготовлении изделий сложной формы, предварительно прессуют заготовку, а затем придают ей окончательную форму при повторном обжатии. При прессовании

кроме стальных пресс-форм — основного инструмента производства — используют гидравлические универсальные или механические прессы. Для прессования сложных изделий применяют специальные многоплунжерные прессовые установки.

Изостатическое прессование — это прессование в оболочке под действием всестороннего сжатия. Если сжимающее усилие создается жидкостью, прессование называют **гидростатическим**. При гидростатическом прессовании порошок засыпают в резиновую оболочку, помещают ее после вакуумирования и герметизации в сосуд, в котором поднимают давление до требуемой величины. Благодаря отсутствию трения между оболочкой и порошком спрессованное изделие получают с равномерной плотностью по всем сечениям, а давление прессования в этом случае будет меньше, чем при прессовании в стальных пресс-формах. Перед прессованием порошок подвергают виброуплотнению. Гидростатическим прессованием получают турбинные лопатки, цилиндры, трубы, шары, тигли и другие изделия сложной формы.

К недостаткам метода относится малая производительность по сравнению с прессованием в закрытых пресс-формах, недолговечность эластичных оболочек, затруднения в соблюдении точных размеров заготовок, необходимость в последующей механической обработке.

Главное преимущество изостатического прессования — высокая степень равномерного распределения плотности, простота установки и возможность получения высоких плотностей при сравнительно низких давлениях прессования. Изостатическое горячее прессование производится с подогревом формуемого порошка и рабочего тела.

Мундштучное прессование — это формование заготовок из смеси порошка с пластификатором путем продавливания ее через отверстие в матрице. В качестве пластификатора применяют парафин, крахмал, поливиниловый спирт, бакелит. Этим методом получают трубы, прутки, уголки и другие изделия большой длины.

Чаще мундштучное прессование выполняют при подогреве материала изделия и в этом случае обычно не используют пластификатор. Для предупреждения окисления при горячей обра-

ботке применяют защитные среды (инертные газы, вакуум) или прессование в защитных оболочках (стеклянных, графитовых, металлических — медных, латунных, в медно-железной фольге). После прессования оболочки удаляют механическим путем или травлением в растворах, инертных спрессованнному металлу.

Динамическое прессование — это процесс прессования с использованием импульсных нагрузок. Он имеет ряд преимуществ: уменьшаются расходы на инструмент, снижается упругая деформация, увеличивается плотность изделий. Источники энергии — взрыв заряда взрывчатого вещества, энергия электрического разряда в жидкости, импульсное магнитное поле, сжатый газ, вибрация. В зависимости от источника энергии прессование называют взрывным, электрогидравлическим, электромагнитным, пневмомеханическим и вибрационным.

Шликерное формование представляет собой процесс заливки шликера в пористую форму с последующей сушкой. Шликер — это однородная концентрированная взвесь порошка металла в жидкости. Шликер приготовляют из порошков с размером частиц 1—2 мкм (реже — до 5—10 мкм) и жидкости (вода, спирт, четыреххлористый водород). Взвесь порошка однородна и устойчива в течение длительного времени. Форму для шликерного литья делают из гипса, нержавеющей стали, спеченного стеклянного порошка. Формирование изделия после заливки формы взвесью порошка заключается в направленном осаждении твердых частиц на стенках формы под действием потоков взвеси (порошка в жидкости). Эти потоки возникают в результате впитывания жидкости в поры гипсовой формы под действием вакуума или центробежных сил, создающих давление в несколько мегапаскалей. Время наращивания оболочки определяется ее толщиной и составляет 1—60 мин. После удаления изделия из формы его сушат при температуре 110—150 °С на воздухе или в сушильных шкафах.

Новейшим направлением получения изделий как из металлических порошков (MIM-технология), так и из керамических порошков (CIM-технология) является PIM-технология (**инжекционная формовка** — рис. 106). Она позволяет получать крупные и малые серии мелких изделий очень сложной формы. В этом процессе мелкодисперсный порошок (около 10 мкм), смешан-

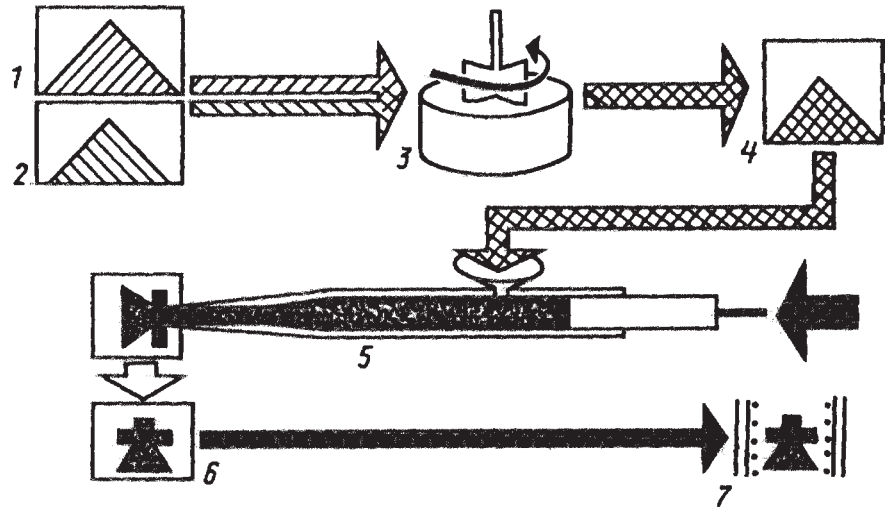


Рис. 106. Схема PIM-процесса:
1 — металлический порошок; *2* — полимерное связующее; *3* — смещение; *4* — гранулы; *5* — инжекционная формовка; *6* — удаление связующего; *7* — спекание

ный с 1–2 % связующего при помощи поршня или шнекового питателя как бы впрыскивается через узкий литник в разъемную металлическую форму. Полученная заготовка извлекается из формы, связующее удаляется (вытапливается, растворяется), и заготовка спекается.

7.4. СПЕКАНИЕ

Спекание представляет собой процесс нагрева и выдержки формуемой заготовки при температуре ниже точки плавления основного компонента с целью обеспечения заданных механических и физико-химических свойств. Это важная технологическая операция, результатом которой является превращение непрочного порошкового тела в прочное спеченное изделие со свойствами, приближающимися к свойствам литого металла. Такое превращение происходит за счет изменения характера межчастичных контактов. Плотность, прочность и другие физические и механические свойства спеченных изделий зависят от свойств исходных порошков и условий изготовления: давления прессования, температуры, времени, атмосферы спекания и других факторов.

Существуют две основные разновидности процесса спекания — *твердофазное* (без образования жидкой фазы) и *жидкофазное*, при котором нагрев порошковой заготовки проводят при температуре, обеспечивающей появление жидкой фазы.

Продолжительность спекания варьируется от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от состава и плотности материала, конструкции печи, размеров изделия и т. д.

Нагрев заготовок при спекании осуществляют в печах различного типа, работающих периодически или непрерывно. Печи периодического действия бывают колокольного типа, муфельные или шахтные. В печах колокольного типа с защитной атмосферой на внутренний герметичный колпак, накрывающий спекаемые порошковые заготовки, одевается наружный колпак с электронагревателями, создающими необходимую температуру. Экономичность печи высокая, производительность 5—7 кг/ч, предельно достигаемые температуры низкие.

Муфельные печи с электрообогревом и защитной атмосферой имеют горизонтальный короб (муфель) из жароупорной стали, помещенный внутри кожуха с огнеупорной футеровкой. Один конец муфеля глухой, а другой с крышкой. Производительность этих печей низка из-за больших затрат времени на нагрев и охлаждение спекаемых заготовок, а расход электроэнергии достаточно высок (300—400 кВт·ч на 100 кг изделия).

Печи периодического действия используют в основном при мелкосерийном производстве спеченных изделий. Для массового выпуска разнообразной продукции из металлических порошков применяют методические печи непрерывного действия — конвейерные, рольганговые, с шагающим подом, толкательные.

В конвейерных печах порошковые заготовки перемещаются в специальных поддонах или прямо на конвейерной ленте из жаростойкой и жаропрочной стали. Рабочая температура (1000—1600 °С) зависит от типа нагревательных элементов. В рольганговых печах процесс ведут при температуре 1200 °С, коробка с заготовками транспортируется в печи по роликам рольганга, выполненным из легированной стали. Производительность печей — до 200 кг/ч при расходе электроэнергии около 1 кВт·ч/кг.

Горячее прессование — это процесс одновременного прессования и спекания порошков при температуре 0,5—0,8 температу-

ры плавления основного компонента шихты. При этом силы давления формования суммируются с внутренними физическими силами, приводящими к уплотнению. Наиболее существенными результатами горячего прессования являются максимально быстрое уплотнение и получение изделия с минимальной пористостью при сравнительно малых давлениях, более высоким пределом текучести, большим удлинением, повышенной твердостью, лучшей электропроводностью и более точными размерами, чем изделия, полученные путем последовательного прессования и спекания. Такие свойства тем выше, чем больше давление прессования. Горячепрессованные изделия имеют мелкозернистую структуру.

В настоящее время применяются пресс-формы из тугоплавких оксидов, силикатов и других химических соединений. Для предупреждения взаимодействия прессуемого материала с материалом пресс-формы ее внутреннюю поверхность покрывают каким-либо инертным составом (жидкое стекло, эмаль, нитрид бора и др.) или металлической фольгой. Кроме того, для предупреждения окисления прессуемого изделия применяют защитные среды (восстановительные, инертные) или вакуумирование. Горячее прессование выполняют на специальных гидравлических прессах, имеющих устройства для регулирования температуры при прессовании.

Для интенсификации процесса спекания используют специальные приемы: химические и физические способы активирования спекания. Химическое активирование заключается в изменении состава атмосферы спекания. Например, добавка в атмосферу спекания хлористых или фтористых соединений способствует активному соединению с ними выступов частичек, а образующиеся соединения снова восстанавливаются до металла, атомы которого конденсируются в местах с минимальным запасом свободной энергии. Интенсивное уплотнение спекаемой заготовки наблюдается при добавке в порошок изделия небольшого количества металла с меньшей температурой плавления. Например, к вольфраму добавляют никель, к железу — золото и т. п. В настоящее время широко применяют физические способы активирования спекания: циклическое изменение температуры,

воздействие вибраций или ультразвука, облучение прессовок, наложение сильного магнитного поля.

При жидкофазном спекании в случае смачивания жидкой фазой твердой фазы увеличивается сцепление твердых частичек, а при плохой смачиваемости жидкая фаза тормозит процесс спекания, препятствуя уплотнению. Смачивающая жидкая фаза приводит к увеличению скорости диффузии компонентов и облегчает перемещение частиц твердой фазы. При жидкофазном спекании можно получить практически беспористые изделия. Различают спекание с жидкой фазой, присутствующей до конца процесса спекания, и спекание с жидкой фазой, исчезающей вскоре после ее появления, когда конечный период спекания происходит в твердой фазе.

7.5. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

После спекания изделия могут подвергаться дополнительной обработке — калиброванию, термической обработке, нанесению покрытий и другим видам обработки для повышения качества. Перспективным направлением получения деталей из порошков является создание оборудования для изготовления деталей, не требующих дополнительной обработки. Дополнительные технологические операции используют для достижения чистоты поверхности и точности (механическая обработка, калибровка), для получения физических и механических свойств — химико-термическая обработка и различные пропитки.

Калибрование применяют для получения размеров 6—11-го квалитета точности. Калибруют как по одному (наружному или внутреннему диаметру), так и по нескольким параметрам, минимальный припуск равен 0,05—0,07 мм. Детали, содержащие в структуре цементит, необходимо перед калибровкой отжигать.

Пропитка жидкими металлами применяется при изготовлении электроконтактных и некоторых конструкционных материалов. При этом жидким металлом или сплавом заполняются сообщающиеся поры заготовки из тугоплавкого компонента. Существует два варианта пропитки. По первому варианту на пори-

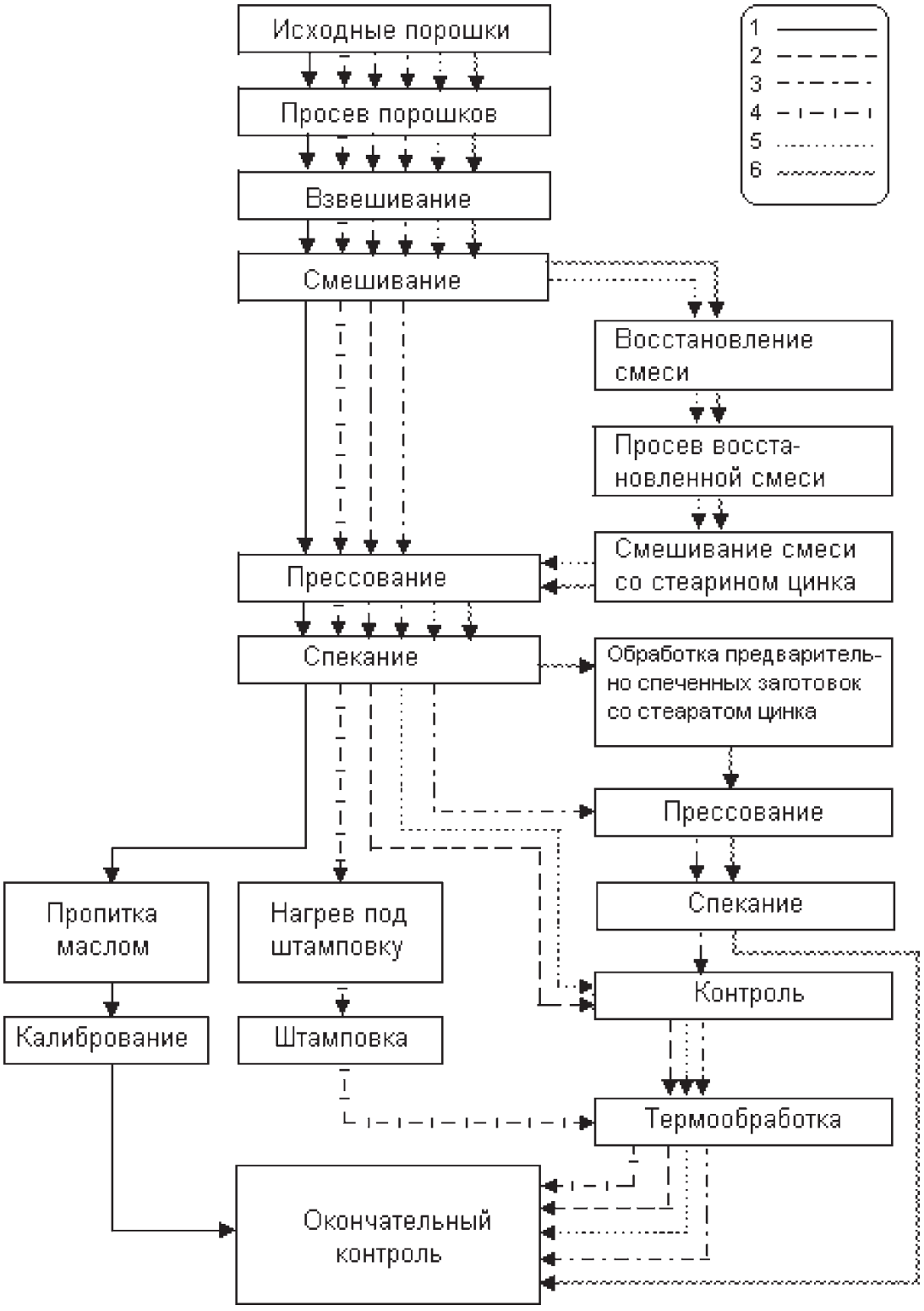


Рис. 107. Технологические схемы изготовления деталей из порошков

стый каркас помещают пропитывающий металл в виде кусочка с объемом, равным объему пор каркаса, и нагревают в печи до температуры плавления пропитывающего материала. По второму варианту пористый каркас помещают, например, в расплав пропитывающего металла. Впитывание происходит под действием капиллярных сил. Скорость пропитки составляет десятые доли миллиметра в секунду и увеличивается с повышением температуры. Температура пропитки обычно на 100–150 °С превышает температуру плавления пропитывающего металла. Однако эта температура не должна быть больше температуры плавления металла каркаса. Для улучшения смачиваемости к пропитывающему металлу добавляют различные присадки.

Механическая обработка имеет особенности, вызванные пористостью материала. Режущий инструмент испытывает микроудары, приводящие к его быстрому затуплению. Для обработки применяют твердые сплавы и алмазный инструмент.

Пропитка изделий маслом (машинным или веретенным) при температуре от +110 до −120 °С происходит в течение 1 ч. Масло заполняет поры изделий и в процессе работы поступает по капиллярам на поверхности трения. Это иногда позволяет избавиться от смазки изделий в процессе работы и улучшает условия трущейся пары.

Цель химико-термической обработки — улучшение механических свойств изделий, расширение области их применения. К этому виду обработки относятся нитроцементация, диффузионное хромирование, увеличивающие износо- и коррозионную стойкость в несколько раз.

Рассмотрим типовые технологические схемы производства деталей из порошков (рис. 107): схема *1* — для изготовления деталей антифрикционного назначения; схема *2* — для получения деталей, не испытывающих нагрузок или слабо нагруженных; схема *3* — для изготовления конструкционных деталей, испытывающих значительные нагрузки; схема *4* — для получения деталей с операцией “штамповка”; схема *5* — для изготовления деталей ответственного назначения; схема *6* — для получения конструкционных деталей ответственного назначения повышенной прочности.

7.6. ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Отличительной чертой порошковой металлургии является возможность производить **пористые материалы**, области применения которых определяются структурой пор. Пористые материалы являются прочными и устойчивыми к коррозии, могут работать в широком диапазоне температур, не засоряют фильтруемую жидкость, легко подвергаются механической обработке и сварке, допускают многократную регенерацию, обладают высокой тепло- и электропроводностью.

В зависимости от способа производства пористые материалы получают с пористостью до 98 %, различной геометрией пор и размером пор от долей микрометра до нескольких миллиметров. **Пористостью** называется отношение объема пустот в материале к его полному объему.

Свойства пористых материалов зависят от свойств исходных порошков и технологического процесса их изготовления. Для их изготовления используются металлические порошки как со сферической, так и с несферической формой частиц размерами от нескольких до тысячи микрометров из различных металлов и сплавов.

По значимости и объемам применения пористые материалы можно распределить так: бронза, нержавеющая сталь, никель и его сплавы, титан, серебро, платина, вольфрам, хром, алюминий. Пористые материалы, кроме того, производятся из карбидов, боридов, силицидов и других тугоплавких металлов. К группе пористых относятся антифрикционные, фрикционные материалы, фильтры и так называемые потеющие материалы.

Бронзовые фильтры обычно изготавливаются из порошков со сферической формой частиц, полученных путем распыления жидкого металла. Температура спекания составляет 800–900 °С. Продолжительность спекания — от 30 мин до 1 ч. Бронзовые фильтры находят широкое применение в промышленности для очистки жидкого горючего в дизелях и реактивных двигателях, смазочных материалов и сжатых газов от твердых примесей размерами 5–200 мкм, а также для очистки разбавленных кислот и щелочей, расплавленного парафина и т. д.

Пористые материалы, изготавливаемые из порошков электролитического и карбонильного никеля методом прессования и последующего спекания при температуре 1000–1100 °С, предназначены для работы в качестве фильтров и пористых электродов. Они находят широкое применение в электрохимии и катализе. Так, щелочные аккумуляторы, электроды которых представляют собой высокопористые никелевые пластины, по сравнению с обычными аккумуляторами имеют меньший вес и габариты. Широкое применение находят фильтры из нержавеющей стали, которые обладают более высокой коррозионной стойкостью и значительно дешевле чистого никеля. Применение пористых материалов для борьбы с обледенением самолетов позволяет снизить на 50 % расход антифриза.

Использование пористого титана в различных отраслях техники обусловлено рядом его ценных свойств, главным из которых является высокая коррозионная стойкость во многих агрессивных средах и высокая удельная прочность. Титановые пористые материалы получают из порошков с размером частиц менее 60 мкм с наполнителем, а также из электролитического порошка с размером частиц до 1 мм без наполнителя. Такие изделия спекают в специальной атмосфере при температуре 950–1150 °С в течение 1,5–2,0 ч. Пористый титан стоек в азотной кислоте и щелочных растворах, обеспечивает тонкость очистки менее 5 мкм.

Металлопластмассовые антифрикционные материалы представляют собой высокопористый металлический каркас из бронзы, железа, коррозионной стали и т. д., пропитанный фторопластом или пластмассой другого вида. Сочетание повышенных антифрикционных свойств пластмасс со свойствами металлов позволяет получать материалы, способные работать в вакууме, различных газовых средах, воде, агрессивных жидкостях, бензине, некоторых кислотах, а также в условиях низких температур. Для повышения антифрикционных свойств к этим материалам добавляют тонкие порошки свинца, сульфидов, молибдена, стекловолокна и т. д. Эти наполнители выполняют роль сухой смазки и упрочняют пластмассовый слой. Металлопластмассовые подшипники работают без смазки при температурах от +280 до –200 °С.

Использование порошковых подшипников повышает надежность и долговечность работающего оборудования, снижает тру-

доемкость процесса их изготовления, позволяет уменьшить отходы металла в стружку, обеспечивает экономию дефицитных цветных металлов и сплавов.

Порошковые фрикционные материалы предназначены для работы в различных тормозных и передаточных узлах автомобилей, гусеничных машин, дорожных и строительных механизмов, самолетов, станков, прессов и т. п. Фрикционные элементы из порошковых материалов изготовляют в виде дисков, секторных накладок и колодок различной конфигурации. Применяют порошковые фрикционные материалы на основе меди и железа.

По сравнению с антифрикционными порошковые материалы обладают более высокими значениями термо- и износостойкости (в два—четыре раза), а в некоторых случаях, например при работе с легированным чугуном, и более высоким (на 15—25 %) коэффициентом трения.

