

В. В. Глухов Т. П. Некрасова

# ЭКОНОМИКА ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Санкт-Петербург  
2017

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

*В. В. Глухов Т. П. Некрасова*

# ЭКОНОМИКА ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

2-е издание, исправленное и дополненное



Санкт-Петербург  
2017

УДК 338.45

Г55

*Глухов В. В. Экономика порошковой металлургии. 2-е изд., испр. и доп. / В. В. Глухов, Т. П. Некрасова. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. — 146 с.*

Первое издание монографии вышло в 1990 г., когда порошковая металлургия только «делала первые шаги». Это был период опробывания процессов получения порошков, процессов спекания изделий. В настоящее время ситуация принципиально изменилась — технологии порошковой металлургии стали базовыми для многих машиностроительных процессов.

Рассмотрены принципы и методики экономического анализа технологических решений производства изделий из порошков, включающего анализ технической, организационной и экономической целесообразности применения средств и способов производства.

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

© Глухов В. В., Некрасова Т. П., 2017

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1. Порошковая металлургия — преимущества и состояние .....	6
2. Классификация продукции порошковой металлургии .....	8
3. Принципы экономического анализа технологических решений производства деталей из порошков .....	17
4. Экономические показатели методов производства порошков .....	22
5. Экономический анализ производства инструментальной заготовки из металлических порошков .....	48
6. Экономический анализ изготовления и использования деталей из металлических порошков .....	62
7. Экономический анализ изготовления и использования инструмента из металлических порошков .....	98
8. Общие экономические показатели оценки проекта .....	114
9. Экономическая оценка лазерной технологии .....	120
10. Экономическая эффективность 3D технологий .....	124
11. Экономическая эффективность технологии прямого лазерного выращивания .....	134
Заключение .....	144

## ВВЕДЕНИЕ

Прорывное развитие производства связано с появлением принципиально новых технических решений. Это может быть новый источник энергии (пар, электроэнергия, ядерный реактор), новый материал (пластмасса, композит), новая техника (компьютер, робот). Одной из последних активно развиваемых технической разработкой является лазер. Его использование в различных областях техники дает возможность реализовать очередной шаг развития.

Применительно к машиностроению и металлообработке лазерная техника привела к появлению лазерной резки, лазерной наплавке, лазерной сварке. В настоящее время происходит следующий технический скачок — лазерная техника, соединяясь с порошковым материалом ведет к появлению новой техники. Произошло объединение нового источника энергии с новым материалом. Эти высокоскоростные и высокоточные технологические процессы реализуются с опорой на компьютерное проектирование и управление. Появилась возможность формирования новой техники, новых технологических процессов, и, как следствие, новых видов продукции, повышается производительность труда, улучшаются показатели деталей и узлов машин.

Металлический порошок, найдя «нового партнера» в виде лазерного луча, «стал резко улучшаться». Появились принципиально новые марки, нанопорошки, композиционные порошки, реализуется соединение различных порошков в частях единого изделия, соединяются принципиально несовместимые материалы..

С порошковой металлургией связывается развитие станкостроения, ускорение процессов создания новой техники, появление деталей и узлов машин с новыми свойствами. Переход к единичному оперативному изготовлению деталей меняет организацию

всего материально-технического обеспечения, вместо запасных частей и складских ресурсов может быть сформирована система оперативных аддитивных производств.

Основная задача в области порошковой металлургии — пройти период становления, найти технические решения, повышающие эффективность, создать номенклатуру новых станков, освоить новые виды машиностроительных узлов с принципиально новыми свойствами, подготовить соответствующие инженерные кадры.

В работе предложены принципы экономического анализа получения порошков методами распыления, восстановления, дробления. Исследована экономическая эффективность производства изделий из порошков: заготовок и деталей общемашиностроительного назначения, а также инструмента. Выделены экономические преимущества замены традиционных технологий на аддитивное производство.

Монография рекомендуется управленческому и инженерному персоналу, работающему в области порошковой металлургии, разрабатывающему и использующему новую машиностроительную технику. Она может быть полезна аспирантам и студентам, изучающим соответствующее направление подготовки.

## **1. ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ — ПРЕИМУЩЕСТВА И СОСТОЯНИЕ**

Порошковая металлургия занимает особое место в отраслевой структуре экономики страны. Ее нельзя рассматривать как разновидность металлургии, так как она включает последовательное осуществление в едином цикле операций получения порошка и формирования его в изделие. Именно так определяли сущность порошковой металлургии ее основоположники П. Р. Соболевский и В. В. Любарский.

Развитие порошковой металлургии обусловило прогрессивные сдвиги в промышленном производстве за счет создания, в первую очередь, новых материалов и промышленных технологий, а также существенного повышения эксплуатационных свойств деталей и инструмента, перехода на новые более производительные и менее металлоемкие технологические процессы. В области порошковой металлургии разработана и реализуется общегосударственная научно-техническая программа, предусматривающая создание и освоение высокопроизводительных технологических процессов, оборудования и средств автоматизации для производства металлических порошков и принципиально нового оборудования для производства продукции из них.

В порошковой металлургии изменяется распределение затрат между металлургическим и металлообрабатывающим переделами. Возможность получения готовых изделий спеканием порошка (выращиванием изделий) позволяет исключить большое число операций механической обработки, для которых характерны значительные трудозатраты и большие отходы металла. Технология порошковой металлургии уменьшает общий производственный цикл, что является одной из предпосылок экономической предпочтительности.

В технологической основе традиционных процессов получения металлоизделий и порошковой металлургии лежат различные принципы. Металлургическая и металлообрабатывающая технологии ориентирована на деформацию металла в пределах пластического течения на стадиях металлургии и механического резания в ме-

таллообработке. Порошковая металлургия базируется на первоначальном разрыве связей частиц, а затем восстановлении этих связей при формировании формы изделия. Сопоставление этих принципиально различных принципов требует анализа работы деформации, которая зависит от температуры тела, химического состава материала, внешних магнитных и электрических полей, размера зерна, кристаллической структуры и ряда других факторов.

Наряду с технологической предпочтительностью порошковая металлургия обеспечивает более высокую стабильность структуры и изотропность свойств изделий. В результате детали и инструмент, полученные из порошка имеют лучшие эксплуатационные показатели. Объясняется это тем, что конструктивная прочность изделий определяется внутренними дефектами. Мельчайшие частицы порошка таких дефектов практически не имеют, и их соединение спеканием, пресованием, выращиванием позволяет подойти к теоретически значениям прочности изделий.

По словам генерального директора ФГУП «ВИАМ», академика РАН Е. Н. Каблова: «Степень использования аддитивных технологий в производстве материалов является верным индикатором индустриальной мощи государства, индикатором его инновационного развития»<sup>1</sup>. Применение аддитивных технологий во многих случаях обеспечивает большую свободу в выборе конфигурации изделия, что позволяет оптимизировать массовые и функциональные параметры детали за счет использования сотовых и иных сложных конструкций, уменьшения толщины стенок, а также объединения нескольких деталей и изготовления их как единое целое<sup>2</sup>.

Порошковая металлургия оказалась удивительным образом подготовлена к переходу на «компьютерное сопровождение». Высокая степень автоматизации процессов, компьютерное проектирование оптимальной конфигурации изделий, компьютерное управление процессом лазерных аддитивных процессов.

---

<sup>1</sup> Новости ВИАМ [Электронный ресурс]. URL: <http://viam.ru/news/1826>.

<sup>2</sup> *Hashmi S.* Comprehensive Materials Processing. — Newnes: Elsevier, 2014. — 5634 p.

Среди различных видов продукции порошковой металлургии наибольшее применение нашли конструкционные детали и инструмент, части машин, биосовместимые элементы суставов. Детали и целые узлы выпускают в виде готовых изделий либо заготовок, требующих незначительной механической обработки.

Применение деталей из порошков повышает надежность и долговечность конструкций и машин. Внедрение специальных и инструментальных твердых сталей в машиностроение обеспечивает существенную интенсификацию процессов металлообработки.

Освоение возможностей аддитивных технологий должно привести к принципиально новому оборудованию, новым деталям. Иллюстрацией этого являются уже освоенные процессы получения деталей с градиентными свойствами, с использованием различных марок металлического порошка в ходе выращивания детали.

Порошковая металлургия стала значимым сектором экономики страны. Объемы производства изделий постоянно увеличиваются, разрабатываются новые материалы, создается новое оборудование, расширяются технологические способы. Дальнейшее решение проблем порошковой металлургии зависит от скоординированности действий ученых и инженерно-технических работников. Значительная роль при этом отводится взаимосвязи технологических и экономических исследований, увязка которых обеспечивает правильную ориентацию перспективных разработок.

## **2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОДУКЦИИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Широта номенклатуры продукции порошковой металлургии приводит к необходимости применения сложной системы ее классификации, предусматривающей несколько уровней детализации разнородных признаков классификации видов продукции (рис. 1). На верхнем уровне классификатора выделяются пять классов продукции: порошок, прокат, заготовка, деталь, материалы специального назначения.

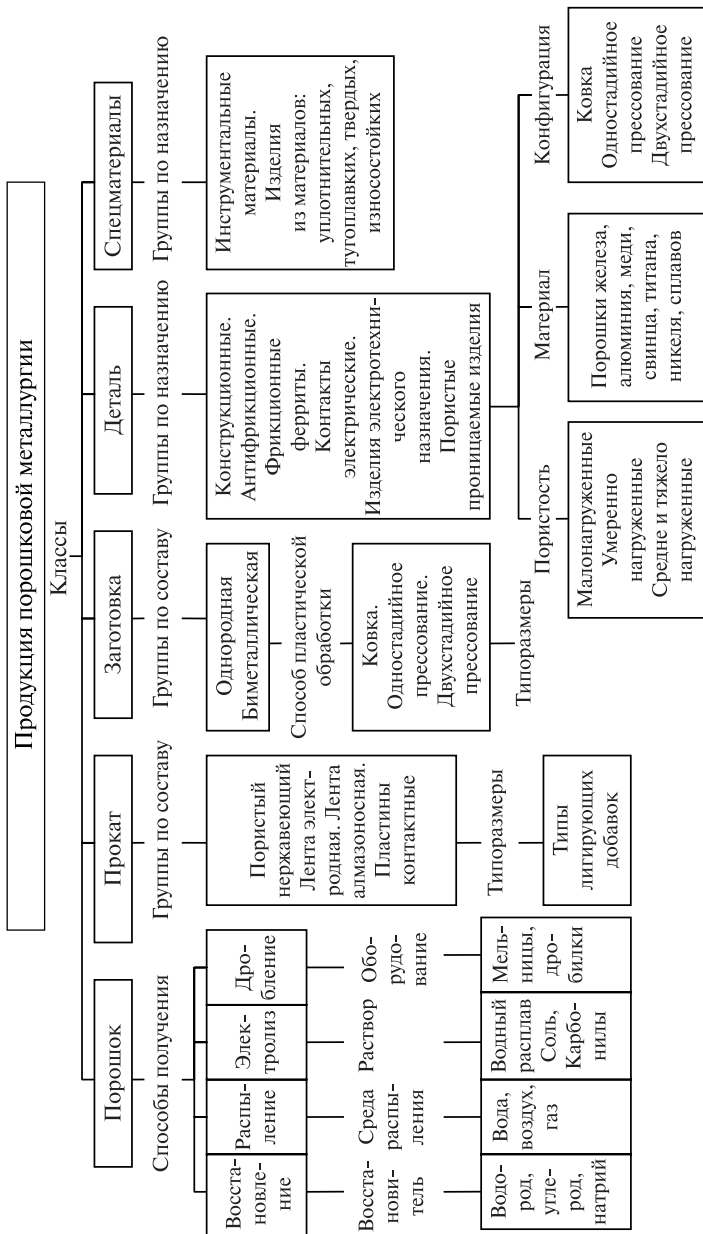


Рис. 1. Классификация продукции порошковой металлургии

Выделение, наряду с изделиями, особого класса «Порошок» вызвано использованием непосредственно порошка как товарной продукции порошковой металлургии.

Показатели *физико-химических свойств порошков*:

химический состав;  
гранулометрический состав;  
форма частиц;  
удельная поверхность;  
микротвердость частиц и др.

*Показатели технологических свойств порошков*:

насыпная плотность — масса единицы объема порошка при свободной засыпке;

текучесть — скорость истечения порошка из нормированной воронки (время истечения 50 г порошка через выходное отверстие специального конуса с углом 60° диаметром отверстия 2,5 мм, носик срезан под прямым углом на расстоянии 3 мм от конуса);

прессуемость — способность порошка под давлением образовывать прессовку (заготовку) заданной формы, плотности и размеров.

Металлические порошки используют для изготовления деталей и узлов, нанесения износо- и коррозионностойких покрытий, применяют 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 разновидности, учитывающие варианты способов получения порошков. Порошки разных марок характеризуются различным химическим и гранулометрическим составом.

На сегодняшний день номенклатура металлических композиций имеет широкий спектр материалов на основе Ni и Co (CoCrMo, Inconel, NiCrMo), на основе Fe (конструкционные стали, инструментальные стали: 18Ni300, H13; нержавеющая сталь 316L), на основе Ti (Ti6-4, CpTigr1) и на основе Al (AlSi10Mg, AlSi12) и др. Производятся порошки бронз, специальных сплавов, а также драгметаллов — главным образом для нужд дентальной медицины. Из металлических порошков «выращивают» заготовки пресс-форм,

специальные инструменты, оригинальные детали сложной конфигурации, которые затруднительно или невозможно получить литьем или механообработкой<sup>3</sup>.

Для изготовления и ремонта изделий путем подачи металла в зону расплавления в аддитивных технологиях применяют жаропрочные никелевые сплавы: Inconel 718<sup>4,5,6,7</sup>, Inconel 625<sup>8</sup> и Waspaloy<sup>9,10</sup>.

*Порошки* — сыпучие материалы с размером частиц до 1 мм — классифицируют по размерам частиц (по условному диаметру  $d$ ), подразделяя их<sup>11</sup>, мкм:

*нанодисперсные с  $d < 0,001$ ;*

---

<sup>3</sup> Тимошенко Ю. Н. Аддитивные технологии в горнодобывающей отрасли / Ю. Н. Тимошенко, Е. И. Сизова, О. В. Белянкина // Современные технологии в горном машиностроении: сборник научных трудов семинара. — М.: НИТУ «МИСиС», 2015. — 255 с.

<sup>4</sup> Liu F et al. Microstructure and residual stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy // Optics & laser technology. — 2011. — Vol. 43, № 1. — P. 208–213.

<sup>5</sup> Qi H., Azer M., Ritter A. Studies of Standard Heat Treatment Effects on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Net Shape Manufactured INCONEL 718 // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2009. — Vol. 40(10). — P. 2410–2422.

<sup>6</sup> Tabernero I., Lamikiz A., Martínez S., Ukar E., Figueras J. Evaluation of the mechanical properties of Inconel 718 components built by laser cladding // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2011. — Vol. 51(6). — P. 465–470.

<sup>7</sup> Zhao X., Chen J., Lin X., Huang W. Study on microstructure and mechanical properties of laser rapid forming Inconel 718 // Materials Science and Engineering: A. — 2008. — Vol. 478 (1–2). — P. 119–124.

<sup>8</sup> Dinda G. P., Dasgupta A. K., Mazumder J. Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: microstructural evolution and thermal stability // Materials Science and Engineering: A. — 2009. — Vol. 509, № 1. — P. 98–104

<sup>9</sup> Moat R.J. et al. Residual stresses in laser direct metal deposited Waspaloy // Materials Science and Engineering: A. — 2011. — Vol. 528, № 6. — P. 2288–2298.

<sup>10</sup> Pinkerton A. et al. Thermal and microstructural aspects of the laser direct metal deposition of waspaloy // Journal of laser applications. — 2006. — Vol. 18, № 3. — P. 216–226.

<sup>11</sup> Wohlers T. Wohlers report 2014: Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry // Annual worldwide progress report / Wohlers Associates, 2014. — 276 p.

*ультрадисперсные* —  $d = 0,01-0,1$ ;

*высокодисперсные* —  $d = 0,1-10$ ;

*мелкие* —  $d = 10-40$ ;

*средние* —  $d = 40-250$ ;

*крупные* —  $d = 250-1000$ .

В 2011 г. Hederick E.<sup>12</sup> опубликовал обзор металлических материалов для аддитивного производства, отметив, что особый интерес к металлическим материалам в аэрокосмической и биомедицинской промышленности связан с возможностью повышения производительности при уменьшении общей стоимости производства.

Новый материал — инконель 625 был представлен компанией ExOne в 2014 г.<sup>13,14</sup>. Несмотря на то что для изготовления из него изделий используется связующее, инконель можно спекать практически до полной плотности (плотность составляет более 99 %), сохраняя при этом приемлемую размерную точность. При распространении этого процесса на другие металлы и сплавы можно ожидать серьезного изменения экономики аддитивного производства металлических изделий.

Для металлургической отрасли (в настоящее время) компания ExOne предлагает нержавеющую сталь 316 с бронзой, нержавеющую сталь 420, отожженную нержавеющую сталь 420, бронзу и инконель 625 — Inconel 625. Для материалов из нержавеющей стали бронза используется в качестве пропитки при изготовлении беспористых изделий (близких к литым). Для металлов используют и полимерные связующие. В машинах, продаваемых компанией ExOne, используются металлические частицы либо песок для изготовления металлических изделий, песчаных форм или стержней для литья.

---

<sup>12</sup> Herderick E. Additive Manufacturing of Metals: A Review // Proceedings of MS&T11, Additive Manufacturing of Metals. — Columbus, OH, 2011. — P. 1413–1425.

<sup>13</sup> ExOne [Электронный ресурс]. URL: <http://www.exone.com>

<sup>14</sup> *Голод В. М.* Теория, компьютерный анализ и технология стального литья / В. М. Голод, В. А. Денисов. — СПб.: ИПЦ СПбГУТД, 2007. — 610 с.

Внедрение на ведущих предприятиях современного оборудования, позволяющего производить детали с использованием аддитивных технологий, вызвало потребность в производстве *высококачественных порошков*<sup>15</sup>.

**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 составе выделяются группы с учетом производственного назначения. Классификационными признаками внутри групп деталей служат пористость, используемый материал и конфигурация.

Выделяют четыре группы плотности материала:

- 1) пористость 25–16 %;
- 2) пористость 15–10 %;
- 3) пористость 9–2 %;
- 4) пористость — менее 2 %.

Эти группы плотности определяют условия нагружения деталей, поэтому используют их соответствующие наименования: мало-, средне- и тяжело нагруженные детали.

Используемый материал характеризуется маркой базового порошка и составом добавки. В зависимости от этого признака выделяют разновидности деталей, основными из которых являются изделия на основе порошка железа, алюминия, меди, серебра, титана, никеля, а также металлических сплавов.

---

<sup>15</sup> *Оспенникова О. Г.* Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий / *О. Г. Оспенникова //* Авиационные материалы и технологии. — 2012. — № 5. — С. 19–35.

В зависимости от сложности формы изделия разделены на три группы сложности. В свою очередь каждая из групп предусматривает наличие двух подгрупп. В первую подгруппу простых изделий включены изделия цилиндрической формы (втулки, кольца). Наличие фасок, переходов по толщине, небольших углублений или выступов является признаком отнесения изделия во вторую подгруппу. К сложным изделиям относят изделия, ограниченные параллельными или почти параллельными плоскостями и имеющие в плоскости, перпендикулярной к направлению прессования, сложную конфигурацию. В эту группу входят также изделия, имеющие криволинейную поверхность без переходов по высоте, цилиндрическую форму с переходами, формование которой не требует сложной оснастки, простую форму при отношении высоты к толщине стенки более 8 или диаметра к толщине стенки более 9. Признаком отнесения во вторую подгруппу сложных деталей является наличие переходов по высоте либо тонких элементов.

Весьма сложная группа объединяет изделия, формование которых требует применения сложной оснастки. Это зубчатые колеса, изделия с переходом по высоте, формование которых осуществляется отдельными пуансонами. Одним из признаков сложности изделия является число отверстий. При наличии более четырех отверстий изделия относят к весьма сложным, при двух-четырех — повышают сложность на одну группу.

Антифрикционные спеченные детали (подшипники скольжения, втулки, кольца, шайбы, поршневые кольца и т. д.) изготавливают на основе порошков железа, меди, алюминия или титана с добавлением графита, фторида, фторопласта или сульфидов. Наиболее распространены антифрикционные детали на основе железа. Введением различных добавок могут быть созданы материалы для работы в условиях повышенных нагрузок, скоростей, температур, а также в присутствии агрессивной среды. Классификация антифрикционных деталей в зависимости от условий работы предусматривает выделение восьми подгрупп материалов, работающих в условиях жидкой смазки, ограниченной смазки, самосмазывания, без смазки в воздушной либо газовой среде, повышенной темпера-

туры, высокой скорости скольжения, коррозионной среды. Кроме этих подгрупп, имеющих общемашиностроительное назначение, выделяют детали с конкретной областью применения: токосъемники, торцевые и радиальные уплотнения, поршневые кольца.

Фрикционные спеченные детали (фрикционы, электромагнитные муфты, синхронизаторы, муфты сцепления и тормоза, гидротрансмиссии и т. д.) в зависимости от условий работы классифицируют по двум признакам: нагружению и среде работы. По первому признаку выделяют слабо-, средне- и тяжело нагруженные детали, по второму — детали, работающие при трении всухую и в масле. Всего выделяется шесть подгрупп. Основными типами фрикционных деталей являются диски, секторные накладки и колодки различной конфигурации. Для деталей, работающих в условиях жидкой смазки применяют порошки на основе медных сплавов с добавлением графита, свинца, диоксида кремния и железа. В условиях сухого трения применяют материалы на основе железа и меди с добавлением свинца, висмута, титана, графита, тугоплавких соединений и т. д.

Ферритовые магниты применяют в магнитных системах герконов, электродвигателей, акустических приборов, в магнитной оснастке, для изготовления магнитной ткани, крепежной ленты, деталей автомобилей и т. д. Основными подгруппами изделий из порошков ферритов являются магнитопласты и магнитоэласты. Более детальная классификация марок материала предусматривает выделение шести групп: магнитомягкие марганец-цинковые, прочие магнитомягкие, с прямоугольной петлей гистерезиса, сверхвысокочастотные, магнитотвердые, магнитофрикционные. В зависимости от конфигурации ферритовые спеченные изделия разделены на две группы сложности, в каждой из которых две подгруппы (четыре типа). Простая группа объединяет изделия простой формы и средних размеров (высота — 4–20 мм, диаметр — 8–40 мм). Сложная группа объединяет изделия с переходом по высоте, сложной конфигурации, с несколькими отверстиями, малых и больших размеров.

**В классе материалов специального назначения** (включающем инструментальные материалы, пористые проницаемые изделия, 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.

Материалы, полученные с помощью газопорошковой наплавки, обладают высокими механическими свойствами. Подбор оптимальных параметров процесса позволяет получать сплошную структуру материала, а применение систем контроля процесса наплавки снижает вероятность образования дефектов и повышает его точность. В процессе используется множество материалов, таких как сплавы на основе железа, титана, никеля, алюминия и др. В технологии DED обычно используется лазер, мощностью до нескольких киловатт и больший по сравнению с селективным лазерным плавлением диаметр пятна, что обеспечивает высокую скорость изготовления деталей<sup>16</sup>.

Подгруппами инструментальных спеченных материалов являются твердые сплавы и порошковые инструментальные стали. В первую подгруппу входят материалы на основе кобальта, никеля и железа с добавлением зерен тугоплавких высокотвердых соединений. Во вторую подгруппу — однородные порошки быстрорежущих сталей либо с добавлением карбидов титана и ниобия. В зависимости от области применения инструментальные спеченные материалы делятся на четыре вида: режущий инструмент, инструмент для обработки металлов давлением, горный инструмент и прочие виды. Подвиды инструментальных материалов определяются обрабатываемым материалом. На этой ступени классификация порошковых спеченных инструментальных сталей может быть принята такой же, как и действующая классификация традиционных видов инструмента. Определяющим классификационным параметром в ней приняты: обрабатываемый материал — для режущего инструмента, характер ударного нагружения — для инструмента по обработке металлов давлением, вид бурения — для горного инструмента.

---

<sup>16</sup> Hashmi S. Comprehensive Materials Processing. — Newnes: Elsevier, 2014. — 5634 p.

### **3. ПРИНЦИПЫ ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОРОШКОВ**

Рациональность разработки и внедрения нового способа изготовления деталей должна устанавливаться на основе комплексного анализа целесообразности его применения в сравнении с применением других способов и средств для получения тех же конечных результатов. Такой комплексный анализ должен включать анализ технической, организационной и экономической целесообразности применения средств и способов производства. При этом необходимо учитывать социальную и экологическую значимость работы.

Анализ технической целесообразности предусматривает установление технической возможности изготовления детали (заготовки) в полном соответствии с предъявляемыми к ней требованиями. Кроме того необходимо выявить преимущества и недостатки метода производства детали и его соответствие прогрессивным тенденциям развития данной области техники. Чтобы анализ был более объективным, выясняют и сопоставляют соответствующие технические показатели использования средств: эксплуатационные и технологические.

При проведении анализа организационной целесообразности необходимо установить возможность изготовления нужных деталей в требуемом объеме и в заданные сроки, а также выявить преимущества и достоинства метода изготовления деталей с точки зрения ускорения подготовки производства, сокращения производственного цикла изготовления деталей, обеспечения непрерывности и ритмичности производства.

В ходе анализа экономической целесообразности применения метода порошковой металлургии при производстве деталей необходимо установить состав и размеры затрат общественного труда, обусловленного его применением, экономического выигрыша, который достигается благодаря применению этого метода по сравнению с существующей технологией. Кроме того, необходимо выявить состав и размер дополнительных средств и производственных

ресурсов, обусловленных применением этого способа, определить величину достигаемой эффективности дополнительных средств и ресурсов.

Экономический выигрыш применения методов порошковой металлургии обеспечивается целым рядом факторов, в частности уменьшением времени проектирования и изготовления изделия, сокращением или полной ликвидацией последующей механической обработки, сведением к минимуму потерь материала, заменой дорогостоящих металлов и сплавов более дешевыми материалами, улучшением показателей изделия, повышением уровня механизации и автоматизации.

При оценке экономической эффективности применения нового технологического процесса возникает ряд методических трудностей. Они вызваны главным образом разновременностью функционирования действующего и предлагаемого процессов. Действующая технологическая схема отличается значительной освоенностью, у нее в максимальной степени выявлены производственные резервы, с учетом ее особенностей разработаны специальные агрегаты и технологические линии. Разрабатываемый новый технологический процесс оказывается на начальной стадии «жизненного цикла». Его развитие и максимальное промышленное использование с достижением наилучших технико-экономических показателей можно ожидать только в перспективе. Подобная ситуация требует специфического экономического анализа, отличающегося от простого сопоставления текущих и единовременных затрат.

Составными элементами экономического анализа должны быть прогнозирование динамики показателей и условий применения нового технологического процесса, статистическая оценка возможного интервала изменения будущих технико-экономических показателей действующего технологического процесса в перспективном периоде при учете сложившейся тенденции изменения оценок потребляемых ресурсов, выявление предпочтительности сопоставляемых технологических процессов, расчет экономического выигрыша от применения нового технологического процесса взамен действующего в условиях динамики их функционирования,

экономическая оценка направлений совершенствования нового технологического процесса, определение областей допустимого изменения параметров нового технологического процесса для разных значений экономического выигрыша.

Если предлагаемый технологический процесс находится на стадии лабораторных и полупромышленных исследований, то его технико-экономические показатели, такие как нормы расхода материалов и топливо-, трудо- и машиноёмкость при переходе к промышленному масштабу применения неизбежно уменьшаются. При этом проявятся две закономерности: во-первых, произойдет скачок в улучшении технико-экономических показателей при переходе к массовому (поточному) производству, во-вторых, процесс улучшения показателей будет продолжаться по мере освоения промышленного способа производства, Математически изменение экономического показателя  $P_i(t)$  можно описать функцией, например, следующего вида

$$P_i(t) = C_i B_i - d_i B_i \left(1 - e^{-a_i t}\right),$$

где  $C_i$  — уменьшение базового значения показателя  $B_i$  в связи переходом к массовому производству;  $d_i$  — уменьшение значения показателя по мере освоения промышленного способа производства;  $a_i$  — темп изменения показателя в процессе освоения промышленного способа производства;  $t$  — номер временного интервала (года). Значение коэффициентов  $a_i$ ,  $C_i$  и  $d_i$  — может быть получено из статистических данных отрасли по освоению технологических процессов и в частности сопоставляемого действующего процесса. При более детальном описании функции  $P_i(t)$  можно учитывать масштаб и условия применения нового технологического решения.