Применение порошковых фрикционных материалов в тормозных передаточных устройствах взамен литых (сталь, чугун) либо антифрикционных деталей позволяет повысить долговечность, надежность и эффективность фрикционных узлов машин и механизмов, создать новые конструкции фрикционных узлов, имеющих более высокий коэффициент трения, высокую стабильность, износо- и термостойкость.

Высокопористые порошковые металлические материалы, благодаря жесткому пространственному каркасу, имеют более высокую прочность. Они выдерживают резкие колебания температур, легко обрабатываются, свариваются и паяются, обеспечивают необходимую коррозионную стойкость, жаростойкость, теплопроводность. Благодаря высокой пористости они имеют хорошую проницаемость для жидкостей и газов при достаточно тонкой фильтрации (до 30 мкм). Эти материалы легко регенерируются и при этом почти полностью восстанавливают свои первоначальные свойства. Они не засоряют фильтрующиеся жидкости или газы материалами фильтра.

Основные требования, которые предъявляются к формованию при изготовлении пористых материалов, связаны с получением изделий заданных форм и размеров с требуемой пористостью и обеспечением равномерного и заданного распределения пористости по сечению изделия.

Для увеличения пористости и облегчения прессования труднопрессуемых порошков к ним добавляют специальные наполнители, которые не должны быть гигроскопичными, вступать в химическое взаимодействие с металлическим порошком во время смешивания и прессования, разлагаться при температуре ниже температуры спекания, оставлять продукты разложения в порах заготовки после спекания. В качестве наполнителя используют поливиниловый спирт, парафин, двууглекислый аммоний, четыреххлористый аммоний и др. в количестве от 3 до10 % массы металлического порошка.

Технология изготовления пористых материалов включает в себя традиционную для порошковой металлургии схему изготовления — формование и спекание.

Статическим прессованием изготавливают пористые материалы простейшей формы в виде диска, конуса, втулки, чечевицы и т. п. Преимущества — высокая точность размеров и большая производительность. Недостатки — неравномерность проницаемости и ограниченность форм и размеров.

Гидростатическим или гидродинамическим прессованием удается получать пористые материалы в виде длинных труб, а также труб с донышком и фланцем с равномерной пористостью. Обычно давление прессования составляет 100–200 МПа. Преимущества — получение тонкостенных изделий, а также изделий больших размеров, равномерное распределение пористости. Недостатки — невысокая производительность.

Методом мундштучного прессования изготавливают пористые трубы диаметром до 100 мм и длиной до 1 м с пористостью 50–60 %. Для этой цели подготавливают шликер из порошка на крахмальном клейстере. Суспензию экструдируют под прессом в трубу необходимого диаметра и длины. После сушки трубы спекают в защитной атмосфере. Недостатком метода является необходимость введения пластификатора и ограниченность формы.

Свободная засыпка порошка в форму — простейший способ формования пористых материалов без приложения давления. Для лучшего заполнения форм порошком, устранения арочного эффекта, а также с целью получения равномерной пористости форму при засыпке подвергают вибрации (вручную или на вибровстряхивателе). Основное требование к материалу формы —

отсутствие взаимодействия с материалом порошка при температуре спекания. Для порошков цветных металлов применяют керамические формы. Предотвращению припекания частиц порошка к стенкам формы способствует их покрытие подходящей суспензией, например глиноземом с водой, и последующая сушка. Теоретически габариты заготовок, сформованных свободной засыпкой порошка в формы, не ограничены — они определены размерами пространства печей спекания.

Пористое охлаждение — один из эффективных способов охлаждения высокотемпературных узлов и механизмов. Испарительное охлаждение предусматривает принудительное пропускание жидкости через пористую среду. При этом тепло, выделяющееся на поверхности пористого тела, поглощается и рассеивается испарительным охлаждающим устройством. Возможности использования пористого материала для контроля температуры на поверхности практически не ограничены. Детали из пористого металла могут использоваться для создания условий локального нагрева и одновременно для охлаждения локального перегрева механизмов.

Перспективным является применение в промышленности тепловых труб, обеспечивающих выравнивание температурного поля в различных аппаратах и установках. Например, использование низкотемпературных тепловых труб в электрических машинах для охлаждения роторов и статоров двигателей, генераторов, а также обмоток трансформаторов позволило увеличить их мощность на 30–50 %. Успешно используются тепловые трубы для охлаждения высоковольтных выключателей большой мощности. Тепловые трубы и паровые камеры имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными элементами передачи тепла (циркуляционными теплообменниками), так как в них не используют подвижные детали, они бесшумны, не требуют расхода энергии на перекачку теплоносителя из зоны конденсации в зону испарения, обладают малым термическим сопротивлением.

8. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ

Физическая химия — наука, объясняющая на основании положений и опытов физики то, что происходит в смешанных телах при химических операциях.

М.В. Ломоносов

Нет ничего практичнее хорошей теории.

Э.Ж. Сант-Илер

Считается, что гальванотехника вошла в промышленную практику в первой трети XIX в. Но есть основания полагать, что парфянские ювелиры более 2000 лет назад производили гальваническое золочение и серебрение изделий — об этом говорят находки из гробниц египетских фараонов. Вероятно, в Древнем Египте также был известен гальванический способ получения медных покрытий из водных растворов: многие деревянные и глиняные предметы, найденные в Мемфисе и Фивах, покрыты тонким слоем меди.

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Изделия из металлов и сплавов под действием различных физико-химических и биологических факторов разрушаются. Такое разрушение (повреждение) металла в результате протекающих на его поверхности химических реакций с составляющими среды получило название **коррозии** (*лат.* corrodere — разъедать), а среда, в которой происходит этот процесс, называется **коррозионной** или **агрессивной**.

Ржавление — коррозия железа и его сплавов с образованием продуктов коррозии, состоящих в основном из гидратированных оксидов железа. Цветные металлы не ржавеют, а корродируют. Способность металлов сопротивляться коррозионному воздействию внешней среды называют **коррозионной стойкостью**.

Коррозионные исследования проводятся, во-первых, для сокращения материальных потерь из-за коррозии деталей машин и судов, мостов, трубопроводов и т. д., во-вторых, для повышения надежности оборудования, которое может разрушаться с катастрофическими последствиями и, в-третьих, с целью сохранности металлофонда. На сегодняшний день металлофонд России составляет 1,6 млрд. т и распределяется по отраслям промышленности следующим образом: промышленность — 750 млн. т, транспорт — 400, сельское хозяйство — 150, прочие конструкции — 300 млн. т. При этом 40–50 % машин и сооружений работает в агрессивных средах, 30 % — в слабоагрессивных, и только около 10 % не требует активной антикоррозийной защиты.

Экономический и экологический ущерб, наносимый нашей планете коррозией металлических изделий, оборудования и конструкций, неисчислим. В последние годы, например, только в Соединенных Штатах Америки ежегодные потери от коррозии составили 300 млрд. дол., что соответствует 6 % национального дохода всей страны.

В Российской Федерации ежегодные потери металлов из-за их коррозии составляют до 12 % общей массы металлофонда, что соответствует утрате до 30 % ежегодно производимого металла. В большинстве стран потери от коррозии составляют 4–6 % национального дохода.

Потери в результате коррозии делятся на прямые и косвенные. К прямым потерям можно отнести стоимость замены корродировавших конструкций машин или их частей, затраты на перекраску конструкций для предотвращения ржавления, расходы по замене деталей из углеродистой стали коррозионностойкой, стоимость нанесения защитных покрытий и т. д.

Труднее оценить косвенные потери, к которым относятся, например, простои, связанные с заменой поврежденного оборудования, потери мощности, загрязнение и порча продукции.

Иногда потери нельзя оценить в стоимостном выражении. К ним относятся аварии, связанные с разрушением химического оборудования, взрывами; катастрофы поездов, автомобилей, самолетов из-за коррозии, приводящие к потере здоровья или гибели людей.

Наибольшие потери от коррозии несут топливно-энергетический комплекс (ТЭК), сельское хозяйство, химия и нефтехимия. Так, потери металла от коррозии составляют: в ТЭК — 30 %, химии и нефтехимии — 20, сельском хозяйстве — 15, металлообработке — 5 %.

В настоящее время проблема коррозии усугубляется резким старением основного металлофонда, физическим и моральным износом, недостаточной степенью возобновляемости и реновации (реконструкция, ремонт — табл. 30).

Анализ причин отказов и аварий нефтегазовых сооружений свидетельствует о превалирующем влиянии коррозионного фактора. В нефтедобывающей промышленности и транспорте нефти 70 % отказов произошло по причине коррозионных повреждений (табл. 31).

Таблица 30

Старение и ремонт металлоконструкций

Конструкции	В эксплуатации	Требуют ремонта или замены
Городские мосты, путепроводы, туннели	22 тыс. ед.	40 %
Водопроводные и канализационные сети	270 тыс. км	Более 30 %
Оборудование котельных и ТЭЦ		35 %
Магистральные нефтепроводы газопроводы резервуары	 49,6 тыс. км 150 тыс. км Более 40 тыс. ед.	 Более объема вновь сооружаемых
Трубопроводные сети Москвы теплоснабжения газоснабжения	 8 тыс. км 6 тыс. км	 Более 50 % 3 %

Таблица 31

Статистика отказов оборудования нефтегазовых систем, %

Система	Вид отказа				
	Коррозия	Брак строительно-монтажных работ	Брак материалов	Механические повреждения	Нарушение эксплуатации
Нефтеперерабатывающая промышленность и транспорт нефти	70	15	2	10	3
Газопроводы	36,7	10	13,3	13,9	26,1
Внутрипромысловые трубопроводы	95	–	–	–	–

Как правило, коррозионные процессы являются электрохимическими и протекают по границе раздела фаз при взаимодействии твердого вещества с газом или жидкостью. Простейшая схема такого процесса состоит из следующих основных стадий:

1) транспортировка реагирующих веществ к поверхности раздела фаз;

2) химическое взаимодействие;

3) отвод продуктов реакции из реакционной зоны.

Скорость коррозии определяется скоростью процессов самой медленной стадии.

Коррозионные процессы классифицируют по механизму взаимодействия металлов с внешней средой; по виду коррозионной среды и условиям протекания процесса; по характеру коррозионных разрушений; по видам дополнительных воздействий, которым подвергается металл одновременно с действием коррозионной среды.

По механизму процесса различают *химическую* и *электрохимическую* коррозию металла.

Химическая коррозия — это процесс взаимодействия метала с коррозионной средой, при котором окисление металла и восстановление окислительного компонента среды протекает одновременно в одном акте. Продукты взаимодействия пространственно не разделены.

Электрохимическая коррозия — это процесс взаимодействия металла с коррозионной средой (раствором электролита), при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекают не в одном акте, и их скорости зависят от электродного потенциала.

По виду коррозионной среды и условиям протекания различают несколько видов коррозии:

газовая коррозия — это химическая коррозия металлов в газовой среде при минимальном содержании влаги (как правило, не более 0,1 %) или при высоких температурах. В химической и нефтехимической промышленности такой вид коррозии встречается часто;

атмосферная коррозия — это коррозия металлов в атмосфере воздуха или любого влажного газа;

подземная коррозия — коррозия металлов в почвах и грунтах;

биокоррозия — это коррозия, протекающая под влиянием жизнедеятельности микроорганизмов;

контактная коррозия — вид коррозии, вызванный контактом металлов, имеющих разные стационарные потенциалы в данном электролите;

радиационная коррозия — это коррозия, обусловленная действием радиоактивного излучения;

коррозия внешним током и коррозия блуждающим током. В первом случае это коррозия металла, возникающая под воздействием тока от внешнего источника, во втором — под воздействием блуждающего тока;

коррозия под напряжением — коррозия, вызванная одновременно воздействием коррозионной среды и механических напряжений. Если присутствуют растягивающие напряжения, то может произойти растрескивание металла. Это очень опасный вид коррозии, особенно для конструкций, испытывающих механические нагрузки (осей, рессор, автоклавов, паровых котлов, турбин и т. д.).

Если металлические изделия подвергаются циклическим растягивающим напряжениям, то возможно образование коррозионной усталости, вызывающее понижение предела усталости металла. Такому виду коррозии подвержены рессоры автомобилей, канаты, валки прокатных станов.

Коррозионная кавитация — разрушение металла, обусловленное одновременным коррозионным и ударным воздействием внешней среды (коррозия лопастей гребных винтов).

Фреттинг-коррозия — это коррозия, вызванная одновременно вибрацией и воздействием коррозионной среды.

Устранить коррозию при трении или вибрации возможно правильным выбором конструкционного материала, снижением коэффициента трения, применением покрытий и т. д.

По характеру изменения поверхности металла или сплава различают несколько видов коррозионных разрушений (рис. 108).

Коррозия называется **сплошной** (см. рис. 108, *а* и *б*), если она охватывает всю поверхность металла. Сплошная коррозия может быть *равномерной* (см. рис. 108, *а*), если процесс протекает с одинаковой скоростью по всей поверхности металла, и *неравномерной* (см. рис. 108, *б*), когда скорость процесса неодинакова на различных участках поверхности.

При **избирательной коррозии** (см. рис. 108, *в*) разрушается одна структурная составляющая или один компонент сплава.

Местная (локальная) коррозия охватывает отдельные участки поверхности металла. Местная коррозия может быть в виде отдельных пятен, не сильно углубленных в толщу металла (см. рис. 108, *г*); язв-разрушений, так называемых раковин, сильно углубленных в толщу металла (см. рис. 108, *д*); или точек (питтингов), глубоко проникающих в металл (см. рис. 108, *е*).

Подповерхностная коррозия (см. рис. 108, *ж*) начинается на поверхности, но затем распространяется в глубь металла. Про-

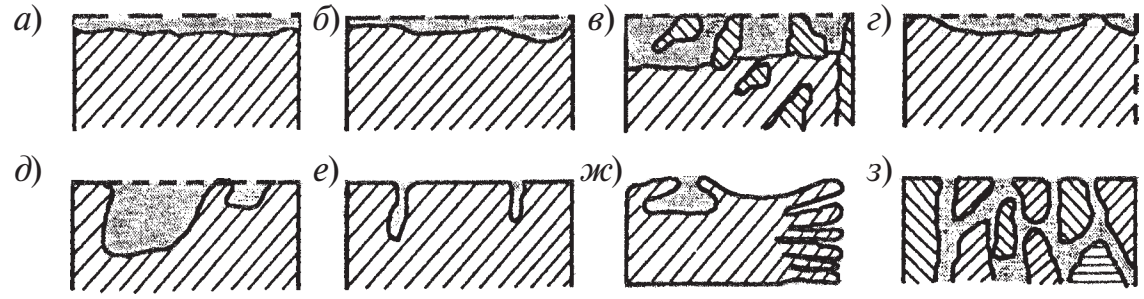


Рис. 108. Виды коррозии:
а — сплошная равномерная; *б* — сплошная неравномерная; *в* — структурно-избирательная; *г* — пятнами; *д* — язвами; *е* — точками (питтинговая); *ж* — подповерхностная; *з* — межкристаллитная

дукты коррозии оказываются сосредоточенными в полостях металла. Этот вид коррозии вызывает вспучивание и расслоение металлических изделий.

Для **межкристаллической коррозии** (см. рис. 108, *з*) характерно разрушение металла по границам зерен. Ее особенность состоит в том, что внешний вид металла не меняется, но он быстро теряет прочность, пластичность и легко разрушается. Связано это с образованием между зернами рыхлых малопрочных продуктов коррозии. Такому виду разрушений особенно подвержены хромистые и хромоникелевые стали, никелевые и алюминиевые сплавы.

Щелевая коррозия вызывает разрушение металла под прокладками, в зазорах, резьбовых креплениях и т. д.

8.2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛОВ

Газовая коррозия

Газовая коррозия наблюдается при работе металлических конструкций, контактных и других аппаратов, арматуры обжиговых и нагревательных печей, деталей двигателей внутреннего сгорания, при термической обработке, горячей ковке и др. В природных условиях она встречается редко. Газовая коррозия протекает при контакте металлов с газами в отсутствии электропроводящих растворов.

Область существования высокотемпературной газовой коррозии определяется интервалом температур. Нижняя граница соответствует температуре конденсации пара на поверхности металла. Это состояние, называемое точкой росы, зависит от парциального давления паров воды. Для воздуха при атмосферном давлении оно оценивается температурой, равной 240–250 °С, а для отходящих газов теплоэлектростанций — 90–100 °С.

При температурах, превышающих точку росы, начинается область химической газовой коррозии.

Верхняя температурная граница определяется такими свойствами металла, как жаростойкость и жаропрочность.

Жаростойкость характеризует способность металла сопротивляться коррозионному воздействию газов при высокой температуре.

Жаропрочность определяет способность материала в условиях высокотемпературного воздействия сохранять хорошие механические свойства, длительную прочность и сопротивление ползучести.

Металл может быть жаростоек, но не жаропрочен, и наоборот — жаропрочен, но не жаростоек.

Жаропрочные стали на основе железа можно эксплуатировать при температурах до 700 °С, алюминиевые и медные сплавы — до 150 °С. Эффективное сочетание жаропрочности и жаростойкости достигается в сплавах системы никель—хром — до 1000 °С.

С повышением температуры скорость газовой коррозии почти всегда увеличивается (табл. 32).

Продукты коррозии образуются в результате одновременного протекания ряда последовательных и параллельных реакций. Рассмотрим процесс образования сплошной оксидной пленки при окислении металла кислородом из газовой фазы (рис. 109).

Процесс окисления металла протекает в несколько стадий:

1) ионизация металла и переход его в форме ионов и электронов в слой оксида;

2) перемещение ионов металла Me^{n+} и электронов в слое оксида;

3) перенос кислорода из газового потока к поверхности оксида;

4) адсорбция кислорода на поверхности;

Таблица 32

Скорость коррозии металлов в некоторых средах, г/(м²·сут)

Металл	Атмосфера, °С							
	O_2		H_2O (пар)		CO_2		SO_2	
	700	900	700	900	700	900	700	900
Fe	511	1243	622	575	587	1133	354	5000
Cr	4,7	22,0	0,5	12,0	2,7	13,0	1,6	32,0
Ni	9,6	28,0	0,3	14,0	3,9	36,0	923	837
Co	37,8	931,0	8,0	259	27,0	443	598	1633
Cu	120	439	33,0	153	65,0	123	1,3	2,0
W	412	3762	21,0	1792	139,0	139	470	290

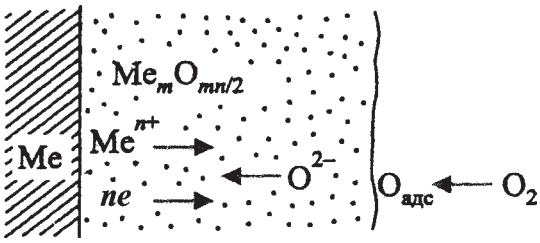


Рис. 109. Схема процесса образования оксидной пленки на металле

5) превращение адсорбированного кислорода в ион O^{2-} в слое оксида;

6) реакция образования оксида.

В некоторых случаях отдельные стадии процесса могут выпадать или трансформироваться. Но в общем, все стадии процесса взаимосвязаны и протекают последовательно. Суммарная скорость процесса определяется скоростью самой медленной реакции. Например, если медленно протекает стадия 3, то процесс лимитируется внешней диффузией, если 1, 2 или 6 — имеет место внутридиффузионный контроль процесса.

Отличительной особенностью коррозии металла в отдельных случаях является затухание процесса во времени. Это происходит в том случае, когда на поверхности металла образуется защитная пленка. Если пленка сплошная и имеет хорошую адгезию с поверхностью, то она изолирует металл от контакта с агрессивной средой и коррозия прекращается.

В атмосферных и промышленных условиях большинство металлов покрыто пленкой продуктов коррозии. Жаростойкость металлов во многом определяется свойствами пленок.

В зависимости от толщины различают пленки:

- тонкие (невидимые) — толщиной от мономолекулярного слоя до 40 нм;
- средние (видимые благодаря интерференционному окрашиванию как цвета побежалости) — толщиной 40–500 нм;
- толстые (видимые) — толщиной более 500 нм.

Толщина образуемых пленок во многом определяется условиями окисления.

Сплошность получаемой пленки характеризует способность тормозить дальнейший процесс коррозии.

Критерий сплошности впервые был сформулирован Пиллингом и Бедворсом. Условие сплошности выполняется в том случае, когда молекулярный объем химического поверхностного соединения (например, оксида) больше объема

металла, израсходованного на образование молекулы оксида. Соотношение объема образованного оксида исходного металла может быть легко подсчитано.

Предположим, что окисляется 1 грамм-атом металла. Его объем можно определить по формуле

$$V_{\text{Me}} = \frac{A_{\text{Me}}}{\rho_{\text{Me}}},$$

где A_{Me} — атомная масса металла; ρ_{Me} — плотность металла.

Объем полученного оксида

$$V_{\text{ок}} = \frac{M_{\text{ок}}}{n\rho_{\text{ок}}},$$

где $M_{\text{ок}}$ — молекулярная масса оксида; n — число атомов металла в молекуле оксида; $\rho_{\text{ок}}$ — плотность оксида.

Соотношение между объемом оксида и объемом металла таково:

$$\frac{V_{\text{ок}}}{V_{\text{Me}}} = \frac{M_{\text{ок}}\rho_{\text{Me}}}{nA_{\text{Me}}\rho_{\text{ок}}}.$$

Очевидно, что при $V_{\text{ок}} / V_{\text{Me}} > 1$ образуется сплошная пленка, при $V_{\text{ок}} / V_{\text{Me}} < 1$ пленка не получается сплошной.

Для ряда металлов установлена логарифмическая зависимость скорости окисления от времени, которая описывается уравнением

$$h = \ln(k\tau),$$

где k — константа.

Логарифмический закон роста пленки установлен экспериментально для окисления на воздухе алюминия и цинка в интервале температур 25–225 °С, никеля — до 650, железа — до 375, меди — до 100 °С.