Точность прогнозирования значений  $P_i(t)$  зависит от правильности выбранной функциональной зависимости и погрешности задания величин  $a_i$ ,  $C_i$  и  $d_i$ . Количественная статистическая оценка интервала возможных будущих изменений равняется

$$\Delta P_i(t) \approx \Delta C_i B_i^0 + C_i^0 \Delta B_i - \left( B_i^0 \Delta d_i + \Delta B_i d_i^0 \right) \left( 1 - e^{-a_i^0 t} + \Delta a_i t e^{-a_i^0 t} \right).$$

Здесь знаком « $\Delta$ » обозначена статистическая или экспертная оценка погрешности соответствующей величины, индексом « $^0$ » — среднее значение величины.

Необходимость рассмотрения сопоставляемых технологических решений в динамике связана не только с изменением во времени  $P_i(t)$ , но сложившейся тенденцией в изменениях оплаты труда, цен на материалы, энергию и металл. В результате стоимостные показатели выпуска продукции с применением сравниваемых технологических решений определяют по формулам

$$f_k(t) = \sum_{i \in I_k} \Pi_i(t) P_i(t);$$

$$\phi_k(t) = \sum_{i \in I_k} \Pi_i(t) P_i'(t),$$

где  $I_k$  — множество составляющих затрат, учитываемых при вычислении  $k$ -го экономического показателя;  $\Pi_i(t)$  — цена на ресурс  $i$ -го вида по интервалам времени;  $P_i(t)$  и  $P_i'(t)$  — значение  $i$ -го экономического показателя для предлагаемого и действующего технологических решений по интервалам времени.

Интенсивность освоения технологического процесса зависит от правильности представления технологом и конструктором экономической значимости путей совершенствования нового технологического решения. Количественное значение коэффициентов чувствительности экономических показателей к изменению технологических и конструкторских параметров (скорости, длительности, температуры, объема и т. п.) можно получить из соотношения

$$\frac{\Delta f_k}{\Delta r_j} = \sum_{i \in I_k} \Pi_i P_i(r_1, r_2, r_3, \dots) - \sum_{i \in I_k} \Pi_i P_i(r_1, r_2, \dots, r_i + \Delta r_i, \dots),$$

где  $r_j$  — обозначает значение  $j$ -го параметра режима работы или конструкции при использовании нового технологического решения. Чем значительнее коэффициент чувствительности, тем больше затрат на научные и конструкторские исследования по этому направлению совершенствования нового технологического процесса можно выделить.

Необходимыми условиями ресурсной предпочтительности нового технологического решения являются улучшение отраслевой структуры необходимых трудовых затрат, используемых производственных операций, потребляемых материалов и энергии (топлива). Чем отраслевая структура расходующихся видов топлива и сырья ближе к их структуре природных запасов, тем предпочтительнее соответствующий технологический процесс. Опыт последних лет наглядно проиллюстрировал значимость ресурсной предпочтительности при оценке технологических решений. Принятые без ее учета технологические решения уже через 10–15 лет начинают наносить значительные убытки. Истощение природных запасов минерального сырья повышает в последние годы актуальность кругооборота конструкционного материала. В связи с этим важное значение для предпочтительности технологического решения имеет возможность повторного использования конструкционного материала после списания изделий. Значительный угар и загрязненность материала при вторичной переработке ведут к безвозвратным потерям и уменьшают тем самым потенциальный запас материала.

Предпочтительность структуры трудовых затрат определяется ее соответствием сложившимся в народном хозяйстве тенденциям: сокращению доли ручного труда, расширению автоматизации и механизации.

Предпочтительность структуры производственного процесса оценивается количеством выполняемых операций и численным значением коэффициентов полезного использования затрат энергии, материалов, труда и оборудования.

При расчете итоговой оценки экономического выигрыша от применения нового технологического решения взамен действующего необходимо выделить два обстоятельства:

во-первых, экономический выигрыш является функцией времени;

во-вторых, при расчете экономического выигрыша следует учесть изменения состава потребляемых трудовых, материальных и энергетических ресурсов.

Их высвобождение по сравнению с действующим процессом сопровождается не только снижением себестоимости продукции, выпускаемой с применением рассматриваемых технологических процессов. Появляется возможность снизить совокупные затраты в других производствах, где высвобожденные ресурсы найдут применение. В результате получается, что каждая единица ресурса оценивается прямой экономией и двойственной оценкой. Наиболее широко такой подход используется в энергетике, где при проведении экономического анализа применяют замыкающие затраты на энергетические ресурсы. Аналогичный подход при рассмотрении новых технологических решений должен быть использован при оценке основных конструкционных материалов и рабочей силы.

Графическое представление результатов экономического анализа имеет три основных формы:

первая предусматривает построение графика изменения во времени основных технико-экономических параметров сопоставляемых процессов;

вторая — изменение технико-экономических параметров в зависимости от ведущих технологических и конструкционных факторов нового технологического процесса или условий его применения;

третья — построение области значений технологических и конструкционных факторов для разных уровней экономического выигрыша.

#### **4. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ПОРОШКОВ**

Основные способы получения порошков: распыление, восстановление, механическое измельчение. Рассмотрим каждый из них.

Структура себестоимости порошка, полученного распылением расплава, зависит от множества конструктивных и технологических параметров применяемого оборудования. Например, использование установки для распыления расплава потоком аргона требует соответствующих затрат на систему подачи и очистки газа. Рас-

пыление порошка центробежным способом с охлаждением в воде связано с организацией дополнительных операций по очистке порошка и циркуляции охлаждающей жидкости.

Рост производительности оборудования, изменение цен на используемые материалы, совершенствование параметров технологического процесса и требований к качеству порошка неизбежно ведут к изменению отдельных составляющих затрат и себестоимости порошка в целом. Поэтому для выработки экономического представления о вариантах процессов получения порошков необходимо знать структуру затрат, количественный интервал их наиболее вероятных значений и функциональную зависимость составляющих себестоимости порошка с важнейшими конструкторско-технологическими параметрами процесса распыления расплава.

Значительную долю в себестоимости порошка составляет стоимость заданного в переплавку металла сырья и материалов. Изменить ее можно за счет применения более дешевой шихты и снижения отходов металла в процессе выплавки, распыления и отсева необходимой фракции порошка. В качестве элементов расходного коэффициента металла выделяют угар и потери металла со шлаком, потери металла в металлоприемнике, предварительно сливаемый металл и остатки металла в ковше. Снижение расходного коэффициента металла связано с оптимизацией температуры расплава, сечения металлопровода, интенсивности процесса распыления струи металла. Повышение температуры расплава снижает вязкость и поверхностное натяжение жидкой стали, что способствует повышению доли мелких фракций в порошке, но одновременно ведет к росту угара металла и расходов на выплавку стали. На фракционный состав порошка может влиять также изменение давления подаваемого газа (при распылении нейтральным газом).

Связь параметров технологического режима с качеством получаемого порошка применительно к конкретной установке распыления может быть установлена на базе статистических данных работы установок распыления либо специальных исследований. Например,

для связи температуры расплава  $t$ , °C, давления воздушного дутья  $\bar{p}$ , Мпа и диаметра струи расплава  $d$ , мм, с размером частиц порошка получены статистические уравнения<sup>17</sup>:

$$s = 26,1 - 5,1t + 4,1\bar{p} - 5,02d + 4,9tp + 4,1td;$$

$$\bar{s} = 527 + 52,5t - 125\bar{p} + 32,5d - 42,5td + 35tpd,$$

где  $s$  — выход порошка фракции менее 200 мкм, %;  $s$  — средний размер частиц, мкм.

Нормированные значения параметров технологического режима составляют:

$$t = \frac{T - 1575}{75}; \quad p = \frac{P - 0,35}{0,05}; \quad d = \frac{D - 7}{1}.$$

Условно-постоянная часть расходов в значительной степени зависит от производительности применяемой установки. Масса садки плавильной печи выбирается из соображений максимального использования полезной емкости печи. Подбор шихты из крупногабаритного лома не обеспечивает плотности завалки. Применение мелких кусков лома требует дополнительных затрат на его подготовку, но ведет к увеличению средней массы плавки. В то же время чрезмерно мелкая шихта повышает угар металла в процессе его расплавления.

Одним из наиболее эффективных путей повышения производительности всего процесса является совершенствование конструкции установки распыления и прежде всего увеличение числа одновременно распыляемых струй металла. При этом скорость распыления возрастает в несколько раз (по числу струй) при сохранении качественных характеристик порошка. Растет выход крупных фракций порошка, снижается производительность по годовому порошку. Распыление одновременно двух струй металла можно обеспечить параллельной работой двух установок распыления либо использованием более сложной спаренной установки

---

<sup>17</sup> *Tay B. Y., Evans J. R. G., Edirisinghe M. J. Solid freeform fabrication of ceramics // International Materials Reviews. — 2013*

с единой камерой распыления. Чтобы увеличить в два раза производительность установки с одной струей металла, необходимо увеличить диаметр этой струи с 6 до 8,5 мм, но при этом резко изменяются условия протекания процесса.

Существенное влияние на себестоимость распыленного порошка оказывает организация взаимодействия дискретных процессов плавления и распыления. Если между плавильной печью и установкой распыления расплава функционирует миксер, то можно организовать независимую работу основных участков. При отсутствии миксера плавильная печь и установка распыления вынуждены работать последовательно. В этих условиях важнейшим фактором оказывается масса порции распыляемого расплава. Ее выбор влияет на суммарную продолжительность подготовительно-заключительных операций процесса распыления, необходимую интенсивность процесса распыления струй металла и однородность гранулометрического состава получаемого порошка. Совокупность параметров, определяющих процесс распыления расплава, может быть разделена на три группы:

конструкторско-технологические параметры (выход годной фракции порошка при расसेве; число видов ферросплавов, лома, отходов при выплавке стали, отходов при распылении, добавочных материалов; выход каждого вида отходов; масса садки печи; число выпусков металла в течение одного цикла работы печи; число действующих установок распыления; время выпуска из печи одной порции металла; скорость распыления металла на одной установке; мощность индукционной сталеплавильной печи; расход на 1 т годного порошка электроэнергии, природного газа, воды, азота; температура нагрева шихты);

организационные параметры (годовой фонд времени работы печи; численность основных производственных рабочих; коэффициенты прочих расходов цеха, расходов на подготовку и освоение производства, прочих производственных расходов, общезаводских расходов);

экономические параметры (цены сырья, материалов и отходов; цена некондиционного порошка; тариф на электроэнергию; цена

на природный газ, воду, азот; среднечасовая тарифная ставка одного рабочего; коэффициенты, учитывающие дополнительную заработную плату и отчисления на социальное страхование; затраты на амортизацию по отделению выплавки стали и распыления; затраты на износ инструментов и приспособлений целевого назначения).

Совершенствование технологических процессов достигается изменением конструкторско-технологических параметров. По принципу воздействия на себестоимость распыленного порошка эта группа параметров может быть разделена на три уровня (рис. 2) цикла работы печи, сквозной расходный коэффициент металла, годовой объем производства порошка.

1-й уровень является исходным и включает температуру нагрева шихты, массу садки плавильного агрегата, число выпусков металла, число струй металла при распылении, диаметр металлопровода, массу скрапа и недоливок с одной плавки, угар и потери металла со шлаком, расход азота в единицу времени, число установок распыления (параллельно работающих). Параметры 2-го уровня могут быть определены расчетом на основании 1-го, но в ряде случаев целесообразно выделить их как независимые факторы (скорость распыления, выход годного при расसेве, расходный коэффициент при выплавке, расходный коэффициент при распылении). К 3-му уровню относятся характеристики, являющиеся в свою очередь функциями параметров 2-го уровня: длительность

На отдельных примерах можно проследить количественную взаимосвязь конструкторско-технологических параметров друг с другом. Увеличение массы садки печи приводит к увеличению длительности цикла работы печи и годового объема производства и соответственно снижает производственную себестоимость порошка. Это пример двухуровневого влияния промежуточных параметров на итоговое значение (рис. 3). Аналогичная картина наблюдается и при рассеве порошка (рис. 4). Увеличение значений расходных коэффициентов сопровождается уменьшением годового объема производства порошка и ростом его себестоимости.



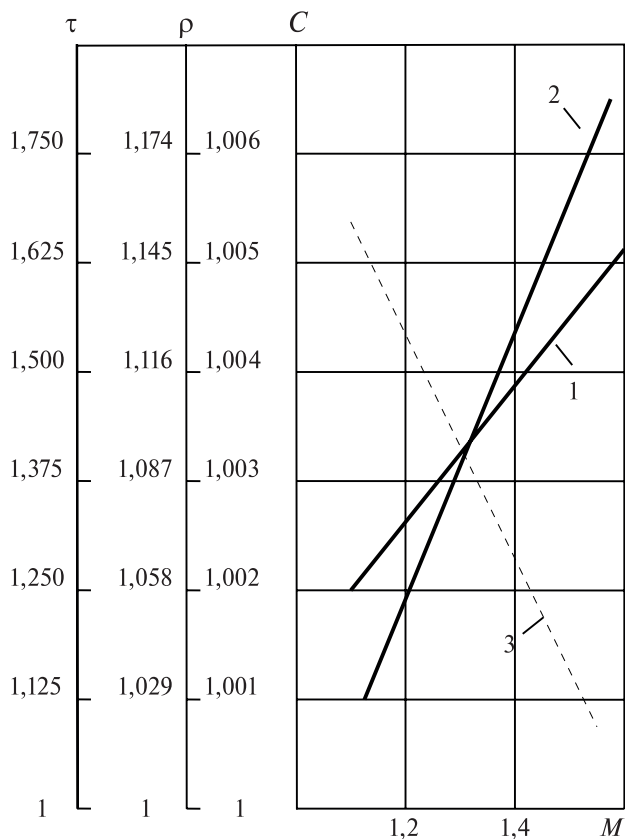


Рис. 3. Зависимость длительности цикла работы печи  $\tau$  (1), годового объема производства  $P$  (2) и производственной стоимости порошка  $C$  (3) (в условных единицах) от массы садки  $M$

Примером трехуровневого влияния параметров может служить цепочка: диаметр металлопровода и число одновременно распыляемых струй металла — скорость распыления — длительность цикла работы печи и годовой объем производства порошка — производственная себестоимость порошка. Увеличение диаметра металлопровода или числа одновременно распыляемых струй

металла ведет к росту скорости распыления (рис. 5), уменьшению длительности цикла работы печи и возрастанию объема производства порошка (рис. 6). Производственная себестоимость порошка будет снижаться. Таким образом, связь таких параметров, как число струй металла и диаметр металлопровода с производственной

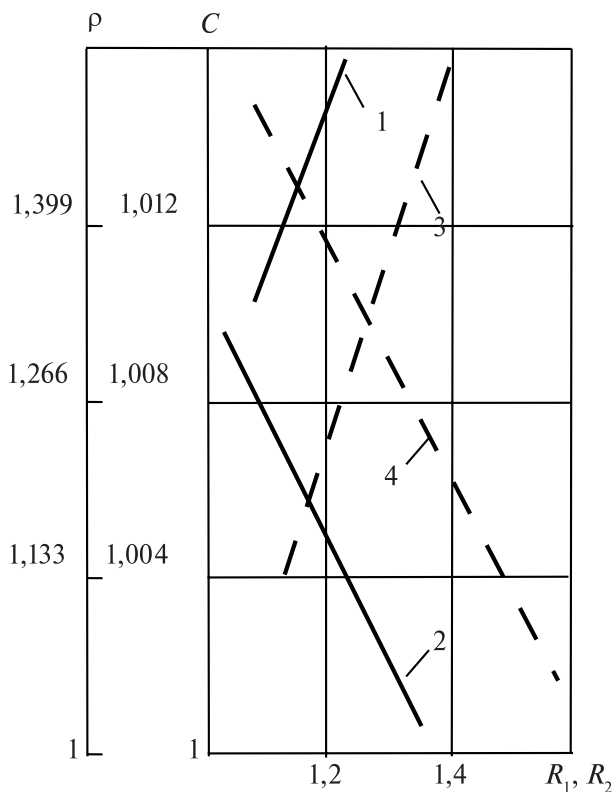


Рис. 4. Зависимость производственной себестоимости порошка  $C$ , годового объема производства порошка  $P$  от расходного коэффициента металлошихты при выплавке стали  $R_1$  (кривые 1, 2 соответственно) и от коэффициента расхода порошка при расसेве  $R_2$  (кривые 3, 4 соответственно) (в условных единицах)

себестоимостью, может быть достаточно просто определена. Для построения подобных графиков и аналогичных им таблиц модель расчета параметров процесса должна быть детализирована в зависимости от конструкторских характеристик и организационных условий работы установки.

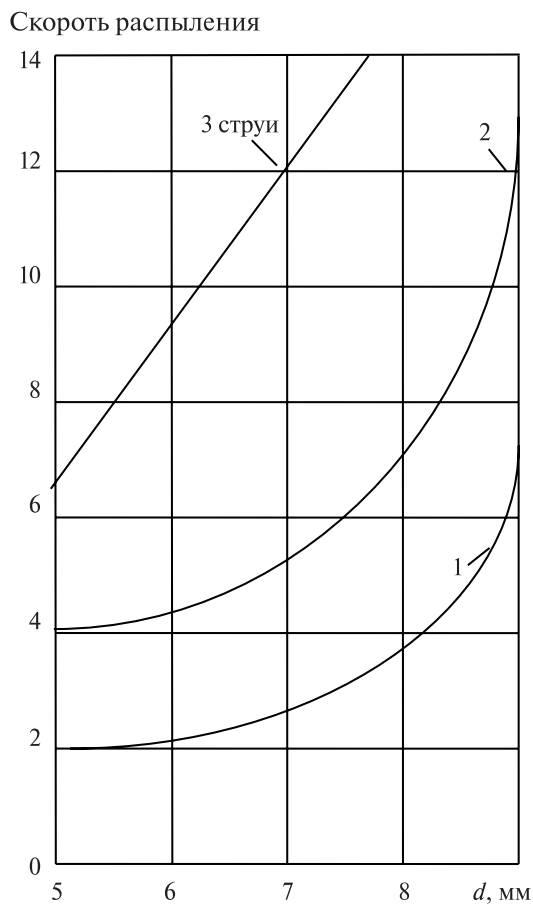


Рис. 5. Зависимость скорости распыления от диаметра металлопровода  $d$  и числа одновременно распыляемых струй металла (в условных единицах)

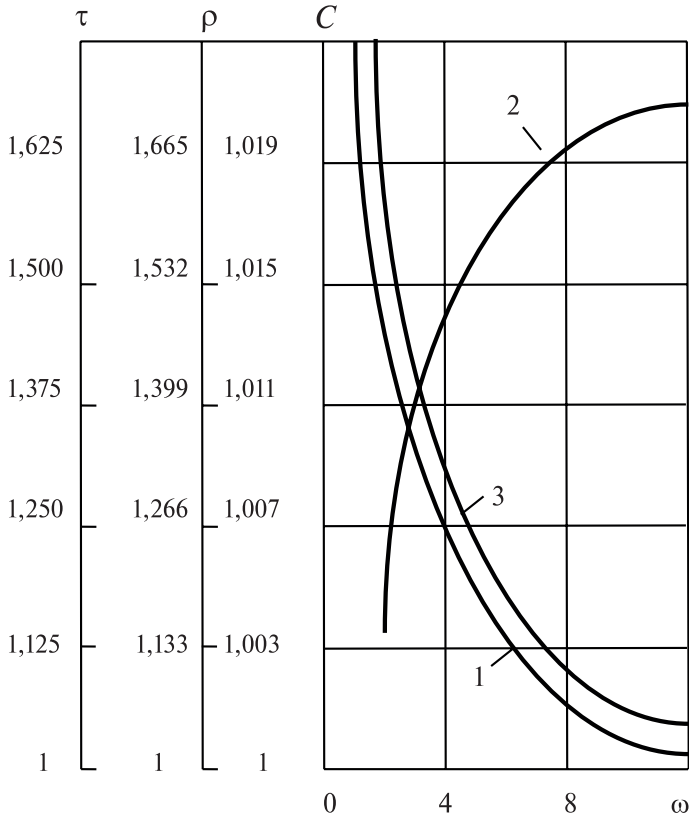


Рис. 6. Зависимость длительности периода работы печи  $\tau$  (1), годового объема производства  $P$  (2) и производственной себестоимости порошка  $C$  (3) (в условных единицах) от скорости распыления  $\omega$

Количественный анализ степени влияния каждого из параметров на себестоимость порошка позволяет выделить наиболее значительные из них (табл. 1). Для исследуемого технологического процесса получения порошка распылением расплава азотом высокого давления изменение лишь таких технологических параметров, как масса садки печи, скорость распыления, расход азота, угар и

потери металла со шлаком, и, как следствие, длительность цикла работы печи, потенциально может привести к значительному изменению себестоимости порошка. Степень влияния остальных параметров на себестоимость порошка мала.

Проиллюстрированные данные показывают влияние параметров 1-го уровня на себестоимость порошка. Но его результаты могут быть использованы для количественно оценки связи себестоимости порошка с конструкторско-технологическими параметрами 2-го и 3-го уровней. Для этого данные, приведенные в табл. 1, необходимо рассматривать совместно с формулами расчета параметров 2-го и 3-го уровней через 1-й.

Совершенствование технологии получения порошка распылением может идти по следующим направлениям: сокращение трудоемкости процесса и расходных коэффициентов металла, изменение длительности ведения процесса и расхода вспомогательных материалов. Номограммы областей эффективности, характерные для получения порошка методами распыления, позволяют установить те предельные значения параметров, при которых использование процессов эффективно. Например, при изменении расходного коэффициента не более, чем в 1,2–1,4 раза, а производительности

оборудования — в 5,8–7,5 раза (для разных объемов производства) применение процесса распыления расплава в вакууме будет более эффективным, чем распыление аргоном (рис. 7).

Совокупность приведенных графиков и таблиц отражает взаимосвязь возможных технологических изменений процессов получения порошка распылением расплава с экономическими показателями и позволяют как на уровне действующих производств, так и в опытных процессах принимать оперативные решения по рациональному изменению технологических параметров.

При экономическом исследовании процесса получения восстановленного железного порошка необходимо выделить две основные стадии: получение губчатого железа и выпуск железного порошка. На 1-й стадии заданным в переработку материалом является восстанавливаемое сырье, на 2-й — полученное ранее губчатое железо.

Таблица 1

## Влияние параметров технологического процесса получения порошка на его себестоимость, %

Параметр	Изменение себестоимости, усл.ед./т									
	-30	-20	-10	-5	-1	0	1	5	10	
Расходный коэффициент при выплавке стали	-	-	-	95	99	100	101	105	110	
Коэффициент выхода годного при расसेве	-	-	111	105	101	100	99	95	95	
Масса садки	321	185	130	113	102	100	98	90	81	
Скорость распыления	213	155	121	110	102	100	98	92	85	
Расход азота	85	86	88	94	99	100	101	106	112	
Температура нагрева шихты при прокатке	-	-	-	127	104	100	96	83	71	
Угар и потери металла со шлаком	82	88	94	97	99	100	101	103	106	
Длительность цикла работы печи	82	87	93	97	99	100	101	104	108	

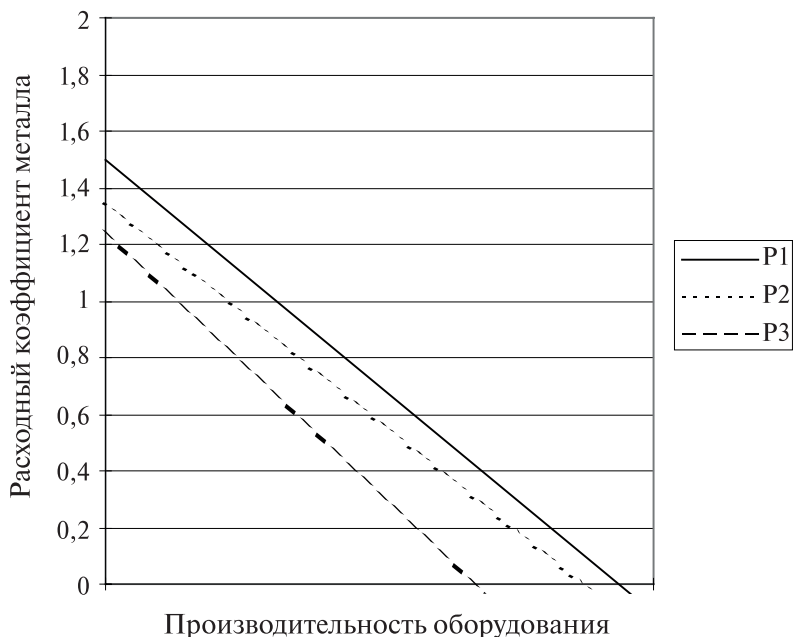


Рис. 7. Номограмма областей эффективности получения порошка методом распыления при изменении расходного коэффициента металла и производительности оборудования для различных объемов производства (в условных единицах)

Структуру себестоимости восстановленного порошка определяют предпочтительные направления улучшения технологического процесса: энергосбережение, повышение производительности и надежности оборудования, снижение норм расхода сырья и материалов. В качестве конкретных мероприятий повышения эффективности процесса получения восстановленного порошка можно отметить повышение степени использования восстановителя и коэффициента полезного действия нагревательных печей. Технология получения восстановленного порошка в капсулах требует избыточного количества восстановителя (в ряде случаев полезное его использование менее 20 %). Кроме того, процесс нагрева кап-

сул характеризується більшою інертністю. Поєтому совершенствование операції відновлення забезпечує значительне зменшення себестоимости порошка.

Класифікація техніко-економічних показателів процесу відновлення може бути виконана по принципам, изложенным вище для процесу розпилення (рис. 8). При цьому різниця буде мати місце тільки для показателів 1-ї групи, об'єднуючої специфічні технологічні показателі: вологість, чистоту, хімічний склад, матеріальний і фракційний склад сировини, масу і габаритні розміри капсул, використовуваних при отриманні губчатого заліза, тип і ступінь використання відновителя, витрати водороду при відпалі губчатого заліза і спека, температуру і тривалість нагріву в операціях відновлення і відпалу, товщину насиченого шару порошка при відпалі, коефіцієнт корисної дії нагрівальних печей.