Щелочные и щелочноземельные металлы, которые имеют отношение объема оксида к объему металла $V_{\text{ок}} / V_{\text{Me}}$ меньше единицы, окисляются по линейному закону. По уменьшению скорости окисления эти металлы располагают в ряд

$$\text{K} > \text{Na} > \text{Ba} > \text{Ca} > \text{Mg}.$$

Линейный ход кинетической зависимости характерен и для металлов, оксиды которых летучи при высоких температурах. К этой группе относятся металлы Mo, Os, Ru, Ir, V, W.

Для ряда технически значимых металлов наблюдается параболическая зависимость скорости окисления во времени. Приближенно по возрастанию устойчивости к газовой коррозии в атмосфере воздуха можно расположить следующие металлы в ряд W < Fe < Co < Cu < Ni. К этой группе относятся и Mn, Be, Zn, Ti.

В группу металлов, дающих пленки с наиболее высокими защитными свойствами и окисляющихся по логарифмическому закону, входят Si, Al, Cr. Они расположены по возрастанию устойчивости.

Константа скорости окисления тем больше, при прочих равных условиях, чем больше изменение свободной энергии и чем выше удельная электропроводимость материала пленки. Если оксид обладает электроизолирующими свойствами, дальнейшего окисления не происходит. Этим объясняется, например, стойкость алюминия к процессам окисления.

На защитные свойства поверхностных пленок влияют природа и состав сплава, температура, давление и состав газа.

Электрохимическая коррозия

Для протекания электрохимической коррозии необходима электропроводящая среда — растворы кислот, щелочей или солей. Этот вид коррозии встречается в природе повсеместно.

При соприкосновении металлической поверхности с раствором электролита происходит взаимодействие металла с заряженными частицами раствора и переход ионов металла в раствор. При этом протекают два процесса, а именно переход ионов:

- из металла в раствор с образованием сольватированных (в водных растворах — гидратированных) ионов (**окислительный** или **анодный процесс**):

$$Me + mH_2O + ne;$$

- из раствора с выделением их на поверхности металла в виде нейтральных атомов, входящих в состав кристаллической решетки металла (**восстановительный** или **катодный процесс**).

Скорости прямого и обратного перехода в общем случае неодинаковы. Если растворение металла происходит быстрее, чем его осаждение, то металл по отношению к электролиту заряжается отрицательно. В результате скорость растворения металла уменьшается, а скорость его осаждения увеличивается. Сдвиг потенциала в отрицательную сторону продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие.

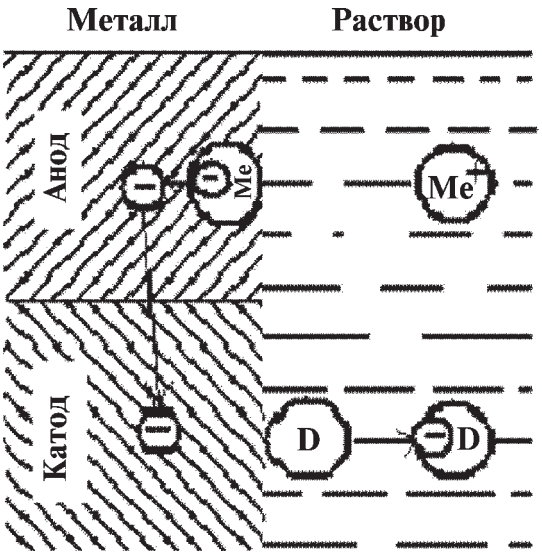


Рис. 110. Принципиальная схема электрохимического коррозионного процесса: *D* — катодный деполяризатор

Возникновение разности потенциалов между металлом и раствором означает, что на границе раздела фаз (металл/электролит) должны появиться на некотором расстоянии друг от друга положительно и отрицательно заряженные слои, которые образуют двойной электрический слой (рис. 110). Обычно разрушение происходит на аноде.

Причиной электрохимической коррозии является термодинамическая неустойчивость металлов в среде электролита.

Стадии любого электродного процесса:

- подвод реагирующих веществ к поверхности электрода из объема раствора;
- перенос заряженных частиц (электронов или ионов) через границу раздела фаз;
- отвод продуктов реакции в объем раствора.

Скорость электродного процесса определяется скоростью самой медленной стадии, которая называется лимитирующей и зависит от потенциала.

В простейшем случае коррозии металлов, с образованием растворимых продуктов (т. е. ионов Me^{n+}), коррозионные процессы принято называть **процессами растворения** металлов. Образование ионов металла из его атомов, например, в кислом растворе можно представить совокупностью реакций

$$Me = Me^{n+} + ne, \quad (1)$$

в которой электроны освобождаются, и

$$H_3O^+ + e = (1/2)H_2 + H_2O, \quad (2)$$

в которой электроны, освободившиеся в реакции (1), присоединяются к ионам водорода. В результате на металле одновременно протекают две реакции — анодная (1) и катодная (2).

Перенос электронов осуществляется на поверхности металла, а перемещение ионов — в электролите.

При протекании электрохимического процесса анодный и катодный потенциалы $E_а$ и $E_к$ выравниваются и принимают значение потенциала $E_{ст}$. Этот потенциал называют стационарным или смешанным (компромиссным) потенциалом.

При $E_{ст}$ соблюдается равенство катодного и анодного токов, т. е.

$$i_а = i_к = i_{кор},$$

где $i_{кор}$ — скорость коррозии или саморастворения металла.

Если бы при этом электродные процессы не протекали, то потенциалы электродов сравнялись бы и наступила полная поляризация.

В действительности анодный и катодный процессы продолжаются. Присутствие в растворе деполяризаторов обеспечивает протекание реакций, в результате которых образуется H_2 или OH^-. Таким образом, если из двух реакций противоположного направления, одновременно протекающих на металле в отсутствии внешнего тока, одна является реакцией растворения, а другая — реакцией восстановления какого-либо окислительного компонента раствора, например ионов водорода, то это и есть коррозионный процесс.

Под коррозией, таким образом, понимают самопроизвольный процесс, происходящий на металле в условиях, когда металл погружен в раствор и ток от внешнего источника через него не проходит.

Коррозию металлов, при которой катодная реакция осуществляется с выделением водорода, называют коррозией металлов с **водородной деполяризацией**.

На практике с такими явлениями сталкиваются при хранении и перевозке кислот, при кислотном травлении металлов, при получении кислот на стадии абсорбции.

Для коррозии металлов с водородной деполяризацией характерно:

- большая зависимость скорости коррозии металла от pH раствора;
- большая зависимость коррозионной стойкости сплавов от их природы и содержания в них катодных примесей;
- увеличение скорости коррозии во времени, что связано с ростом посторонних примесей на поверхности металла в результате его растворения;
- возможность появления водородной хрупкости металлов.

Процессы коррозии металлов, у которых катодная реакция осуществляется с участием растворенного в электролите кислорода, называются коррозией с **кислородной деполяризацией**.

С кислородной деполяризацией корродируют металлы, находящиеся в атмосфере или соприкасающиеся с водой и растворами солей: обшивка судов в речной или морской воде, оборудование охладительных систем химических заводов, магистральные трубопроводы и т. д. Коррозия металлов с кислородной деполяризацией является самым распространенным коррозионным процессом.

К внутренним факторам, определяющим скорость и характер электрохимической коррозии, относятся состояние поверхности, химический состав, структура металла и т. д. Неоднородность поверхности металла является одной из причин местной коррозии. Тщательная, тонкая обработка поверхности (шлифовка, полировка) повышает коррозионную стойкость металлов, способствуя образованию более однородной сплошной оксидной пленки на их поверхности. При грубой обработке истинная поверхность контакта металла с агрессивной средой увеличивается, усиливая коррозию.

Внешние факторы, влияющие на скорость реакции металлов, определяются природой и свойствами коррозионной среды и ее параметрами (температура, давление, скорость движения раствора электролита и т. д.).

8.3. ЛОКАЛЬНЫЕ ВИДЫ КОРРОЗИИ

Для всех локальных коррозионных процессов характерно то, что они протекают на сравнительно небольших по площади участках поверхности металла и развиваются с высокой скоростью. В результате разрушения этих участков происходит потеря металлоконструкциями эксплуатационных свойств. Опасность таких процессов связана с тем, что из-за малых размеров пораженных ими участков и высоких скоростей растворения металла в них наличие очага разрушения часто обнаруживается только в момент выхода из строя оборудования.

К основным видам локальной коррозии относится *питтинговая, язвенная, щелевая, межкристаллическая, селективное вытравливание и контактная коррозия.*

Питтинговая коррозия (ПК) является одним из наиболее опасных видов локальной коррозии.

Язвенная коррозия по характеру своего развития очень напоминает ПК, но локализация коррозионного процесса при этом менее острая, и диаметр очагов язвенной коррозии гораздо больше, чем при ПК. Диаметр язв, как правило, существенно больше их глубины. Повышенной склонностью к язвенной коррозии обладают углеродистые и низколегированные стали.

Щелевая коррозия проявляется в условиях, когда из-за близости расположения двух поверхностей (т. е. в местах застоя раствора) возникают узкие зазоры или щели. При этом не имеет большого значения, что явилось причиной образования щели — особенности металлической конструкции или свойства структуры металла.

Межкристаллическая коррозия (МКК) возникает в поликристаллических материалах, преимущественно сплавах железа, алюминия и меди, протекает на границах зерен и его зернограничных областей.

Селективное вытравливание характерно для конструкционных материалов, состоящих из двух или более фаз, сильно отличающихся по своим свойствам. При этом одна из них подвергается наиболее значительному растворению, а другие растворяются с гораздо более низкими скоростями.

Характерен такой вид растворения для нержавеющих сталей, когда селективному растворению подвергаются выделяющиеся по границам их зерен карбиды.

Контактная коррозия развивается при возникновении контакта между двумя или более разнородными металлами.

Скорость проникновения очагов локальной коррозии в глубь металла может достигать десятков сантиметров в год.

Обычно локальные коррозионные процессы имеют несколько последовательно сменяющих друг друга стадий, каждой из которых соответствует свой лимитирующий процесс. Основные стадии:

- зарождение, нарушение равномерного протекания коррозии и переход к стационарному развитию очагов локальной коррозии; стадия имеет достаточно высокую продолжительность и называется индукционным периодом;
- устойчивое функционирование очага локальной коррозии — катастрофически быстрое разрушение локально активированных участков металла;
- завершение — "залечивание" (репассивация) очагов локальной коррозии.

Часто происходит переход одного вида локальной коррозии в другой. Например, начальной стадией развития язвенной, межкристаллической и щелевой коррозии является ПК в местах несплошности и отслоения покрытий.

Рассмотрим более подробно перечисленные виды коррозии.

Питтинговая коррозия. Возникает в морской воде, растворах солей, в охлаждающих системах холодильных машин, в системах оборотного водоснабжения химических предприятий. К ней склонно подавляющее большинство металлов (Fe, Ni, Co, Mn, Cr, Ti, Al, Mg, Zr, Nb, Ta, Cu, Zn и др.) и конструкционных материалов на их основе.

Название "питтинг" обычно применяют к глубоким точечным поражениям. В зависимости от температуры, кислотности, химсостава раствора форма питтингов бывает разной — полусферической, цилиндрической, полиэдрической, закрытой, открытой и т. д.

Полусферическую форму имеют так называемые полированные питтинги. Их внутренняя поверхность блестящая, что свидетельствует об изотропном, не зависящем от структуры, растворении, близком по механизму к электрополировке.

Ограненные (кристаллографические) питтинги, а также питтинги неправильной формы (анизотропно растущие в различно

ориентированных зернах металла), как правило, являются травленными. Форма кристаллографических питтингов соответствует правильным пирамидам, призмам и сложным многогранникам, а тип огранки определяется пустотами кристаллической решетки, образовавшимися на начальных стадиях слияния множества более мелких кристаллографических осей. Образование питтингов протекает по электрохимическому механизму.

Основной причиной возникновения питтингов является дефектность (неоднородность) структуры реальных металлических материалов. Химический состав сплавов оказывает наиболее существенное влияние на их питтинговость.

Язвенная коррозия. Протекает на поверхности активно растворяющихся металлов, в водных хлоридсодержащих средах (водоводы, водопроводы, теплоэнергетическое оборудование).

Стойкость углеродистых и низколегированных сталей против язвенной коррозии в значительной степени зависит от их структурных и структурно-фазовых составляющих.

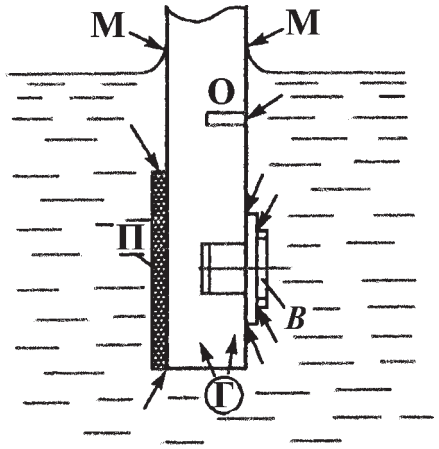


Рис. 111. Благоприятные места для развития щелевой коррозии (показаны стрелками): П — изолирующее покрытие; Г — газовый пузырек; О — узкое отверстие; *В* — резьбовое соединение с шайбами, фланцами, прокладками; М — граница соприкосновения раствора с металлическим изделием

Резкое снижение стойкости сталей язвенной коррозии происходит при выделении в их структуре сульфидных неметаллических включений на основе кальция. Для сталей с ферритно-перлитной структурой склонность к язвенной коррозии возрастает при образовании непрерывной сетки тонкодисперсных перлитных выделений.

Щелевая коррозия. Наличие в конструкции узких щелей, зазоров, застойных мест, дефектов в виде микрощелей или микротрещин приводит к возникновению коррозии (рис. 111).

Часто причиной щелевой коррозии является развитие в указанных дефектах питтингов. Изменение свойств раствора в щелях и зазорах (с течением времени он подкисляется, становится более концентрированным по

агрессивным анионам) приводит к усилению разрушения. Склонность к щелевой коррозии уменьшается с увеличением степени легирования сталей. Наиболее стойкие материалы — сплавы на основе никеля и суперсплавы с повышенным содержанием хрома, никеля, молибдена.

Межкристаллическая коррозия. Причиной МКК является ускоренное растворение границ зерен металла. Ей подвержены нержавеющие стали, сплавы на основе никеля, алюминий и его сплавы.

Скорость развития МКК зависит от потенциала металла. Обеднение приграничных зон хромом и возникновение в этих областях сегрегации примесей приводят к ускоренному растворению нержавеющих сталей.

При контакте с агрессивной средой обедненные хромом области подвергаются наиболее значительному растворению. Чем больше разность концентраций хрома в теле зерна и его приграничных областях, тем выше скорость МКК. Иногда причиной МКК является образование на границах зерен питтингов.

Разновидностью МКК является так называемая ножевая коррозия, при которой коррозионный процесс локализуется в очень узких приграничных областях металла. Ножевая коррозия характерна для многослойных сварных швов. Этому виду коррозии обычно подвержены стабилизированные титаном стали, эксплуатирующиеся в азотной кислоте, и стали с высоким содержанием молибдена.

Контактная коррозия. Развивается в растворах электролитов при контакте металлов, обладающих различными электрохимическими свойствами, например системы углеродистая сталь—нержавеющая сталь, углеродистая сталь—алюминий (или его сплавы) и др. Контактная коррозия может возникать также в случаях, если различие электрохимических свойств обусловлено применением пайки или сварки при изготовлении конструкции из одного и того же металла, или при контакте деталей, изготовленных из металла одной и той же марки, но существенно различающегося по своим свойствам в ее пределах. Механические напряжения, приводящие к изменению электрохимических характеристик металла, также могут вызвать возникновение контактной коррозии при соединении деталей из одного

и того же металла, но по-разному механически обработанных. Таким образом, плохо продуманные с точки зрения конструкционного оформления сложные металлические объекты могут досрочно выходить из строя.

В случае, когда оборудование пролегает в грунтах, отличающихся по составу и кислотности (металл контактирует со средой различного состава), также возможна контактная коррозия. Кроме того, при эксплуатации теплообменного оборудования коррозия протекает в условиях теплопередачи и изменение потенциала связано с воздействием температуры.

8.4. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ В ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Атмосферная коррозия — это коррозия сооружений и оборудования, эксплуатирующихся в нормальной земной атмосфере.

На скорость процесса атмосферной коррозии влияют характер атмосферы, продолжительность воздействия, состав металла и состояние его поверхности, а на качество и состав образующихся на поверхности металла пленок влаги — влажность, температура и степень загрязнения атмосферы.

Сильно загрязненные промышленными отходами (газами CO_2, SO_2, NO_2, NH_3, угольной пылью и др.) среды являются наиболее агрессивными. Так, в атмосфере сельской местности скорость коррозии стали составляет 100–250 г/м^2 в год, а в атмосфере городов с развитой промышленностью — 450–550; для цинка — соответственно 7–20 и 40–80 г/м^2 в год.

В среднем скорость коррозии металлов в атмосфере ниже, чем в почве и морской воде.

В промышленной атмосфере медь покрывается зеленой защитной пленкой продуктов коррозии (патиной), состоящей главным образом из основного сульфата меди $CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$. На медном куполе церкви, расположенной на окраине города, сторона, обращенная к центру города, может быть покрыта зеленой патиной, а противоположная часть купола остается красно-коричневой, так как с этой стороны на медь попадает меньше серной кислоты.

В зависимости от влажности атмосферы различают мокрую (100 %), влажную (< 100 %) и сухую (< 60 %) коррозию.

Важное значение для характера протекания атмосферной коррозии имеют особенности конструкции изделия. Наличие узких щелей и зазоров, способствующих капиллярной конденсации и застою влаги, усиливает коррозию и может привести к образованию язв (рис. 112).

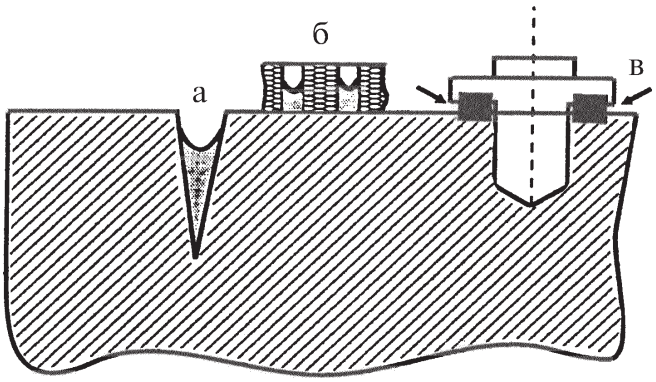


Рис. 112. Влияние конструктивных особенностей изделий на центры капиллярной системы конденсации влаги и усиление атмосферной коррозии:
а — щель или зазор в деталях конструкции;
б — поры в защитном покрытии или в оксидной пленке;
в — неплотности в резьбовых и винтовых соединениях

Стойкость металлов к атмосферной коррозии зависит от их химической природы и состояния поверхности. Приведем приближенные данные по стойкости некоторых металлов в городской атмосфере:

Металл	Pb	Al	Sn	Cu	Ni	Zn	Fe
Скорость коррозии, мкм/год	4	8	12	12	32	50	200

Почва и грунт — сложная природная среда, вызывающая коррозию различных трубопроводов, силовых кабелей и кабелей связи, опор, емкостей и других металлических конструкций.

Агрессивность грунта определяется его пористостью (аэрацией), электропроводимостью, наличием растворенных солей, влажностью, кислотностью или щелочностью.

Для каждого вида почвы существует свое значение критической влажности, при которой коррозионные потери достигают максимума. Для глинистых почв это 12–25 %, для почвенных — 10–20 %.

Помимо равномерной коррозии подземные металлические сооружения подвержены питтингу и коррозионному растрескиванию. Питтинг возникает чаще всего на нижней части трубопроводов, где происходит постоянный контакт с грунтом.

Блуждающие токи — причина серьезных коррозионных разрушений подземных коммуникаций и сооружений в промышленной зоне. Блуждающие постоянные токи появляются вследствие утечки в грунт постоянного тока, потребляемого наземным и подземным рельсовым транспортом (метро, трамвай, электрифицированная железная дорога), электросварочными агрегатами. Участки, где блуждающие токи из земли проходят в металлическую конструкцию, становятся катодами, а там, где ток стекает с металла в почву, — анодами. Протекание тока величиной 1 А в течение года соответствует растворению около 9 кг железа, 11 кг цинка и меди, 34 кг свинца, 3 кг алюминия. В некоторых неблагоприятных случаях были зарегистрированы блуждающие токи величиной 200–500 А.

Микроорганизмы и продукты их жизнедеятельности оказывают существенное влияние на процесс почвенной (подземной) коррозии.

В почве обитают два вида микроорганизмов: аэробные, жизнедеятельность которых протекает только при наличии кислорода, и анаэробные бактерии, развивающиеся при отсутствии кислорода. Коррозия металлов, вызванная или усиленная воздействием микроорганизмов, носит название **биологической** или **биохимической**.

Кислород и хлориды металлов, содержащиеся в морской воде, влияют на ее агрессивность. В зависимости от температуры, концентрации воды и географического района потери железоуглеродистых сплавов составляют 1–3 г/(м^2·сут).

Портовые сооружения, причалы, суда, оборудование морских нефтепроводов подвержены воздействию морской коррозии.

Соленость морской воды определяют в промиллях (‰). Промиллей называется количество твердых веществ в граммах, растворенных в 1000 г морской воды, при условии, что все галогены заменены эквивалентным количеством хлора, все карбонаты переведены в оксиды, органические вещества сожжены. В этом случае 1‰ = = 0,1 мас. %. Средняя соленость воды в океане 3,0–3,5‰. Но она значительно колеблется в различных водных бассейнах.

Так, содержание солей: в заливе Кара-Богаз — 16 %; в Красном море — 4,1; в Средиземном море — 3,9; в Атлантическом океане — 3,5; в Черном море — 1,7; в Финском заливе — 0,4; в речной воде — 0,03 %.