Розглядати процес відновлення як економічно конкуруючий з процесом отримання порошка розпиленням расплава в даний час було б невірно. Ці процеси не вичерпали ще всіх своїх технічних можливостей і не досягли межового рівня техніко-економічних показателів. Якість відновленого порошка поки вище розпиленого порошка в умовах порівнянних марок, однак потенційно можливий рівень витрат по розпиленню представляється більш низьким, ніж по відновленню. Зв'язано це з необхідністю двократного застосування операцій нагріву і дроблення при відновленні, в результаті за один цикл виробництва двічі вкладаються витрати на підвищення енергетичного потенціалу основного матеріалу і на руйнування внутрішніх зв'язей частинок. В процесі розпилення нагрів (розплавлення) і розділення як основні операції виконуються однократно. При цьому отримання расплава зв'язано з отриманням більш високих температур, ніж в процесі відновлення, але одночасно розділення расплава енергетично більш вигідно, ніж розділення твердого спека в процесі відновлення. Крім того, економічно невигідними при відновленні є застосування дорогішого

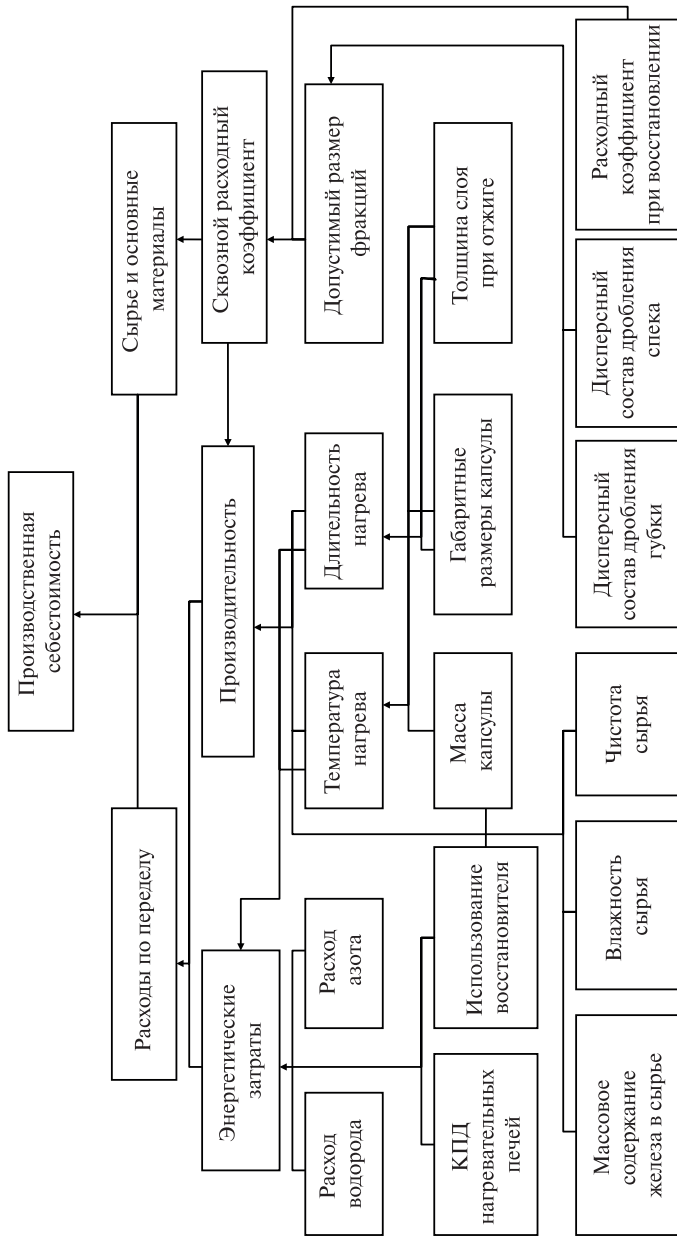


Рис. 8. Взаимосвязь технологических и экономических параметров процесса получения восстановленного порошка

энергоносителя (водорода) и большое число операций, каждая из которых требует специального оборудования и обслуживающего персонала. Все это позволяет считать способ получения железного порошка более предпочтительным.

Следует отметить, что необходимо параллельно решать задачи повышения качества распыленного порошка и снижения затрат на получение восстановленного порошка. Предстоящие принципиальные изменения в структуре сырья металлургической промышленности связаны с вовлечением в переработку вторичного сырья. Объективными предпосылками этого являются уменьшение природных запасов и значительный накопленный фонд материальных средств. Целесообразность вовлечения в переработку металлургического лома очевидна, так как технологическая цепочка выпуска металлопродукции начинается в этом случае с выплавки стали, исключая переделы добычи и обогащения руды, а также выплавки чугуна.

Возросшая масса лома делает наиболее актуальными разработку мероприятий по росту степени утилизации отходов, совершенствованию методов их переработки, повышению качества получаемого продукта. Основным технологическим способом переработки металлического лома в настоящее время 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 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 переработка отходов металла дроблением предъявляет более высокие требования к чистоте исходного продукта. Необходимы обязательная предварительная его сортировка по маркам и тщательная промывка.

Одним из перспективных в настоящее время является технологический процесс переработки стружки в конусных инерционных дробилках (КИД).

Экономическое исследование затрат на дробление проводится в зависимости от перерабатываемого материала, типа дробилки, технологических параметров режима дробления. Взаимосвязь определяющих параметров процесса дробления в КИД с себестоимостью получаемого порошка показана на рис. 9. В этой схеме выделяются три уровня влияния и пять функциональных групп первичных параметров, к которым относятся организационные, технологические, конструкционные, нормативно-справочные, материальные. Определяющими факторами промежуточного уровня являются часовая производительность  $q$ , удельный расход сырья  $k$ , цена оборудования  $\alpha$ . На базе этих факторов производственную себестоимость порошка можно вычислить по формуле

$$c = \alpha k + \left( \beta + \gamma \frac{1}{T} \right) \frac{1}{q},$$

где  $\alpha$  — цена сырья;  $\beta$  — эксплуатационные затраты по дроблению в единицу времени;  $\gamma$  — норма амортизационных отчислений;  $T$  — годовой фонд времени работы дробилки.

Факторы  $k$ ,  $\beta$  и  $q$  являются функциями конструктивных, технологических и материальных параметров, факторы  $\alpha$  — конструктивных,  $T$  — организационных и  $\gamma$  — материальных параметров. В результате себестоимость готового продукта оказывается многопараметрической функцией и ее экономическое исследование можно проводить на базе ограниченного набора вариантов сочетания значений параметров либо совокупности однопараметрических зависимостей. При комплексном экономическом исследовании эти два подхода оказываются взаимно дополняющими. Решение частных задач допускает применение одного из них.

Проиллюстрируем изменение себестоимости дробленого порошка как функции отдельных параметров. Одним из параметров, характеризующих сырьё, является твердость материала. Ее повышение сопровождается снижением производительности дробилки и, как следствие, ростом эксплуатационных расходов на единицу готового порошка. Экономический расчет выполняется на основе результатов экспериментальных работ по дроблению материалов

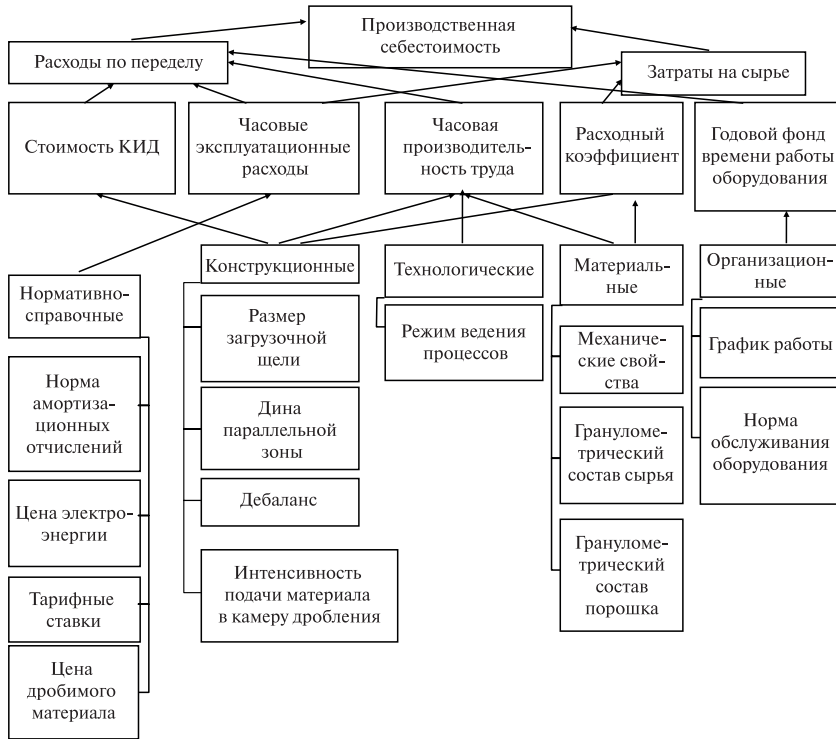


Рис. 9. Взаимосвязь параметров процесса дробления в КИД с себестоимостью получаемого порошка

твердостью 110–3200, 2070–2670 и 2700–3500 Мпа. Показатель твердости материала  $H$  при расчете себестоимости порошка учитывался через влияние на  $\alpha$ ,  $k$  и  $q$ . Итоговая расчетная формула имеет вид

$$c(H) = \alpha(H)k(H) + \left( \beta + \gamma \frac{1}{T} \right) \frac{1}{q(H)}.$$

Эта зависимость приведена на рис. 10. Она иллюстрирует тенденцию изменения итоговых экономических показателей от твердости перерабатываемого материала. Однако параметр  $H$  воздействует на величину  $C$  в системе параметров. Переход на другой типоразмер

дробилки либо изменение требуемого фракционного состава порошка одновременно с заменой перерабатываемого материала может принципиально изменить тенденцию однопараметрической связи. Например, на дробилке КИД-300 переработка чугунной и быстрорежущей стружки при производительности 100 кг/ч обеспечивает в первом случае частицы порошка до 200 мкм, а во втором — 250 мкм.

Влияние дисперсного состава получаемого продукта ранее уже рассматривалось. Производительность КИД — 300 при переработке стружки в частицы крупности до 250 мкм равна 100 кг/ч, а при дальнейшем переходе к частицам крупности до 63 мкм производительность снижается до 5–10 кг/ч. Пропорционально этому возрастают расходы на дробление. Аналогичная ситуация имеет место и для дробления гранул расплава стали этой же марки. Достижение в основной массе порошка размера 500 мкм обеспечивается за один цикл дробления, размера 200 мкм — за четыре цикла, а размера 63 мкм — за 25 циклов.

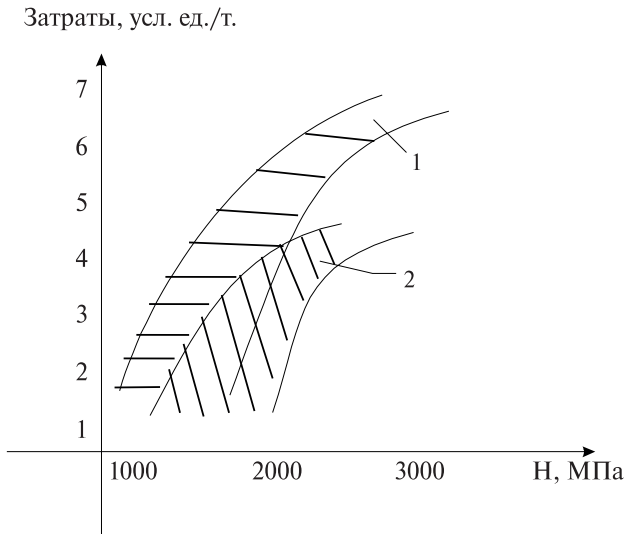


Рис. 10. Изменение затрат на дробление от твердости материала Н: 1 — себестоимость порошка, 2 — эксплуатационные расходы

В соотношении  $c(H)$  выделяют три основных составляющих. Первая определяется главным образом ценой сырья, вторая — эксплуатационными затратами, третья — стоимостью оборудования. Соотношение их в общей производственной себестоимости дробленого порошка равняется 1 : 0,12 : 0,06.

Применение различных типоразмеров дробилок рассмотрим на сопоставлении показателей дробления материала на дробилках КИД — 60 и КИД — 300. Они отличаются стоимостью, производительностью и часовыми эксплуатационными затратами. Общая тенденция развития техники показывает экономические преимущества повышения ее мощности. Дробилка КИД — 300 при больших потребных капитальных затратах характеризуется меньшей себестоимостью готового продукта. Однако, в реальных условиях выбор предпочтительной дробилки зависит от предполагаемой их загрузки. При малой загрузке более предпочтительна КИД — 60. Количественная оценка этого вытекает из третьей составляющей функции  $c(H)$ .

Достижение максимальной эффективности процесса дробления на КИД в значительной степени определяется правильной организацией производства. КИД — новый вид оборудования, на базе которого необходимо организовать технологические производственные линии, включающие ряд вспомогательных агрегатов, объединенные с КИД непрерывными материальными потоками. В зависимости от вида исходного сырья и назначения готового продукта необходимо оптимизировать состав оборудования и организовать работу технологической линии. Исследование многопараметрической зависимости

$c(H, \alpha, T, q)$  позволяет перейти к таким оптимальным задачам.

Одним из основных факторов, определяющих качество спеченных деталей, является дисперсионный состав и характер поверхности частиц используемого порошка. Уменьшение гранулометрического размера частиц порошка повышает прочность спеченных изделий и обеспечивает достижение необходимых качественных характеристик с меньшими затратами. Одновременно снижение

размера частиц порошка требует для его получения дополнительных затрат, что можно проследить на примере процесса дробления распыленного порошка.

Изменение себестоимости порошка от гранулометрического состава рассмотрим на базе процесса дробления распыленного порошка марки 10P6M5K5 в конусной инерционной дробилке. Уменьшение размера частиц порошка достигается многократным повторением операций отсева и дробления. При организации многоциклического процесса дробления порошка допускаются два варианта:

- 1) с уменьшающейся (ДУ);
- 2) постоянной (ДП) массой партии порошка.

В 1-м варианте последующая операция дробления осуществляется только на порошке, не прошедшем отсев. Во 2-м варианте порция порошка после дробления и отсева нужной фракции пополняется исходным порошком.

Количество порошка, полученного дроблением, можно считать по следующим рекуррентным соотношениям:

в процессе ДУ

$$b_{kn} = \left( 1 - \sum_{i=1}^{n-1} b_{ki} \right) a_{kn};$$

в процессе ДП

$$b_{kn} = \gamma_n + \sum_{i=1}^{n-1} b_{ki} \gamma_{n-i},$$

где  $b_{k1} = a_{k1} = \gamma_1$ ,  $n = 2, 3, 4, \dots$ ;  $a_{ki}$  — доля порошка  $k$ -й фракции в  $i$ -м цикле дробления;  $b_{kn}$  — выход порошка  $k$ -й фракции в  $n$ -м цикле дробления;

$$\gamma_n = \left( 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i \right) a_{kn} \quad (\gamma_n \text{ — вспомогательная величина}).$$

Основные параметры, определяющие процесс дробления после осуществления  $n$  циклов, вычисляются по соотношениям: длительность процесса

$$t_n = \sum_{i=1}^n m_i / q_i,$$

где  $m_i$  и  $q_i$  — масса исходного порошка и производительность процесса по исходному порошку на  $i$ -м цикле дробления соответственно; суммарный выход порошка  $k$ -й фракции после  $n$ -го шага дробления

$\overline{b_{kn}} = \sum_{i=1}^n b_{ki}$ ; средняя производительность на  $n$ -м цикле по

готовому порошку  $q_{kn} = \overline{b_{kn}} / t_n$ .

При расчете себестоимости порошка необходим набор нормативно-справочных (цена порошка, используемого при дроблении; цена отходов; тариф на электроэнергию; часовая тарифная ставка рабочих; балансовая стоимость и норма годовых амортизационных отчислений; различные коэффициенты) и технологических параметров (производительность оборудования, мощность электродвигателей). На основании рассчитываемых значений  $q_n$ ,  $t_n$ ,  $b_{kn}$  можно построить зависимость себестоимости дробленого порошка от числа циклов дробления и размера получаемых частиц.

Для процесса ДУ характер этой зависимости приведен на рис. 11. Себестоимость порошка мелких фракций существенно уменьшается с увеличением числа циклов дробления. Для порошка крупных фракций рост числа циклов в процессе ДУ практически не отражается на себестоимости порошка. Себестоимость порошка для фиксированной фракции снижается с увеличением числа циклов, но темпы падения замедляются.

Выбор технико-экономических решений для новых технологических процессов должен проводиться с учетом их перспективного развития. Для процесса дробления это предполагает в частности анализ влияния изменения цен на сырье и производительности оборудования. Отмеченные факторы изменяют значения составляющих себестоимости порошка. Например при уменьшении цены на исходный порошок более, чем на 37 % в 19-м цикле дробления (фракция меньше 100 мкм) использование процесса ДУ по сравнению с процессом ДП становится неэффективным. Аналогичные

результаты имеют место и для других фракций порошка и циклов дробления (табл. 2). Использование более производительного оборудования ведет к повышению эффективности процесса ДУ.

Производительность процессов по готовому порошку на каждом из циклов (кроме 1-го) примерно одинакова и в два раза ниже производительности дробилок на исходном порошке. Однако при использовании процесса ДП повышается количество порошка, получаемого в каждом цикле. Это позволяет иметь повышенную среднюю производительность процесса ДП по сравнению с процессом ДУ от 1,1 (фракция до 63 мкм) до 2,8 раз (фракция до 315 мкм) (табл. 3).

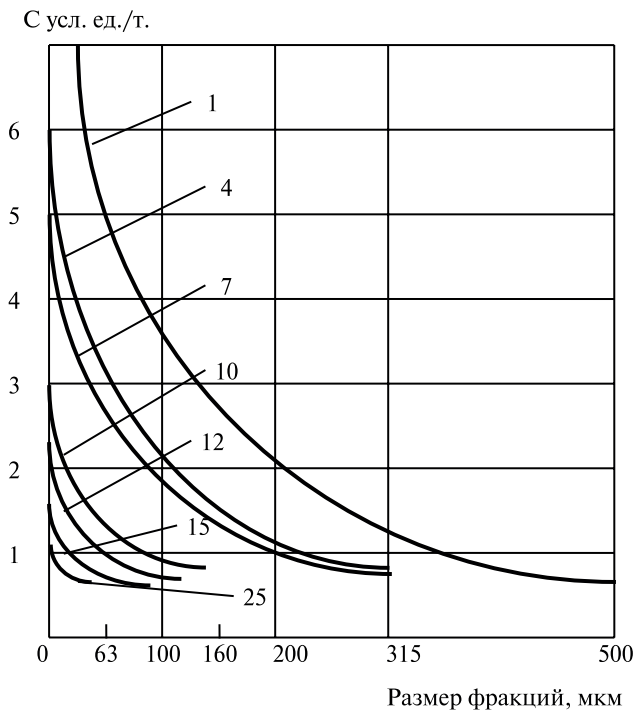


Рис. 11. Зависимость себестоимости дробленого порошка  $C$  от числа циклов дробления (1, 4, 7, 10, 12, 15, 25) и размера получаемых частиц

Таблица 2

**Предельные значения коэффициентов изменения цены порошка и производительности оборудования, при которых использование процесса ДУ становится неэффективным по сравнению с процессом ДП**

Номер цикла дробления	Максимальный размер фракции порошка, мкм числитель-изменение цены порошка, знаменатель-производительности оборудования			
	160	100	63	Менее 63
7	<u>0,22</u>	<u>0,20</u>	<u>0,31</u>	=
	0,28	0,24	0,39	0,73
10	<u>0,38</u>	<u>0,23</u>	<u>0,21</u>	=
	0,48	0,29	0,26	0,27
12	<u>0,36</u>	<u>0,20</u>	<u>0,10</u>	=
	0,49	0,25	0,13	0,11
15	–	<u>0,47</u>	<u>0,17</u>	=
		0,55	0,21	0,18
17	–	<u>0,48</u>	<u>0,18</u>	=
		0,59	0,22	0,20
19	–	<u>0,63</u>	<u>0,21</u>	=
		0,78	0,26	0,23
21	–	–	<u>0,24</u>	=
			0,30	0,28
23	–	–	<u>0,28</u>	=
			0,36	0,31
25	–	–	<u>0,34</u>	=
	–	–	0,41	0,33

Себестоимость порошка, получаемого в процессе ДП, выше для всех фракций по сравнению с процессом ДУ. Причиной этого являются более высокие затраты на сырье и основные материалы в процессе ДП. Минимальные значения себестоимости дробленого порошка при использовании процессов ДУ и ДП приведены в табл. 4. На основании полученных результатов можно сделать вывод об эффективности изменения процесса ДУ по сравнению с процессом ДП.

Средняя производительность процесса по циклам дробления (по готовому порошку), кг/ч

Номер цикла	Максимальный размер фракции, мкм									
	500	315	200	160	100	63	Менее 63			
1	139,6	112,99	64,94	34,22	26,26	7,96	6,30			
4	—	<u>23,12</u>	<u>22,15</u>	<u>13,11</u>	<u>9,44</u>	<u>4,56</u>	<u>1,90</u>			
7	—	66,10	36,50	16,88	11,52	5,09	2,00			
		—	<u>12,84</u>	<u>11,57</u>	<u>9,07</u>	<u>4,00</u>	<u>1,23</u>			
			—	17,64	12,18	4,69	1,33			
10	—	—	—	<u>8,82</u>	<u>7,88</u>	<u>4,07</u>	<u>1,51</u>			
				17,98	12,66	5,00	1,62			
12	—	—	—	<u>7,52</u>	<u>7,35</u>	<u>4,96</u>	<u>1,85</u>			
				18,42	13,45	6,13	2,00			
15	—	—	—	=	<u>6,16</u>	<u>4,51</u>	<u>1,66</u>			
				19,12	13,99	6,26	1,87			
17	—	—	—	=	<u>5,55</u>	<u>4,43</u>	<u>1,64</u>			
				19,57	14,39	6,54	1,88			
19	—	—	—	=	<u>5,06</u>	<u>4,40</u>	<u>1,65</u>			
				19,99	14,75	6,89	1,93			



Приведенная методика расчета рекомендуется для технико-экономического анализа процессов дробления различных марок порошка, а также стружки. Проиллюстрированные экономические результаты позволят выявить направления совершенствования процессов дробления, оценить влияние перспективных изменений цен на получаемый порошок, количественно увязать необходимый уровень улучшения эксплуатационных характеристик готовых изделий с затратами на получение порошка, обосновать состав оборудования в механизированных линиях дробления.

## **5. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

Анализ экономической эффективности вариантов технологического процесса получения инструментальной заготовки связан со следующими особенностями:

варианты технологического процесса включают несколько последовательных стадий и отличаются составом и параметрами основных технологических операций;

при сравнении вариантов необходимо учитывать изменение эксплуатационных показателей получаемого в дальнейшем инструмента;

сопоставляя варианты необходимо рассматривать области их применения при варьировании параметров оборудования, технологического процесса и сортамента инструментальной заготовки.

Отмеченные особенности показывают, что процесс анализа экономической эффективности вариантов технологического процесса получения инструментальной заготовки базируется на многовариантном расчете показателей многостадийного процесса. Его реализация возможна только на основе современных принципов человеко-машинных процедур экономического расчета, которые предусматривают оперативное информационное взаимодействие человека и ЭВМ, выбор последующего направления расчета на базе промежуточных решений, использование минимального объема

нормативно-справочной информации, конструирование технологического варианта в ходе экономического расчета и получение зависимостей, связывающих итоговые экономические показатели с нормативно-справочными факторами. Основные этапы подобного подхода проиллюстрируем на примере технологических вариантов, представленных на рис. 12. Эта схема объединяет весь набор вариантов, и выбор одного из них может быть осуществлен заданием условных обозначений (номеров) последовательности требуемых производственных участков. Набор участков, показанный на рис. 12, может быть дополнен, но это будет оправдано, если новый участок характеризуется иным составом текущих и единовременных затрат.

Процедура вычислений составляющих затрат состоит из повторяющегося по производственным участкам цикла работ. Этот цикл включает три этапа: корректировка нормативно-справочной информации, корректировка расчетных формул, расчет составляющих затрат.

Каждому из возможных участков технологической схемы производства инструментальной заготовки ставится в соответствие базовый вариант, для которого определяется состав необходимых нормативно-справочных величин и формулы вычисления составляющих текущих и капитальных затрат. Если рассматриваемый участок технологической схемы отличается от базового варианта, то необходима корректировка справочной базы.

Как пример нормативно-справочной информации по базовому примеру участка можно выделить характеристики используемых на участке вспомогательных материалов и энергетических ресурсов; параметры основного оборудования; характеристика исходного и готового продуктов; общие показатели участка.

Корректировка расчетных формул, выполняемая на втором этапе вычислений, осуществляется также на основе базовой информации. В составе этой информации — наименование статей и соответствующие им расчетные формулы.

На третьем этапе вычислений выполняется расчет составляющих затрат. При этом допускается два варианта, отличающихся количеством расчетов. По 1-му варианту вычисляют затраты на основе

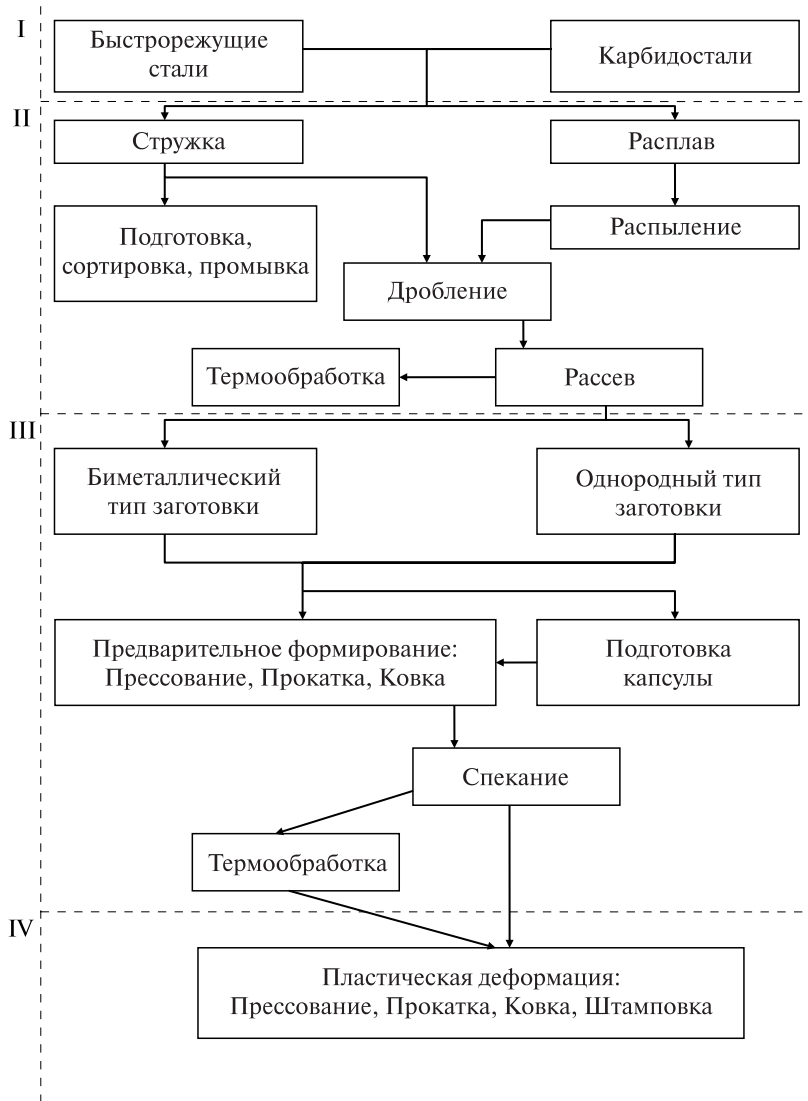


Рис. 12. Варианты технологических схем получения заготовок из порошков (I, II, III, IV этапы)

скорректированных числовых параметров и расчетных формул, по 2-му варианту вычисляют затраты для нескольких значений одного или нескольких нормативно-справочных параметров. В результате получают набор технологических вариантов и соответствующие им составляющие затрат.

Совокупность параметров, влияние которых может быть рассмотрено по предложенной методике, включает следующие группы параметров:

конструкторско-технологические (мощность оборудования, длительность ведения технологических процессов, число циклов дробления, нормы расхода материалов и энергоресурсов);  
организационные (размер партии, длительность простоев);  
эксплуатационные (стойкость, срок службы);  
экономические (цены на материалы, порошок, энергоресурсы).

При выборе прессового оборудования определяющим параметром является усилие прессования, смесителя — масса порции порошка и условия смешивания, печного оборудования — температура нагрева, время выдержки и защитная среда, дополнительного оборудования (окисидирование, калибровка, термообработка и т. п.) — требования к качеству изделия.

Разнообразие технологий производства порошков позволяет получать порошки различного состава и формы. Так, изменяя соотношение в смеси восстановленного и карбонильного порошков, можно получить материалы с разной прессуемостью, формуемостью и текучестью. Смешивание распыленного и восстановленного порошков позволяет управлять составом изделий как по примесям, так и по легирующим элементам.

Одним из основных факторов, определяющих качество спеченных заготовок и соответственно способа пластической обработки является дисперсный состав используемого порошка. Уменьшение гранулометрического размера частиц порошка позволяет использовать менее мощное оборудование для прессования, исключить ряд операций (например, дополнительного нагрева заготовки) и тем самым снизить затраты на ее производство. С другой стороны, для получения порошка с мелкими частицами необходимы дополнительные затраты.