Повышенное содержание кислорода в поверхностных слоях воды вызывает усиленную коррозию в области ватерлинии судов, на участках гидросооружений, находящихся близко к поверхности или периодически омываемых водой.

На погруженных в воду конструкциях закрепляются или развиваются многие растительные и животные организмы. Это явление называется **обрастанием**. Микроорганизмы ускоряют разрушение противокоррозионных покрытий, а оголенные участки поверхности приводят к разрушению металла.

Конструкции, работающие в условиях одновременного воздействия агрессивных сред и механических напряжений, подвергаются более сильному разрушению.

Процессы синтеза аммиака, мочевины, этилового спирта протекают в агрессивных средах, в условиях повышенных температур, при движении газового потока под давлением 35–40 МПа.

Вибрационные сита, грохоты, фильтры работают в условиях коррозионно-активной среды и механических нагрузок.

Коррозионному растрескиванию подвержены выпарные аппараты, трубопроводы, автоклавы и другие аппараты.

Не менее опасное разрушение металла наблюдается при одновременном воздействии на него агрессивной среды и переменных нагрузок. Такой вид воздействия испытывают компрессоры и насосы, роторы, диски, лопатки турбин и т. д.

Механические напряжения бывают двух видов: *внутренние* и *внешние*, они приводят к коррозионному растрескиванию, усталости, кавитации, эрозии (фреттинг-коррозия).

Внутренние напряжения возникают при термической и механической обработке деталей, при сварке. Внешние, приложенные извне, могут быть статическими и переменными. Под влиянием механических напряжений меняется структура поверхнос-

ти слоя металла, а это вызывает изменения потенциала на отдельных участках, разрушение защитных пленок.

Коррозионные процессы при механических нагрузках протекают через три последовательные стадии: инкубационный период, отвечающий отсутствию видимых разрушений; период образования очагов коррозии; период быстрого масштабного разрушения.

Коррозионное растрескивание (КР) — это разрушение металла вследствие возникновения и развития трещин при одновременном воздействии растягивающих напряжений и коррозионной среды. Для него характерно почти полное отсутствие пластической деформации металла.

КР — это опасный вид разрушения металлов. В химической аппаратуре КР наиболее часто наблюдается в конструкциях, которые имеют остаточные напряжения после термической или механической обработки, при монтаже и сборке оборудования, при сварке, в условиях эксплуатации при повышенных давлениях и температурах.

На возникновение КР и его интенсивность оказывают большое влияние характер агрессивной среды, ее концентрация и состав. КР в напряженном состоянии подвержены все металлы и сплавы. На долю КР в химической, нефтегазовой и теплоэнергетической отраслях промышленности приходится от 20 до 40 % всех коррозионных разрушений.

Усталость металла — это разрушение под влиянием периодической динамической нагрузки при напряжениях значительно меньших, чем предел прочности. В химической промышленности достаточно часто наблюдаются случаи такого разрушения деталей аппаратов и машин. Усталостное разрушение обычно сопровождается образованием меж- и транскристаллитных трещин. На величину усталости влияет среда и режим термообработки.

Кавитация — это процесс образования и исчезновения пузырьков в жидкости. Исчезновение пузырьков сопровождается гидравлическим ударом, который и является причиной кавитационной эрозии. Возникновение пузырьков происходит в области низкого, а исчезновение — в области высокого давления.

Кавитационная эрозия наблюдается при эксплуатации гидротурбин, гребных винтов, насосов, клапанов, запорных устройств в трубопроводах. Она обусловлена нестационарностью

потока жидкости, обтекающей твердое тело. Сначала происходит прогрессирующее разрыхление материала, приводящее к образованию многочисленных микротрещин, затем начинается выкрашивание мелких частиц.

На разрушение деталей при кавитационном действии жидких коррозионных сред большое влияние оказывают состав, структура сплава и скорость потока.

Фреттинг-коррозия — это коррозия при трении. Этот процесс происходит в различных болтовых, шлицевых, замковых, заклепочных соединениях, в процессе работы которых совершаются повторные относительные перемещения (смещения). Соприкасающиеся поверхности при фреттинге никогда не разъединяются, и, следовательно, продукты разрушения не имеют выхода из зоны контакта. Это усиливает коррозию и износ металлов.

Скорость фреттинг-коррозии зависит от природы металла, состава среды, температуры, удельной нагрузки.

8.5. ЗАЩИТА МЕТАЛЛА ОТ КОРРОЗИИ

Существующие способы противокоррозионной защиты направлены на снижение скорости коррозии. Этого можно достигнуть за счет:

- подбора соответствующих коррозионных сплавов;
- изменения состава коррозионной среды;
- применения защитных покрытий;
- изоляции металла от агрессивной среды слоем более стойкого материала;
- электрохимических методов защиты.

Первая группа методов связана с легированием и созданием сплавов с определенными коррозионными и эксплуатационными характеристиками. Ко второй группе относится обработка среды для уменьшения ее агрессивности ингибиторами. **Ингибитор** — это химическое вещество, введение которого в среду в небольших концентрациях приводит к значительному уменьшению скорости коррозии.

Ингибиторы подразделяются:

- по механизму своего воздействия — на катодные, анодные и смешанные;

• по химической природе — на неорганические, органические и летучие;

• по сфере влияния — в кислой, щелочной и нейтральной среде.

Действие ингибиторов обусловлено изменением состояния поверхности металла вследствие адсорбции ингибитора или образования с катионами металла труднорастворимых соединений. Защитные слои, создаваемые ингибиторами, всегда тоньше наносимых покрытий.

В качестве таких веществ применяют, например, неорганические вещества с окислительными свойствами — пассиваторы (хроматы, нитриты, молибдаты); консистентные смазки, содержащие органические добавки (продукты окисления нефти, соли сульфированных масел и др.); летучие ингибиторы — вещества с невысоким, но достаточным для замедления коррозии давлением паров (нитрит дициклогексиламмония, карбонат этаноламина и др.).

Нитрит дициклогексиламмония — один из наиболее эффективных летучих ингибиторов. Это кристаллическое вещество белого цвета, почти без запаха и сравнительно нетоксичное. Давление паров при температуре 21 °С составляет примерно одну десятую давления паров ртути. Одним граммом можно насытить ~550 м³ воздуха и сделать его малоагрессивным по отношению к стали. Это вещество медленно разлагается и эффективно предотвращает коррозию стали при комнатной температуре в течение нескольких лет.

Универсальным и давно используемым способом защиты является нанесение изолирующего покрытия на поверхность металла. К поверхностным тонкослойным покрытиям относятся *неорганические защитные пленки*, *гальванопокрытия* и *лакокрасочные покрытия*.

Выбор того или иного покрытия зависит от сроков эксплуатации изделия и скорости коррозии. Так, применение лакокрасочных покрытий экономически выгодно при долговечности не более 10 лет и скорости коррозии металла до 0,05 мм/год.

Повышение долговечности при скорости коррозии металла 0,5–1,0 мм/год может быть достигнуто при использовании ком-

бинированных металлизованных лакокрасочных покрытий. Например горячее цинкование плюс лакокрасочное покрытие, ручная металлизация плюс лакокрасочное покрытие. Использование этого вида защиты позволяет увеличить продолжительность защиты до 30 и более лет.

При химической и электрохимической обработке можно создать на поверхности фосфатные или оксидные покрытия, обладающие высокой адсорбирующей способностью, электроизоляционными свойствами, повышенной твердостью и износостойкостью. При дополнительной обработке пассивирующими растворами, смазочными или лакокрасочными материалами значительно повышается коррозионная стойкость металлов и сплавов.

Фосфатирование применяют для черных и цветных металлов, и оно состоит в образовании малорастворимых фосфатов железа, марганца или цинка. Фосфатные пленки обладают хорошей адгезией, имеют высокоразвитую шероховатую поверхность. Они являются хорошим грунтом для нанесения лакокрасочных покрытий и пропитывающих смазок. Фосфатирование используют для изделий, которые эксплуатируют в морской воде, в тропических районах. Недостатком фосфатных пленок является низкая прочность и эластичность. Они имеют короткий срок эксплуатации.

Оксидирование — это процесс образования оксидных пленок на поверхности металлических изделий.

Современный метод оксидирования — химическая и электрохимическая обработка деталей в щелочных растворах.

Электрохимическое оксидирование ведут в растворе 4 %-ного едкого натра при температуре 65–120 °С и анодной плотности тока от 2,5 до 10 А/дм^2. Продолжительность анодной обработки не превышает 60 мин. Оксидирование черных металлов носит название **воронения**.

Оксидная пленка на малоуглеродистой стали имеет глубокий черный цвет, а на высокоуглеродистых сталях — черный с сероватым оттенком. Для повышения антикоррозионных свойств оксидированное изделие погружают на 2–3 мин в горячий 2–3 %-ный раствор мыла, а затем на 5–10 мин в минеральное трансформаторное или машинное масло при температуре 105–120 °С. После этой операции поверхность покрытия становится

блестящей, с равномерной черной окраской. Толщина оксидных пленок составляет 0,8–1,5 мкм.

Противокоррозионные свойства поверхностной пленки оксидов невысоки, поэтому область применения этого метода ограничена. Основное назначение его — декоративная отделка. Почти все стрелковое оружие и ряд точных приборов приобретают за счет этого красивый черный цвет. Воронение используют и в том случае, когда необходимо сохранить исходные размеры изделия, так как оксидная пленка составляет всего 1,0–1,5 микрона.

Для защиты от коррозии используют метод **пассивирования** — обработки металла в растворах хроматов для нитритов. Например, стальные детали, обработанные в 60–90 %-ном растворе нитрита натрия, не ржавеют в течение двух лет.

Анодирование — это процесс образования оксидных пленок на поверхности алюминия. Процесс искусственного образования толстых оксидных пленок может быть проведен химическим и электрохимическим способами.

Пленки, образующиеся при анодной обработке алюминия, обладают достаточной толщиной и рядом ценных свойств: они защищают металл от коррозии и являются хорошим подслоем под лакокрасочные покрытия. Анодные пленки на алюминии обладают большим сопротивлением к истиранию, имеют высокое омическое сопротивление и хорошо окрашиваются, что позволяет придать изделиям из анодированного алюминия красивый вид.

Гальванические покрытия имеют преимущества по сравнению с другими методами защиты, поскольку они позволяют регулировать толщину слоя, экономно расходовать цветные металлы, наносить покрытия из металлов с высокой температурой плавления (Cr, Ni, Cu, Ag, Pt).

Защитные покрытия бывают *анодными* и *катодными*. По отношению к стали цинковое покрытие является анодным, а медное — катодным. Поэтому в начале начинает разрушаться цинк. При этом он защищает от разрушения железо или сталь тем дольше, чем больше толщина покрытия, т. е. является **протектором** (рис. 113, *а*). Медь — это катодное покрытие по отношению к железу, так как имеет потенциал более положительный. Поэтому разрушению будет подвергаться железо, и тем

в большей степени, чем выше пористость медного покрытия (рис. 113, *б*).

Для защиты деталей машин, трубопроводов, стальных листов применяют цинковые покрытия. Поскольку цинк является доступным и дешевым металлом, с его помощью защищают от коррозии около 20 % всех стальных деталей, и примерно 50 % производимого в мире цинка расходуется на гальванические покрытия.

Кроме цинка для таких покрытий используют кадмий, олово, свинец, никель, хром.

Никель обладает стойкостью на воздухе, в растворах щелочей и некоторых кислотах. Никель в паре с железом является катодом, так как имеет более электроположительный потенциал, чем железо. Никель может защищать сталь только механическим путем, следовательно, покрытие не должно иметь пор, но должно иметь большую толщину — 20–25 мкм. Существует несколько разновидностей никелевых покрытий.

***Никелирование матовое** — нанесение на поверхность металлических деталей матового слоя никеля.*

***Блестящее никелирование** используют для защитно-декоративной отделки поверхности. При этом отпадает необходимость полирования покрытия. Блестящий никель можно наносить на детали со сложным профилем, он обладает способностью сглаживать неровности.*

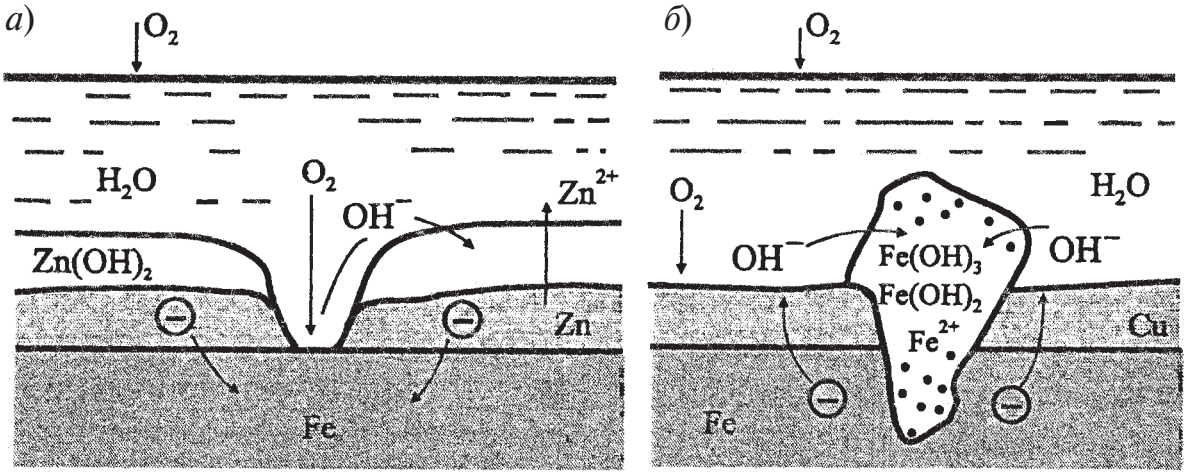


Рис. 113. Схема действия анодных (*а*) и катодных (*б*) по отношению к основному металлу металлических покрытий

Для получения блестящих покрытий в состав раствора электролита вводят специальные добавки — блескообразователи.

***Никелирование черное** — электролитическое нанесение на поверхность металлических изделий слоя никеля черного цвета. Такое покрытие используют как с защитно-декоративной целью, так и для уменьшения коэффициента отражения света. Оно нашло применение в оптической промышленности и в некоторых отраслях машиностроения.*

Для защиты аппаратов от газовой коррозии на их поверхность наносят жаропрочные или жаростойкие металлические покрытия с помощью следующих методов: *диффузионного*, *распыления металла*, *горячего* — погружения изделия в расплавленный металл и *механотермического (плакирования)*.

Одним из самых распространенных и надежных способов защиты являются лакокрасочные покрытия. Они дешевы и доступны, имеют простую технологию нанесения на поверхность, легко восстанавливаются в случае повреждения, отличаются разнообразием внешнего вида и цвета.

Защитные действия лакокрасочного покрытия заключаются в создании на поверхности металлического изделия сплошной пленки, которая препятствует агрессивному воздействию окружающей среды и предохраняет металл от разрушения.

Компонентами лакокрасочных материалов служат пленкообразующие вещества, растворители, пластификаторы, пигменты, наполнители, катализаторы (сиккативы).

Лаки — это коллоидные растворы высыхающих масел или смол в органических растворителях. Защитное твердое покрытие образуется вследствие испарения растворителя или полимеризации масла (смолы) при нагревании или под действием катализатора.

Краски представляют собой суспензию минеральных пигментов в пленкообразователе.

Эмали — это раствор лака, в который введены измельченные пигменты.

Пленкообразователи — это природные масла, естественные или искусственные смолы. Масла по своему составу представляют собой сложные эфиры (продукт взаимодействия кислот и спиртов).

Наиболее распространенный масляный пленкообразователь — олифа. Натуральную олифу получают из высыхающих растительных масел, обработанных при температуре 300 °С с целью частичной полимеризации. На воздухе олифа окисляется и полимеризуется до твердого состояния.

Растворители пленкообразующих веществ придают лакокрасочным покрытиям такую вязкость, при которой они легко наносятся на поверхность. В дальнейшем растворители испаряются. Растворителями могут быть: спирты, ацетон, бензин, скипидар, толуол, ксилол, этилацетат и др.

Пластификаторы (смягчители) — это вещества, повышающие эластичность пленок после высыхания. К ним относятся касторовое масло, каучуки, дибутилфталат, трикрезилфосфат, эфиры адипиновой кислоты.

Количество пластификаторов, вводимых в смесь, составляет 20–75 % массы пленкообразователя.

Сиккативы, или катализаторы, представляют собой магниевые и кобальтовые соли жирных органических кислот. Их вводят в состав композиций для ускорения высыхания масляных пленок.

Успешная противокоррозионная защита лакокрасочными материалами в значительной степени зависит от соблюдения технологии получения покрытий. Основные факторы, влияющие на срок службы покрытия:

- способ подготовки поверхности;
- методы нанесения и отверждения лакокрасочного покрытия;
- толщина комплексного покрытия.

Повышение требований по экологии способствует созданию новых прогрессивных лакокрасочных материалов: с высоким сухим остатком, водоразбавляемые, порошковые.

Материалы с высоким сухим остатком позволяют сократить на 30 % потребление органических растворителей, снизить примерно на 20–30 % расход лакокрасочных материалов, а также увеличить в 1,5–2,0 раза срок службы покрытия. В нашей стране эти материалы находятся на стадии промышленного внедрения.

В наибольшей степени соответствуют современным экологическим требованиям водоразбавляемые лакокрасочные материалы.

Порошковые краски — новый вид современных лакокрасочных материалов. Их применение позволяет практически исключить опасность загрязнения окружающей среды, снизить пожаро- и взрывопасность при работе. В настоящее время ведутся работы, направленные на усовершенствование и удешевление этого вида покрытий.

Новым классом современных лакокрасочных материалов являются модификаторы ржавчины.

За основу электрохимических методов борьбы с коррозией принят принцип непосредственного воздействия на скорость протекания анодных и катодных реакций. Сущность метода состоит в уменьшении скорости электрохимической коррозии металла при поляризации электрода от источника постоянного тока или при контакте с добавочным электродом, являющимся анодом по отношению к корродирующей системе.

Различают катодную и анодную электрохимическую защиту.

Катодную защиту применяют в том случае, когда металл не склонен к пассивации, как правило, для подземных сооружений (трубопроводы и кабели различных назначений, фундаменты, буровое оборудование), корпусов судов, морских буровых платформ, резервуаров химической промышленности и др. Часто катодную защиту применяют одновременно с нанесением защитных покрытий. Уменьшение скорости саморастворения металла при его внешней поляризации называют защитным эффектом.

Разновидностью катодной защиты является **протекторная защита**. В этом случае к защищаемой конструкции присоединяют более электроотрицательный металл — протектор, который, растворяясь в окружающей среде, защищает от разрушения основную конструкцию. После полного растворения протектора или потери контакта с защищаемой конструкцией протектор необходимо заменить.

Цинковые протекторы применяют для защиты оборудования, эксплуатирующегося в морской воде (морских судов, трубопроводов, прибрежных сооружений); алюминиевые — для защиты сооружений, эксплуатирующихся в проточной морской воде, а также для защиты портовых сооружений и конструкций, располагающихся в прибрежном шельфе.

Магниевые протекторы используют в основном для защиты небольших сооружений в слабоэлектропроводных средах, где эффективность действия алюминиевых и цинковых протекторов низка (грунтах, пресных или слабосоленых водах).

Анодную защиту применяют в электропроводных средах при эксплуатации оборудования, изготовленного из легко пассивирующихся материалов — углеродистых, низколегированных нержавеющих сталей, титана, высоколегированных сплавов на основе железа. Анодная защита перспективна для оборудования, изготовленного из разнородных пассивирующихся материалов, например нержавеющих сталей различного состава, сварных соединений.

Анодная защита пассивирующими ингибиторами-окислителями основана на том, что в процессе их восстановления возникает ток, достаточный для перевода металла в пассивное состояние.

Чтобы использовать анодную защиту, объект должен отвечать следующим требованиям:

- материал аппарата должен пассивироваться в технологической среде;
- конструкция аппарата не должна иметь заклепок, количество щелей и воздушных карманов должно быть минимальным, сварка — качественной;
- катод и электрод сравнения в защищаемом устройстве должны постоянно находиться в растворе.

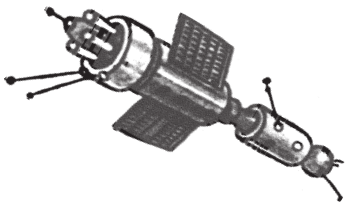
В химической промышленности для анодной защиты наиболее пригодны аппараты цилиндрической формы, а также теплообменники.

В настоящее время такую защиту применяют для цистерн, сборников, мерников, хранилищ в производстве серной кислоты, минеральных удобрений. Для уменьшения коррозии теплоэнергетического оборудования, работающего в воде при высокой температуре и давлении, используют **кислородную защиту**.

В химической промышленности широкое применение находят **неметаллические материалы**. Из них изготавливают как аппараты целиком, так и детали к ним. Кроме того, такие материалы используют как футеровки, обкладки и другие защитные покрытия для изоляции металлического корпуса. Часто такие покрытия бывают многослойными.

По химическому составу неметаллические материалы подразделяются на материалы неорганического и органического происхождения.

К неорганическим материалам относятся *горные породы*, *силикатные материалы*, *керамика* и т. д., к органическим — *полимерные материалы*, а также *материалы на основе каучука*, *графит* и *его производные* и т. д.



9. НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО

Честь науке — ей дано уменье
выводить нас из недоуменья.

М. Светлов

Космическая металлургия — это направление космической технологии, связанное с получением металлургическими методами материалов и изделий, обладающих уникальными свойствами и изготовление которых в земных условиях невозможно.

Методами космической металлургии могут производиться сплавы из несмешиваемых соединений, твердые растворы, композиты с уникальными характеристиками, пенометаллы.