При выборе способа пластической обработки могут быть рассмотрены варианты, в частности, прокатка, горячее и холодное прессование. Технология холодного прессования позволяет сократить затраты на изготовление инструментальной заготовки по сравнению с затратами при горячем прессовании. Но при этом эксплуатационные характеристики инструмента, получаемого холодным прессованием, ниже, чем при горячем прессовании. Повышение стойкости инструмента, получаемого горячим прессованием, приведет к тому, что использование холодного прессования для изготовления инструмента окажется неэффективным.

По структуре заготовка может быть биметаллической и однородной. Заготовки, имеющие различную структуру, соответственно различаются и по затратам. Например, себестоимость заготовок из стали Р6М5Ф3, порошковой стали Р6М5Ф3-МП и биметаллической заготовки с сердечником из стали марки 5ХНМ и порошков Р6М5Ф3-МП находится в соотношении 1 : 1, 36 : 1,33. Таким образом, за счет уменьшения затрат на материалы при изготовлении биметаллической заготовки сокращается себестоимость инструмента.

Экономическая эффективность вариантов технологического процесса может быть рассмотрена в двух аспектах. С одной стороны, можно сопоставить варианты с одинаковым составом производственных участков при отличающихся нормативно-справочных параметрах. Для этого достаточно вычислить составляющие затрат для нескольких вариантов при сохраняющихся прочих параметрах. С другой стороны, можно составить варианты технологического процесса с отличающимися эксплуатационными показателями заготовки. В этом случае сравнения затрат по вариантам получения заготовки недостаточно, требуется учесть изменение стойкости и расхода изделий в металлообработке. Однако на стадии изучения технологических схем получения заготовки выигрыш от увеличения стойкости изделий можно определять как пропорциональное снижение массы потребной заготовки:

$$\Theta = k \sum_t (C_1(t) + K_1(t)) \alpha_t - \sum_t (C_2(t) + K_2(t)) \alpha_t,$$

где  $k$  — повышение стойкости изделий, полученных из заготовки по 2-му варианту, по сравнению с 1-м вариантом;  $K_1(t)$ ,  $K_2(t)$  — капи-

тальные затраты по сравниваемым вариантам;  $C_1(t)$ ,  $C_2(t)$  — себестоимость заготовки по сравниваемым вариантам,  $\alpha_t$  — коэффициент дисконтирования в году  $t$ .

Величину  $\mathcal{E}$  можно рассматривать как пессимистическую оценку экономического выигрыша. Оптимистическая оценка равняется  $\beta\mathcal{E}$ , где  $\beta$  — коэффициент, учитывающий отношение общего экономического выигрыша в металлообработке от повышения стойкости изделий к выигрышу от снижения стоимости расходного материала,  $\beta = 1,5 - 3,0$ ; значение  $\beta$  зависит от типа изделий, числа их переточек и сферы применения.

Один из вариантов технологического процесса получения спеченных заготовок предусматривает обработку порции порошка в металлической капсуле. Порошок засыпается в капсулу, которая проходит вакуумирование, герметизацию и предварительное прессование. Спрессованная капсула нагревается и проходит повторное прессование. Получаемая компактная заготовка заменяет литую заготовку из стали аналогичных марок.

Затраты, связанные с получением порошка, вакуумированием и деформацией капсулы, выше затрат по разливке стали, поэтому компактная заготовка имеет себестоимость более высокую, чем литая заготовка. Основными причинами повышенной себестоимости является цена порошка, эксплуатационные расходы на вакуумирование (4–5 час.) и нагрев капсулы (20–22 час.). Если прессование капсулы осуществляется в особой среде (гидростатической или газостатической), то с этими причинами оказывается сопоставимой по затратам и операция прессования.

Изготовление заготовок из порошка усложняет технологический процесс по сравнению с традиционной схемой металлургии и металлообработки. На этапах процесса появляются операции распыления расплава металла и спекания порошка в компактную заготовку. На последующих этапах процесс получения готовых изделий идентичен. Такой технологический процесс исключает одно из экономических преимуществ порошковой металлургии — сокращение производственного цикла и, следовательно, практическое применение процессов получения из порошка заготовок оправдано только при улучшении свойств заготовок и получаемых из них гото-

вых изделий. Экономическая целесообразность будет определяться соотношением прироста затрат на получение заготовки и снижения затрат в сфере применения готовых изделий.

Взаимосвязь минимально допустимого повышения стойкости инструмента и прироста затрат на получение заготовки показана на рис. 13. Часть номограммы над осью абсцисс соответствует области эффективного применения инструментальной заготовки. Задаваясь двумя параметрами: повышение стойкости инструмента и повышением затрат на получение инструментальной заготовки, по номограмме можно обрелить предполагаемый экономический выигрыш.

Основными организационно-технологическими факторами снижения себестоимости компактной заготовки являются выход годного и степень загрузки основного оборудования.

Отходы технологического процесса вызываются снижением качества капсул и однородности порошка, а также необходимостью обрезки торцевых частей заготовки, имеющих иные условия деформации.

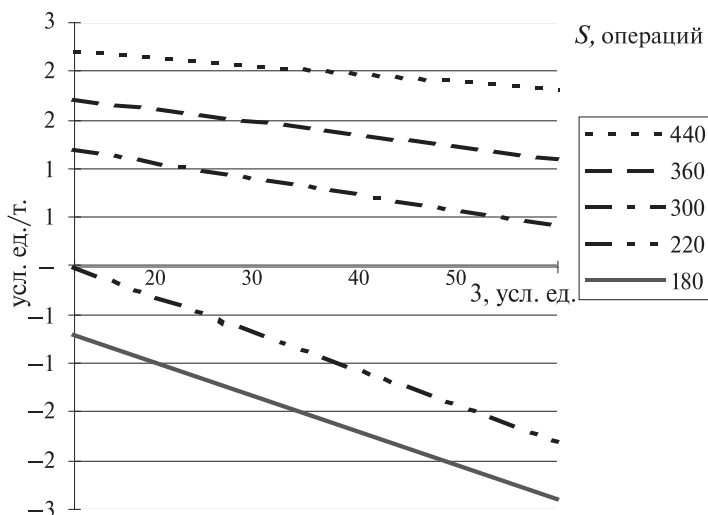


Рис. 13. Зависимость экономического выигрыша  $\mathcal{E}$  от изменения стойкости инструмента  $S$  и затрат  $Z$  на его заготовку

Повысить экономический выигрыш от применения спеченной инструментальной заготовки можно за счет разработки мероприятий, способствующих увеличению стойкости инструмента либо снижению затрат на получение заготовки (например, изготовление биметаллических заготовок и термическая обработка порошка перед прессованием). Изготовление биметаллических заготовок позволяет уменьшить затраты на исходные материалы за счет применения сердечника из литой стали. Рабочая часть инструмента, приходящаяся на внешнюю поверхность заготовки, при этом сохраняет показатели порошкового инструмента. Термическая обработка порошка перед прессованием улучшает структуру металла в частицах порошка и обеспечивает повышение в конечном счете стойкости инструмента.

Однако применение дополнительной операции термообработки порошка в капсулах требует дополнительных затрат и увеличивает стоимость получаемой заготовки. Затраты на процесс отжига порошка изменяются в зависимости от используемых печей. Например, соотношение этих затрат находится в соотношении 1,7 — для камерной печи, 1 — для шахтной, 1,2 — для печи с защитной атмосферой. Так как дополнительный отжиг обеспечивает улучшение свойств получаемого инструмента, то необходимо определить степень влияния стойкости инструмента на экономический выигрыш, полученный от использования этой дополнительной операции. Представленная на рис. 14 зависимость экономического выигрыша от повышения стойкости и цены используемого порошка  $\Pi_n$  позволяет сделать вывод, что дополнительный отжиг вполне оправдан и использование его экономически целесообразно во всех случаях, когда обеспечивается повышение стойкости хотя бы в 1,1 раза. Степень влияния стойкости инструмента на выигрыш значительно больше, чем степень влияния цены порошка.

Применение различных печей вызвано различными их возможностями. Если же обеспечиваются одинаковые свойства инструмента, то производительность печи будет определяющей в выборе оборудования для отжига (рис. 15). В этом случае необходимо учитывать также степень загрузки оборудования.

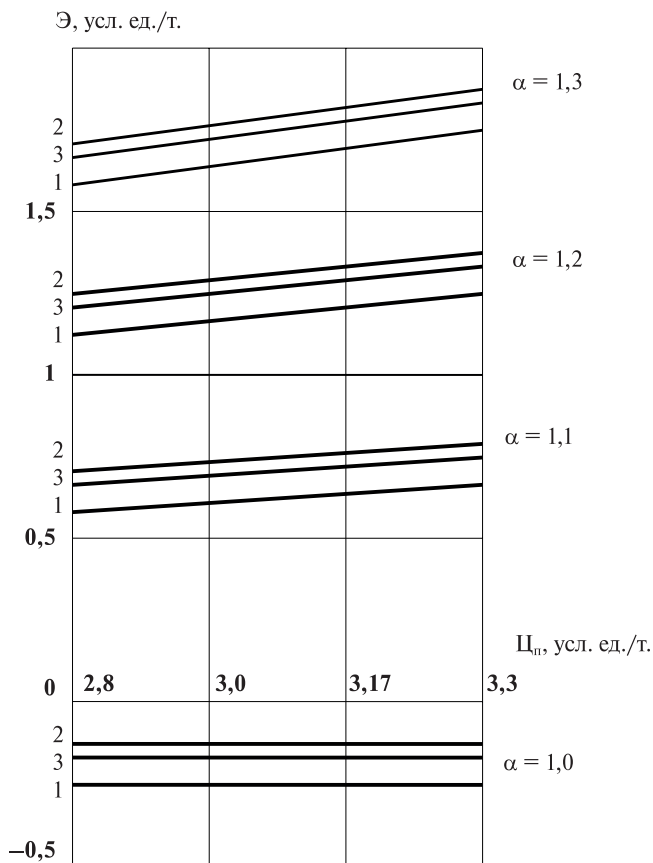


Рис. 14. Зависимость экономического выигрыша Э от коэффициента стойкости инструмента  $\alpha$

Себестоимость биметаллической заготовки зависит от геометрических размеров и марки стали ее составляющих. В зависимости от выбранной марки порошка будут изменяться и эксплуатационные параметры получаемых заготовок. Поэтому при выборе той или иной марки материала необходимо определить, что экономичнее — дешевый материал с низкими эксплуатационными характеристиками или материал с высокими эксплуатационными свойствами,

но дороже в 1,5–2 раза. Числовой пример связи цен на сердечник и порошок показан на рис. 16.

Применение порошка более низкого качества за счет уменьшения его цены приведет к снижению себестоимости заготовки, но одновременно на стадии прессования ухудшается прессуемость порошка, что требует применения высоких давлений прессования, введения, а затем на стадии спекания удаления пластификаторов. В связи с

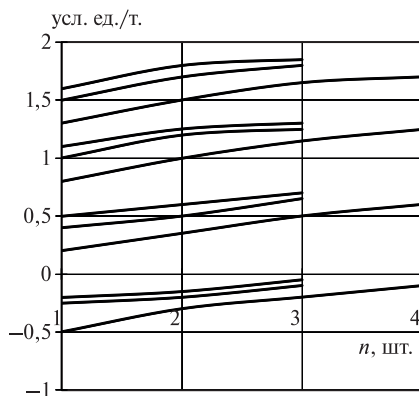


Рис. 15. Зависимость экономического выигрыша  $\mathcal{E}$  от числа печей  $n$  (1–3 — номер печи)

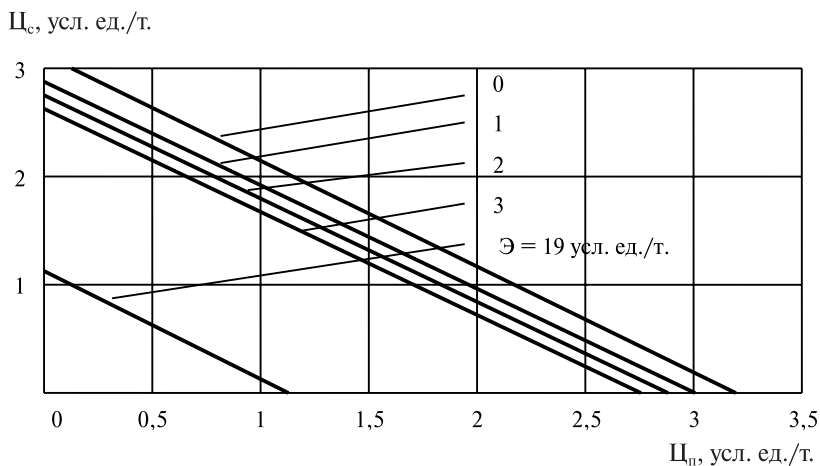


Рис. 16. Номограмма областей применения инструмента из биметалла при изменении цен на порошок  $\Pi_{\text{п}}$  и сердечника  $\Pi_{\text{с}}$

высоким содержанием кислорода в порошок вводят компоненты (например, углерод), необходимые для разрушения оксидов в ходе восстановительных реакций. Для создания оптимальных условий протекания таких реакций и удаления продуктов восстановления прибегают к спеканию в вакууме, которое является дорогостоящей и нетехнологичной операцией по сравнению со спеканием в активных или инертных газовых средах. Дешевый порошок, получаемый из стружки, используется при производстве заготовок из стружковых отходов. При этом предусматриваются следующие технологические операции: очистка стружки, дробление, холодное прессование, спекание, горячее динамическое прессование. Использование распыленного порошка позволяет исключить операции горячего динамического прессования и дополнительную термическую обработку. Увеличение числа технологических операций при производстве заготовок с использованием стружки по сравнению с распыленным порошком ведет к тому, что увеличиваются затраты на заработную плату, электроэнергию, амортизацию и текущий ремонт оборудования.

Значимость различных факторов с точки зрения равного воздействия на показатели применения компактной заготовки можно количественно оценить, рассмотрев различные уровни изменения экономического выигрыша (табл. 5)

Таблица 5

**Степень влияния различных параметров  
на экономический выигрыш**

Параметр	Изменение выигрыша, %						
	-30	-20	-10	0	10	20	30
Цена порошка, %	132,2	121,2	110,2	100	88,2	77,2	66,2
Затраты на материалы, %	145,8	130,6	115,3	100	84,7	69,4	54,2
Расходы по переделу, %	144,9	129,9	114,9	100	85,0	70,1	55,1

Применение процесса прокатки для получения компактной заготовки из металлических порошков отражает стремление применить уже отработанный технологический процесс к новому виду материалов. Совокупность процессов прокатки порошковой металлургии можно разделить на несколько групп: прокатка порошка, прокатка капсул с порошком, уплотняющая горячая прокатка спеченных заготовок. Наибольшей специфичностью в сравнении с традиционным прокатным производством отличается прокатка порошка. Этот процесс требует применения специализированных станов, оснащенных устройствами подачи порошка в межвалковый зазор. Порошок может прокатываться в горячем или холодном состоянии. Процесс прокатки применяют главным образом для получения лент с особыми свойствами из композиционных материалов, которые не могут быть получены традиционным металлургическим способом. В меньших масштабах прокатку порошков применяют для получения лент обычных марок стали.

Одной из особенностей станов порошковой металлургии является применение валков разного диаметра, что вызвано необходимостью достижения требуемой плотности ленты. В связи с этим тип стана характеризуется двумя числами, соответствующими минимальному и максимальному диаметрам рабочих валков.

В настоящее время процесс прокатки металлических порошков применяют для получения компактных, пористых и армированных лент. Наиболее перспективным является применение непрерывного автоматизированного технологического процесса. На 1-й стадии прокаткой порошка в горизонтальных валках формируется сырая лента, которая на 2-й стадии спекается в проходной печи до необходимого предела прочности. На 3-й стадии во второй прокатной клети происходит уплотнение ленты, которая затем сматывается в рулон.

Основными технологическими параметрами процесса получения металлической ленты являются толщина ленты, обжатия, скорость прокатки, температурный режим спекания и гранулометрический состав порошка. Эти параметры определяют свойства готовой ленты и затраты на ее получение. Обжатия порошка и

спеченной ленты характеризуют энергосиловые требования к конструкции прокатных клетей. От скорости движения ленты и температурного режима ее спекания зависят общие габаритные размеры установки.

Одним из параметров, влияющих на качество заготовки, является геометрическая форма частиц порошка. Она влияет на условия захвата частиц валками, пластической деформации в очаге деформации, контакта между частицами.

На себестоимость ленты значительное влияние оказывает производительность стана, связанная со скоростью прокатки и толщиной ленты. Технологические требования к уплотнению порошка ограничивают диапазон скоростей до 3–20 м/мин. при фракционном составе порошка 70–150 мкм, 2–3 м/мин. — при фракционном составе порошка 1–30 мкм. Большая толщина ленты обеспечивается увеличением зазора между валками, но одновременно снижается плотность сырой ленты.

В себестоимости ленты влияние технологических параметров проявляется преимущественно через изменение расхода энергоресурсов (электроэнергии, топлива), амортизационных отчислений и условно-постоянных составляющих затрат. На рис. 17 приведено изменение доли затрат на сырье в зависимости от толщины ленты и коэффициента трудности по стану для пористого проката из порошка нержавеющей стали.

Холодная раскатка заготовок относится к малоотходным и энергосберегающим технологическим процессам. Она применяется для изготовления деталей типа валов, колец, дисков, шестерен, стаканов с фланцами. Реализуется холодная раскатка на базе специальных деталепрокатных станов. Исходной заготовкой служат отрезки труб и прутков. В порошковой металлургии холодную раскатку применяют как продолжение базовых технологических процессов. Ее использование позволяет расширить номенклатуру выпускаемых деталей.

Экономическая эффективность получения металлического проката из порошка оценивается сопоставлением этого процесса с процессом-аналогом. Если эксплуатационные свойства компактного проката аналогичны свойствам проката, полученного из

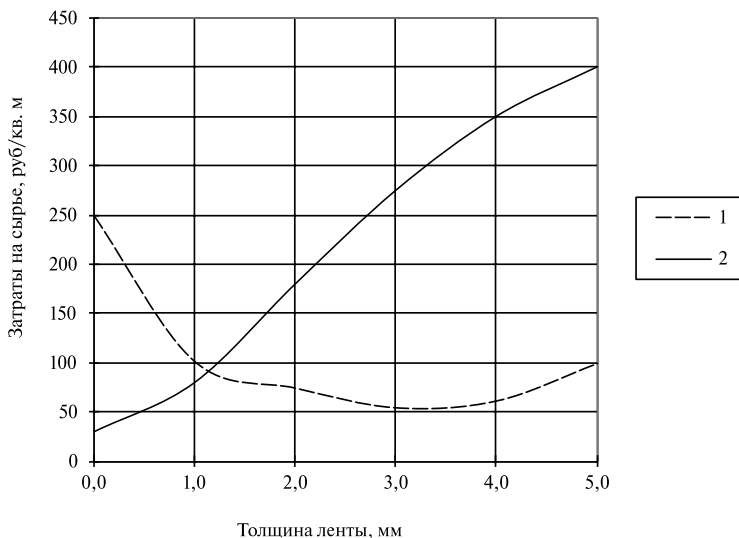


Рис. 17. Изменение доли затрат на сырье в зависимости от толщины ленты (1) и коэффициента трудности по стану (2) для пористого проката из порошка нержавеющей стали

литой заготовки, то процессом-аналогом является традиционная металлургическая схема. Если эксплуатационные свойства компактного проката улучшаются, то процессом-аналогом может быть технология, базирующаяся на применении прессового оборудования. Для достижения лучших свойств проката при экономическом расчете надо учесть изменение затрат в сфере применения проката у потребителя, вызываемое уменьшением геометрических размеров либо увеличением срока службы готовых изделий. Расчетное соотношение для экономического выигрыша имеет вид

$$\Theta = \sum_t (C_1(t) + K_1(t)) \alpha_t - k \sum_t (C_2(t) + K_2(t)) \alpha_t,$$

где  $C_1(t)$ ,  $C_2(t)$  и  $K_1(t)$ ,  $K_2(t)$  — себестоимость и капитальные затраты на получение проката из литой заготовки и порошков соответственно,  $k$  — изменение массы потребляемого проката при замене литого проката на компактный.

## 6. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

История аддитивного производства насчитывает 150 лет, уходя корнями в такие области, как *фотоскульптура* и *топография*<sup>18</sup>.

В середине 80-х годов 20 столетия были разработаны методы аддитивного производства с использованием нагрева лазерным и электронным лучом. Эти методы были внедрены в производство в 1990-х гг., позволив использовать аддитивные технологии для изготовления металлических объектов<sup>19</sup>.

Карл Декарт получил патент в 1989 г., он изобрел технологию избирательного (селективного) лазерного спекания (SLS). В этом же году на имя Скотта Крампа, соучредителя компании Stratasys, была зарегистрирована заявка на выдачу патента на технологию послойного наплавления (FDM). Крамп получил патент в 1992 г., сегодня эта технология широко применяется в простых бытовых моделях 3D-принтеров.

Ханс Лангер основал в 1989 г. в Германии компанию EOS GmbH, выпустившую первый 3D-принтер «Stereos» в 1990 г. Компания занялась развитием технологии лазерного спекания, включая прямое лазерное спекание металлов (DMLS)<sup>20</sup>.

Проблема технико-экономического проектирования участка (цеха) по выпуску изделий из металлических порошков может быть сформулирована в двух подходах. Первый предполагает определение состава оборудования при заданной номенклатуре выпускае-

---

<sup>18</sup> *Bourell D. L.* Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead / D. L. Bourell, J. J. Beaman, M. C. Leu, D. Rosen // U. S. Turkey Workshop on Rapid Technologies. — 2009.

<sup>19</sup> *Bourell D. L.* Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead / D. L. Bourell, J. J. Beaman, M. C. Leu, D. Rosen // U. S. Turkey Workshop on Rapid Technologies. — 2009.

<sup>20</sup> *Bregman A., Kunkel K.* Аддитивное производство — прорыв в арматуростроении? // Арматуростроение. — 2015. — № 3 (96). — С. 68–73.

мых деталей. Второй подход допускает распределение потребной номенклатуры деталей между проектируемым цехом и другими предприятиями порошковой металлургии. Первый подход применяется при проектировании развития специализированных предприятий порошковой металлургии, второй — при создании участка (цеха) в рамках машиностроительного предприятия.

Математическая постановка задачи определения типа и числа единиц оборудования для стадий технологического процесса получения деталей из порошков формулируется как определение  $x_{ij}$  — числа агрегатов  $i$ -го типа для  $j$ -й стадии. В качестве основных стадий выделим: смешивание, прессование, спекание, калибрование, термическую обработку, металлообработку. Система ограничивающих условий на переменные  $x_{ij}$  включает следующие соотношения:

$$\sum_i x_{ij} T_{ij} \geq \sum_k \tau_{kij} n_k, \quad j = \overline{1, J};$$

$$S_{ij} \geq f_{ik} \text{ при } x_{ij} \neq 0, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$$

$$\sum_j \sum_i x_{ij} \phi_{imj} \leq F_m, \quad m = \overline{1, M};$$

$$x_{ij} = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}.$$

Здесь  $T_{ij}$  — фактический фонд времени работы оборудования  $i$ -го типа на  $j$ -й стадии технологического процесса;  $\tau_{kij}$  — нормативное время работы оборудования  $i$ -го типа  $j$ -й стадии при обработке детали  $k$ -го типоразмера;  $f_{jk}$  — необходимые параметры режима обработки деталей  $k$ -го типоразмера на  $j$ -й стадии (температура спекания, усилие прессования, температура отжига);  $S_{ij}$  — допустимые параметры режимов работы  $i$ -го типа оборудования на  $j$ -й стадии процесса;  $\phi_{imj}$  — потребное количество ресурсов  $m$ -го типа (площадь, численность рабочих, цена, электрическая мощность и др.) для единицы  $i$ -го оборудования на  $j$ -й стадии процесса;  $F_m$  — выделенные ресурсы  $m$ -го типа.

Предпочтительный состав оборудования должен соответствовать минимуму затрат

$$J = \sum_i \sum_j \sum_t x_{ij} \phi_{ijt} \alpha_t + \sum_i \sum_j \sum_t \sum_k C_{kit} (t_{ij}) n_k \alpha_t,$$

где  $\phi_{ijk}$  — капитальные затраты на единицу оборудования  $i$ -го типа  $j$ -й стадии в году  $t$ ;  $C_{kijt}$  — себестоимость обработки детали  $k$ -го типоразмера на  $i$ -м оборудовании  $j$ -й стадии процесса в году  $t$ . Связь  $C_{kijt}$  с определяемыми значениями  $x_{ij}$  осуществляется через параметр  $t_{ij}$  — время занятости оборудования  $i$ -го типа на  $j$ -й стадии процесса  $t_{ij}$ , равное  $\sum_k \tau_{kij} n_k$ , с одной стороны, определяет эксплуата-

ционные затраты на обслуживание оборудования, с другой — простой оборудования из-за неполного использования фактического фонда времени его работы.

Опыт становления порошковой металлургии показал, что выпуск изделий из порошков на небольших участках, оснащенных малопроизводительным оборудованием, не дает возможности проиллюстрировать экономические преимущества новой технологии в полной мере. Кроме того организация подобного участка связана с отвлечением инженерного потенциала от задач основного производства и поиском дополнительных производственных площадей. Многим машиностроительным предприятиям приходится самим конструировать и изготавливать (приспосабливать) оборудование для участка порошковой металлургии. По-видимому экономически более правильным является концентрация ресурсов и создание межотраслевых специализированных предприятий порошковой металлургии.

Рассмотренные задачи создания участка порошковой металлургии одновременно с распределением номенклатуры необходимых деталей между централизованной поставкой и изготовлением на проектируемом участке предполагает определение двух групп неизвестных:  $x_{ij}$  — число агрегатов  $i$ -го типа для  $j$ -й стадии процесса;  $y_k$  — число деталей  $k$ -го типоразмера, планируемое для получения от специализированных предприятий.

Математическая постановка задачи включает следующие соотношения:

$$\sum_t x_{ij} T_{ij} \geq \sum_k \tau_{kij} (n_k - y_k), \quad j = \overline{1, J};$$

$$S_{ij} \geq f_{jk} \text{ при } x_{ij} \neq 0, \quad y_k < n_k, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J};$$

$$\sum_j \sum_i x_{ij} \phi_{imj} \leq F_m, \quad m = \overline{1, M};$$

$$x_{ij} = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J};$$

$$0 \leq y_k \leq n_k, \quad k = \overline{1, K}.$$

Оптимизационная оценка вариантов решения задачи имеет вид

$$J = \sum_t \sum_j \sum_i x_{ij} \phi_{ijt} \alpha_t + \sum_t \sum_j \sum_i \sum_k C_{kt} (t_{ij}) n_k \alpha_t + \sum_t \sum_k (R_t + y_k C_{kt}) \alpha_t,$$

где  $C_{kt}$  — себестоимость детали  $k$ -го типоразмера в году  $t$  на специализированном предприятии порошковой металлургии,  $R_t$  — капитальные затраты в году  $t$ . Эта оценка фактически сопоставляет затраты на изготовление деталей на разных предприятиях: специализированном и неспециализированном. Для того чтобы учесть ограничения по объему централизованных поставок, необходимо в постановку задачи добавить ограничения:

$$\sum_k y_k a_k \leq P; \quad y_k \leq y_k^{(0)}, \quad k = \overline{1, K},$$

где  $a_k$  — масса детали  $k$ -го типоразмера;  $P$  — ресурс централизованной поставки деталей из порошков;  $y_k^{(0)}$  — предельно допустимое число деталей  $k$ -го типоразмера, получаемых от специализированных предприятий.

Обобщенный анализ группы конструкционных деталей рассмотрен на примере совокупности деталей, включающей 79 типоразмеров, в том числе втулки, кольца, ролики, шестерни, шайбы и другие детали. В базовом варианте детали изготавливались из стали

марок 25, 45, 40Х, 35Л, 40Л и другие. При изготовлении спеченных деталей основным исходным материалом могут быть порошки марок ЖГр0,5 ЖГр1Д3, применение которых обеспечивает необходимые физико-механические свойства готовых деталей. Масса отобранных деталей не превышает 1 кг, а наибольшее число деталей (около 70 %) имеет массу до 0,25 кг. Годовая потребность в деталях составляет 1,5 млн.шт.

Для каждой из деталей был выполнен расчет составляющих себестоимости и экономического выигрыша при изготовлении их из порошка. По результатам этого расчета выявились закономерности изменения экономических показателей от параметров деталей.

Применение методов порошковой металлургии повышает коэффициент использования металла до 0,9–0,95 против 0,5–0,6 при металлообработке. В результате анализа экономии металла (массы порошка по сравнению с массой заготовки) для различных конструкционных деталей установлено, что она наименьшая для деталей III группы сложности (рис. 18). Значительная экономия металла для простых деталей объясняется малым коэффициентом выхода годного для них в металлообработке. В I группе сложности

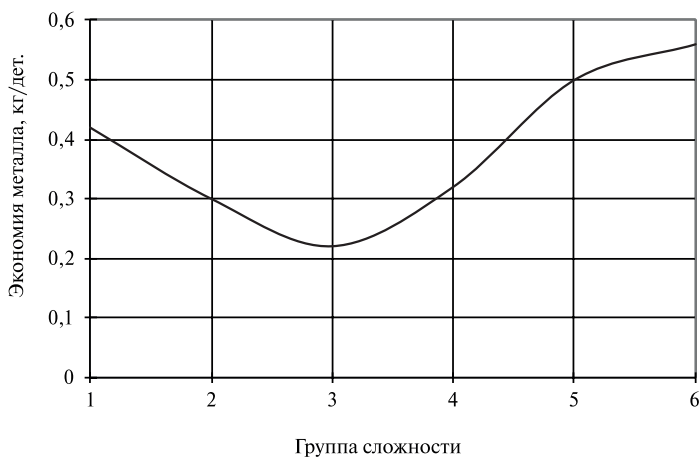


Рис. 18. Зависимость экономии металла от группы сложности

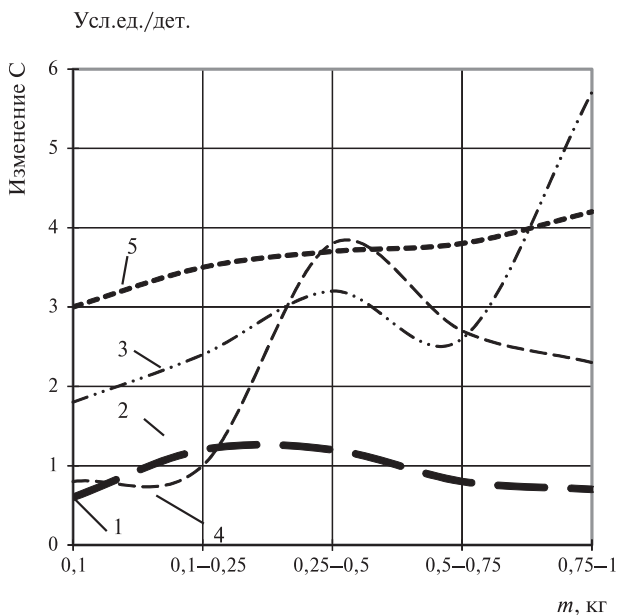


Рис. 19. Зависимость экономики себестоимости изменения  $C$  от массы детали  $m$  и группы сложности (1–5)

встречаются детали, у которых масса заготовки в 3–4 раза больше массы готовой детали. Детали высоких групп сложности требуют многооперационной металлообработки, что также связано с повышенными отходами металла.

В настоящее время создаются технологические возможности по изготовлению спеченных изделий больших размеров. Однако увеличение массы деталей существенно снижает эффективность порошковой металлургии. Только для деталей сложной конфигурации удастся достигнуть компенсации роста цены материала снижением его расхода (рис. 19). Исследования показывают, что весомая группа деталей с массой 0,25–0,5 кг является как бы критической точкой, за которой увеличение массы деталей ведет к уменьшению экономического выигрыша для простых деталей либо снижению его темпов роста для сложных деталей.

Повышенной эффективностью отличается применение методов порошковой металлургии одновременно с заменой марки металла. Например, изготовление втулки велодвигателя из материала ЖГр3 взамен ранее применяемого материала БроР-10-1 позволило экономить 19 т/год цветного металла<sup>21</sup>.

Изменение себестоимости деталей при повышении группы сложности происходит по иной закономерности, чем изменение экономии металла (рис. 20). Здесь проявляется комплексное влияние цен на сырье, тарифных ставок, амортизационных отчислений, трудоемкости производственных операций и других параметров. Детали сложной формы требуют в металлообработке повышенных эксплуатационных расходов, что ведет к опережающему росту се-

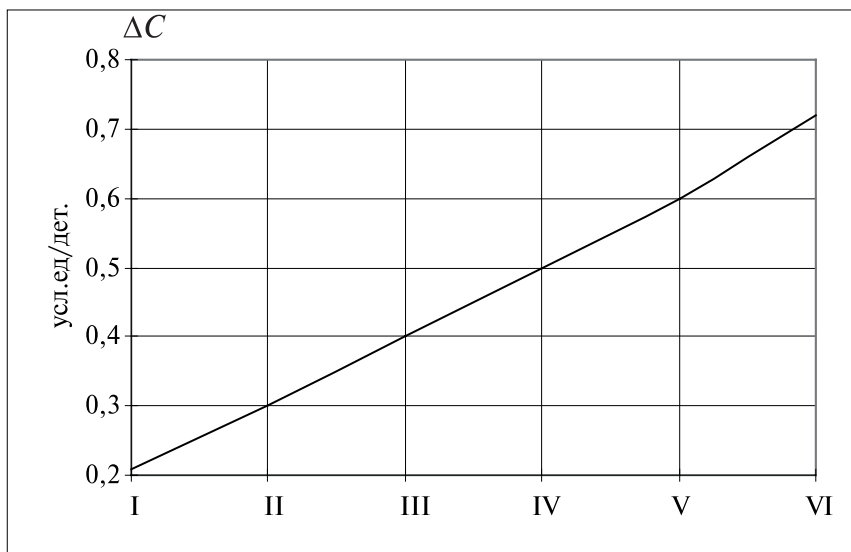


Рис. 20. Влияние группы сложности детали (I–VI) на экономию себестоимости  $\Delta C$

<sup>21</sup> Melcher R., Martins S., Travitzky N., Greil P. Fabrication of  $Al_2O_3$ -based composites by indirect 3D-printing // Materials Letters. — 2006. — Vol. 60 (4). — P. 572–575

бестоимости деталей, полученных традиционными методами по сравнению с технологией порошковой металлургии. Для деталей простых групп сложности затраты на изготовление менее значительны и поэтому основная экономия себестоимости получается лишь за счет экономии затрат на металл.

Высокие цены на порошки не позволяют пока сделать эту экономию значительной.

Проведение экономических исследований не может ограничиться рассмотрением только себестоимости продукции и факторов, влияющих на нее. Следует подробно рассматривать эффективность капитальных затрат в эту новую в промышленном применении область.

Общая сумма капиталовложений в объекты порошковой металлургии складываются из капиталовложений в оборудование, необходимое для производства продукции, включая расходы на доставку и монтаж; в здания, сооружения и устройства; в оснастку и инвентарь. В случае, когда строительство новых либо реконструкция действующих объектов порошковой металлургии требует использования смежных отраслей и предприятий, необходимо учитывать и капиталовложения в них.

Более высокие капитальные вложения в порошковую металлургию связаны с улучшением качества продукции, что требует дополнительных капитальных вложений, эффект в этом случае реализуется у потребителя. Применение более современных машин и оборудования, а также дополнительных капитальных вложений на улучшение условий труда, защиту водного и воздушного бассейнов увеличивают удельные капитальные затраты в порошковой металлургии. Однако, снижение капиталоемкости продукции достигается концентрацией производства и уменьшением материалоемкости.

Несмотря на более высокий уровень капитальных вложений в порошковую металлургию, она является прогрессивным направлением в научно-техническом прогрессе, а применение ее методов может дать народному хозяйству значительный эффект.

Экономический выигрыш от применения технологии порошковой металлургии взамен методов металлообработки зависит от

нормативных и справочных параметров, закладываемых в расчет. К ним относятся цены на сырье, основные и вспомогательные материалы, нормы расхода материалов, степень загрузки оборудования, объем и серийность выпускаемой продукции по группам сложности и маркам порошка, нормативы длительности технологических процессов и др. Перечисленные параметры при внедрении технологии на участке порошковой металлургии могут отличаться от принятых по стадии предпроектного анализа или могут изменяться в процессе эксплуатации участка под влиянием временных изменений цен, потребности в изделиях, степени освоения оборудования. Оценка последствий этих изменений является обязательной, так как они могут привести к принципиальному изменению экономического

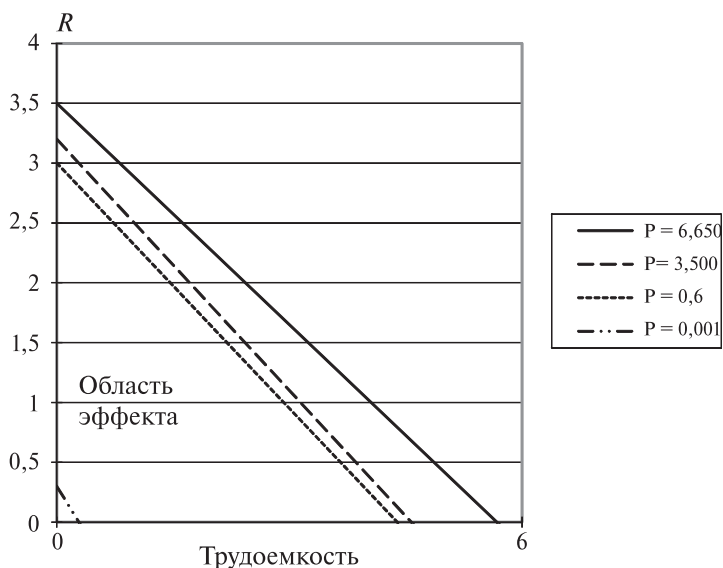


Рис. 21. Номограмма областей эффективности применения технологии порошковой металлургии по производству деталей при изменении расходного коэффициента металла  $R$  и трудоемкости производства (параметры приведены в условных единицах)

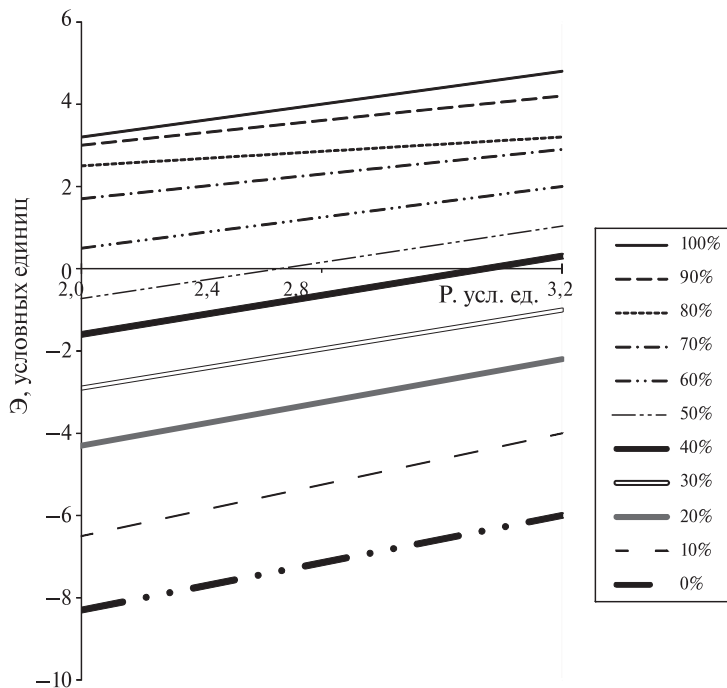


Рис. 22. Зависимость экономического выигрыша от объема производства  $P$  и повышения срока службы деталей из порошка, %

выигрыша и вывода из области эффективности предлагаемого перехода на технологию порошковой металлургии. Количественным выражением степени влияния отдельных параметров на экономический выигрыш могут быть графики (рис. 21, 22), а также таблицы влияния параметров на составляющие затраты.

Набор номограмм и областей выигрыша следует рассматривать в комплексе, так как первые иллюстрируют чувствительность экономического выигрыша к изменению отдельных параметров, а вторые показывают значимость и допустимые диапазоны изменения параметров. Графическое представление допускает наличие двух-трех параметров. На практике их число может быть большим, поэтому необходимо строить набор номограмм либо пользоваться укрупненными расчетами.

Учет неопределенности исходной информации при расчете экономических показателей производства деталей из порошков может быть выполнен с использованием принципов, изложенных выше. Например, при использовании производства деталей методом порошковой металлургии набор исходных данных разделяется на следующие группы:

- информация о технологии производства порошковых деталей;
- информация о порошковой детали;
- информация об организации производства;
- информация о капитальных вложениях;
- информация о сфере применения.

К основной информации о технологическом процессе отнесены: состав операций технологической схемы; состав и характеристики используемого оборудования; расходный коэффициент материала на отдельную операцию и на технологический процесс в целом.

Информация о порошковой детали включает: вид и назначение детали; масса детали; количество порошков-компонент; структура порошков-компонент; цены порошков-компонент; группа сложности детали.

К информации об экономико-организационной ситуации отнесены следующие показатели: годовой фонд времени работы оборудования; тарифы на электроэнергию; продолжительность межремонтного цикла работы оборудования; объем производства продукции; нормативные коэффициенты; стойкость и стоимость пресс-форм.

К информации о капитальных вложениях отнесены: состав операций технологической схемы; состав и характеристики используемого оборудования; нормативы капитальных вложений.

К информации о сфере применения порошковых деталей отнесены: область промышленности, в которой используются (либо будут использоваться) порошковые детали; традиционные схемы производства деталей для сопоставления и конкретные значения показателей.

Каждый из видов информации допускает ее деление по следующим уровням. Информация о технологическом процессе производства предусматривает следующие уровни информированности:

1 уровень — информация о технологической схеме и применяемом оборудовании отсутствует;

2 уровень — имеется информация о технологической схеме изготовления детали, но неизвестны характеристики используемого оборудования;

3 уровень — известны технологическая схема производства и характеристики используемого оборудования.

Информация о детали допускает следующие уровни информированности:

1 уровень — информация о детали отсутствует;

2 уровень — известны виды порошков, входящих в исходный;

2.1 уровень — известен процентный состав исходного порошка;

2.2 уровень — известен процентный состав исходного порошка и цена порошков-компонент;

3 уровень — известны процентный состав исходного порошка, цена порошков-компонент и группа сложности детали;

4 уровень — известны все параметры детали.

Информация по организации производства допускает ее деление по следующим уровням информированности:

1 уровень — показатели, характеризующие организацию производства деталей, неизвестны;

2 уровень — известны точные значения показателей.

Информация о капитальных вложениях может быть классифицирована по уровням информированности следующим образом:

1 уровень — нет сведений о величине капитальных вложений;

2 уровень — технологический процесс производства порошковых деталей известен;

3 уровень — технологический процесс производства порошковых деталей и характеристики используемого оборудования известны;

4 уровень — известны нормативы капитальных вложений.

Наличие информации о сфере применения классифицируется следующим образом:

1 уровень — сфера применения порошковых деталей неизвестна;

2 уровень — сфера применения порошковых деталей известна без данных для точного расчета;

3 уровень — известна традиционная технология производства деталей;

4 уровень — известны все данные для точного расчета.

В зависимости от полноты необходимой информации расчет экономических показателей производства и применения деталей из порошков проводится на том или другом уровне информированности. С уточнением исходной информации уточняется интервал значений итогового экономического показателя.

Одним из важнейших показателей, определяющих конкурентоспособность порошковых деталей, выступает себестоимость. Вопросы учета неопределенности исходной информации для порошковой металлургии при ее расчете рассмотрены явно недостаточно.

Для расчета себестоимости порошковой детали необходимо иметь определенный набор исходных данных. Однако достаточно часто возникает ситуация, когда данные для расчета себестоимости неизвестны, либо известны недостаточно точно. Такие ситуации характерны для проектирования новых деталей, при планировании выпуска новых деталей либо при отсутствии по каким-либо причинам необходимых данных.

Согласно выделенным уровням информированности проводится расчет себестоимости порошковых деталей.

На первом уровне информированности о технологии себестоимость можно оценить исходя из интервальных показателей, характеризующих технологию порошковой металлургии в целом. На втором уровне себестоимость порошковой детали оценивается в разрезе интервальных значений, взятых для различных видов оборудования, которое может быть использовано в выбранной технологической схеме. На третьем уровне информированности все показатели известны точно.

На первом уровне информированности о детали себестоимость можно оценить исходя из интервальных значений показателей, характеризующих деталь, взятых в разрезе порошковой металлургии. Себестоимость на уровнях 2, 2.1, 2.2 и 3 оценивается, исходя из интервальных значений более детализированных показателей,

характеризующих порошковую деталь. На четвертом уровне себестоимость порошковой детали рассчитывается, исходя из точных значений показателей.

Себестоимость на первом уровне информированности по экономико-организационной ситуации оценивается исходя из интервальных значений данных показателей с учетом особенностей порошковой металлургии. На втором уровне себестоимость оценивается исходя из точных значений.

Для иллюстрации различных вариантов расчета элементов затрат по некоторым из статей себестоимости были построены соответствующие схемы (рис. 23–25). На схемах блок А включает параметры, зависящие от технологического процесса производства порошковых деталей; блок Б включает параметры, характеризующие порошковую деталь; блок В включает параметры, характеризующие организацию производства. Между блоками существует взаимосвязь. Исследуя каждую из схем, можно получить варианты расчета элементов затрат по каждой из статей себестоимости.

Для иллюстрации влияния неопределенности исходной информации на себестоимость детали проведен расчет и анализ по конкретной совокупности деталей, изготавливаемых из порошков железа, меди, алюминия, хрома, никеля, молибдена с добавлением порошков графита. Масса деталей отобранной номенклатуры находится в интервале от 0,04 до 2,3 кг. Детали данной группы производятся по традиционным технологическим схемам, включающим такие операции как просев, взвешивание, смешивание, прессование, спекание, механическая обработка, контроль и упаковка. В качестве дополнительных применяются операции химико-термической обработки и др. Результаты расчета представлены на рис. 26.

Значения себестоимости на уровнях 2, 2.1, 2.2, 3, 4 приняты для порошков на железной основе. Точка А на рис. 26 представляет величину производственной себестоимости порошковой детали, рассчитанную при точных значениях всех необходимых данных.

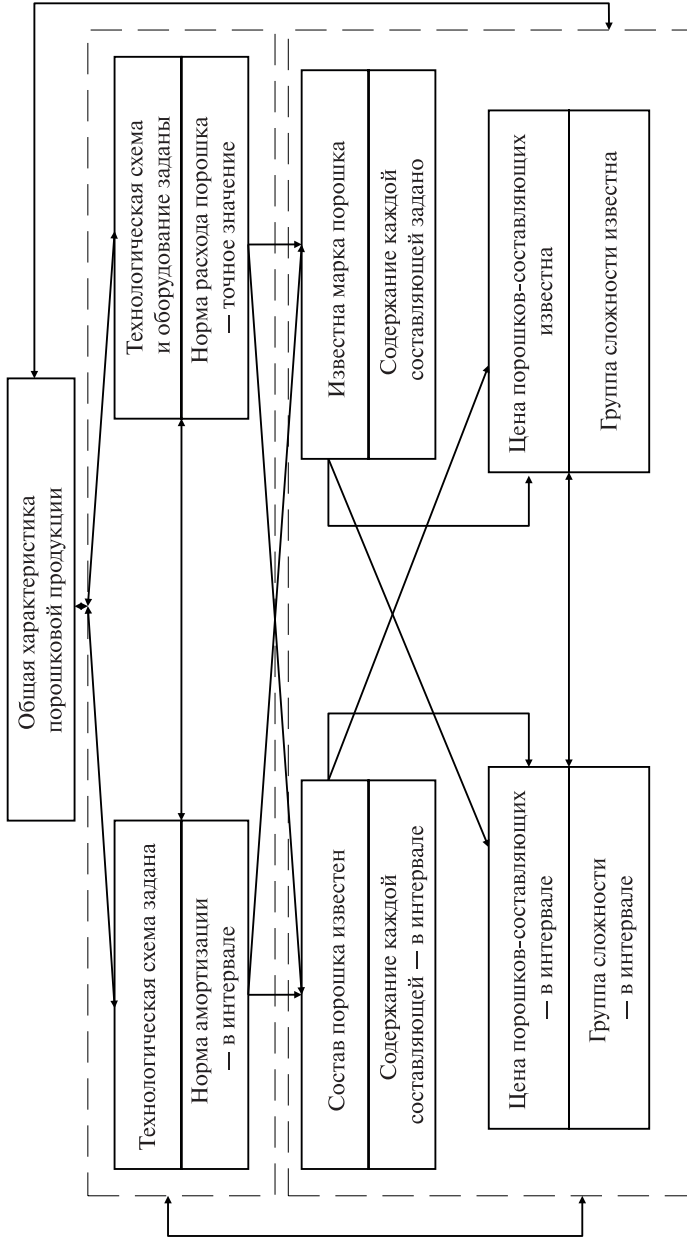


Рис. 23. Классификация информации, учитываемой при расчете затрат на основные материалы, сырье и полуфабрикаты

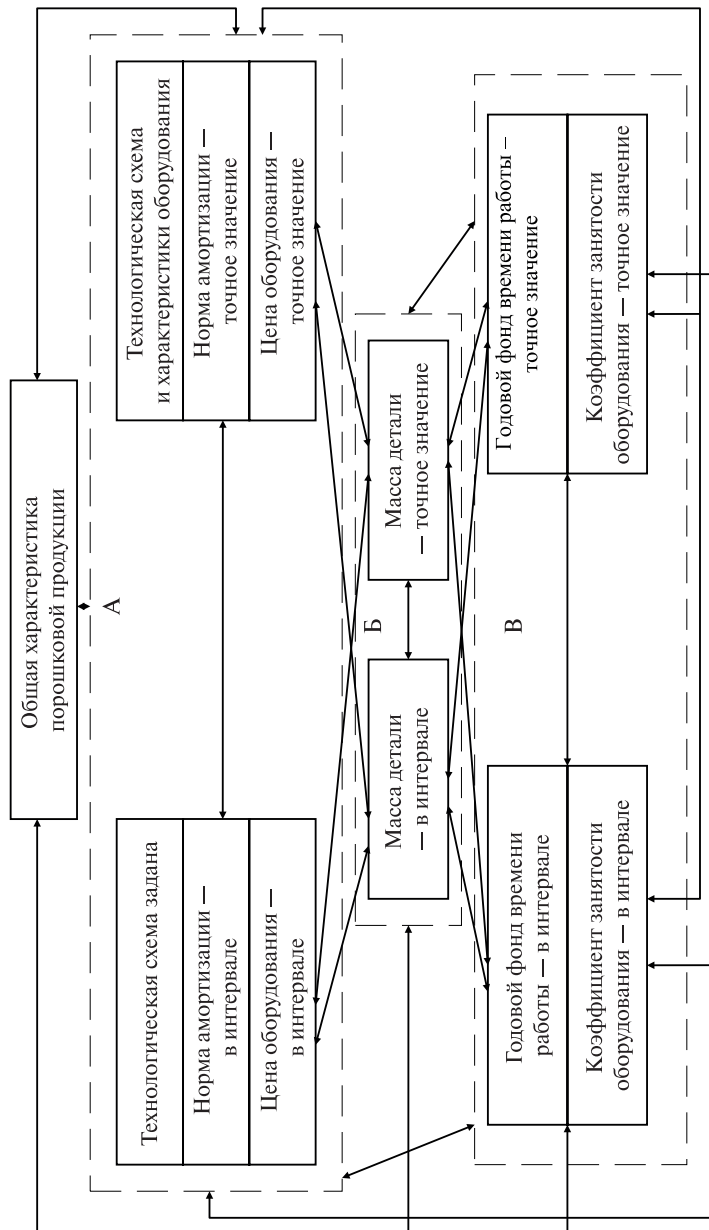


Рис. 24. Классификация информации, учитываемой при расчете затрат на амортизацию основных средств

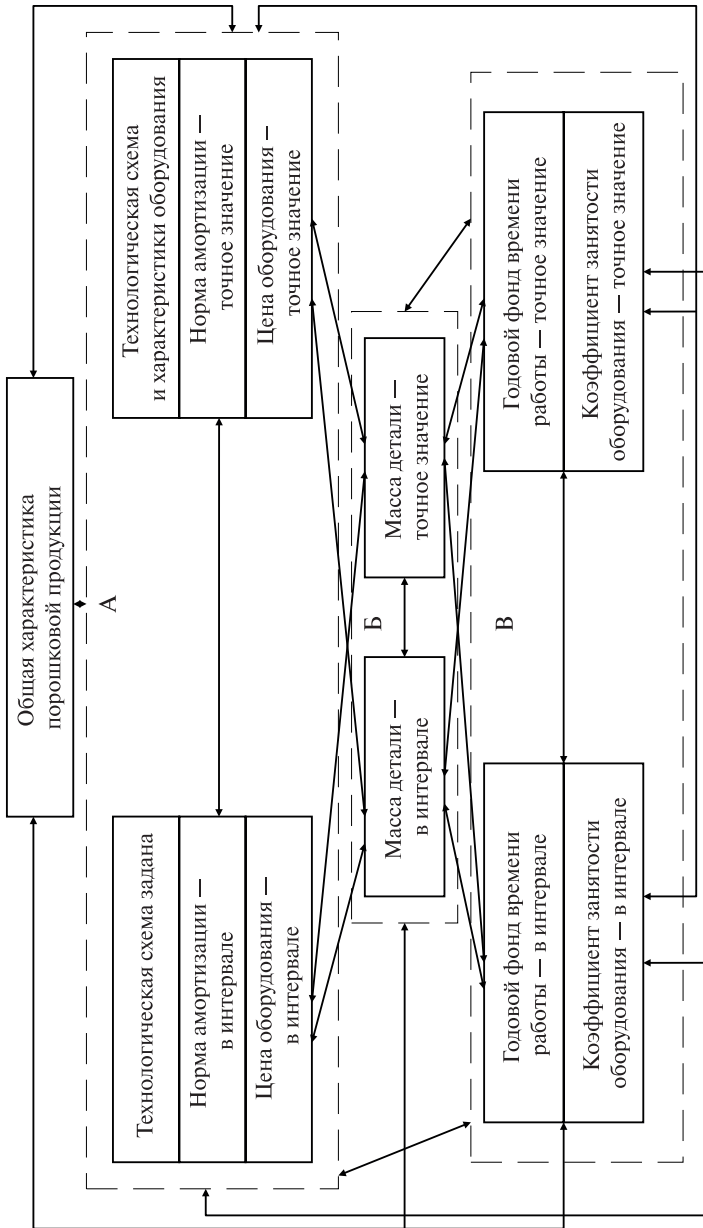


Рис. 25. Классификация информации, учитываемой при расчете затрат на амортизацию основных средств

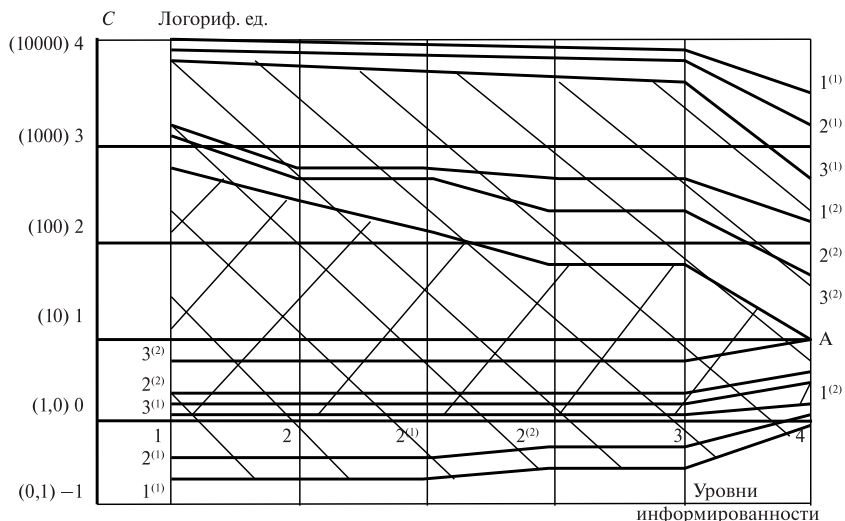


Рис. 26. Производственная себестоимость порошковой детали с учетом различной степени информированности о параметрах детали, факторах технологии, показателях экономико-организационной ситуации (в логариф.масштабе) (1.1 — технология производства и показатели экономико-организационной ситуации неизвестны; 1.2 — технология производства неизвестна. Показатели экономико организационной ситуации известны; 2.1 — технологическая схема известна. Сведения о показателях экономико-организационной ситуации отсутствуют; 2.2 технологическая схема и показатели экономико-организационной ситуации известны; 3.1 — технологическая схема и характеристики оборудования известны. Сведения о показателях экономико-организационной ситуации отсутствуют; 3.2 — технологическая схема, характеристики оборудования и показатели экономико-организационной ситуации известны)

На основании рассчитанных интервальных значений себестоимости была определена погрешность при расчетах с различной степени информированности как себестоимости, так и отдельных ее составляющих (табл. 6). Величина погрешности характеризует уменьшение интервального значения себестоимости или каждой из его статей при уточнении информации (переходе с одного уровня информированности на другой).