Материалы будущего можно разделить на группы:

металлы: стали, композиционные материалы с металлической матрицей, металлокерамика, металлические пеноматериалы, жаропрочные суперсплавы, интерметаллиды, аморфные материалы, сплавы с поглощенным водородом; сверхпроводники, легкие и сверхлегкие сплавы на основе алюминия, магния, бериллия и др.; высокоэффективные хорошо свариваемые титановые сплавы; сплавы с особыми свойствами;

керамические материалы: композиты с керамической матрицей, керамические материалы для газовых турбин и двигателей; сверхпроводящая керамика, керамические покрытия, новые виды стекла (нелинейное оптическое стекло);

композитные материалы: высококачественные пластики с упрочнением из углеродных волокон; высококачественные металлические композитные материалы; высококачественные композиты типа С-С;

наноматериалы или ультрадисперсные системы (УДС): материалы с размерами частиц или зерен 1–100 нм (нановолокна, нанопленки, ультрадисперсные порошки и т. п.);

материалы для микро- и наноэлектроники: оптические интегральные схемы; полупроводниковые элементы со сверхрешеткой; гетероструктуры на квантовых размерных эффектах; суперинтеллектуальные чипы; микросистемная техника и микросенсорика.

9.1. НОВЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Возрастающие требования потребителей к свойствам конструкционных материалов относятся к таким показателям, как прочность, упругость и т. п. в расчете на единицу массы или удельного веса для снижения массы изделий и затрат по эксплуатации; повышение сопротивляемости воздействию рабочей среды (температура, агрессивность, излучение и т. п.); увеличение срока службы и надежности в эксплуатации.

Ведущими высокотехнологичными потребителями новых металлических материалов являются аэрокосмический комплекс, энергетика, автомобилестроение, медицина и др., например, главная проблема при создании электростанций нового поколения — разработка и внедрение технологичных материалов, обеспечивающих ресурс работы установок 200 тыс. ч и более (свыше 25 лет).

Явление сверхпроводимости было открыто в 1911 г., но до применения его на практике прошло почти столетие. После получения реальных материалов начали развиваться направления по использованию этого явления: производство и преобразование энергии; высокоскоростной наземный транспорт на магнитной подвеске; уникальное медицинское оборудование (томографы); работы по обогащению руд; очистка воды.

Стало развиваться новое направление — создание уникальных экспериментальных установок для физических

исследований, начиная с самых простых магнитов со сверхсильными магнитными полями и кончая мощными ускорительно-накопительными комплексами для исследования по физике элементарных частиц, в которых сверхпроводящее оборудование занимает периметр в несколько километров. Явление сверхпроводимости либо приводит к качественному улучшению электроэнергетических показателей по сравнению с существующими традиционными аналогами, либо позволяет создать уникальное оборудование, реализация которого была бы абсолютно невозможна без применения сверхпроводимости.

Эффективность и экологическая безопасность энергосистем зависит от технологических параметров энергоблоков. Турбины бывают паровые и газовые, они существенно различаются конструктивно и по техническим параметрам. Различные рабочие температуры и габариты роторов определяют применение разных материалов при их изготовлении. В последние двадцать лет в мире ведутся интенсивные поиски оптимального состава роторных сталей и способа их производства. Для этой цели была создана специальная программа (европейская программа COST505), в результате которой были разработаны новые классы роторных сталей и технология, основанная на схеме ВИП–ЭШП–ВДП. Наибольший слиток для газовой турбины с температурой газов 1260 °С получен диаметром 610 мм, а нужен диаметром 915 мм, для турбины с температурой 1427 °С создан слиток диаметром 500 мм, тогда как необходим диаметр 685 мм. Так что работы в этой области будут продолжаться.

Нанотехнологии (по-гречески “нанос” — карлик) имеют дело с объектами размером порядка нанометра (миллионная доля миллиметра). Теоретически с помощью нанотехнологии можно создавать любые изделия: вычислительные элементы, искусственные органы, конструкционные материалы с уникальными свойствами, высококачественные продукты и т. д. Биотехнология оказалась первым этапом развития нанотехнологий. Она ориентирована на синтез биологически активных веществ из крупных молекулярных блоков. На базе “молекулярного сборщика” атомы встраиваются в формируемую структуру.

9.2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Большинство современных материалов по своей сути являются композиционными. **Композиционные материалы** (композиты) — это твердые системы, состоящие из двух или более компонентов, имеющих четкую границу раздела и обладающих совокупностью свойств, не присущих ни одному из этих компонентов в отдельности. Например, один из двух компонентов может быть пластичным, но малопрочным, а другой — высокопрочным, но хрупким. В целом же получается достаточно прочный и пластичный материал. Такие материалы можно получить либо в результате кристаллизации из расплава, превращения в твердом состоянии (естественным путем), либо при искусственном сочетании компонентов. Один из компонентов называют матрицей, другие компоненты, упрочняющие или армирующие эту матрицу, могут быть в виде как изолированных друг от друга частиц, нитей, пластин, волокон, так и в виде связной конструкции (подобно сетке арматуры в железобетоне).

По характеру распределения армирующего материала композиты делятся на два класса: с упорядоченным и с неупорядоченным армированием. В первом случае конфигурация распределения арматуры задается заранее, во втором она носит случайный характер. Композиты, в которых заранее заданное распределение армирующей фазы создает требуемое изменение служебных свойств по объему материала, называются функционально-градиентными материалами (ФГМ).

Если армирующая фаза имеет вид отдельных мелких частиц сферической, кубической и подобных форм, композит называется дисперсно-армированным. Если армирующая фаза присутствует в виде волокон (непрерывных или дискретных), то такой композит называют волокнистым (ВКМ), а если армирующая фаза присутствует в виде широких пластин (слоев), то композит называют слоистым (СКМ).

По служебному назначению композиты можно разделить на три группы: конструкционные (включая износостойкие); со специальными физическими свойствами (проводники, сверхпроводники, токопроводящая резина и т. п.); информационные.

Дисперсно-армированные композиты обычно относятся к первым двум группам. Существует много материалов со специ-

альными свойствами (например, система медь—графит для скользящих электроконтактов), но важнейшим видом этих композитов являются конструкционные дисперсно-упроченные композиты (ДУКМ). Они имеют металлическую матрицу, а вторая фаза представлена в виде мелких (менее 1 мкм) частиц оксидов, нитридов и карбидов. Существуют материалы с матрицей на основе железа, никеля, алюминия и других легких металлов, титана, тугоплавких металлов и интерметаллидов.

Получают ДУКМ обычно методами порошковой металлургии — тщательным смешением (физическим или химическим) порошков матрицы и второй фазы, с добавлением 1–2 % связующего, формовкой заготовки и ее спеканием.

Примером ДУКМ на алюминиевой матрице являются материалы САП — спеченные алюминиевые пудры, армированные оксидом Al_2O_3.

Широко известны жаропрочные ДУКМ на основе никеля, упрочненные 1–2 % оксидов Th, Hf, Al — так называемый TD-никель. Очень перспективным материалом является композит FeAl40 Grade 3 (Fe + 24 % Al; 0,11 % Zr; 0,0025 % B; 1 % Y_2O_3), свойства которого превышают свойства сталей и не уступают свойствам никелевых и титановых сплавов при температуре 500–600 °C, а коррозионная и эррозионная стойкость превышают уровень свойств лучших нержавеющих сталей.

К ДУКМ близки так называемые керметы — композиты с металлической матрицей и керамическим упрочнением с высокой (до 45–60 %) объемной долей керамической фазы. Примером керметов являются карбидостали и ферротитаниты, в которых стальная матрица упрочнена частицами карбида титана TiC размером 2–5 мкм. Это очень износостойкие материалы, используемые в деталях, подверженных износу трением. По режущим свойствам они превышают быстрорежущие стали и только немного уступают твердым сплавам, будучи значительно дешевле последних.

Очень перспективными и широко используемыми являются волокнистые и слоистые композиты с матрицами из различных материалов:

стеклопластики — стеклянные волокна в матрице из полимерных смол;

углепластики — углеродные волокна в полимерной матрице;

ВКМ и СКМ с металлической матрицей и керамическими или металлическими волокнами;

слоистые металлоорганопластики, применяемые в авиастроении взамен алюминиевых сплавов, снижающие массу конструкций и резко повышающие ее надежность за счет резкого (в 10–15 раз) снижения скорости роста усталостных трещин;

углеродные ВКМ с углеродной (графит) матрицей и углеродными или карбидными (SiC) волокнами;

керамические ВКМ с керамической (SiC, Si_3N_4) матрицей и металлическими (MO, W) волокнами для работы при температуре до 1700 °С.

Главная задача армирующей фазы в конструкционных ВКМ и СКМ — воспринимать внешнюю нагрузку, а задача матрицы — связать волокна в компактный монолит, передавать напряжения от волокна к волокну, защищать волокна от внешних воздействий.

ВКМ и СКМ бывают с пластичной матрицей и пластичными волокнами (металл—металл), пластичной матрицей и хрупкими волокнами (металл—керамика) и хрупкой матрицей и пластичными волокнами (керамика—металл).

Методы изготовления ВКМ и СКМ зависят от свойств материалов. Композиты с полимерными матрицами изготавливают, пропуская пучки волокон через жидкие, быстро твердеющие смолы, а композиты с металлической матрицей — обработкой давлением, пропиткой пучка волокон расплавом, методами порошковой металлургии. Такие материалы используют в судостроении и аэрокосмической технике.

К материалам с особыми физическими свойствами относятся:

высокопрочные композиты с высокой проводимостью (медный провод в оболочке из нержавеющей стали; медно-ниобиевые провода);

сверхпроводники (металлические и керамические);

проводники с контролируемые свойствами.

Сверхпроводники (СП), работающие при температуре жидкого гелия (4,2 К), представляют собой многоволоконные ВКМ с волокнами из деформируемого сверхпроводящего сплава НТ-50 (50 % Nb, 50 % Ti) с диаметром волокон (жил) 6–

200 мкм и числом жил от 6 до 9000, расположенных в матрице из меди или бронзы. Получают такие СП многократной экструзией “сборок” — медных капсул, заполненных стержнями из бронзы, меди и сплава НТ-50 с последующим волочением экструдированных прутков.

Новейшим достижением в области СП является сверхпроводящая оксидная керамика на основе системы иттрий—барий—медь—кислород, которая охлаждается жидким азотом. Эти СП выпускают в виде проводов, проволоки, ленты в серебряной оболочке длиной до 600 м или в виде цилиндров и штабиков. Их можно использовать в магнитных подшипниках, допускающих скорость вращения до 100 000 об/мин., для транспорта на магнитной подушке, в электродвигателях с мощностью в пять-семь раз выше, чем у обычных.

9.3. АМОРФНЫЕ И ТИКСОТРОПНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Аморфные металлы и сплавы (металлические стекла) — новый класс материалов, в котором отсутствует упорядоченное расположение атомов, свойственное кристаллам. По уровню свойств они значительно превосходят кристаллические металлы и сплавы. Например, получены материалы, имеющие высокую прочность и твердость, износостойкость которых в 10—15 раз выше, чем у кристаллических материалов, коррозионная стойкость в сотни раз выше, чем у стойких сталей, а удельные потери при перемагничивании в 3—7 раз ниже, чем у электротехнических сталей.

Разработаны методы получения аморфных пленок, ленты, проволок, волокон и порошков. Аморфную ленту толщиной 20—40 мкм используют для магнитных экранов, защищающих электрокабели от помех, для трансформаторов с низкими удельными потерями энергии, для магнитных головок магнитофонов и т. п. Из ленты и проволоки делают вибраторы, реле, пружины, сейсмодатчики и т. п. Высокопрочные волокна используют для армирования волокнистых металлических композитов и бетона аэродромных полос. Аморфные ленты — исходный материал для получения материалов с микрокристаллической (0,1—1,0 мкм) и нанокристаллической (менее 0,1 мкм) структурами, обладающими повышенной прочностью.

Методы получения аморфных материалов различны в зависимости от вида и назначения материала. Для получения лент, проволоки и порошков используют методы быстрой и сверхбыстрой кристаллизации, для получения тонких пленок — осаждение металла из паровой фазы на подложку, а для получения аморфных слоев на поверхности изделий — ионную имплантацию.

Наибольшее распространение в производстве аморфных сплавов получил способ получения лент закалкой продавливаемых через профильные сопла расплавов на вращающийся холодильник. Этот метод обеспечивает высокую производительность технологического процесса, необходимое качество и однородность продукции, возможность автоматического управления. Тот же принцип используется и при непрерывном производстве литой проволоки.

Подавляющая масса аморфных и нанокристаллических материалов, выпускаемых промышленно в настоящее время в мире, относится к магнитомягким материалам. Годовые объемы производства сплавов этого класса исчисляются тысячами тонн, большая часть их объема — аморфные электротехнические стали (АЭС).

Конкурентоспособность АЭС определяется достигнутым уровнем удельных потерь при перемагничивании и стоимостью (при современных методах производства и технологиях), близкой к цене традиционных трансформаторных сталей. При этом существенным фактором является практически одинаковый уровень затрат и расход материалов при изготовлении обычных трансформаторов и из АЭС.

В настоящее время в США, Японии, Европе, странах Юго-Восточной Азии эксплуатируется более 100 тыс. единиц трансформаторов с магнитопроводами из аморфных электротехнических сталей. Недавно изготовлен и начал работать крупнейший в Европе трехфазный трансформатор 1600 кВ·А с сердечником из аморфной стали.

Производство и использование АЭС в России еще плохо развито, хотя парк трансформаторов, подлежащих замене вследствие выработки гарантированного ресурса, составляет не менее 130 тыс. единиц в год. Замена только этой части трансформаторного парка (без его расширения), благодаря уменьшению потерь холостого хода, дает экономию около 27 млн. кВт·ч/год.

Для изготовления такого количества трансформаторов требуется около 3,5 тыс. т в год аморфной ленты. ЦНИИЧермет и ВНИИМетмаш разработали технологию и оборудование для производства аморфных сталей, позволяющие организовать их выпуск в таких количествах. Экономические расчеты показывают, что использование аморфных сталей в сердечниках силовых трансформаторов становится выгодным при цене сталей менее 3,3 дол./кг. Разработанная технология позволяет при указанных объемах производить аморфные стали, себестоимость которых укладывается в эти рамки и очень близка к себестоимости классических трансформаторных сталей.

Одна из важнейших причин сдерживания развития аморфных электротехнических сталей в России — отсутствие жесткого ограничения потерь энергии в нормативной документации на отечественные силовые трансформаторы, как это было 10–15 лет назад, когда снижение уровня потерь энергии при перемагничивании не в несколько раз, а всего на 4–5 % считалось большим достижением в области энергосбережения.

Нанокристаллические сплавы появились позже аморфных — их разработка и начало промышленного производства в мире относятся к началу 90-х гг. XX в. Целесообразно объединение аморфных и нанокристаллических материалов в один класс и совместное их рассмотрение, так как нанокристаллическая структура в технически важных случаях формируется на основе трансформации аморфного состояния. Наноматериалы также называют ультрадисперсными (УДМ).

УДМ используются в микроэлектронике, способствуя дальнейшей миниатюризации электронных приборов, в защитных системах поглощения ВЧ- и рентгеновского излучений, в качестве катализаторов в атомной энергетике, в термоядерной технике (мишени для лазерно-термоядерного синтеза), в качестве добавок к моторным маслам, восстанавливающим поверхности трущихся деталей, как конструкционные сверхпрочные материалы (сопла), в качестве шлифующего и полирующего материала при финишинге (конечной обработке) изделий электронной техники — полупроводников, диэлектриков и т. п.

В оборонной промышленности УДМ применяется в качестве радиопоглощающего покрытия самолетов-невидимок “Стелс”,

в новых видах взрывного оружия (графитовая бомба — контейнер, начиненный высокопроводящим УДМ-П графитом, выводящим из строя энергосистемы противника). Трубчатые графитовые нановолокна (фуллерены), обладающие сверхвысокой прочностью, перспективны для армирования композиционной суперброни для танков и бронежилетов. Фуллерены используются также как элементная база в микро- и наноэлектронике, а также в качестве защитных покрытий, в частности для защиты от лазерного излучения.

В медицине УДМ применяют для защиты персонала от рентгеновских лучей (перчатки, фартуки и т. п. из резины с УДП-свинцовым наполнителем в четыре раза легче обычных), а также для лекарств быстрого усвоения и действия, используемых в экстремальных условиях (ранения, полученные в результате катастроф, боевых действий и т. п.).

Необычность свойств УДМ позволяет утверждать, что начиная с 90-х гг. XX в. научно-технический прогресс стал определяться нанотехнологиями. В настоящее время специалисты, занимающиеся нанотехнологиями, вплотную подходят к решению вопроса о создании из нескольких атомов нужных структур, не существующих в природе, но смоделированных на компьютере специально для получения заданных свойств. В мире вопросам УДМ уделяется самое серьезное внимание. В конце 80-х гг. XX в. США и Япония ежегодно тратили на исследования в области УДМ 110–120 млн. дол. Рынок УДМ в США в 1996 г. составил 42 млн. дол., а в 2000 г. он уже оценивался в 154 млн. дол.

Метод, совмещающий в себе элементы литья и штамповки (обработка металлов в полутвердом состоянии), основан на открытии, сделанном в Массачусетском технологическом институте в начале 70-х гг. XX в. Процесс, основанный на этом открытии, был назван реолитьем (тиксолитьем или перемешиваемым литьем). Для тиксообработки необходимо наличие бездендритной структуры. Такая структура получается с помощью магнитогидродинамического перемешивания.

Полутвердоштампованные детали (автомобильные диски, тормозные цилиндры и клапаны, турбинные лопатки, кожухи, корпуса электродвигателей) вытесняют традиционно-штампованные, литье, вытачиваемые детали. Преимущества полутвер-

дой штамповки состоят в возможности полной автоматизации процесса, высокой производительности (от 120 до 360 деталей в час весом от 20 г до 13,6 кг), отсутствии последующей механической обработки, снижении дефектов из-за усадки и образования пор при кристаллизации. К недостаткам процесса можно отнести высокую стоимость сырья, специфическое оборудование, высокие требования к квалификации персонала.

9.4. КОСМИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Одним из первых направлений металлургических исследований в невесомости стала модификация пайки и сварки применительно к условиям космоса для обеспечения ремонта космических кораблей или сборки металлических конструкций на орбите. Впоследствии появилась возможность использовать особенности невесомости на борту орбитальных спутников для совершенствования других металлургических процессов. Такая ситуация сложилась к началу 70-х гг. XX в., когда стало возможным проведение первых экспериментов на борту космической лаборатории "Скайлэб". С целью проверки фундаментальных теорий в области материаловедения и разработки научной базы металлургии в 1975 г. были поставлены эксперименты на борту космического комплекса "Спейслэб-1". Значительное число космических экспериментов было проведено за последние пятнадцать лет на космических станциях "Салют".

Улучшение свойств металлических материалов при их получении в космических условиях связано с отсутствием:

- термической конвекции в расплаве — что способствует стабилизации плоского фронта затвердевания;
- плавучести — что приводит к стабильности смесей компонентов различной плотности;
- гравитации — что открывает возможность бесконтейнерного удержания расплава.

Процесс **бесконтейнерной** и **бестигельной плавки** в космосе может выглядеть так. После доставки с Земли слиток металла либо компонентный сплав (например, в виде спрессованного порошка) нагревается до температуры плавления всех его составляющих компонентов. Вследствие почти полного отсутствия

гравитационных сил расплав принимает сферическую форму. Охлаждение может осуществляться через охлажденную стенку технологической установки путем радиации.

Однако при плавлении на орбитальных космических станциях нужно учитывать микроускорения. При несовпадении центра массы расплавленного материала с центром масс орбитальной станции, с увеличением габаритов расплава, а также при внешних возмущениях могут возникнуть значительные инерционные силы, действующие на расплав. Поэтому необходимо иметь возможность управлять формой расплавленного материала или удерживать его в определенном объеме космического технологического аппарата. С этой целью используется как звуковое, так и магнитное поле (рис. 114).

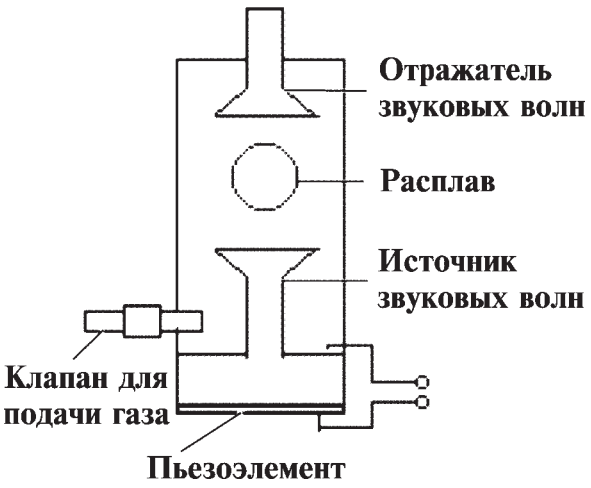


Рис. 114. Схема подвески расплава в звуковом поле

В настоящее время наиболее перспективным способом управления формой и удержания расплава в условиях пониженной гравитации считается способ бесконтейнерной плавки с электромагнитной подвеской расплавленного металла. В такого рода устройстве используются две-три пары электромагнитных катушек и механизм сервоуправления, который реагирует на сдвиг центра масс расплава к одной из катушек и автоматически регулирует систему. В условиях действия пониженной гравитации можно использовать установку и с одной электромагнитной катушкой. Поле, действующее вдоль оси катушки, не только позволяет удерживать металл, но и может служить источником нагрева путем индуцирования вихревых токов. Возможны и другие способы нагрева “подвешенного” металла, в частности излучением путем концентрации энергии солнечных лучей.

Бесконтейнерным методом можно производить из разнородных исходных материалов изделия не только из металлов и сплавов, но и из стекла с весьма совершенными поверхностями.

Примером таких изделий служат твердые фильтры из взвеси малопрозрачных частиц внутри прозрачного материала (показатели преломления таких частиц и материала совпадали лишь для одной длины волны). В результате световое излучение лишь этой длины волны будет проходить через фильтр без потерь; излучение всех других длин волн будет сильно рассеиваться и поглощаться из-за многократных отражений между частицами.

Первый эксперимент по пайке в невесомости был осуществлен на космическом комплексе “Скайлэб”. Для пайки были подготовлены два никелевых образца и два образца из различных марок нержавеющей стали, а также сложный припой. Каждый из образцов представлял собой трубку, помещенную в муфту и заполненную припоем. Ширина зазора поддерживалась при помощи ограничителей с точностью до 0,5 мм.

Проведенный на “Скайлэб” эксперимент подтвердил возможность пайки в космосе. Благодаря низкому остаточному гидростатическому давлению в жидком припое удалось запаивать зазоры, в 10 раз превышающие максимальные зазоры, запаиваемые на Земле. Полученный результат позволил сделать вывод, что требования к допускам на зазоры для пайки в космосе могут быть значительно ослаблены. Это существенно упростит изготовление деталей и сборку металлических конструкций.

Гелиосварка — сварка с использованием лучистой энергии Солнца. Особенно возрастают перспективы ее использования в космосе, где уровень радиации солнечной энергии в два раза выше, чем на Земле. Простота подвода и дозирования энергии позволяет с помощью одного устройства выполнять различные технологические операции. Возможность бесконтактного подвода энергии к изделию допускает обработку материалов в атмосфере любого состава и давления. Учитывая отсутствие механических воздействий лучей на расплавленный металл, можно считать, что лучистая энергия является единственным источником нагрева для сварки тонколистовых конструкций без опасности прожога.

С целью моделирования в земных условиях процессов гелиосварки, пайки и термообработки в Институте проблем материаловедения (Украина) была создана гелиоустановка, которая доказала перспективность использования лучистой энергии Сол-

нца для различных технологических целей в космосе. Дальнейшим развитием этого типа установок можно считать малогабаритную гелиоустановку “Луч-1”, которую можно эксплуатировать непосредственно в космическом полете.

Установка “Луч-1” имеет диаметр зеркала 1,5 м. В рабочий агрегат, где осуществляется технологический процесс (сварка, пайка и т. д.), встроена оптическая система. Солнечные лучи, падающие на отражатель, собираются в районе фокуса, где установлен контротражатель, как и отражатель, выполненный в форме параболоида, но значительно меньших размеров. С помощью электропривода и штанги контротражатель направляет лучи на систему плоских кварцевых линз, на которые нанесены кольцевые зоны. Вследствие этого лучи преломляются таким образом, что их поток концентрируется в нужной точке рабочей камеры, где размещены технологические образцы.

Интенсивность потока можно регулировать посредством кольцевой оптической заслонки, установленной после линз на пути хода лучей, или за счет перемещения контротражателя. В вакуумной камере с помощью упоров и установочных винтов закреплена поворотная головка, на которой размещено шесть образцов, подводимых по очереди под лучевой поток. Поворот головки и смена образцов производятся автоматически.

Проведенные эксперименты продемонстрировали применимость обычных методов лучевой сварки и пайки в условиях космоса.

Возможность получения в космосе материалов, обладающих уникальными свойствами, обоснована теоретически. В основном это относится к многофазным системам, управление процессами формирования структуры которых является важной областью материаловедения. Условия невесомости способствуют достижению такой цели.

9.5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Обычной “нержавейкой” в наши дни никого не удивишь. А вот в США выдан патент на прозрачную нержавеющую сталь. Столь необычный металл изготовляют электрохимической обработкой тончайших стальных по-

лос, в результате чего между отдельными кристаллами образуются субмикроскопические трещины. Эти мельчайшие поры не снижают прочность металла, но делают его прозрачным, придают ему равномерную микропористость. Такой материал используется для изготовления некоторых клапанов, фильтров и т. д.

При горении дерева, угля, газа, нефти атомы углерода теряют электроны, а атомы кислорода их приобретают. Таким образом углерод и кислород соединяются в молекулы углекислого газа. Химическая энергия системы переходит в тепловую, процесс идет с высокой скоростью, повышается температура, появляется видимое пламя. Обмен электронами при горении происходит хаотично, неупорядоченно.

Первый топливный элемент на основе химических процессов был создан случайно. В 1839 г. У.Р. Гров проводил опыты с целью разложения разбавленного раствора серной кислоты электрическим током и обнаружил, что процесс может идти в обратную сторону при использовании платиновых полосок, полупогруженных в раствор. Это открытие он опубликовал как бы между прочим.

Ни сам ученый, ни его современники до конца не осознали, что было открыто новое явление — основа принципиально иных технологий. Фактически химическое горение превращалось в электрический ток.

Электрохимические батареи, генерирующие ток, были уже известны, но в них “сжигались” металлы: цинк, свинец, никель, а в опыте Грова — водород, который соединялся с кислородом. Электрохимически сжигать водород гораздо дешевле.

Электрохимия основана на взаимодействии газа (водорода), источника анионов (электролита — раствор щелочи в воде) и металла, принимающего образующиеся в реакции электроны. Этот процесс идет на стыке трех фаз (трехфазной границе). Чтобы получить электрический ток к границе раздела металл—электролит—газ, необходимо непрерывно подводить ионы и отводить электроны. Обеспечивается это вторым специально подобранным электродом. К нему подводится кислород или воздух.

Электрохимическое горение может проходить при обычной температуре и почти без потерь. В 1893 г. Нернст теоретически

доказал, что при электрохимическом соединении угля с кислородом коэффициент полезного действия достигает 99,75 %. Это основное преимущество топливных элементов.

Аналогичные процессы протекают в живой природе, где химическая энергия преобразуется в механическую (в мышцах), в электричество (в нервных клетках), в свет (светлячки). Во всех этих превращениях происходит холодное горение водорода в кислороде.

В 1894 г. известный немецкий ученый Оствальд писал: “Путь, которым можно решить самый важный из всех технических вопросов — вопрос получения дешевой энергии, должен быть теперь найден электрохимией. Если мы будем иметь элемент, производящий электроэнергию непосредственно из угля и кислорода воздуха в количестве, более или менее соответствующем теоретическому, то это будет техническим переворотом, превосходящим по своему значению изобретение паровой машины”.

Преимущества топливных элементов очевидны: работа при обычной температуре, отсутствие выбросов, высокий КПД.

Французский ученый А. Беккерель 150 лет назад обнаружил электрический ток в цепи при освещении электрохимической ячейки. Это было первым шагом к электрохимическому преобразованию солнечной энергии. В настоящее время солнечные батареи широко используются в быту и в производстве как источники электроэнергии и тепла.

10. ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Острый язык — единственный инструмент,
не теряющий своих режущих свойств
при постоянном пользовании.

Некто

К инструментам всегда относились с почтением, а в древности даже с суеверием. Случайно обнаруженные каменные орудия служили талисманами: их носили на груди для храбрости; ели в перетертом виде с пищей, чтобы самому быть здоровым; подсыпали пудру из каменных топоров и молотков в вино и пищу врагам, чтобы их одолел недуг и от них отвернулось счастье; клали топор под крышу дома, чтобы не было пожара; считалось, что каменный талисман у полководца способствует взятию городов.

Города увековечивали инструменты на своих гербах: Тула (1778) — перекрещенные клинки, ружейный ствол и два молота; Александров (1781) — слесарные тиски и наковальня; Алапаевск (1783) — механический молот для ковки железа; Кузнецк (1804) — кузнечные инструменты и кузница.

Лазер — это слово составлено из первых букв английского определения light amplification by simulated emission of radiation — “усиление света с помощью стимулированного излучения”.

В основу работы лазеров положено явление электромагнитных колебаний при помощи вынужденного (стимулированного) излучения атомов и молекул. Возбужденный каким-либо обра-

зом электрон вновь возвращается с верхних электронных оболочек атома на нижние. Каждый атом при люминесценции испускает свой свет в разное время, не согласованное с атомами соседей. В результате возникает хаотическое излучение.

Между средой и светом постоянно происходит обмен энергией. Среда может как поглощать и рассеивать, так и, при определенных условиях, усиливать падающее на нее излучение. Это явление было предсказано Альбертом Эйнштейном еще в 1916 г. В одной из статей он показал, что согласовать вспышки излучения отдельных атомов между собой позволило бы внешнее электромагнитное излучение. Оно может заставить электроны разных атомов взлететь на одинаково высокие возбужденные уровни. Этому же излучению нетрудно сыграть роль спускового механизма при световом выстреле. Направленное на кристаллы, оно может вызвать одновременное возвращение на исходные орбиты сразу нескольких десятков тысяч возбужденных электронов, что будет сопровождаться ослепительной вспышкой света монохроматического типа. В 50-е гг. XX в. А.М. Прохоровым, Н.Г. Басовым и Ч.Х. Таунсом был создан лазер.

Лазерное излучение обладает рядом уникальных, характерных только для него свойств, а именно: монохроматичность (излучение сосредоточено в ограниченном интервале длин волн); высокая когерентность (излучаемые кванты света совпадают друг с другом по фазе); высокая интенсивность излучения; маленькая расходимость лазерного луча.

Данные свойства позволяют сфокусировать лазерный луч в пятно маленького диаметра (несколько микрон), и в результате можно получить очень высокую концентрацию энергии на поверхности обрабатываемого изделия. Поэтому лазерный луч является уникальным источником нагрева, имеющим ряд преимуществ перед традиционными источниками и находящим все более широкое применение в различных отраслях науки и техники.

Преимущества лазерной обработки материалов:

• Большое разнообразие процессов обработки самых различных материалов, в том числе таких, которые не поддаются механической обработке. В частности, лазеры незаменимы при обработке материалов, отличающихся повышенной хрупкостью, например глиноземной керамики.

• Высокая скорость. Так, резка углеродистой стали толщиной 6 мм может выполняться со скоростью 2–5 м/мин, шовная сварка — 100 м/ч, что значительно быстрее традиционных способов сварки, например электродуговой.

• Высокое качество (гладкость реза, прочность сварных швов, чистота поверхности и др.).

• Высокоточная прецизионная обработка (изготовление фильер в алмазах для волочения проволоки, отверстий в рубиновых камнях для часовых механизмов и др.).

• Локальность воздействия на отдельные участки обрабатываемой поверхности — что обусловливает отсутствие деформации изделия.

• Возможность обработки в труднодоступных местах, где другими методами хорошего результата не получить (обработка внутренних поверхностей труб).

• Быстрая перестраиваемость на разные виды обработки (в пределах технологического назначения лазера), а также сравнительная простота автоматизации операций и технологических процессов.

• Участки лазерной обработки могут быть легко встроены в технологическую цепочку, так как лазерное излучение можно транспортировать на необходимые расстояния от лазерного источника до обрабатываемого изделия по воздушному тракту (с помощью поворотных зеркал) либо по гибкому световоду.

• Высокая производственная надежность технологических лазеров, превосходящая обычное оборудование для механической обработки. Простои на наладку и ремонт составляют не более 2–5 % общего времени работы лазера.

Использование лазерных технологий экономически выгодно, поскольку снижается стоимость технологического процесса, а качество продукции повышается. Значительный экономический эффект возникает за счет экономии материалов (при сварке, резке), повышения производительности труда (сварка, маркировка, размерная обработка).

Лазерный луч как технологический инструмент не имеет себе равных по степени “гибкости”, быстроте действия и износоустойчивости, особенно в условиях единичного и мелкосерийного производства с быстро меняющейся номенклатурой деталей.

10.1. КРАТКИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ОТРАСЛИ

К настоящему времени лазерная индустрия стала одной из ведущих отраслей наукоемкой промышленности в мире (табл. 33), а по широте и разнообразию применения лазерная аппаратура сопоставима только с компьютерной.

Основными отраслями, в которых применяется лазерная техника, являются электронная, в том числе микроэлектроника, электротехника и производство печатных плат, автомобильная промышленность (рис. 115).

За 2002 г. рынок диодных лазеров, без учета телекоммуникационного сектора, увеличился на 53 % (рис. 116), при этом большую часть рынка занимают лазеры для оптической записи и считывания информации.

Лазеры используются в системах телефонии, передачи данных и кабельного телевидения, а также для накачки оптических усилителей в линиях связи. Объем продаж с 1999 по 2003 г. имел следующую динамику:

Количество, млн. шт.	2,1	5,4	5,5	1,8	2,5
Стоимость, млн. дол.	2178	5050	2519	665	884

В связи с ослаблением спроса на новое телекоммуникационное оборудование и с накоплением большого ресурса неисполь-

Таблица 33

Мировой рынок лазерной техники

Показатель	Год						
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Объем продаж лазерных источников излучения, млрд. дол.	2,1	2,4	2,8	3,2	3,9	4,9	8,8
Объем продаж лазерной аппаратуры, млрд. дол. (не менее)	16	18	22	26	30	40	70
Годовой прирост объемов продаж источников излучения, %	24	14	17	14	22	26	79

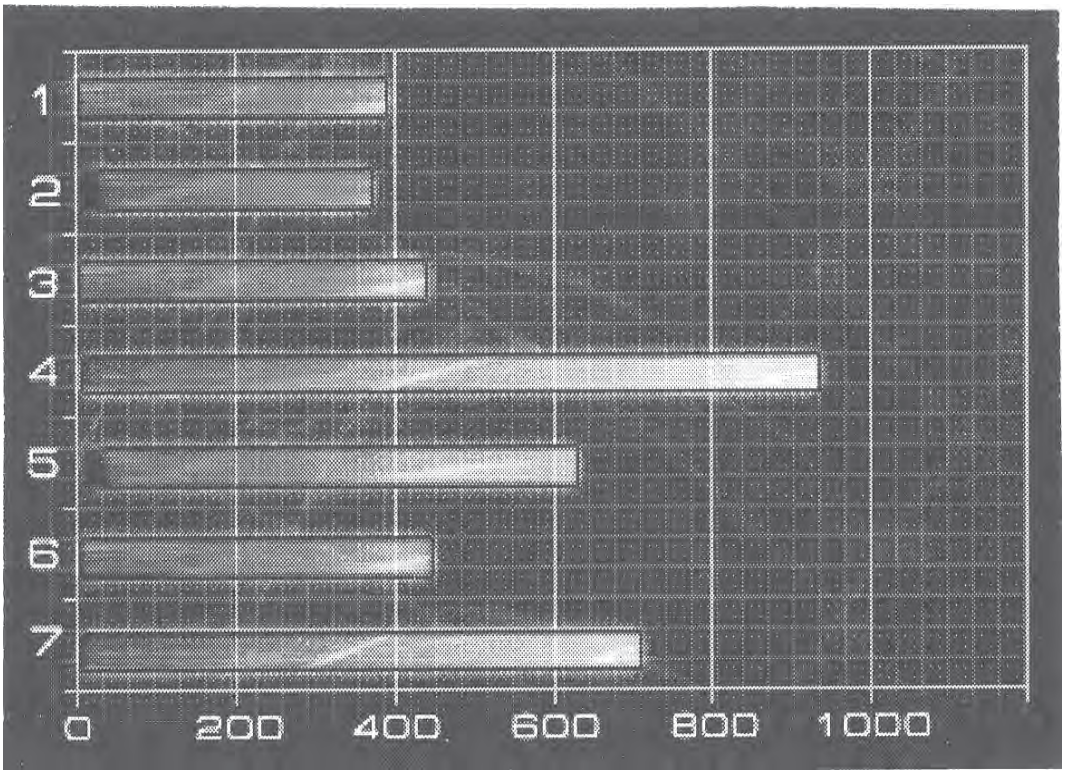


Рис. 115. Распределение мирового рынка
лазерной техники по отраслям-пользователям:
1 — автомобильная промышленность; *2* — электротехника;
3 — производство печатных плат; *4* — микроэлектроника;
5 — обработка металлов; *6* — обработка неметаллов;
7 — мелкотоварное производство

Год	Диодные	Недиодные
1999	64 %	36 %
	4,9 млрд. дол.	
2000	75 %	25 %
	8,8 млрд. дол.	
2001	65 %	35 %
	5,6 млрд. дол.	
2002	56 %	44 %
	4,3 млрд. дол.	
2003	59 %	41 %
	4,8 млрд. дол.	

Рис. 116. Общемировой объем продаж лазеров

зованных комплектующих изделий у компаний-изготовителей этого оборудования рынок лазерно-оптических изделий для телекомоборудования снизился в 2002 г. на 73 %. В то же время продажи диодных лазеров для систем с оптической памятью постоянно увеличиваются за счет огромного покупательского спроса на DVD-носители.

Лазеры также используются для создания световых шоу, дисплейных голограмм и информационных табло, лазерных указок и видеопроектов. Объем продаж с 1999 по 2003 г. имел следующую динамику:

Количество, млн. шт.	36,0	36,0	30,0	43,0	43,0
Стоимость, млн. дол.	48,2	21,3	21,0	25,3	22,9

Лазеры, применяемые в офтальмологии, общей хирургии, терапии, косметологии и диагностики имели такую динамику объема продаж (с 1999 по 2003 г.):

Количество, млн. шт.	4,2	364,2	211,8	167,7	271,7
Стоимость, млн. дол.	25,4	82,0	60,4	44,0	53,0

Диодные лазеры входят в состав авиакосмических систем, в структуру военно-коммерческой авиации, как оборудование для военных учений, в качестве дальномеров, в состав спутникового оборудования, лазерной пиротехники. Объем продаж с 1999 по 2003 г. имел следующую динамику:

Количество, млн. шт.	5,0	18,3	11,0	9,6	9,6
Стоимость, млн. дол.	67,4	203,0	122,6	80,6	80,8

В странах СНГ, к сожалению, освоение лазеров в промышленности пока далеко от требуемого уровня, хотя практически все известные на сегодня лазерные системы были или созданы, или усовершенствованы отечественными учеными и инженерами.

Российские предприятия выпускают почти все известные виды лазерной техники в широком ассортименте, но, строго говоря, современному мировому техническому уровню соответствует не более 5–10 % этих моделей, а многие из них остаются опытными образцами. Производство лазерной техники в России в 1996–2000 гг. можно представить следующим образом:

Всего моделей	Около 2500
В том числе:	
Источники лазерного излучения	1700
Лазерное медицинское оборудование	400
Установки для обработки материалов	140
Лазерные приборы для технических измерений	160
Организации — производители лазерной техники	Около 300

В 1996 г. Россия занимала второе место в Европе по объему лазерных НИОКР, но к 2000 г. заметно снизился объем новых научных результатов по лазерной физике и квантовой электронике, отодвинув страну на четвертое место, после Германии, Франции и Великобритании.

По средним оценкам объем продаж российской лазерной продукции внутри страны и за рубежом в последние годы не превышает 0,1 % мирового рынка, что не соответствует имеющемуся в России конструкторско-производственному потенциалу.

10.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРА

Микрочастицы в веществе, как известно, могут обладать только некоторыми фиксированными значениями энергии: 1, 2, 3, 4 Дж и т. д., но не 1,5 или 3,7 Дж. На самом деле разница между уровнями намного меньше — для двух нижних уровней атома водорода эта разница составляет около $1{,}5 \cdot 10^{-18}$ Дж, а для возбужденных состояний (пятый и шестой уровень) — $2{,}5 \cdot 10^{-20}$ Дж.

Частицы, обладающие одинаковой энергией, называются находящимися на одном энергетическом уровне. Если частица переходит с более высокого уровня на более низкий, то она испускает энергию, а если с более низкого — на более высокий, то поглощает ее. Переход между уровнями осуществляется несколькими способами.

Переход вверх может происходить, например, с поглощением фотона. В этом случае фотон аннигилирует, а частица, “забрав” его энергию, переходит вверх.

Переход вниз может происходить как с испусканием фотона (излучательный переход), так и без испускания (безызлучательный переход).

Теперь представьте, что каким-то образом на верхних уровнях вы создали большое число частиц. Процесс их создания называется **накачка**.

Накачка возбуждает атомы активной среды, переводя их из основного (нижнего) энергетического состояния на верхний (возбужденный) уровень. Чтобы возникла генерация, накачка должна обеспечить наличие достаточно большого числа атомов активной среды на верхнем (возбужденном) уровне. Говорят, что накачка должна обеспечить инверсную населенность среды, когда число атомов на верхнем уровне превышает их число на нижнем. После этого частицы начнут "падать" вниз, так как будут стремиться к состоянию с наименьшей энергией. Соответственно они начнут испускать фотоны, т. е. свет. Именно этот свет и видят на выходе лазера.

Активная среда может быть различной и представляет собой совокупность атомов, молекул, ионов или кристалл (полупроводниковый лазер). Например, в качестве активной среды CO_2-лазера выступает газовая смесь CO_2—He—N_2; также активной средой могут быть пары металлов (лазер на парах меди), алюмоиттриевый гранат, легированный неодимом (твердотельный лазер) и др.

В зависимости от активной среды получаемое излучение имеет различные характеристики (длина волны, мощность и др.). CO_2-лазеры генерируют излучение с длиной волны 10,6 мкм, а твердотельные лазеры — с длиной волны 1,06 мкм. Следовательно, при равной мощности излучения глубина проплавления стали твердотельным лазером значительно выше, чем при использовании CO_2-лазера, так как поглощающая способность материала зависит от длины волны. В свою очередь, максимальная мощность CO_2-лазера значительно выше мощности твердотельных лазеров, поэтому для различных технологий используются лазеры разных типов, излучение которых отвечает требованиям данной технологии.

Сейчас устройство лазера кажется чрезвычайно простым: световые лампы накачки облучают рабочее тело (например,

стержень из рубина или неодимового стекла), в котором образуется определенная заселенность уровней (на верхнем, возбужденном уровне больше атомов, чем на основном, нижнем); первый же высветившийся фотон, проходящий вдоль стержня, “срывает” лавину фотонов, и с обоих торцов выходят узкие монохроматические световые пучки.

Зеркала образуют так называемый оптический резонатор лазера. Задача оптического резонатора — обеспечение необходимого уровня обратной связи для возникновения генерации. Отражаясь от зеркал, волна многократно проходит через среду и усиливается.

В зависимости от типа лазера и мощности выходного излучения зеркала изготавливаются из разных материалов (например, у мощных CO_2-лазеров зеркала делаются из меди и дополнительно охлаждаются маслом, а последнее, в свою очередь, — водой).