Погрешность себестоимости порошковых деталей при расчете с различной степенью информированности об исходных данных, % (числитель — для порошков на железной основе, знаменатель — для порошков на цветной основе)

Статьи себестоимости	Уровни информированности								
	по технологии		по порошковой детали					по экономико-организационной ситуации	
	известна технологическая схема	известна технологическая схема и характеристика оборудования	известны виды порошков входящих в исходный	известен процентный состав исходного порошка	известны процентное содержание и цена порошков-компонент	известны процентное содержание, цена порошков и группа сложности	известны все параметры детали	известны показатели организационной ситуации	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Сырье, основные материалы и полуфабрикаты	73,1–98,0	65,3–88,4	$\frac{37,7-52,4}{62,1-70,67}$	$\frac{26,16-34,8}{47,9-61,9}$	$\frac{0,8-10,2}{1,06-13,3}$	$\frac{0,7-9,2}{0,96-12,3}$	0,2	–	
Вспомогательные материалы	17,8–61,1	11–16	–	–	–	–	23,98	6,9	

Энергетические затраты	19–61,6	2,2–3,8	–	–	–	–	–	23,98	8,33
Основная заработная плата производственных рабочих	25,5–63,3	18–49,3	–	–	–	–	–	23,98	74,5
Дополнительная заработная плата производственных рабочих	25,5–63,3	18–49,3	–	–	–	–	–	23,98	74,9
Отчисления на страхование	25,5–63,3	18–49,3	–	–	–	–	–	23,98	47,9
Износ инструмента	31,8–78,5	29,8–68,9	–	–	–	–	93,2	23,98	18,9
Амортизация основных средств	48–74	14,4–30	–	–	–	–	–	23,98	33,2
Ремонтный фонд	20,9–30,4	12,1–18,9	–	–	–	–	–	23,98	4,06
Цеховая себестоимость	48–74	31,4–51	65,3–67,4 66,8–69,4	64,3–65,6 64,65 –67,2	63,46–63,9 63,46–64	61,45–61,8 61,48–61,9	–	13,6	34,5
Производственная себестоимость	46,58–75,2	32,1–51,76	65,6–67,7 67,1–69,7	64,6–65,9 64,95–67,5	63,76–64,2 63,76–64,3	61,75–62,1 61,76–62,2	–	13,86	34,8

Рассмотрим подробно статью “Энергетические затраты”, на точность расчета которой влияет полнота информации как по порошковой детали и технологии (состав операций технологической схемы и характеристики используемого оборудования), так и показатели экономико-организационной ситуации. Из данных табл. 6 следует, что определение состава операций технологической схемы позволяет уточнить расчет на 38,4–81 %. Соответственно информация о составе операций и характеристиках используемого оборудования позволит уточнить расчет на 96,2–97,8 %, о показателях экономико-организационной ситуации — на 91,7 %, о массе детали — на 76–94 %. Таким образом, точность расчета по этой статье в первую очередь зависит от полноты информации о факторах технологии производства, что объясняется определяющим влиянием на величину затрат по данной статье такого фактора технологии производства, как мощность используемого оборудования, а также его производительность.

Влияние уточнения данных показателей при переходе с одного уровня информированности на другой более существенно, чем влияние конкретизации показателей экономико-организационной ситуации и массы детали. Второй по степени влияния на данную статью себестоимости является информация об экономико-организационной ситуации производства (тариф платы за электроэнергию, коэффициент использования мощности и т. д.), причем более важна в данном случае конкретизация тарифа платы за электроэнергию. Информация о параметрах детали (массе) оказывает наименьшее влияние на точность расчета. Аналогичным образом могут быть рассмотрены и другие статьи себестоимости.

В итоге на величину себестоимости порошковой детали определяющее влияние оказывает информация о параметрах детали, затем информация об экономико-организационной ситуации и технологии. При этом при задании факторов технологии более существенное влияние оказывает одновременное с этим уточнение параметров детали (рис. 27), при задании показателей экономико-организационной ситуации — параметров детали (рис. 28), при уточнении параметров детали — показателей, характеризующих

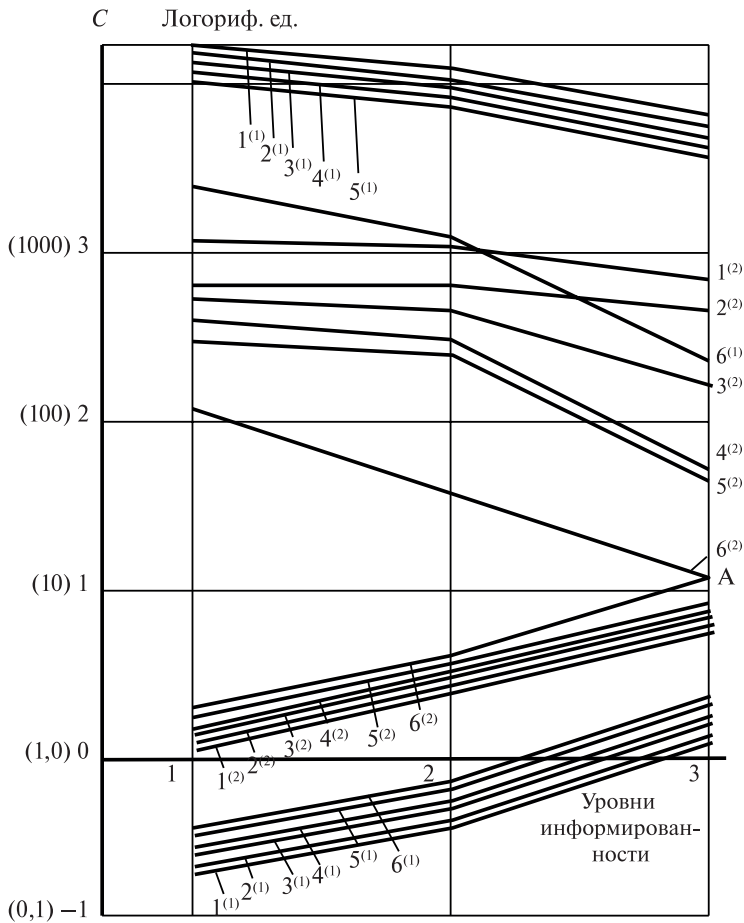


Рис. 27. Величина производственной себестоимости (С) порошковой детали в зависимости от степени информированности о факторах технологии производства (в логарифмическом масштабе)

1.1 — состав исходного порошка, масса, группа сложности и показатели экономико-организационной ситуации известны;

1.2 — состав исходного порошка, масса, группа сложности неизвестны. Показатели экономико-организационной ситуации известны;

2.1 — известны виды порошков, входящих в исходный. Масса, группа сложности и показатели экономико-организационной ситуации неизвестны;

- 2.2 — известны виды порошков, входящих в исходный и показатели экономико-организационной ситуации. Масса и группа сложности неизвестны;
- 3.1 — известен процентный состав исходного порошка. Масса, группа сложности и показатели экономико-организационной ситуации неизвестны;
- 3.2 — известен процентный состав исходного порошка и показатели экономико-организационной ситуации. Масса детали и группа сложности неизвестны;
- 4.1 — известны процентное содержание и цены порошков-компонент. Масса, группа сложности и показатели экономико-организационной ситуации неизвестны;
- 4.2 — известны процентное содержание, цена порошков-компонент и показатели экономико-организационной ситуации. Масса и группа сложности неизвестны;
- 5.1 — известны процентное содержание, цены порошков-компонент и группа сложности. Масса детали и показатели экономико-организационной ситуации неизвестны;
- 5.2 — известны процентное содержание и цены порошков-компонент, группа сложности и показатели экономико-организационной ситуации;
- 6.1 — известны все параметры детали. Показатели экономико-организационной ситуации неизвестны;
- 6.2 — известны все параметры детали и показатели экономико-организационной ситуации.

экономико-организационную ситуацию (рис. 26). Приоритетность влияния на себестоимость порошковой детали информации о параметрах детали, показателях экономико-организационной ситуации и факторов технологии проиллюстрирована на рис. 29.

Существуют различные методы определения величины капитальных вложений. Это может быть применение отраслевых нормативов. Либо это может быть прямой расчет отдельных элементов вложений, но в этом случае необходимо иметь достаточный объем исходных данных. Очень часто возникает ситуация, когда для расчета величины капитальных вложений, необходимых для производства определенного объема продукции порошковой металлургии нет требуемых данных или их недостаточно.

Точность расчета величины капитальных вложений будет зависеть от наличия сведений о реализуемом технологическом процессе

С Логориф. ед.

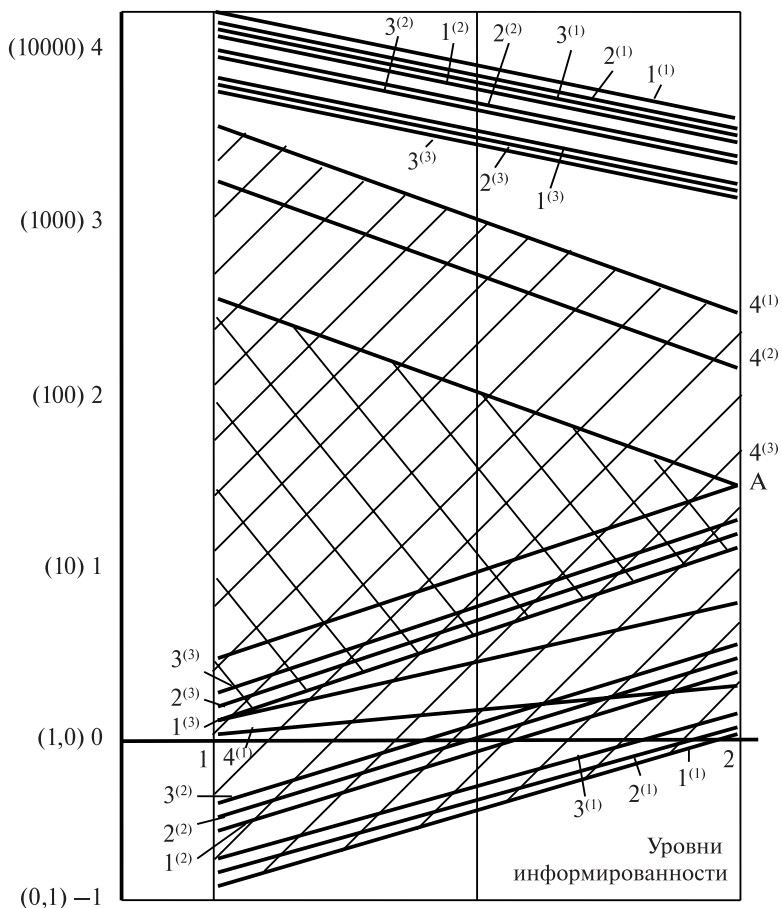


Рис. 28. Величина производственной себестоимости (С) порошковой детали в зависимости от степени информированности о показателях экономико-организационной ситуации (в логарифмическом масштабе)

1.1 — состав исходного порошка, группа сложности и технологическая схема производства неизвестны;

1.2 — состав исходного порошка, масса, группа сложности неизвестны;

- 1.3 — состав исходного порошка, масса, группа сложности неизвестны. Технологическая схема и характеристики используемого оборудования известны;
- 2.1 — известны виды порошков, входящих в исходный. Масса, группа сложности, технологическая схема неизвестны;
- 2.2 — известны виды порошков, входящих в исходный. Масса, группа сложности неизвестны. Технологическая схема производства известна;
- 2.3 — известны виды порошков, входящих в исходный. Масса, группа сложности неизвестны. Известны технологическая схема производства и характеристики используемого оборудования;
- 3.1 — известен процентный состав порошка. Масса, группа сложности и технологическая схема производства неизвестны;
- 3.2 — известен процентный состав порошка. Масса, группа сложности неизвестны. Технологическая схема производства известна;
- 3.3 — известен процентный состав порошка. Масса, группа сложности неизвестны. Известна технологическая схема производства, используемое оборудование;
- 4.1 — известны все параметры детали. Технологическая схема производства неизвестна;
- 4.2 — известны все параметры детали. Технологическая схема производства известна;
- 4.3 — известны все параметры детали, технологическая схема и характеристики используемого оборудования.

порошковой металлургии. Знание реализуемого технологического процесса можно считать определяющим для повышения точности расчетов капитальных вложений, поскольку вид реализуемого технологического процесса оказывает решающее влияние на величину практически каждой составляющей капитальных вложений.

При расчете капитальных вложений на первом уровне информированности величина капитальных вложений определяется приближенным методом расчета с использованием отраслевых нормативов.

При расчете капитальных вложений на втором уровне информированности (т. е. операции технологического процесса известны) возможно подобрать варианты применяемого на данных операциях оборудования, таким образом, с повышенной точностью указать интервал необходимых затрат на оборудование. Величина таких составляющих капитальных вложений, как стоимость разработки

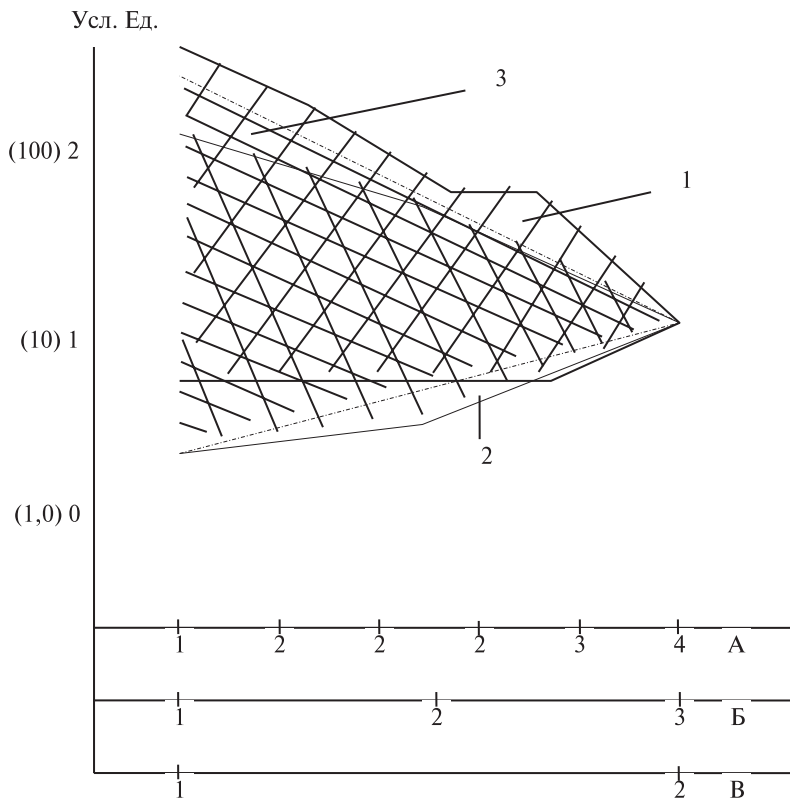


Рис. 29. Степень влияния на величину производственной себестоимости информации о параметрах детали, показателях экономико-организационной ситуации и факторах технологии (в логарифмическом масштабе)

А — уровни информированности о параметрах детали;

Б — уровни информированности о факторах технологии;

В — уровни информированности о показателях экономико-организационной ситуации;

1 — область влияния неопределенности исходной информации о параметрах детали;

2 — область влияния неопределенности исходной информации о показателях экономико-организационной ситуации;

3 — область влияния неопределенности исходной информации о факторах технологии.

проекта, вложения в производственные здания и технологическую оснастку считаем жестко связанными с величиной затрат на оборудование. Тогда величины данных составляющих возможно определить процентом к величине капвложений на оборудование. Величина остальных составляющих не являются жестко связанными с оборудованием и принимаются в расчетах интервальной величиной.

Расчет на третьем уровне информированности (известны технологический процесс и используемое при этом оборудование) точность расчетов повышается. Величина капитальных вложений в оборудование известна точно. Расчет капитальных вложений на третьем уровне информированности аналогичен расчетам на втором с той разницей, что капитальные вложения в оборудование являются точным числом, а не интервальной величиной.

Расчет на четвертом уровне информированности проводится при наличии всех необходимых данных для детального расчета каждой составляющей капитальных вложений.

Для совокупности деталей, рассмотренных выше проведен расчет и анализ влияния неопределенности исходной информации на величину капитальных вложений. Иллюстрация полученных зависимостей дана на рис. 30 .

Результаты освоения и выпуска порошковых деталей разнообразны и сводятся к пяти крупным группам эффектов:

- экономическим;
- социальным;
- экологическим;
- научно-техническим;
- специальным.

Экономические эффекты выражаются большим числом показателей, которые можно подразделить на две группы: показатели экономии отдельных элементов производства порошковых деталей и сводные показатели экономии.

Социальные эффекты заключаются в улучшении условий труда, повышении уровня техники безопасности, решении задач развития культуры и здравоохранения, в удовлетворении запросов населения в высококачественных товарах.

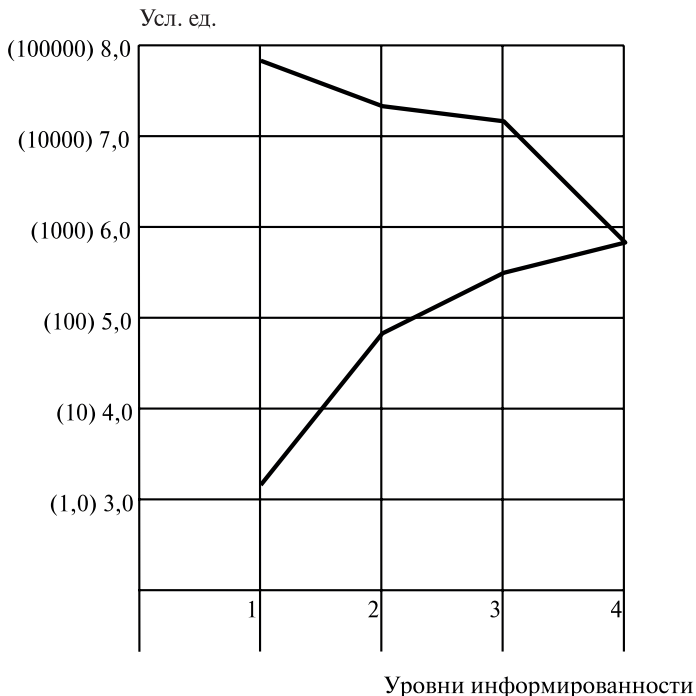


Рис. 30. Зависимость величины капитальных вложений от наличия сведений об исходной информации (в логарифмическом масштабе)

- 1 — нет сведений о технологическом процессе производства;
- 2 — известна технологическая схема производства;
- 3 — известна технологическая схема производства и характеристики используемого оборудования;
- 4 — известны данные для детального расчета

Экологические эффекты проявляются в проведении в жизнь природосберегающих мероприятий, в снижении загрязнений окружающей среды газами, вредными выбросами и шлаками. И социальные и экологические эффекты не всегда сопутствуют экономическим, однако во многих случаях решение важных социальных и экологических проблем перекрывает дополнительные затраты.

Научно-технические эффекты заключаются в накоплении знаний и повышении технического уровня производства.

К специальным эффектам относятся результаты внедрения новой продукции порошковой металлургии, которые направлены на повышение обороноспособности страны.

Необходимо отметить ряд особенностей, присущих методу порошковой металлургии при производстве деталей:

- эффект от производства порошковых деталей проявляется как в сфере производства, так и в сфере их применения

- при сопоставлении двух технологий производится сравнение двух существенно различающихся между собой технологий, так как порошковая металлургия является принципиально новым, по сравнению с традиционными способами, методом изготовления деталей.

Экономический выигрыш от внедрения методов порошковой металлургии в промышленности может дифференцироваться в зависимости от сферы его проявления и времени, в течение которого он исчисляется. В зависимости от сферы проявления можно различать выигрыш у производителя деталей и у потребителя, использующего их.

Экономический выигрыш у потребителя деталей проявляется через:

- резкое возрастание производительности труда в связи с сокращением числа технологических операций и повсеместным внедрением автоматизации;

- снижением расхода материалов за счет уменьшения отходов в стружку, в летниковые системы и т.д., а также за счет наличия пористости в порошковых деталях;

- уменьшение числа рабочих, занятых производством деталей, и числа металлообрабатывающих станков;

- снижение себестоимости деталей за счет возможной замены дорогостоящих и дефицитных материалов на более дешевые без снижения качества деталей;

- высвобождение дополнительных производственных площадей.



Рис. 31. Формирование потребительских свойств порошковых деталей на стадии их производства

На стадии производства порошковых деталей происходит фирмирование их потребительских свойств (рис. 31)<sup>22</sup>. Преимущество метода порошковой металлургии проявляется в виде:

- увеличения срока службы изделий;
- снижения количества отказов;
- сокращения ремонтно-эксплуатационной базы.

Схема реализации потребительских свойств порошковых деталей представлена на рис. 32.

При расчете экономического выигрыша используются те же уровни информированности, что и при расчете себестоимости и капитальных вложений.

Возможны различные ситуации при определении целесообразности замены деталей, изготовленных по традиционным технологиям, на порошковые. На рис. 33 дано графическое представление различных ситуаций, возникающих при решении вопроса о замене традиционных деталей порошковыми.

В ситуации А четко видно, что применение порошковых деталей менее выгодно, так как затраты на производство и применение порошковых деталей выше, чем затраты по деталям, произведенным по традиционной технологии.

В ситуации Б безусловно следует вывод о том, что использование порошковых деталей более предпочтительно, так как затраты в данном случае меньше.

Более сложно принять решение в ситуации В, так как в данном случае возможно выделение зоны равной величины затрат. Применение порошковых деталей и деталей, изготовленных по традиционным технологиям, дает равный экономический выигрыш, что вполне возможно в практической деятельности. Для решения вопроса о предпочтительности вариантов необходимо уточнить информацию по затратам. С уточнением информации, как видно на рисунке, величина затрат по традиционным деталям меньше, чем по порошковым. Возможно и наоборот.

---

<sup>22</sup> *Gusarov A. et al. Model of radiation and heat transfer in laser-powder interaction zone at selective laser melting // Journal of heat transfer. — 2009. — Vol. 131, № 7. — P. 072101*

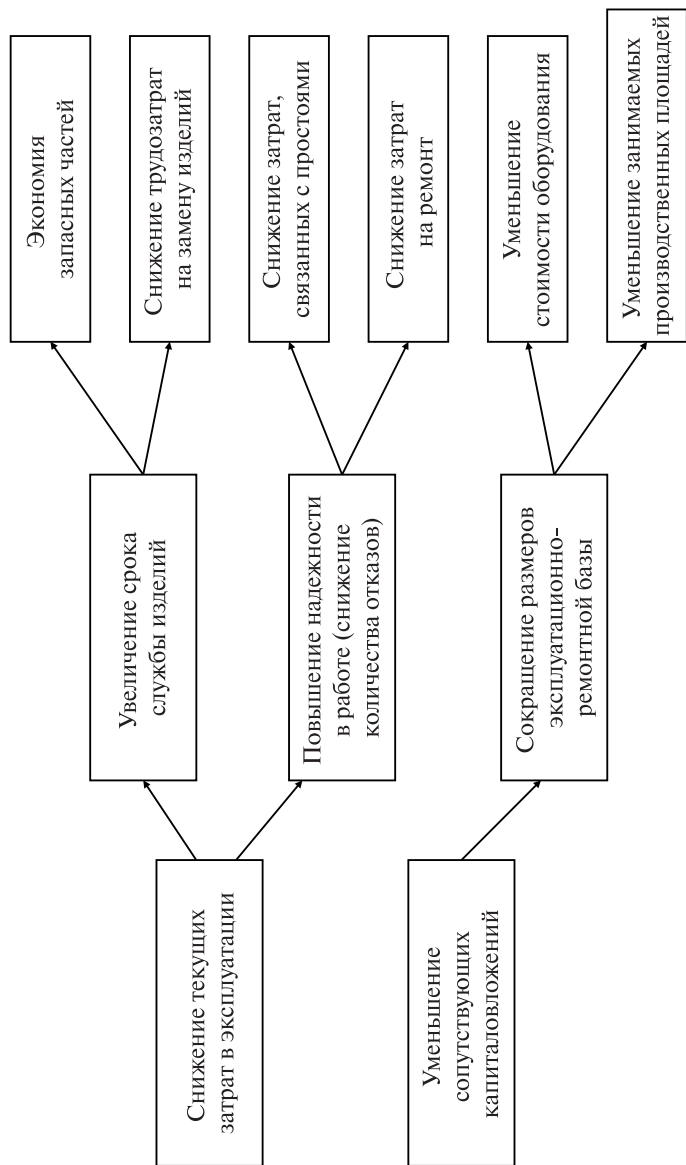


Рис. 32. Реализация потребительских свойств порошковых деталей в сфере их применения

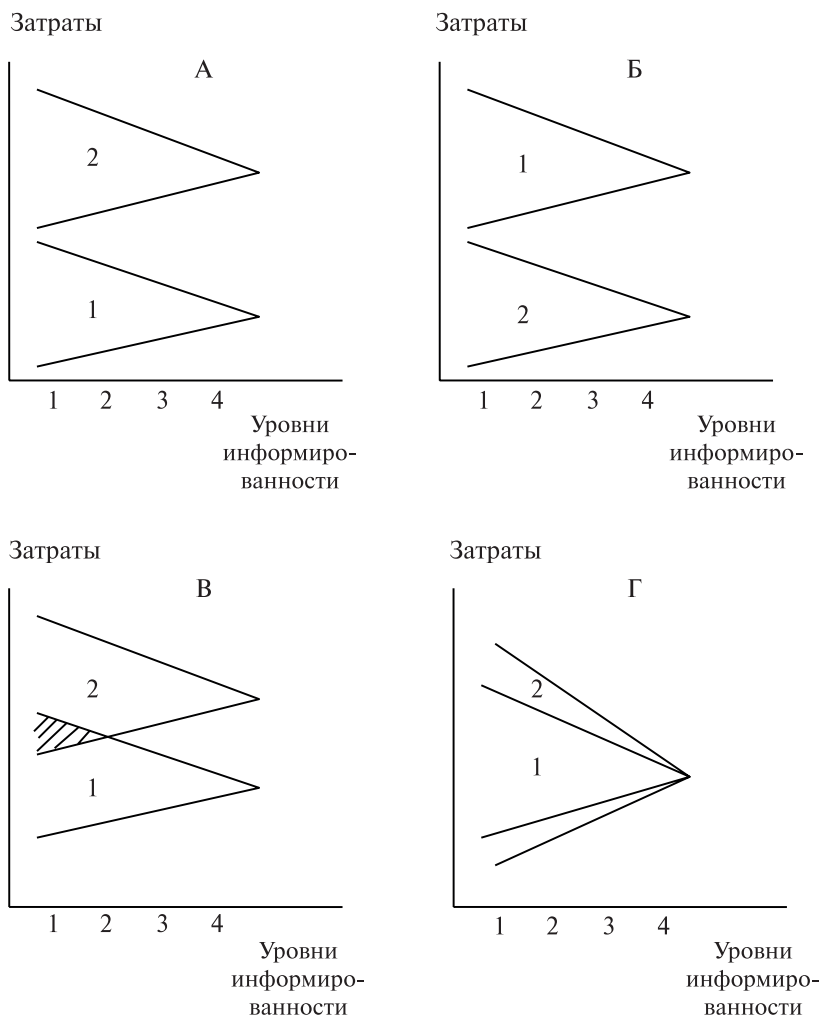


Рис. 33. Возможные ситуации при применении порошковых деталей и деталей, изготовленных по традиционным технологиям  
 1 — традиционные технологии производства деталей;  
 2 — порошковая технология производства

В ситуации Г происходит наложение затрат по традиционным деталям на зону затрат для порошковых деталей. В данном случае необходимо всесторонне проанализировать те преимущества, которые обеспечивает использование традиционных или порошковых деталей в сфере их применения. В процессе анализа необходимо количественно оценить степень реализации потребительских свойств как порошковых деталей, так и деталей, изготовленных по традиционной технологии.