Обычно резонатор состоит из “глухого” и полупрозрачного зеркал (рис. 117). “Глухое” зеркало полностью отражает падающее на него излучение (коэффициент отражения “глухого” зеркала около 1).

Излучение, отраженное от “глухого” зеркала, вновь проходит через активную среду и усиливается. Полупрозрачное зеркало служит выходом для излучения из резонатора (коэффициент отражения полупрозрачного зеркала менее 1), т. е. часть излучения отражается, а часть выходит из резонатора. Так, например, для CO_2-лазера как “глухое”, так и полупрозрачное зеркала изготовлены из меди, но полупрозрачное зеркало имеет выходное отверстие.

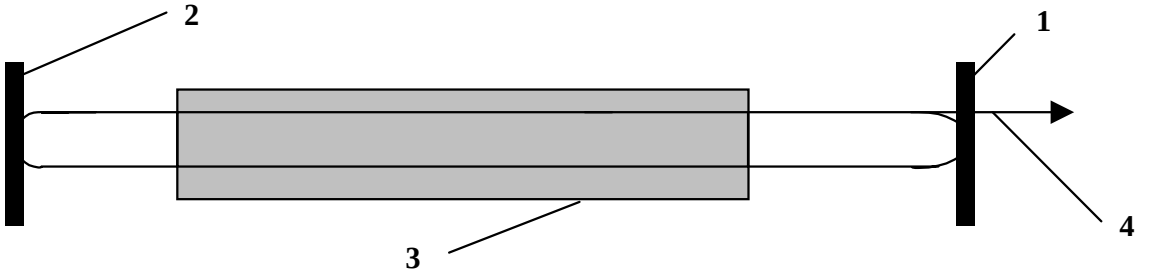


Рис. 117. Принципиальная схема источника лазерного излучения:
1 — полупрозрачное зеркало; *2* — “глухое” зеркало;
3 — активная среда; *4* — выходное лазерное излучение

Выходное излучение транспортируется к обрабатываемому изделию (рис. 118). Транспортировка излучения, в зависимости от типа лазера, может осуществляться различными способами: по воздушному тракту с использованием поворотных зеркал (для CO_2-лазера); по гибкому оптическому волокну (для твердотельных, диодных лазеров).

Для обеспечения необходимой концентрации энергии на поверхности обрабатываемого изделия применяют фокусирующие системы, которые могут состоять из фокусирующих линз

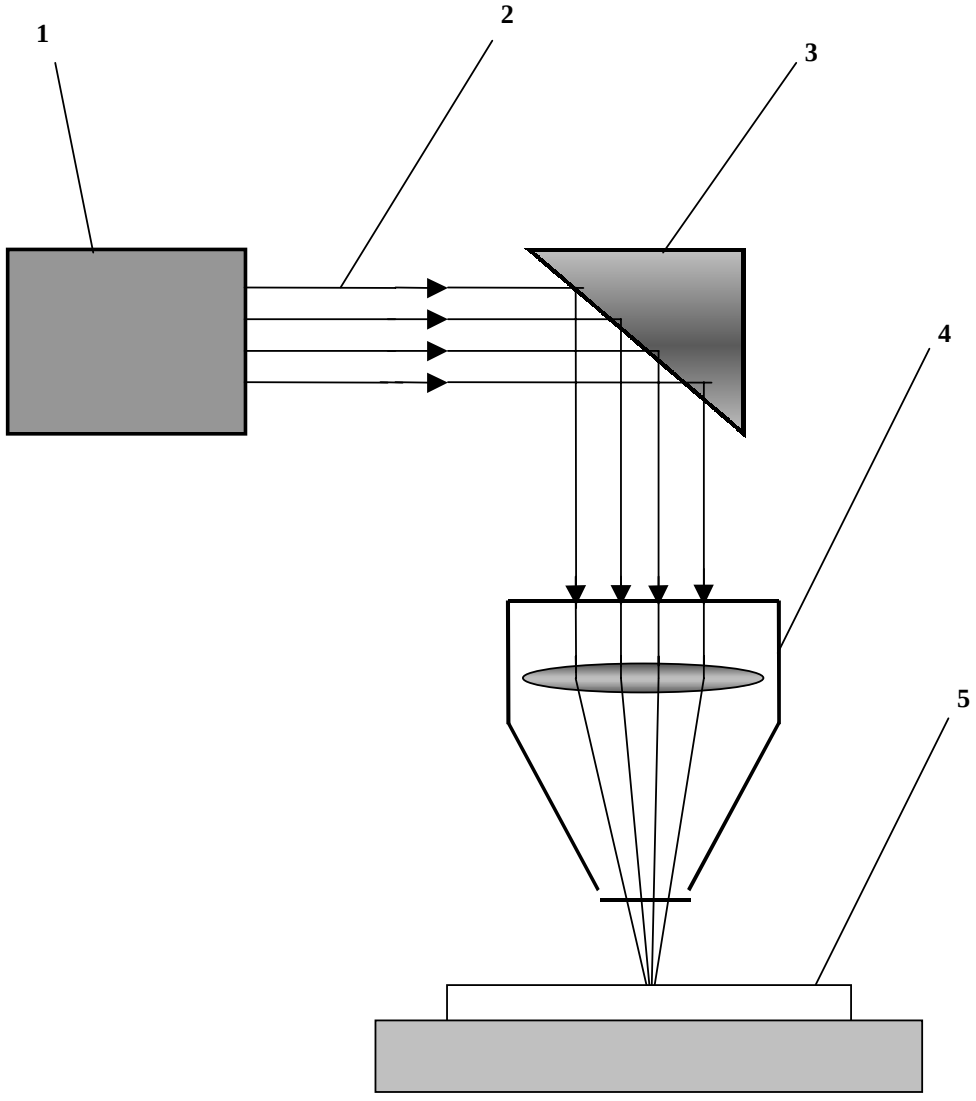


Рис. 118. Схема транспортировки лазерного излучения к изделию:
1 — источник лазерного излучения; *2* — лазерное излучение;
3 — поворотное зеркало; *4* — фокусирующее устройство;
5 — обрабатываемое изделие

(ZnSe) либо из фокусирующих зеркал (медные сферические зеркала).

Среда чаще называется **активным веществом**. Это вещество должно иметь определенную концентрацию активных частиц, т. е. частиц, которые обеспечивают накопление и излучение энергии. В качестве активного вещества используют:

твердые искусственные вещества и минералы (рубин, сапфир, стекло с неодимом и др.) — твердотельные лазеры;

газы, например гелий, — неоновый, аргоновый лазеры;

жидкости, парообразные среды, полупроводниковые материалы и др.

Источник возбуждения обеспечивает переход в возбужденное состояние большинства активных частиц. Таким источником может быть световая энергия, электронная бомбардировка, химическая энергия и др.

К другим основным элементам обычно относят: рефлектор, резонатор, источник питания активного элемента, пульт управления.

Лазеры различают по характеристикам излучаемой энергии, выходной мощности, в зависимости от конструкции резонатора и другим признакам.

10.3. ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Первые лазеры появились в конце 1950-х гг., однако уже сегодня можно назвать более 350 случаев их применения почти во всех сферах деятельности человека. Среди них наиболее распространена лазерная технология обработки материалов. Наиболее эффективно технологическое применение лазерного излучения в микрообработке (изготовление микроотверстий, пазов, микрофрезерование и пр.); раскрое и резке материалов; упрочняющей поверхностной обработке (закалка, легирование, наплавка, напыление и др.); сварке; маркировании, гравировании, нанесении и считывании кодированных информационных знаков; динамическом балансировании; поверхностной очистке материалов; выращивании трехмерных объектов и т. д.

Микрообработка. Благодаря специфическим свойствам лазерного излучения электромагнитная энергия может быть зна-

чительно локализована, что позволяет контролированно удалять микроскопические объемы материала и, таким образом, выполнять прецизионную обработку. В настоящее время можно получить микроотверстия диаметром до нескольких микрометров в различных материалах. По такой технологии обрабатываются прецизионные отверстия приборных камней, диафрагм, топливных форсунок, разных фильтров, фильер для получения искусственного волокна и пр. Производительность изготовления таких отверстий в зависимости от толщины материала может достигать нескольких тысяч отверстий за секунду. С помощью сканирующего лазерного излучения с большой скоростью можно выполнять сложные профильные пазы в различных деталях микроэлектроники, осуществлять прецизионную подгонку резисторов и т. д.

Раскрой и резка материалов. Применение лазеров при раскрое и резке в настоящее время очень распространено, так как одновременно с высокой точностью и производительностью обработки обеспечивается значительная экономия материала за счет малой ширины реза и рациональной системы раскроя по сравнению с традиционными технологиями. При этом эффективность вырезания изделий сложного профиля при невысокой серийности значительно выше, чем при обычной вырубной штамповке листовых изделий. Для габаритных листовых заготовок сложного профиля со значительным количеством стандартных однотипных элементов (больших отверстий) обработка может выполняться на комбинированном оборудовании типа лазер—пресс, который позволяет с большой эффективностью использовать преимущества двух процессов: традиционного вырубного прессования типовых элементов и гибкого лазерного вырезания сложного профиля. Лазерный раскрой материалов широко применяется в современной автомобильной, аэрокосмической, судостроительной, электротехнической промышленности.

В настоящее время для промышленной резки используется несколько типов лазеров:

• YAG — твердотельные лазеры на основе алюмоиттриевого граната. Накачка активного элемента производится высоковольтными разрядными лампами, непрерывными или импульсными.

Режим генерации соответственно может быть непрерывным и импульсным.

• YAG с диодной накачкой. Это новый современный вариант лазеров, в которых вместо высоковольтной газоразрядной лампы накачка производится мощными светоизлучающими диодами. Пока они довольно дороги, но зато в системе отсутствуют высокие напряжения, ресурс диодных линеек существенно выше ресурса газоразрядной лампы и лазеры лучше управляются от электронных систем.

• CO_2-лазеры — газовые лазеры на основе смеси газов CO_2–He–N_2. Возбуждение смеси выполняется разными видами электрического разряда в газах. В настоящее время самыми компактными и эффективными являются так называемые щелевые лазеры с накачкой высокочастотным разрядом.

YAG-лазеры пригодны только для резки металлов. Импульсные YAG-лазеры режут с высоким качеством не только сталь и титан, но и алюминиевые сплавы. Возможна резка сплавов на медной основе.

CO_2-лазеры пригодны для резки неметаллов (почти любых, не рекомендуется использовать лазерную резку только для ряда материалов со сложной структурой — ДСП, бакелитовые фанеры, граниты) и металлов. Однако для резки металлов нужен достаточно большой уровень мощности (от 500 Вт), а для резки цветных металлов — более 1000 Вт.

Вероятно, что в ближайшие годы лазерная резка будет вытеснять в судостроении (и в других отраслях промышленности) традиционные способы, и особенно там, где нужна точная резка “в размер”. На толщинах 15–25 мм она станет доминирующей. Повышению точности будет способствовать использование тех же лазерных источников и для лазерной разметки и маркировки.

При оценке преимуществ нового процесса обработки материалов наряду с чисто экономическими показателями следует принимать во внимание высокие качественные характеристики лазерной резки. Отсутствие коробления и грата устраняет необходимость в дополнительных операциях механической обработки кромок и рихтовки заготовок после резки, а также возможность изготовления деталей на окончательный размер под сборку и приводит к резкому сокращению времени изготовления

деталей. Это особенно ценно при необходимости срочной поставки изделий.

Сварка. Благодаря высокой концентрации энергии и возможности довольно гибкого управления ею в пространстве и времени лазерный луч стал универсальным термическим источником для выполнения неразъемных соединений из различных материалов. В настоящее время с его помощью можно соединить тонкий проводник диаметром в несколько микрометров с металлической микропленкой. Лазерным лучом можно сваривать и стальные детали толщиной более десятка сантиметров с довольно высоким качеством соединения, которого нельзя достичь другими методами сварки. Кроме соединений сталей разных типов лазерная технология оказалась очень эффективной при сваривании алюминия и алюминиевых, а также титановых сплавов. В результате качественной сварки металлических листов разной толщины создана новая технология штампования крупногабаритных деталей сложной пространственной формы и листовых заготовок разной толщины. Эта технология актуальна в автомобильной и аэрокосмической промышленности.

При сварке корпусов автомобилей использование лазерной сварки вместо традиционно применявшейся контактной сварки позволяет значительно повысить коррозионную стойкость кузовов. В частности, после перехода фирмы “Фольксваген” на лазерную сварку стойкость от сквозной коррозии кузовов возросла до 12 лет.

Наряду с технологиями лазерной сварки в автомобильной и судостроительной промышленности все более широкое применение находят технологии лазерно-дуговой сварки, когда излучение CO_2-лазера комбинируется с воздействием сварочной электрической дуги. Обеспечивая качество сварных швов, практически не уступающее лазерной сварке, такая технология позволяет получить значительный выигрыш в производительности и экономической эффективности процесса.

Одним из новых способов использования прецизионной лазерной сварки является фиксация элементов магнитных цепей электротехнических изделий, которая приводит к совершенствованию технологии изготовления роторов электродвигателей, трансформаторов и т. п. Лазерная сварка открывает новые воз-

можности для получения качественного термического соединения пластмасс, керамических и композиционных материалов.

Маркирование, гравирование, нанесение и считывание кодированных информационных знаков. Лазерная технология позволяет проводить маркирование на любых материалах бесконтактно и с очень большой скоростью при обеспечении чрезвычайно высокого качества. Маркировку можно осуществлять не только на поверхности, но и внутри материала, прозрачного для лазерного излучения. Например, идентификационный номер микроскопических размеров может быть нанесен внутри дорогостоящего бриллианта, без потери его товарного вида и с гарантией сохранения этого номера практически навсегда. Менее экзотической сферой применения такого процесса является маркирование деталей микроэлектроники, электротехники, приборов, разного типа инструментов и т. п. Выполнение художественных надписей, рисунков, различных гравировальных работ широко зарекомендовало себя в ювелирной промышленности. Нормальное функционирование современной торговой сети было бы просто невозможно без использования лазерного нанесения и особенно лазерного считывания кодированной информации на каждом изделии. Лазерная технология позволяет обеспечить также надежный оперативный контроль, регистрацию и управление перемещением товаропотоков в границах не только отдельной торговой единицы, но и системы, региона, страны и т. д.

Лазерная технология привела к революции в области нанесения, сохранения и считывания аудио- и видеоинформации. Лазерные компакт-диски могут содержать огромные объемы информации в виде кодированных двоичных знаков, нанесенных лазерным лучом на пластмассовый диск, и обеспечивают практически идеальное качество записи и воспроизведения этой информации.

Динамическое балансирование. Ряд современных очень ответственных прецизионных изделий имеет узлы, которые требуют специфической операции — динамического балансирования, т. е. полного удаления лишней массы с поверхности узла или детали, вращающейся с большой скоростью, для обеспечения стабильной работы изделия. К таким изделиям можно отнести судовые и авиационные гироскопы, скоростные электродвигатели и т. п.

При традиционных методах балансирования сначала определяется нахождение дисбаланса, а затем в состоянии покоя (узла, детали) проводится устранение дисбаланса, как правило, механической обработкой. Лазерная технология позволяет соединить в одном процессе операцию определения дисбаланса и его значения с операцией прецизионного удаления лишней дисбалансирующей массы. Благодаря этому достигается значительная экономия времени (1–2 ч), так как некоторые ответственные приборы для выхода на рабочий режим (несколько десятков тысяч оборотов в минуту) требуют до 1 ч и столько же для своей остановки. Применение лазерного динамического балансирования не только дает значительную экономию времени, но и обеспечивает большую точность удаления массы (до нескольких миллиграммов или даже десятых долей миллиграмма).

Созданные системы лазерного динамического балансирования позволят значительно повысить качество гироскопов, скоростных электродвигателей и т. п. и, следовательно, надежность и срок эксплуатации, а также намного уменьшить себестоимость их изготовления.

Выращивание трехмерных объектов. В классической технологии изготовления детали (изделия) в промышленности предусматривается удаление лишнего материала с заготовки для получения детали нужной формы, размеров и качества. Развитие лазерной техники позволило разработать принципиально новую технологию создания деталей сложной пространственной формы, при которой деталь выращивается из материала поэлементно, слой за слоем, соответственно образу, формализованному в памяти компьютера. Материалом при реализации таких технологий могут быть: полимерные вещества; бумажные или картонные ленты, обработанные клеевым составом; металлическая лента с легкоплавким покрытием; металлический порошок или специальные композиции и пр.

В настоящее время процессы выращивания трехмерных объектов постепенно выходят из стадии экспериментальной проверки и внедряются в производство. Эта технология особенно актуальна для таких динамично развивающихся областей производства, как авиа- и автомобилестроение, электронное машиностроение, инструментальная промышленность, изготовление косми-

ческой техники и т. п. Так, по сравнению с традиционными методами моделирования деталей и узлов новая технология "выращивания" объектов в американской компании General Motors позволяет сэкономить 60–80 % времени и средств. Например, при изготовлении модели корпуса коробки передач тепловоза затраты времени снижаются с 6 месяцев до 400 ч (16,6 дня). Лазерная технология позволяет оперативно реализовать огромное разнообразие сложных пространственных деталей любого дизайна с минимальными затратами, воплотить самые необычные фантазии клиента.

Лазерные диоды используются в геодезических инструментах, лазерных строительных уровнях, прицелах для стрелкового оружия.

В печатных машинах используются CTP-технологии (компьютер—пластина или компьютер—пресс), решетка лазеров мощностью 1 Вт засвечивает термочувствительную печатную пластину, перенося на нее изображение, записанное в цифровом виде в компьютерном файле. Это существенно уменьшает трудо- и материалоемкость процесса печати, увеличивая производительность, но перевод на них обычной печатной машинки требует существенных капиталовложений.

Световодные лазеры с полупроводниковой накачкой обладают высокой когерентностью излучения и почти идеальными эксплуатационными характеристиками, конкурируя с газовыми и твердотельными лазерами. Этот тип лазеров решает задачу повышения частоты при одновременном расширении рабочей полосы в системах передачи информации.

Ключевой энергетический элемент световодного лазера — полупроводниковый диод, активная зона которого (p–n-переход) допускает повышение плотности мощности накачки на пять-шесть порядков больше, чем для других лазерных сред, использующих газ или кристалл. Вторым преимуществом является высокий КПД преобразования энергии накачки p–n преимущества перехода в лазерное излучение (50–70 %). Эти преимущества были использованы при создании высококачественных и надежных изделий — лазерных усилителей и генераторов, таких как "ЛАУТ-Н1". Основные технические характеристики этой установки:

• зона обработки 400×400 мм;
• максимальные размеры обрабатываемой заготовки 0,7×1,2 м;
• позиционная точность 20 мкм;
• максимальная рабочая скорость 2,5 м/мин.

Лазерная хирургия — один из наиболее ярких примеров использования высоких технологий в медицинской практике. Лазерный луч как режущий инструмент используется:

• при стерилизации гнойных ран, профилактике возможного заражения послеоперационных ран;

• при коагуляции мелких сосудов в зоне разреза, позволяющей проводить рассечение кровенаполненных органов, уменьшить потерю крови;

• при уменьшении операционных и послеоперационных болей;

• при сокращении послеоперационного периода и сроков лечения;

• при дозировании воздействия, что упрощает технику хирургического вмешательства.

Кроме того, лазерные источники излучения позволили создать новые эффективные малоинвазивные технологии (термотерапия, каналирование и перфорация мягких и костных тканей, фотодинамическая терапия и т. д.), что нашло широкое применение в онкологии, отоларингологии, дерматологии, кардио- и нейрохирургии, косметологии и других отраслях медицины.

10.4. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

В настоящее время в промышленности используют десятки моделей лазерных установок различного назначения.

Лазерный технологический комплекс (ЛТК) предназначен для выполнения операций лазерной обработки изделий (или веществ) как автономно, так и в составе более общего комплекса оборудования. В состав ЛТК входят следующие основные системы:

технологический лазер;
система транспортировки и фокусировки излучения;
лазерный технологический пост;
обрабатываемое изделие;
лазерный робот.

Система автоматического управления на базе ЭВМ предназначена для программного или адаптивного управления всеми системами ЛТК.

В качестве примера приведена характеристика некоторых ЛТК.

1. Лазерный комплекс для поверхностного упрочнения быстро изнашиваемых деталей и узлов изделий машиностроения. Предназначен:

- для легирования поверхности катания колес рельсового транспорта с различным диаметром поверхности катания;
- для наплавки твердых материалов на плоские детали;
- для закалки плоских и цилиндрических поверхностей деталей в изделиях машиностроения.

Технические характеристики:

- мощность излучения 1,5 кВт;
- длина волны излучения 10,6 мкм (CO_2-лазер);
- толщина наплавки — от 1 до 2 мм;
- толщина легированного слоя — от 0,2 до 0,7 мм.

Преимущества данного комплекса заключаются в увеличении твердости обрабатываемой поверхности, а также в повышении стойкости к истиранию поверхностей трущихся деталей (например, лопаток ленточных транспортеров, бандажа колес железнодорожного вагона и др.).

2. Прецизионный лазерный маркирующий комплекс “Бета-Марк-2000”. Предназначен для прецизионной маркировки продукции в условиях промышленного производства, в рекламном бизнесе, возможно его интегрирование в поточную производственную линию.

Технические характеристики:

- мощность излучения 16 Вт;
- длина волны излучения 1,06 (твердотельный лазер);
- скорость обработки 2500 мм/с;
- тип выводимых изображений — контурные и растровые, текстовые и графические, штрих-код.

Преимущества данного комплекса состоят в широком спектре маркируемых материалов, отсутствии механического воздействия на изделие, маркировке без применения красок и химических реактивов, прецизионной точности, высокой контрастности, “пожизненной” стойкости изображения.

3. Технологический лазерный комплекс для раскроя листовых материалов. Предназначен для разметки, гравировки и резки листовых материалов.

Технические характеристики:

- мощность излучения 300 Вт;
- длина волны излучения 1,06 (твердотельный лазер);
- скорость резки 800 мм/мин;
- ширина реза — не более 0,4 мм.

Данный комплекс заменяет сварочное, термическое, штамповочное, резательное и другие виды оборудования и может быть использован в таких видах производства, как заготовительное, инструментальное, сварочное, литейное, механообрабатывающее и др.

Преимуществами комплекса являются возможность обработки как твердых, так и мягких материалов, отличных по своим физико-механическим свойствам, отсутствие механического контакта с обрабатываемым изделием.

Конструкции и характеристики технологических лазеров непрерывно улучшаются, снижается стоимость 1 кВт·ч лазерной энергии за счет применения новых компоновочных решений, новых материалов с высоким ресурсом работы, новых методов накачки (перевод активного вещества от состояния поглощения энергии к состоянию генерации излучения), полной автоматизации ЛТК.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВАТЕЛЯХ СОВРЕМЕННОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

В средние века находилось немало "ученых", доказывающих, что металлы не приносят людям пользы, а потому нет смысла искать и добывать их. Им возражал Георг Агрикола — известный немецкий мыслитель, автор работ по металлургии, в том числе труда "О горном деле и металлургии" в 12 книгах (1566). Он писал: "Если бы не было металлов, люди влачили бы самую омерзительную и жалкую жизнь среди диких зверей. Они вернулись бы к желудям и лесным яблокам и грушам, питались бы травами и кореньями, ногтями вырывали бы себе логовища, чтобы лежать в них ночью, а днем бродили бы там и сям по лесам и полям, подобно зверям. Поскольку же такой образ жизни совершенно недостоин человеческого разума, самого лучшего дара природы, неужели кто-либо окажется столь глуп и упрям, чтобы не согласиться с тем, что металлы необходимы для пропитания и одежды и, вообще, служат для поддержания человеческой жизни?

Аносов Павел Петрович (1799–1851) — металлург широчайшего кругозора; всемирную известность приобрели его работы по производству стали; автор способа газовой цементации; раскрыл секрет производства булатной стали; основатель микроскопического анализа металлов.

Бадаев Семен Иванович (1778–1848) — создатель оригинального способа получения стали, названного в его честь "бадаевской"; за свое изобретение крепостной Бадаев был выкуплен правительством у его владельца.

Байков Александр Александрович (1870–1946) — ученый-металлург; разработал методику для исследования структуры и внутренних превращений в металлах и сплавах при высокой температуре, метод переработки полиметаллических руд и технологический процесс производства на их основе металла; создатель теории окислительных и восстановительных процессов; участвовал в создании новых марок легированных сталей; организатор отечественного производства огнеупоров.

Басов Николай Григорьевич (1922–2001) — создатель мазера, активной средой которого является аммиак; предложил идею лазера на основе полупроводникового кристалла.

Бессемер Генри (1813–1898) — английский металлург, изобретатель и создатель названного в его честь способа продувки чугуна воздухом с целью получения стали; бессемеровский процесс сделал возможным массовое производство литой стали.

Бочвар Андрей Анатольевич (1902–1984) — создатель теории эвтектической кристаллизации и литейных свойств; разработал и внедрил метод кристаллизации фасонных отливок под давлением; широко известно правило Бочвара для оценки температуры начала рекристаллизации металлов.

Гадфильд Роберт Абот (1858–1923) — английский металлург, создатель первой аустенитной стали; в 1893 г. запатентовал аустенитную высокомарганцовистую сталь и тем самым открыл новое направление в металлургии стали.

Грум-Гржимайло Владимир Ефимович (1864–1924) — автор так называемого русского бессемерования; дал этому способу правильное теоретическое обоснование; впервые в мире объяснил процессы, происходящие в бессемеровском конверторе и в стальной ванне мартеновской печи с позиций физической химии; автор теории расчета пламенных печей, в которой законы гидравлики применены к движению печных газов.

Дерби Абрахам I (1677–1717) — основатель черной металлургии в Англии; первым добился успеха в выплавке чугуна с использованием каменноугольного кокса.

Дерби Абрахам II (1711–1763) — первым в мире построил и эксплуатировал доменную печь, работавшую на каменноугольном коксе.

Дерби Абрахам III (1750–1808) — руководитель строительства первого в мире чугунного моста, используемого до настоящего времени (все части моста отлиты из чугуна).

Калакуцкий Николай Вениаминович (1831–1899) — ученый-металлург; описал влияние способов и условий ковки на структуру и свойства поковок, причины и механизмы образования в стали дефектов, объяснил механизм образования внутренних напряжений в стали и чугуне, разработал методы их определения и конструкцию необходимых приборов.

Карнаухов Михаил Михайлович (1892–1955) — ученый-металлург, исследователь физико-химических основ мартеновского, бессемеровского и томасовского процессов производства стали и кристаллизации стального слитка; участвовал в проектировании металлургических предприятий.

Корт Генри (1740–1800) — английский металлург, изобретатель пудлингового процесса, при котором чугун расплавляли с использованием каменноугольного кокса и затем фришевали; разработал способ прокатки.

Курако Михаил Константинович (1872–1920) — металлург-доменщик; предложил новую конструкцию горна печи; создатель оригинального распределительного устройства для загрузки шихты в доменную печь; много сделал для совершенствования конструкции доменной печи.

Курнаков Николай Семенович (1860–1941) — изобретатель самопишущего пирометра, что явилось крупным усовершенствованием методики термического анализа; основатель методики физико-химического анализа металлов и сплавов.

Лавров Александр Сергеевич (1838–1904) — инженер-металлург; выдвинул теорию, по которой сталь представляет собой твердый раствор углерода в железе; совместно с Н.В. Калакуцким описал явление ликвации и установил ее зависимость от размеров слитка; впервые в мире применил алюминий для раскисления стали, предложил, изготовил и применил на практике термитные порошки.

Любарский Василий Васильевич (1795–1852) — ученый-металлург, один из разработчиков способа получения ковкой платины и изготовления из нее изделий, основатель порошковой металлургии.

Ломоносов Михаил Васильевич (1711–1765) — основатель науки о металле, создатель теории металлургического производства, автор первой русской книги по металлургии — "Первые основания металлургии, или рудных дел", долгие годы являвшейся основным учебным пособием для металлургов.

Мартен Пьер Эмиль (1824–1915) — французский металлург; вместе со своим отцом Эмилем Мартеном впервые осуществил в 1894 г. фришевание чугуна на поду, используя для этой цели созданную братьями Сименс подовую печь с регенеративным отоплением (мартеновский процесс).

Обухов Павел Матвеевич (1820–1869) — металлург, основатель крупнейшего производства литой стали и стальных пушек в России, изобретатель способа массового производства тигельной стали высокого качества (обуховский), который использовался на заводах в Златоусте, Перми, Петербурге.

Павлов Михаил Александрович (1863–1959) — ученый-металлург, создатель первой отечественной домны, атласов чертежей по доменному и сталеплавильному производству, разработчик методов расчета доменных печей, автор лучших учебников по металлургии.

Прохоров Александр Михайлович (1916–2002) — совместно с Басовым разработал мазер и принцип действия лазера.

Пятов Василий Степанович (1824–1892) — инженер-металлург, изобретатель высокопроизводительного способа производства броневых плит прокаткой с химико-термическим упрочнением поверхности.

Рамм Александр Николаевич (1903–1987) — ученый-металлург; спроектировал доменную печь объемом 1300 $м^3$, разработал метод расчета технических показателей доменной плавки.

Реомюр Рене-Антуан (1683–1757) — французский ученый, занимавшийся многими научными проблемами, в том числе и проблемами черной металлургии; автор первых в мире трудов по металловедению — "Искусство превращения ковкого железа в сталь" и "Искусство умягчения литого чугуна" (1722).

Ржешотарский Альфонс Александрович (1847–1904) — ученый-металлург; внес значительный вклад в теорию и прокатку металлургического производства (металловедение, металлография, сталелитейное дело); создатель первой в России (1895) металло-

графической лаборатории (Обуховский завод); разработал технологию производства броневой стали.

Самарин Александр Михайлович (1902–1970) — ученый-металлург; основные труды посвящены электрометаллургии стали и ферросплавов, физико-химическим основам металлургических процессов, проблемам вакуумной металлургии.

Сведенборг Эмануил (1688–1772) — шведский ученый, автор первого в мире учебника по металлургии железа “De ferro” (1734).

Сименс Вильгельм (1823–1883) — создатель регенеративной паровой машины; вместе с Мартенами создал, на основе построенной его братом печи, сименс-мартеновский процесс выплавки стали.

Сименс Фридрих (1826–1904) — немецкий инженер-металлург, создатель регенеративной печи для выплавки стали.

Соболевский Петр Григорьевич (1782–1841) — ученый-металлург; совместно с Любарским разработал способ получения ковкой платины и изготовления из нее изделий; основоположник порошковой металлургии.

Соколов Алексей Николаевич (1907–1975) — специалист в области электрометаллургии; разработал основы расчета размеров дуговых печей и электрических режимов их работы, рассчитал и определил для действующих печей электрические характеристики агрегатов и впервые в мире предложил рабочие характеристики ДСП.

Тейлор Фредерик Уинслоу (1856–1915) — американский ученый, изобретатель быстрорежущих сталей, легированных вольфрамом и хромом.

Томас Сидни Джилькрист (1850–1885) — английский металлург, изобретатель названного его именем процесса выплавки стали в конвертере, который позволил бессемеровский процесс применить и для передела фосфористых сортов чугуна.

Фарадей Майкл (1791–1867) — английский ученый, который не только открыл электромагнитную индукцию и создал теоретические основы электрического поля, но и одним из первых систематически исследовал сплавы на основе железа.

Федотьев Павел Павлович (1864–1934) — химик-технолог и металлург, основоположник электрометаллургии цветных ме-

таллов, один из создателей отечественной алюминиевой промышленности.

Хансмен Александр Иванович (1704–1776) — английский изобретатель литой стали; совместным переплавом чугуна и ковкого (низкоуглеродистого) железа в глиняных тиглях впервые получил высококачественную по тем временам сталь.

Целиков Александр Иванович (род. 1904) — ученый-металлург; разработал теорию прокатки; создатель уникальных прокатных станов и другого оборудования для обработки металлов давлением.

Чекмарев Александр Петрович (1902–1975) — ученый-металлург; занимался совершенствованием прокатного оборудования, разработкой новых технологических процессов, изучением теории прокатки.

Чернов Дмитрий Константинович (1839–1921) — основоположник современного металловедения и основатель школы русских металлургов и металловедов; его открытия (критические температуры, названные точками Чернова, теория кристаллизации слитка, совершенствование конверторного процесса, применение спектроскопа для определения конца процесса продувки, обогащенного кислородом воздуха для продувки жидкого чугуна) получили признание во всем мире.

Чижевский Николай Прокопьевич (1873–1952) — ученый-металлург; разработал методы определения азота в сплавах при различной температуре, пути борьбы с этой вредной примесью; создатель конструкции вакуумной печи для выплавки стали, способа насыщения поверхности металлических изделий азотом для повышения твердости и предохранения от коррозии; занимался проблемой обеспечения отечественной металлургии доброкачественным топливом.

Шавлов Артур (род. 1921) — американский ученый; совместно с Таунс Чарльзом изобрел лазер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки: Учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.

Аксенов Л.Б., Вагин В.А., Золотов А.М. и др. Проектирование процессов и машин обработки давлением с использованием ЭВМ: Учеб. пособие / СПбГТУ. СПб., 1991. 112 с.

Алейников В.С. Реальный прорыв в лазерной технике // Лазер-Информ. 2002. № 23 (254), дек. С. 1–4.

Антонишин Ю.Т. Пластическая деформация чугуна. Минск: Навука і тэхніка, 1991. 119 с.

Атрошенко А.П., Вагин В.А. Горячая объемная штамповка: Метод. рекомендации по курсовому проектированию. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 1998. 105 с.

Байшев Ю.П. Доменные печи и воздухонагреватели. Екатеринбург: Изд-во РАН, Урал. отд-е. 1996. 995 с.

Банкетов А.Н., Бочаров Ю.А., Добринский Н.С. и др. Кузнечно-штамповочное оборудование. М.: Машиностроение, 1982. 576 с.

Беккерт М. Железо. Факты и легенды: Пер. с нем. М.: Металлургия, 1984. 232 с.

Беккерт М. Мир металла. М.: Мир, 1980. 152 с.

Берлин Е.Н. Энергия в черной металлургии. М.: Металлургия, 1987, 80 с.

Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Кулагин Н.М. и др. Металлургия алюминия. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1999. 438 с.

Булатов Г.Я. Введение в общую теорию технологий (на примере строительства): Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 175 с.

Вакуленко В.М., Ковш И.Б. Лазерные технологии в машиностроении: объединение усилий стран СНГ // Лазер-Информ. 1999. Спецвып., май. С. 1–5.

Венецкий С.И. В мире металлов. М.: Металлургия, 1988. 168 с.

Венецкий С.И. Рассказы о металлах. М.: Металлургия. 1985. 240 с.

Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия: Учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1985. 480 с.

Воскобойников В.Т., Макаров Л.П. Технология и экономика переработки железных руд. М.: Металлургия, 1987. 256 с.

Востров В.Н., Рис В.В., Шелестеев А.М. Ресурсосберегающие технологические процессы обработки металлов давлением. Гидравлическая штамповка: Учеб. пособие. Махачкала: Авиаагрегат, 2003. 20 с.

Гинер П.Г. О чем молчат чертежи. М.: Металлургия, 1983. 160 с.

Глазунов С.Г., Борзецовская К.М. Порошковая металлургия титановых сплавов. М.: Металлургия, 1989. 136 с.

Глухов В.В. Организация прокатного производства. СПб.: Лань, 2001. 368 с.

Глухов В.В. Экономика и организация производства алюминия: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. 126 с.

Глухов В.В., Некрасова Т.П. Экономика производства деталей из порошков. Л.: Машиностроение, 1990. 144 с.

Голов А.Н., Хомченко О.А., Садовская Г.А. Промышленное освоение технологии обжига медного концентрата с выщелачиванием огарка и электроэкстракцией меди на комбинате “Североникель”. Цветные металлы, 2003. № 2. С. 26–29.

Голубев Ю.Н., Горячев В.И. и др. Технологические инновации: Космические технологии и электротехнологии: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбУЭФ, 1995. 180 с.

Горынин И.В., Чечерин Б.Б. Титан в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.

Зайффарт П., Гофман Я. Лазерные технологии в судостроении — реальность и перспективы // Автоматическая сварка. 2001. № 12. С. 11–17.

Зубков Л.Б. Космический металл. М.: Наука, 1987. 128 с.

Калмыков В.А., Карасев В.П. Электрометаллургия стали: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 1999. 292 с.

Коваленко В.С. Лазерная технология на новом этапе развития// Автоматическая сварка. 2001. № 12. С. 4–10.

Козырев В.С. Цветная металлургия стран СНГ (краткий обзор) // Цветные металлы. 2003. № 2. С. 4–6.

Кокорин В.Н. Технологические расчеты в процессах холодной листовой штамповки / УлГТУ. Ульяновск. 2002. 36 с.

Коликов А.П., Нуриахметов Ф.Д. Актуальные проблемы трубного производства России // Сталь. 2001. № 1. С. 50–53.

Кондратьев О. Оценка спроса на цветные металлы в России // Металлоснабжение и сбыт. 2001. № 3. С. 34–38.

Косников Г.А. Основы литейного производства: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 211 с.

Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии. Т. 1. Производство металлических порошков: Учебник для вузов / МИСИС. М., 2001. 368 с.

Линчевский Б.В., Соболевский А.П., Кальменев А.А. Металлургия черных металлов: Учеб. для техникумов. М.: Металлургия, 1999. 336 с.

Липухин Ю.В., Булатов Ю.И. и др. Автоматизация основных металлургических процессов. М.: Металлургия, 1990. 280 с.

Лопота В.А., Туричин Г.А., Цибульский И.А. Лазерные технологические комплексы для обработки материалов и их использование в машиностроении // Лазер-Информ. 2003. № 4. С. 4–11.

Малахов А.И., Жуков А.П. Основы металловедения и теории коррозии: Учеб. для машиностроительных техникумов. М.: Высш. шк., 1988. 192 с.

Малеева С.Б., Саврукова Н.Т. Экономические основы технологического развития: Конспект лекций. СПб.: Политехника, 2000. 41 с.

Мальшин В.М., Завадовская В.Н., Пампушко Н.А. Металлургия титана. М.: Металлургия, 1991. 208 с.

Мансуров И.З., Подрабинник И.М. Специальные кузнечно-прессовые машины и автоматизированные комплексы кузнечного производства: Справ. М.: Машиностроение, 1990. 344 с.

Медовар Б.И., Медовар Л.Б., Соенко В.Я. Электрошлаковые технологии в XXI веке // Проблемы специальной электрометаллургии. 2001. № 1. С. 12–17.

Медовар Л.Б., Цыкуленко А.К., Шавченко В.Е. Современные валки прокатных станов. Требования, материалы и способы производства. ПроСЭМ. 2001. № 1. С. 38–48.

Мировой рынок лазеров: обзор 2002 г. и прогноз на 2003-й. Ч. II. Диодные лазеры // Лазер-Информ. 2003. № 5-6 (260-261), март. С. 1–10.

Моисеев В.В., Закамаркин М.К. и др. Один миллион тонн стали ЭШП выплавки с использованием ЭВМ // ПроСЭМ. 2001. № 3. С. 15–18.

Молотилов Б.В. Аморфные и нанокристаллические сплавы — перспективы и проблемы // Сталь. 2001. № 1. С. 79–83.

Неменов А. Металлизованное сырье. Национальная металлургия // Печ. центр “Национальная металлургия”. М., 2002. С. 57–65.

Патон Б.Е., Саенко В.Я. и др. Дугошлаковый переплав — современное состояние и перспективы развития // ПроСЭМ. 2002. № 1. С. 3–10.

Патров Б.В. Электрохимия: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 28 с.

Петриченко А.М., Суходольская Е.А. Чугун — настоящее и будущее. Киев: Наукова думка, 1987. 104 с.

Попов Е.А. и др. Технология и автоматизация листовой штамповки: Учеб. для вузов / МВТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2000. 480 с.

Порошковая металлургия в СССР. История. Современное состояние. Перспективы. М.: Наука, 1986. 296 с.

Привалов В.А., Лаппа А.В. Новые малоинвазивные хирургические технологии с использованием диодных лазеров, разработанных в Челябинске // Лазер-Информ. 2003. № 5-6 (260-261), март. С. 11–15.

Ракошиц Г.С. Электроимпульсная штамповка: Учеб. пособие для ПТУ. М.: Высш. шк., 1990. 191 с.

Рис В.В., Шелестеев А.М. Ресурсосберегающие технологические процессы обработки материалов давлением. Получение неразъемных соединений: Учеб. пособие. Махачкала: Авиаагрегат, 2003. 15 с.

Скалли Дж. Основы учения о коррозии и защите металлов. М.: Мир, 1978. 223 с.

Солнцев Ю.П., Веселов В.А., Демянцевич В.П. Металловедение и технология металлов. М.: Металлургия, 1988. 512 с.

Сталь на рубеже столетий / МИСИС. М.: 2001. 664 с.

Сулеев Д.К. Автоматизированная система управления технологическими процессами титанового производства. Алма-Ата: Гылым, 1991. 84 с.

Теория, технология и оборудование обработки металлов давлением: Метод. указания к выполнению курсовой работы “Технология холодной листовой штамповки”/ Сост. К.К. Мартенс. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. 28 с.

Тюлькина С. Хозяева медных гор или современное состояние рынка меди // Национальная металлургия. 2003. № 2. С. 45–52.

Уайэт Т.О., Дью-Хьюзд. Металлы, керамики, полимеры. Введение к изучению структуры и свойств технологических материалов: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1979. 580 с.

Улиг Г.Г., Реви Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Л.: Химия, 1989.

Унксов Е.П., Джонсон У., Калмогоров В.П. и др. Теория ковки и штамповки. М.: Машиностроение, 1992. 720 с.

Федоров А.С. Творцы науки о металле. М.: Наука, 1980. 218 с.

Харлампович Г.Д., Кауфман А.А. Черный хлеб металлургии. М.: Металлургия, 1983. 160 с.

Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В. Никомед титана: структура и свойства. М.: Наука, 1992. 160 с.

Хендрикс К., Айхингер Х.М. Энергетические аспекты и современное потребление энергоносителей в черной металлургии // Черные металлы. 1998. Июль-август. С. 108–118.

Хильчевский В.В., Кожевников Л.И. Мир металлов. Киев: Тэхника, 1991. 119 с.

Холляйс Г., Куттнер Г., Шерекер В. Достижения ФАИ в области технологии непрерывной разливки стали // Сталь. 2001. № 5. С. 21–24.

Цыкуленко А.К., Медовар Л.Б., Чернец А.В. Современные материалы для валов роторов паровых и газовых турбин (требования, состав и способы производства) // ПроСЭМ. 2001. № 3. С. 10–14.

Чепурной А.Д. Перспективы применения электрошлаковой технологии в производстве ответственных изделий машиностроения // ПроСЭМ. 2001. № 4. С. 11–16.

VI конгресс сталеплавильщиков // Сталь. 2001. № 1. С. 18–20.

Шпарбер Л.Я. Металлургия железа и чугуна. 1. История. Состояние. Тула: АССОД, 1996. 416 с.

Шпарбер Л.Я. Металлургия железа и чугуна. 2. Состояние и перспективы. Тула: АССОД, 1996. 368 с.

Юдин Л.Г., Гаврилкина И.М. и др. Холодная штамповка: Учеб. пособие / Тул. политехн. ин-т. Тула, 1991. 120 с.

Глухов Владимир Викторович
Гущина Лариса Борисовна

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ОТРАСЛЕЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ

Учебное пособие

2-е издание, стереотипное

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 – учебная литература

Подписано в печать 27.12.2024. Формат 60×84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 29,25. Тираж 38. Заказ 6196.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.

ПОЛИТЕХ