Для представления расчетных значений экономического выигрыша конкретной совокупности деталей, рассмотренных выше, предложен разнообразный набор комбинаций уровней информированности по затратам и сфере применения (рис. 34). На оси абсцисс графика указаны следующие возможные ситуации:

1. 1 уровень по общим затратам на производство порошковых деталей. Сфера применения порошковых деталей неизвестна.

2 уровень по общим затратам на производство порошковых деталей. Сфера применения порошковых деталей неизвестна.

3 уровень по общим затратам на производство порошковых деталей. Сфера применения порошковых деталей неизвестна.

4. 4 уровень по общим затратам на производство порошковых деталей. Сфера применения порошковых деталей неизвестна.

5. 4 уровень по общим затратам на производство порошковых деталей. Сфера применения известна без данных для детального расчета экономического выигрыша от применения порошковых деталей.

6. 4 уровень по общим затратам на производство порошковых деталей. Сфера применения известна без данных для детального расчета экономического выигрыша. Известны общие затраты по заменяемой детали.

7. 4 уровень по общим затратам на производство порошковых деталей. Известны общие затраты по заменяемой детали и все данные для детального расчета экономического выигрыша от применения порошковых деталей.

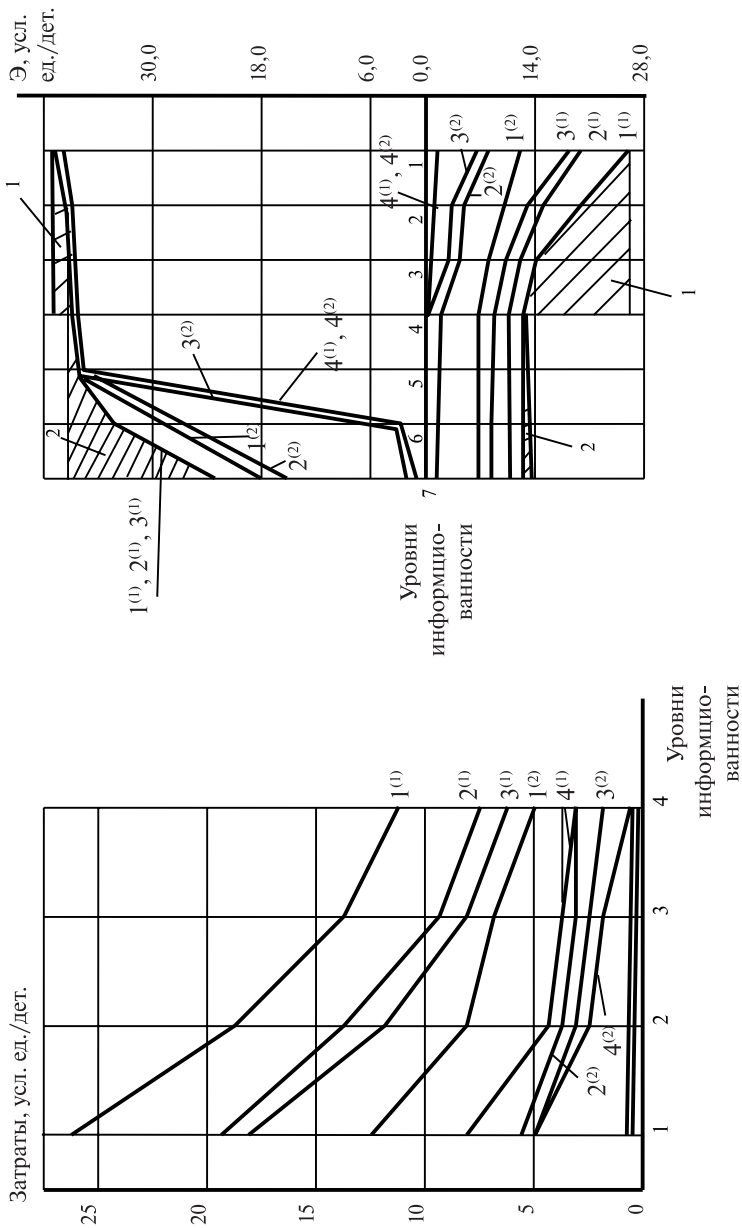


Рис. 34. Экономический выигрыш (Э) от применения порошковых деталей в зависимости от наличия информации по затратам и сфере применения

- 1 — влияние уточнения информации по суммарным затратам на производство порошковой детали;
- 2 — влияние уточнения информации по сфере применения порошковых деталей (без данных для детального расчета экономического выигрыша от применения порошковых деталей);
- 3 — влияние уточнения информации по базовой детали;
- 4 — влияние уточнения информации по сфере применения порошковой детали при наличии всех необходимых данных для детального расчета экономического выигрыша;
  - 1.1 — параметры детали и показатели организационной ситуации неизвестны;
  - 1.2 — параметры детали неизвестны. Показатели организационной ситуации известны;
  - 2.1 — известны виды порошков, входящих в исходный. Показатели экономико-организационной ситуации неизвестны;
  - 2.2 — известны виды порошков, входящих в исходный, и показатели экономико-организационной ситуации;
  - 3.1 — известны процентное содержание, цена порошков-составляющих и группа сложности детали. Показатели экономико-организационной ситуации неизвестны;
  - 3.2 — известны процентное содержание, цена порошков-составляющих, группа сложности и показатели экономико-организационной ситуации;
  - 4.1 — известны все параметры детали. Показатели экономико-организационной ситуации неизвестны;
  - 4.2 — известны все параметры детали и показатели экономико-организационной ситуации.

При расчете на уровнях № 1–5 неизвестна заменяемая деталь, изготовленная по традиционной технологии и соответственно общие затраты на ее производство принимаются интервальным значением. На уровне № 6 уточняется информация по базовой детали; на уровне № 7 — информация, необходимая для расчета экономического выигрыша, известна в полном объеме. Пользуясь рис. 34 можно определить возможные значения экономического выигрыша от применения порошковой детали, имея определенный объем информации.

## **7. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

Высокая себестоимость заготовки, получаемой из порошка, по сравнению с себестоимостью проката аналогичной марки стали требует специального экономического исследования целесообразности применения новой технологии получения инструментальной заготовки. Исследование должно включать следующие этапы: проведение испытаний опытных партий инструмента, оценку изменения эксплуатационных характеристик инструмента, расчет себестоимости изготовления инструмента и эксплуатационных издержек металлообработки для сопоставляемых видов инструмента, расчет прямых и сопутствующих дополнительных капитальных затрат, рассмотрение зависимости экономического выигрыша применения новой технологии изготовления инструмента от его эксплуатационных характеристик, выделение области экономически эффективного применения инструмента из порошковой заготовки.

Показателем, определяющим экономическую целесообразность затрат на улучшение эксплуатационных характеристик режущего инструмента, является экономический выигрыш, получаемый в металлообработке.

При сопоставлении вариантов применения инструмента из компактной и литой заготовки необходимо учитывать, что их

различие проявляется на стадиях процессов получения инструментальной заготовки и применения инструмента. Процесс изготовления однотипного инструмента практически не зависит от свойств используемой заготовки. Изменение эксплуатационных характеристик операций в металлообработке определяется расхождением эксплуатационных свойств инструмента. Это позволяет при расчете экономического выигрыша от изготовления инструмента из компактной заготовки базироваться на соотношении

$$\Theta = \sum_t ((C_{1t} + K_{1t})Y_{1t} + I_{1t} - (C_{2t} + K_{2t})Y_{2t} - I_{2t})A_t\alpha_t,$$

где  $C_t$  и  $K_t$  — себестоимость и капитальные затраты на производство инструмента в году  $t$ ;  $I_t$  — эксплуатационные издержки металлообработки при использовании инструмента в году  $t$ ;  $Y_t$  — расход инструмента на единицу работы (продукции) в металлообработке;  $A_t$  — годовой объем работы (продукции) металлообработки с применением анализируемого вида инструмента;  $\alpha_t$  — коэффициент дисконтирования; индексом «1» обозначена принадлежность показателя к базовому варианту изготовления инструмента, индексом «2» — к предлагаемому варианту.

При пользовании этой формулой необходимо учитывать ряд особенностей, которые позволяют конкретизировать общую рабочую формулу с учетом состава факторов, определяющих изменение качества инструмента, и совокупности изменяемых стадий процесса изготовления. К таким факторам относятся стойкость инструмента, скорость резания, время наладки станка, время заточки инструмента, коэффициент случайных поломок инструмента и др.

Базовый технологический процесс применения режущего инструмента из литой, прокатанной или ковальной заготовки является промышленно освоенным, поэтому показатели  $Y_{1t}$  и  $I_{1t}$  могут быть взяты из статистической отчетности металлообрабатывающего предприятия, а затем на их основе вычислены показатели  $Y_{2t}$  и  $I_{2t}$ .

Расход инструмента определяется главным образом двумя факторами: стойкостью и частотой поломок, поэтому показатель  $Y_{2t}$ , вычисляющий корректировкой  $Y_{1t}$  пропорционально изменению этих факторов:

$$Y_{2t} = Y_{1t} \frac{s_2 \beta_2}{s_1 \beta_1},$$

где  $s$  — удельный износ инструмента в процессе металлообработки;  $\beta$  — процент непредвиденных поломок инструмента;  $s_1$  и  $\beta_1$  — фактические характеристики инструмента по базовому варианту;  $s_2$  и  $\beta_2$  — предполагаемые либо опытные характеристики нового инструмента.

Снижение эксплуатационных издержек металлообработки связано с сокращением времени переналадки металлорежущего станка, времени металлообработки и затрат на заточку инструмента. Сокращение это является следствием изменения двух факторов: скорости резания  $V$  и стойкости инструмента  $S$ . Расчетная формула имеет вид

$$c_{2t} = C_{1t} \left( \phi_1 \frac{V_2}{V_1} + \phi_2 \frac{S_2}{S_1} + \phi_3 \frac{S_2}{S_1} \right),$$

где  $\phi_1, \phi_2$  — доля эксплуатационных издержек основных работ металлообрабатывающего цеха, пропорциональная основному и вспомогательному времени работы станков соответственно;  $\phi_3$  — доля эксплуатационных издержек, приходящаяся на работы по подготовке инструмента.

Процесс изготовления инструмента состоит из четырех основных стадий: выплавки стали, разливки стали, деформации (ковки, прокатки) полуфабриката до инструментальной заготовки, изготовления инструмента. Для базового технологического процесса показатель  $C_{1t}$ , вычисляющий на основании статистических отчетных данных по соотношению

$$C_{1t} = C_{1t}^{(0)} \rho_1 \rho_2 \rho_3 \rho_4 + u_{1t} \rho_2 \rho_3 \rho_4 + u_{2t} \rho_3 \rho_4 + u_{3t} \rho_4,$$

где  $C_{1t}^{(0)}$  — себестоимость 1 т жидкой стали в году  $t$ ;  $u_{1t}, u_{2t}, u_{3t}$  — эксплуатационные издержки при разливке стали, деформации полу-

фабриката, изготовлении инструмента, соответственно в году  $t$ ;  $\rho_1 - \rho_4$  — расходные коэффициенты металла по стадиям технологического процесса. Если инструмент изготавливают из двух компонент, то значение  $C_{1t}$  рассчитывают по соотношению:

$$C_{2t} = C_{2t}^{(0)} \overline{\rho_1 \rho_2 \rho_3 \rho_4} + \overline{u_{1t} \rho_2 \rho_3 \rho_4} + \overline{u_{2t} \rho_3 \rho_4} + \overline{u_{3t} \rho_4},$$

где  $C_{2t}^{(0)}$  — себестоимость 1 т порошка;  $\overline{u_{1t}}$ ,  $\overline{u_{2t}}$ ,  $\overline{u_{3t}}$  — удельные эксплуатационные издержки при получении компактного полуфабриката, деформации полуфабриката до инструментальной заготовки и изготовлении инструмента;  $\rho_1 - \rho_4$  — расходные коэффициенты металла по производственным стадиям изготовления инструмента из порошка.

Капитальные вложения определяются, исходя из статистических данных по организации производственного процесса изготовления инструмента из порошка.

Определение эксплуатационных издержек металлообработки при использовании инструмента проводится по известным формулам. Применительно к расчету экономического выигрыша от изготовления и применения инструмента из порошка вычисления можно упростить, если исходить из следующих практически оправданных положений:

1) в составе эксплуатационных издержек может быть выделена одна изменяющаяся составляющая  $I_{it}$ ;

2) затраты на смену и заточку инструмента  $C_{1t} = \mathbf{I}_{1t}^{(0)} + \mathbf{I}_{1t}$ ,  $C_{2t} = \mathbf{I}_{2t}^{(0)} + \mathbf{I}_{2t}$  где  $\mathbf{I}_{1t,2t}^{(0)}$  — постоянные составляющие эксплуатационных издержек;

3) затраты на единицу инструмента при оценке  $\mathcal{E}$  на машиностроительном предприятии могут быть заменены на цену инструмента ( $\Pi_{1t}$ ,  $\Pi_{2t}$ ) с учетом стоимости реализации изношенного инструмента ( $\Pi_{1t}^{(0)}$ ,  $\Pi_{2t}^{(0)}$ ).

4) потребность в инструменте зависит от коэффициента случайной убыли инструмента (по вариантам  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ) и коэффициента, учитывающего влияние переточек на изменение стойкости инструмента ( $r_1$ ,  $r_2$ )

$$\mathbf{y}_{1t} = \mathbf{y}_{1t}^{(0)} \beta_1 \frac{1}{r_1}; \quad \mathbf{y}_{2t} = \mathbf{y}_{2t}^{(0)} \beta_2 \frac{1}{r_2}; \quad \mathbf{y}_{2t}^{(0)} = \mathbf{y}_{2t}^{(0)} \frac{1}{s},$$

где  $\mathbf{y}_{1t}^{(0)}$  и  $\mathbf{y}_{2t}^{(0)}$  — средняя удельная потребность в инструменте по базовому и новому вариантам;  $s$  — коэффициент повышения стоимости инструмента по новому варианту по сравнению с базовым;

5) использование действующей статистической отчетности предприятия позволяет принять произведение  $A_t \mathbf{y}_{1t}$  за фактический расход инструмента за отчетный год  $A_t \mathbf{y}_{1t} = m_{1t}$ , соответственно

$$A_t \mathbf{y}_{2t} = m_{1t} \frac{1}{s} \frac{\beta_2 r_1}{\beta_1 r_2};$$

6) использование статистической отчетности предприятия позволяет определить годовой объем затрат на смену и заточку инструмента через количество инструмента

$$u_{1t} A_t = e_t N_{1t} n_1, \quad N_{1t} = P_{1t} / M,$$

где  $e_t$  — затраты на одну смену и заточку инструмента;  $N_{1t}$  — число единиц инструмента;  $n_1$  — среднее число переточек инструмента;

$M$  — масса единицы инструмента. Аналогично  $A_t u_{2t} = e_t N_{1t} n_1 \frac{1}{s} \frac{\beta_2 r_1}{\beta_1 r_2}$ .

Если изменяется число переточек для нового вида инструмента, то  $n_1$  изменяется на  $n_2$ .

С учетом отмеченных особенностей базовая расчетная формула будет иметь вид

$$\Theta = \sum_t \left( \frac{P_{1t}}{M} (\Pi_{1t} - \Pi_{1t}^{(0)} + e_t n_1) - \frac{P_{1t} \beta_2 r_1}{M s \beta_1 r_2} (\Pi_{2t} - \Pi_{2t}^{(0)} + e_t n_2) \right) \alpha_t.$$

Применение этой формулы упрощает процесс оценки экономического выигрыша на металлообрабатывающем предприятии при работе с инструментом с улучшенными свойствами. Показатели  $\Pi_{1t}$ ,  $\Pi_{2t}$ ,  $\Pi_{1t}^{(0)}$ ,  $\Pi_{2t}^{(0)}$ ,  $P_t$ ,  $e_t$ , входящие в формулу, планируются предприятиями,  $n_1$ ,  $M$ ,  $s$  — содержатся в технологических нормах,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  — в статистической отчетности предприятия,  $\alpha_t$  — норма

дисконтирования. При определении  $e_t$  можно воспользоваться соотношением  $e_t = \tau a_t \alpha$ , где  $\tau$  — трудоемкость операции смены и заточки инструмента, чел.-ч;  $a_t$  — стоимость 1 чел.-ч станочника с начислениями;  $\alpha$  — доля прочих условно-переменных эксплуатационных издержек металлообрабатывающего цеха.

Изменение основных эксплуатационных параметров процесса использования инструмента, а также технологических параметров процесса изготовления инструмента по новой технологической схеме устанавливается на основании опытных работ либо экспертных оценок. В связи с этим получаемая экономическая оценка экономического выигрыша должна рассматриваться как интервальная величина. Если опытные работы были произведены для нескольких единиц (партий) улучшенного инструмента, то экономический расчет выполняют для средних, оптимистических и пессимистических оценок эксплуатационных и технологических параметров. Если расчет выполняют на этапе научно-исследовательских разработок, то соответствующие оценки принимаются как показатели, достигнутые на аналогичном инструменте и подобных технологических процессах.

Второй группой факторов, влияющих на возможное расхождение расчетного и фактического экономического выигрыша являются используемые в расчете нормативно-справочные параметры. В первую очередь это цена металла, порошка, электроэнергии и топлива, а также тарифные ставки работающих. Сложившаяся тенденция в изменении этих параметров требует подробного анализа влияния их на величину экономического выигрыша в перспективе.

Рассмотрим три основных вида инструмента из порошка: сверла, фрезы и метчики. Классификация сверл предусматривает выделение четырех основных групп: спиральные, перовые, центровые и специальные сверла. Наибольшее распространение в металлообработке получили спиральные сверла, предназначенные для сверления отверстий с глубиной не более 4–5 диаметров.

Экономическую целесообразность изготовления спиральных сверл из компактной заготовки рассмотрим на базе сопоставления процессов изготовления и применения сверл с рабочей частью из литой стали марки Р6М5 и порошка марки Р6М5Ф3-МП. Хвостовую часть сверла будем предполагать изготовленной из стали 45.

Типовой технологический процесс изготовления сверла, являющийся одинаковым для сопоставляемых вариантов, включает следующие основные операции: сварку хвостовой и рабочей частей сверла, прокатку, завивку, шлифование. Кроме них выполняется ряд вспомогательных промежуточных операций по термообработке, зачистке, правке, фрезерной и токарной обработке поверхности. Разница в себестоимости сверла из обычной стали и порошковой составляет примерно в два раза. Причина заключается в более высоких затратах на порошок. Эта разница, зависящая от диаметра сверла и различия цен литой и компактной заготовок, является базой для минимально допустимой экономии текущих затрат в сфере металлообработки.

Для сопоставления текущих затрат сверления при использовании сверл разного качества необходимо определить себестоимость средней единицы работ. Такой единицей может быть нормативное отверстие или единица просверленной длины. В качестве нормативно-справочных параметров, влияющих на себестоимость, можно выделить следующие: затраты на замену и переточку сверла, число переточек сверла до полного изнашивания, время выполнения единицы работы и, пожалуй самый основной параметр, число наименований работ, выполняемых между переточками (этот параметр определяет стойкость). Эксплуатационные параметры сверл, имеющие статистическую природу, будут колебаться в некоторых пределах. В связи с этим на этапе экономического анализа появляется необходимость оценивать степень влияния эксплуатационных характеристик на экономический выигрыш от применения сверл, изготовленных из компактной заготовки. Это влияние можно проиллюстрировать в графической, табличной и математической формах.

Количественная оценка влияния нормативно-справочных и эксплуатационных параметров на экономический выигрыш от производства и применения инструмента из порошка позволяет обосновать первоочередные мероприятия по улучшению технологии изготовления и применения сверл, определить перспективные изменения составляющих эксплуатационных затрат. Из общей

совокупности параметров, привлекаемых к экономическому исследованию сверл, наиболее значимыми являются размер, стойкость, время выполнения единицы условной работы, время настройки станка при смене сверл, время заточки сверла, коэффициент случайных поломок, разница цен компактной и литой инструментальных заготовок.

Увеличение размера инструмента сопровождается увеличением и массы, и длительности операций по изготовлению сверл. В результате возрастают затраты на заготовку и текущие расходы инструментального цеха. Характер зависимости экономического выигрыша от диаметра сверла определяется соотношением изменяющейся части материальных и эксплуатационных затрат в себестоимости сверла.

На основе анализа установлено, что на материальные затраты при изготовлении сверла из стали марки Р6М5 приходится более 70 %, а для компактной заготовки — более 85 %. При увеличении размера сверла его масса возрастает пропорционально квадрату диаметра. Следовательно, можно считать, что увеличение диаметра сверла приводит к снижению экономического выигрыша (рис. 35).

Стойкость сверла зависит от его физико-механических свойств, применяемых режимов сверления и марки обрабатываемого материала. Влияние стойкости проявляется во всех статьях текущих затрат на сверление одного условного отверстия за счет пропорционального снижения доли материальных затрат и вспомогательных расходов по наладке станка и заточке сверла. Следовательно, характер зависимости экономического выигрыша от повышения стойкости сверла зависит от соотношения основных и суммы вспомогательных и материальных расходов в общей себестоимости работ на сверление одного условного отверстия. Условно количественная зависимость снижения себестоимости сверления от стойкости сверла представлена на рис. 36. Здесь важно обратить внимание на интенсивный рост экономии в области малых значений коэффициента стойкости сверла и появление предельной экономии в области больших значений этого коэффициента. При значительной стойкости сверла в базовом варианте его изготовле-

ния существенный экономический выигрыш возможен только при резком повышении стойкости. Среднее минимально допустимое увеличение стойкости спирального сверла из компактной заготовки по сравнению с аналогичным из литой заготовки равняется 20 %. Меньшее значение прироста стойкости сверла не обеспечивает компенсацию повышения его себестоимости снижением эксплуатационных расходов при сверлении.

Время выполнения одной операции зависит от принятой единицы условной работы, а его изменение определяется принятыми скоростями вращения и подачи сверла. Использование инструмента с улучшенными свойствами позволяет интенсифицировать процесс сверления, что ведет в свою очередь к пропорциональному снижению основной части эксплуатационных расходов на сверление.

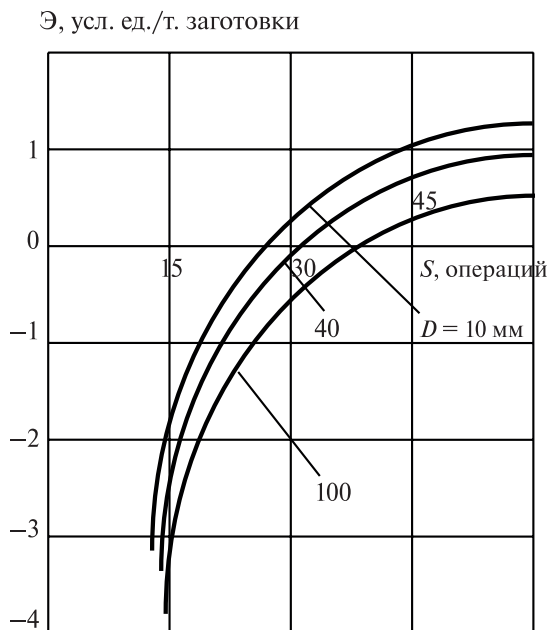


Рис. 35. Зависимость экономического выигрыша Э от стойкости S и диаметра заготовки D

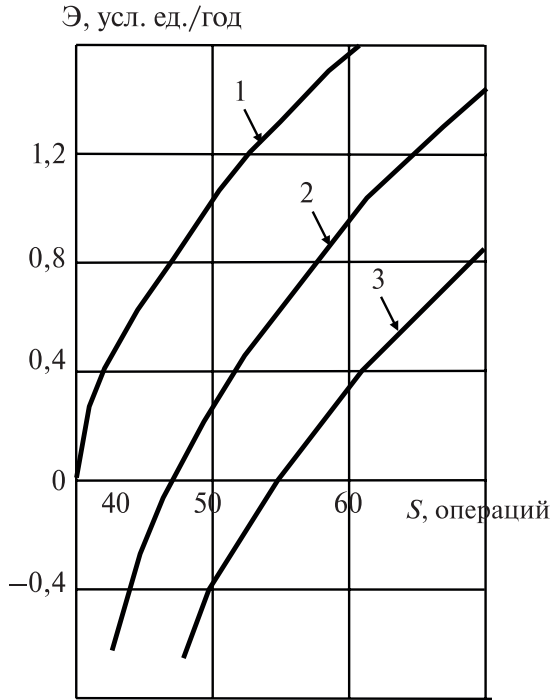


Рис. 36. Зависимость экономии затрат на сверление от изменения стойкости инструмента  $S$  при стойкости обычного сверла: 34 операции (1); 40 операций (2); 45 операций (3)

Цена компактной инструментальной заготовки превышает цену литой заготовки. В перспективе эта разница может быть устранена за счет снижения цены порошка и совершенствования процесса получения заготовки. Одновременно произойдет снижение затрат на материалы, составляющих около 6% в расходах на сверление. Несмотря на малую долю этих затрат, они составляют основную величину в разнице текущих затрат на сверление при использовании сверл из разного материала.

Выполненный анализ показывает степень влияния отдельных характеристик на экономический выигрыш от использования

сверла из компактной заготовки. В реальных условиях приходится сталкиваться с одновременным воздействием нескольких факторов, поэтому важно иметь представление о количественном соотношении степени влияния отдельных факторов. Например, для рассматриваемого выше сверла изменить экономический выигрыш на 10 % можно за счет повышения стойкости на 40 % или снижения цены заготовки на 14 %, времени операции сверления на 40 % или времени наладки станка на 7 %.

Фреза — многозубый вращающийся инструмент, режущие зубья которого последовательно один за другим вступают в работу. В процессе металлообработки осуществляется относительное движение обрабатываемой детали и фрезы. При фрезеровании цилиндрических поверхностей движение подачи фрезы поступательное, при фрезеровании поверхностей вращения — вращательное, а при фрезеровании винтовых поверхностей — винтовое. В промышленности распространены различные типы фрез, основные из которых следующие: дисковые, концевые, угловые, цилиндрические, торцевые, дисковые трехсторонние.

Для снижения износа режущих элементов фрезы (зубьев) их оснащают элементами из твердого сплава. Возможен и другой путь — изготовление рабочей части фрезы из более стойкого материала, например, порошковой быстрорежущей стали.

Примером эффективного применения компактной заготовки служит изготовление из нее пил для холодной резки металла. Пилы из литой стали имеют стойкость 12 резов при времени одного реза 20 мин. Число ее переточек 42. Пилы из компактной заготовки имеют стойкость 36 резов при 14 переточках до полного изнашивания. Одновременно в связи с лучшей структурой металла сокращается время заточки пил. В результате оказывается, что экономический выигрыш в процессе резки от применения пил из компактной заготовки достигается за счет снижения удельных затрат на инструмент, на переточку и замену пил. Причем их величина в расчете на один рез оказывается примерно одинаковой.

Характер зависимости экономического выигрыша применения фрез, изготовленных из компактной заготовки, от эксплуатации

онных и нормативно-справочных характеристик аналогичен рассмотренным выше для сверл, поэтому перейдем к обобщенной характеристике различных видов фрез. Экономическое исследование целесообразности изготовления фрез с использованием технологии порошковой металлургии проиллюстрируем на примере дисковой, двусторонней дисковой угловой, резьбовой и шпоночной фрез.

Себестоимость фрез, изготовленных из проката, примерно в 1,5 раза меньше, чем себестоимость аналогичного инструмента из порошковой заготовки. Однако повышение стойкости и снижение коэффициента случайной убыли инструмента сопровождается уменьшением в металлообрабатывающем цехе удельного расхода фрез и суммарного времени переналадки станка, что в свою очередь приводит к снижению удельных затрат на инструмент. При увеличении стойкости фрез из компактной заготовки в 1,1–1,35 раза удельные затраты металлообработки на стоимость инструмента уменьшаются только на 5–25 %, при увеличении стойкости в 1,5–2,2 раза эти затраты уже уменьшаются на 30–40 %. Кроме того, эксплуатационные расходы металлообработки при использовании фрез повышенной стойкости снижаются на 16–54 %, в том числе затраты на установку и наладку на 1–3 %, на переточку на 1,2–40 %, затраты, связанные с работой оборудования, на котором работает инструмент, — на 1–14 %.

Количественная связь эксплуатационных параметров фрез и получаемого экономического выигрыша показана на рис. 37–39. Для рассмотренных опытных партий инструмента оказалось, что их изготовление из порошковой заготовки оказывается экономически выгодным при повышении стойкости не менее, чем на 25 %, либо снижении коэффициента случайных поломок в 10 раз, либо повышении скорости резания в 10 раз, либо снижении цены заготовки из порошка в 3 раза. По отдельным видам инструмента с учетом их массы и условий эксплуатации, а также совместного влияния факторов эти пределы ниже (например, для шпоночной фрезы предельные значения повышения коэффициента случайной убыли инструмента 1,5, скорость резания 2,1 и цены заготовки — 5 раз).

Количественную значимость характеристик фрез можно рассмотреть на основе их экономической эквивалентности или степени влияния на экономический выигрыш. Экономические эквиваленты для характеристик исследованных видов фрез могут быть представлены в следующем виде: 10 денежных единиц в цене инструмента или 0,5–1 ч во времени наладки, или 5–10 % стойкости инструмента, или 1–10 ч во времени на переточку, или 0,2 ч во времени резания. Они показывают, на сколько необходимо улучшить одну из характеристик инструмента при соответствующем ухудшении другой, чтобы себестоимость металлообработки не изменилась. Повышение экономического выигрыша на требуемую величину возможно соответствующим изменением одной из этих характеристик.

Выполненное исследование показало, что изготовление фрез из порошковой пресованной заготовки экономически выгодно при

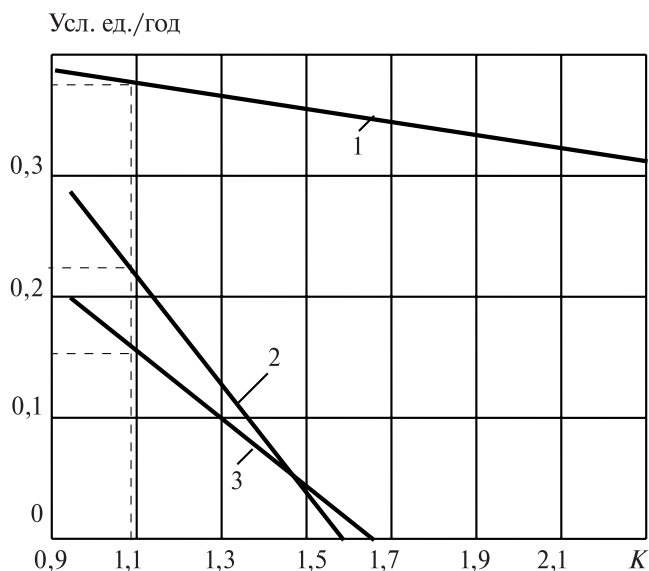


Рис. 37. Зависимость годового экономического выигрыша  $\mathcal{E}$  от коэффициента случайной убыли инструмента  $K$  для фрез: (1 — угловая, 2 — дисковая, 3 — шпоночная)

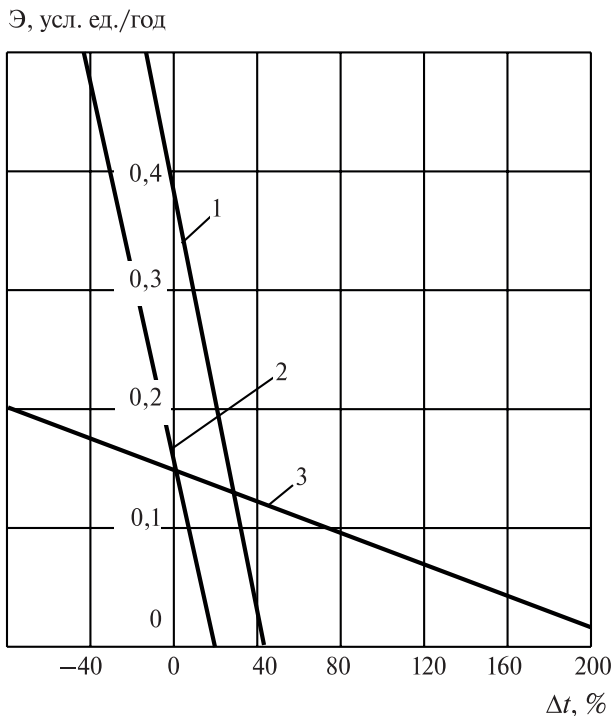


Рис. 38. Зависимость годового экономического выигрыша  $\mathcal{E}$  от изменения времени резания  $\Delta t$  для фрез: (1 — угловая, 2 — дисковая, 3 — шпоночная)

существующих в настоящее время затратах на получение и обработку порошка. В связи с освоением и развитием технологии порошковой металлургии себестоимость изделий из порошка в перспективе будет снижаться, что приведет к расширению сферы их применения.

Метчик — инструмент в виде винта, который снабжен продольными прямыми или винтовыми канавками, образующими режущие кромки для нарезания резьбы в отверстиях. В зависимости от назначения метчики подразделяют на следующие типы: ручные, гачные, машинно-ручные, плашечные и маточные, сборные. Как правило, для изготовления рабочей части метчика используют быстрорежущую сталь, а хвостовика — сталь 45.

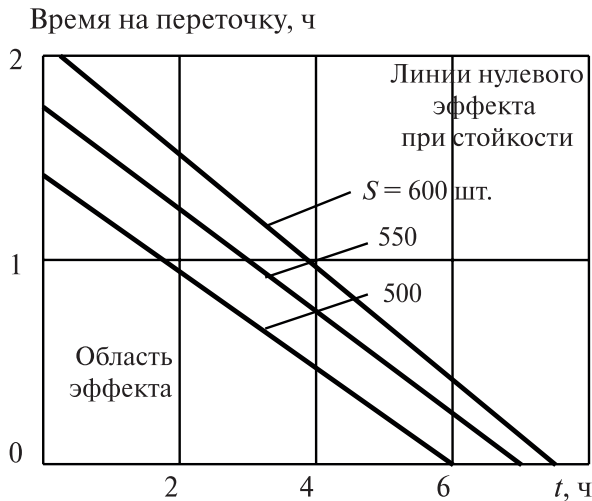


Рис. 39. Номограмма областей эффективности использования фрезы шпоночной из порошка при изменении времени на наладку и переточку инструмента  $t$  для различных значений стойкости  $S$

Наряду с метчиками, рабочая часть которых изготовлена из обычной быстрорежущей стали, выпускаются метчики с улучшенными характеристиками. Заготовка для рабочей части таких метчиков производится из порошковой стали. Метчики из порошковой стали обладают более высокими эксплуатационными качествами и выигрыш, возникающий в сфере применения (металлообработке), компенсирует повышение затраты в сфере производства инструмента.

Затраты в металлообработке при использовании порошкового метчика ниже, чем при работе обычным метчиком. Причиной этого является повышение стойкости инструмента из порошка, причем стойкость инструмента определяют три фактора: физико-механические свойства инструмента, режимы резания и марка обрабатываемого материала. Изменение времени на обработку деталей происходит в результате изменения скорости резания, подачи и частоты вращения.

Использование новых инструментов с улучшенными технологическими характеристиками позволяет интенсифицировать трудовые процессы и снизить тем самым время обработки детали. Сокращение времени резания улучшенным инструментом на 25% приведет к увеличению экономического выигрыша в 2,8 раза. Этот же выигрыш может быть достигнут за счет повышения стойкости метчиков из порошка по сравнению с заданной стойкостью в 1,14 раза (стойкость обычного инструмента остается в обоих случаях постоянной). Изменение стойкости метчика и времени резания обычным инструментом не влияет на характер зависимости экономического выигрыша от этих параметров.

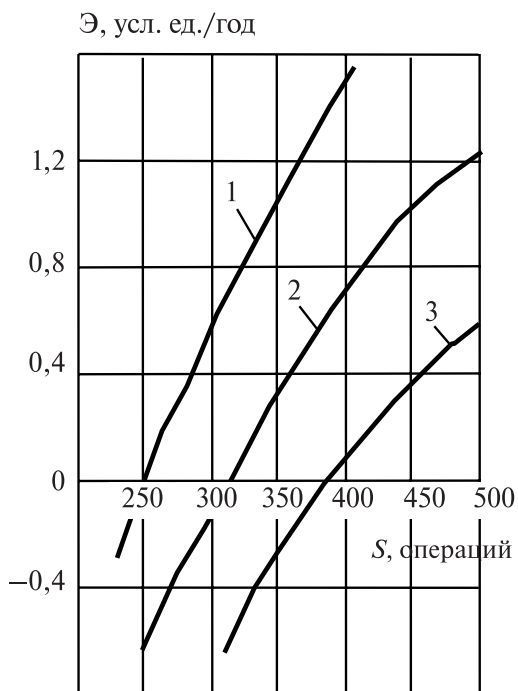


Рис. 40. Зависимость экономического выигрыша  $\mathcal{E}$  от стойкости метчика  $S$  для сталей марок: 40 ХС (1) 20 ХФ (2) Сталь 20 (3)

Использование метчиков для обработки различных материалов существенно сказывается на их стойкости. Работа с труднообрабатываемыми материалами значительно снижает стойкость применяемых инструментов. Так, использование метчиков из порошковой стали будет экономически целесообразно при следующих значениях стойкости для различных обрабатываемых материалов (рис. 40): 260 операций (сталь 40ХС); 330 операций (сталь 20ХФ); 395 операций (сталь 20).

Уменьшение размера метчиков, как и для исследуемых выше инструментов, сопровождается резким уменьшением экономического выигрыша (1 мм увеличения диаметра метчика снижает экономический выигрыш в среднем на 5 %).

Сокращение цены используемого порошка для производства инструментальной заготовки будет способствовать сокращению затрат на производство и применение метчиков из нее. Перечень параметров, влияющих на эффективность применения метчиков, может быть расширен. Характер изменения таких факторов, как коэффициент непредвиденных поломок инструмента, возможности переточенного и восстановленного инструмента, время наладки станка, расходные коэффициенты металла при изготовлении инструмента, снижение шероховатости поверхности получаемого инструмента и многие другие, без сомнения, может быть исследован. Выбранные же в приведенном примере параметры являются основными. Они позволяют увеличить годовой экономический выигрыш от применения метчиков из порошка на 10% за счет снижения стойкости на 20%, цены заготовки на 10 %, времени резания на 15 %.

## **8. ОБЩИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ ПРОЕКТА**

Среди всех участников проекта выделяются четыре основные группы, для которых в той или иной мере может проявиться экономическое влияние разработки и применения проекта:

– инвестор;

- разработчик проекта;
- предприятие — потребитель результатов;
- государство.

В качестве первого показателя оценки проекта может быть принята сумма дисконтированных стоимостных результатов  $R_{\Sigma}$  и затрат  $C_{\Sigma}$ . При этом используется метод сложного процента, учитывающий временную ценность денег при отсутствии риска и инфляции и предположении дискретности времени:

$$R_{\Sigma} = \sum_{t=1}^T (R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) + R_5(t)) \times (1+e)^{-t},$$

$$C_{\Sigma} = \sum_{t=0}^T (C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t) + C'_4(t)) \times (1+e)^{-t},$$

где  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$ ,  $R_3(t)$ ,  $R_4(t)$  — выраженные в текущих ценах результаты в году  $t$ , соответственно для инвестора (индекс 1), разработчика (2), предприятия (3) и государства (4);  $R_5(t)$  — выигрыш в будущем от распространения в других отраслях;  $C_1(t)$ ,  $C_2(t)$ ,  $C_3(t)$ ,  $C_4(t)$  — выраженные в текущих ценах затраты в году  $t$  для соответствующих участников проекта;  $C'_4(t)$  — научные затраты на разработку новой “базы” высокой технологии;  $e$  — неизменная в течение всего жизненного цикла норма дисконтирования без учета риска и инфляции;  $t$  — индекс времени; длительность жизненного цикла равна  $(T + 1)$  лет;  $R_{1-4}(0) = 0$ , так как результаты появятся в первом году эксплуатации, затраты же могут быть сделаны на год раньше.

Если суммарные затраты и результаты приводятся к последнему году жизненного цикла проекта, то расчет проводится по следующим формулам:

$$R_{\Sigma}^T = \sum_{t=1}^T (R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) + R_5(t)) \times (1+e)^{T-t},$$

$$C_{\Sigma}^T = \sum_{t=0}^T (C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t) + C'_4(t)) \times (1+e)^{T-t},$$

В этом случае, если норма дисконтирования изменяется по годам и равна  $e(d)$ , то суммарные затраты и результаты определяются следующим образом:

$$R_{\Sigma(1)} = \sum_{t=1}^T (R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) + R_5(t)) \times \prod_{d=1}^t (1 + e(d))^{-1},$$

$$C_{\Sigma(1)} = \sum_{t=0}^T (C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t) + C'_4(t)) \times \prod_{d=1}^t (1 + e(d))^{-1},$$

$$C(0) = C_1(0) + C_2(0) + C'_4(0).$$

$C_3(0) = 0$ , так как предприятие, внедряющее результаты разработки, обычно не делает никаких затрат на самом начальном этапе. Эти затраты ложатся чаще всего на инвестора и разработчика.

$$R_{\Sigma(1)}^T = \sum_{t=1}^T (R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) + R_5(t)) \times \prod_{d=t+1}^T (1 + e(d)),$$

$$C_{\Sigma(1)}^T = \sum_{t=0}^T (C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t) + C'_4(t)) \times \prod_{d=t+1}^T (1 + e(d)),$$

Для того, чтобы правильно оценить результаты и затраты, связанные с реализацией и использованием проекта, необходимо максимально учесть влияние инфляции. Если темп инфляции обозначить через  $i(t)$ , то при неизменной норме дисконтирования (без риска и инфляции)  $e$ , норма дисконтирования по годам примет вид:

$$e(t) = e + i(t) + e \times i(t).$$

Тогда формула расчета результатов и затрат примет вид:

$$R_{\Sigma(2)} = \sum_{t=1}^T (R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) + R_5(t)) \cdot (1 + e)^{-t} \prod_{d=1}^t (1 + i(d))^{-1},$$

$$C_{\Sigma(2)} = C(0) \sum_{t=0}^T (C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t) + C'_4(t)) \times \\ \times (1 + e)^{-t} \prod_{d=1}^t (1 + i(d))^{-1},$$

В некоторых случаях темп инфляции может быть принят постоянным по всем годам жизненного цикла, т. е.  $i(t) = i$ , соответственно,  $e^t = e + i + i \times e$ . Тогда

$$R_{\Sigma(2)} = \sum_{t=1}^T (R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) + R_5(t))(1+e)^{-t} \cdot (1+i) - t = \\ = \sum_{t=1}^T (R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) + R_5(t))(1+e')^{-t}$$

$$C_{\Sigma(2)} = \sum_{t=0}^T (C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t) + C_4'(t))(1+e)^{-t} \cdot (1+i)^{-t} = \\ \sum_{t=0}^T (C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t) + C_4'(t))(1+e')^{-t},$$

При приведении к последнему году жизненного цикла:

$$R_{\Sigma(2)}^T = \sum_{t=1}^T (R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) + R_5(t)) \times (1+e)^{T-t} \cdot \prod_{d=t+1}^T (1+e(d)),$$

$$C_{\Sigma(2)}^T = \sum_{t=0}^T (C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t) + C_4'(t)) \times (1+e)^{T-t} \cdot \prod_{d=t+1}^T (1+i(d)),$$

Во всех формулах и критериях, приведенных выше и о которых будет сказано позже, одним из ключевых параметров является норма дисконтирования. Эта норма представляет собой альтернативную стоимость капитала. Выбор дисконтной нормы зависит от вида финансирования. Если капитал собственный, то в качестве дисконтной нормы может выступать депозитный процент, выплачиваемый банком, либо другой доход на капитал в случае отказа от проекта. Если капитал заемный, то дисконтная норма определяется как процентная ставка.

В случае, когда капитал смешанный, то дисконтная норма может быть определена как средневзвешенная стоимость капитала (ССК)

$$\text{ССК} = \sum_{i=1}^n e_i S_i,$$

где  $n$  — число видов капитала,  $e_i$  — стоимость  $i$ -го капитала после уплаты налогов,  $S_i$  — доля  $i$ -го капитала в общем капитале.

В качестве частных показателей оценки проекта можно использовать следующие показатели:

- чистая приведенная стоимость;
- внутренняя норма возврата;
- соотношение результатов и затрат;
- соотношение чистой приведенной стоимости и затрат;
- срок возврата инвестиций;
- точка безубыточности.

**Чистая приведенная (текущая, дисконтированная) стоимость** (в некоторых методиках — чистый приведенный доход) представляет собой разность дисконтированных за период жизненного цикла всех оценок получаемых результатов и затрат

$$ZPS = \sum_{t=0}^T (R_1(t) + R_2(t) + R_3(t) + R_4(t) + R_5(t)) - (C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t) + C_4'(t)) \times (1+e)^{T-t},$$

где как и раньше,  $R_i(t)$  и  $C_i(t)$  — приростные результаты и затраты года  $t$ . Для того, чтобы проект был принят, необходимо, чтобы  $ZPS \geq 0$ .

При наличии нескольких альтернативных вариантов проекта выбирается тот, при котором достигается наибольшее значение  $ZPS = \max_j ZPS_j$ , где  $j$  — номер варианта,  $j = 1, \dots, m$ .

**Внутренняя норма возврата** (отдачи, доходности, прибыли, эффективности) — **ВНВ**. Под внутренней нормой возврата обычно понимается такое значение нормы дисконтирования, при которой чистая приведенная стоимость равна нулю ( $ZPS = 0$ ), т. е. ВНВ =  $e$  является корнем уравнения  $ЧПС(e) = 0$ . [63, 106]

Соотношение результатов и затрат (РЗ). Этот критерий определяется по формуле

$$РЗ = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_i R_i(t) \times (1+e)^{-t}}{\sum_{t=1}^T \sum_i C_i(t) \times (1+e)^{-t}},$$

если  $P3 > 1$ , то проект эффективный, он может быть принят для рассмотрения.

Соотношение чистой приведенной стоимости и затрат ( $ZPSS$ ) рассчитывается по соотношению

$$ZPSS = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_i (R_i(t) - C_i(t))(1+e)^{-t}}{\sum_{t=1}^T \sum_i C_i(t) \times (1+e)^{-t}}.$$

Для признания проекта эффективным необходимо, чтобы  $ZPSS \geq 0$ .

**Метод срока возврата инвестиций.** Суть метода заключается в определении периода времени, в течение которого первоначальные инвестиционные затраты компенсируются получаемыми прибылями. При этом определенный срок возврата  $t_{\text{ВВ}}$  сопоставляется с некоторым «стандартом»  $t$ . Для того, чтобы проект был потенциально эффективен, необходимо соблюдение условия  $t_{\text{ВВ}} \leq t$ . Если  $t_{\text{ВВ}} > t$ , то проект должен быть отвергнут.

В нашем простейшем примере, когда инвестиции осуществляются однократно при  $t = 0$ , а доходы и расходы по годам не меняются

$$t_{\text{ВВ}} = \frac{\sum_i K_i}{\sum_{t=1}^T \sum_i (R_i(t) - C_i(t))(1+e)^{-t}} \leq t.$$

В качестве «стандарта»  $t$  может быть принят жизненный цикл проекта  $T$ . При этом  $t_{\text{ВВ}}$  — такое наименьшее значение времени, при котором дисконтированные результаты равны и начинают превышать дисконтированные затраты (рис.2.5). Тогда  $ZPS(t_{\text{ВВ}}) = 0$ , а условие эффективности проекта  $t_{\text{ВВ}} < T$ .

Этот показатель является необходимым, но недостаточным для выбора варианта проекта к реализации.

**Метод определения точки безубыточности.** По этому методу определяются пороговые значения объемов продаж продукции  $V$ , при которых проект остается еще прибыльным, т. е. выполняется условие  $ZPS(V) = 0$ . При этом все затраты разделяются на постоян-

ные  $C_n$  (не зависящие от объема продаж) и переменные  $C_3V$  (пропорциональные выпуску продукции). Если цена за единицу продукции  $\Pi$ , то точка безубыточности определяется по соотношению

$$\Pi V - (C_n + C_3V) = 0,$$

откуда

$$V = \frac{C_n}{\Pi - C_3}.$$

Этот же способ может быть использован при сравнении альтернативных вариантов.

Для варианта 1 точкой безубыточности является объем  $V_1$ , для варианта 2 —  $V_2$ . В точке  $V_0$  варианты равноэффективны. Но при объемах, больших  $V_0$ , вариант 1 становится более выгодным, чем вариант 2. Поэтому учитывая спрос на продукцию, вариант 1 может быть принят к применению.

Новые технологии требуют проработки новых производственных структур (мощность, оборудование, номенклатура продукции, площади и т. п.). В связи с этим возникает необходимость решения задач подбора номенклатуры продукции, определения видов, количества и загрузки оборудования, расчета производственной программы выпуска продукции.

## 9. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Основным направлением научно-технического прогресса в области технологии является переход от механической обработки материалов к использованию движения материи на молекулярном, атомном и субатомном уровнях, благодаря чему изменяется сама структура вещества. Среди множества таких принципиально новых технологий одна из самых перспективных — группа лазерных технологий, позволяющих многократно повысить производительность труда, поднять эффективность использования ресурсов и снизить материалоемкость и энергоемкость продукции, улучшить условия труда, повысить общую культуру производства.

В настоящее время рынок лазерной техники имеет небывалые темпы роста (10 % ежегодно), обогнав даже рынок компьютеров.

Необходимость развития лазерной технологии определяется все более широким распространением в различных отраслях промышленности новых сверхпрочных материалов, трудно обрабатываемых обычными методами и потребностью промышленности в выполнении ряда уникальных операций микрообработки.

Причины быстрого увеличения производства технологических лазеров в развитых странах состоят в следующем:

- лазерная технология позволяет резко снизить применение дорогостоящих материалов при изготовлении изделий прецизионного машиностроения и приборостроения;

- современное быстрое развитие техники требует налаживания быстрого выпуска экспериментальных партий изделий с помощью автоматизированных лазерных технологических комплексов, которые по гибкости перестройки значительно превосходят металлорежущее оборудование;

- современные автоматизированные лазерные технологические комплексы (АЛТК) достигли такого технического уровня, что по надежности они превосходят обычные металлорежущие станки (простой на ремонт и наладку занимают не более 2 ... 5 % времени).

Основные преимущества лазерной технологии по сравнению с другими видами обработки материалов:

- высокие средние и пиковые мощности излучения, большая и широко изменяемая плотность мощности излучения позволяют производить практически все технологические операции, основанные на тепловых процессах с металлическими и неметаллическими материалами;

- кратковременность нагрева материалов и возможность регулирования его временного режима;

- простота управления лучом, безинерционность луча, отсутствие изнашиваемости “инструмента” — луча. Пространственное разделение мест формирования и применения рабочей энергии позволяет свободно компоновать оборудование, быстро перераспределять энергию с одного рабочего места на другое или же на несколько рабочих мест одновременно;

– лазерный луч исключает механический контакт с деталью, что чрезвычайно важно при работе с тонкими и хрупкими изделиями;

– независимость нагрева от механических свойств обрабатываемых материалов, возможность обработки материалов, трудно обрабатываемых традиционными методами (тугоплавких, химически активных, разнородных и пр.), возможность реализации уникальных металлургических процессов;

– возможность обработки деталей в труднодоступных местах, обработка при сложных и прецизионных формах швов, резов;

– упрочнение локальных (по глубине и площади) объемов материала обрабатываемых деталей в местах их износа, получаемая при этом твердость превышает на 15–20 % и более твердость материала после термообработки существующими методами с сохранением исходных свойств материала в остальном объеме;

– получение заданных свойств (механических, химических и др.) поверхностей деталей с помощью лазерного легирования различными элементами;

– возможность полной автоматизации процесса, телевизионного наблюдения технологического процесса, отсутствие рентгеновского излучения, вибраций, электромеханических и других отрицательных воздействий на материал в процессе обработки.

Лазерная технология обладает социальными преимуществами по сравнению с традиционными. К ним относятся: повышение культуры производства; уменьшение затрат ручного труда; экологическая чистота; снижение производственного травматизма; снижение текучести кадров, ввиду улучшения условий труда.

Внедрение технологических лазеров в машиностроении позволяет: значительно повысить качество материалов и изделий, производительность труда; создать поверхности деталей с заданными свойствами; снизить трудоемкость технологических процессов; сэкономить обрабатываемый материал; освоить новые производственные процессы, невозможные без лазерной технологии; улучшить условия труда; повысить культуру производства и сократить долю ручного труда.

Лазерные технологические комплексы (ЛТК), сконструированные с учетом требований максимальной реализации преимуществ

лазерной технологии должны удовлетворить жестким требованиям, обусловленным как потребностями лазерной технологии, так и условиями эксплуатации. Эти требования предусматривают высокое качество лазерного пучка, сводящееся к возможности его фокусировки в пятно размером порядка длины волны излучения; высокую стабильность мощности, модового и спектрального состава, углового положения лазерного пучка; широкий диапазон управления мощностью излучения, временным режимом излучения, его спектральным составом. ЛТК должен обладать высокой энергетической и технической эффективностью, хорошими эксплуатационными и эргономическими показателями.

Лазерная технология имеет особенности, затрудняющие ее быстрое и универсальное промышленное освоение. В первую очередь к ним относится высокая стоимость лазерного технологического оборудования, необходимость разработки и выпуска принципиально новых станков.

Элементами методики экономического анализа процессов лазерной поверхностной обработки являются:

- подбор номенклатуры изделий для процессов лазерной поверхностной обработки;
- определение основных технологических параметров ведения процесса;
- определение показателей экономической эффективности;
- предварительная оценка степени влияния отдельных параметров на экономический выигрыш;
- выявление области эффективного применения лазерной поверхностной обработки.

Процессы лазерной поверхностной обработки следует рассматривать как многопараметрические, зависящие от совокупности конструктивных, технологических, ассортиментных, нормативно-справочных параметров, которые являются исходными данными для экономического исследования.

К конструктивным параметрам относятся характеристики оборудования, которые определяют предельные возможности его функционирования и используются при сравнении различных

моделей однотипного оборудования. Технологические параметры описывают режим работы оборудования при выпуске конкретного вида продукции и являются результатом оптимизации ведения процессов, либо моделирования хода технологического процесса. К ассортиментным параметрам относятся характеристики выпускаемых изделий. В группу организационных параметров входят характеристики режима работы и обслуживания оборудования, графики подачи деталей, инструмента, состав работающих и т. д. К нормативно-справочным параметрам относятся цены материальных и энергетических ресурсов, тарифы оплаты труда, нормы амортизации и т. д.

## 10. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ 3D ТЕХНОЛОГИЙ

Прорывной шаг в развитии порошковой металлургии произошел при практическом использовании 3D технологий. Классификация этих технологий предложена несколькими организациями.

ASTM F2792 (США) классифицирует аддитивные технологии, разделяя их на 7 категорий (табл. 7)<sup>23</sup>:

1. *Material extrusion* — выдавливание материала;
2. *Material Jetting* — разбрызгивание материала, струйные технологии;
3. *Binder jetting* — разбрызгивание связующего;
4. *Sheet lamination* — соединение листовых материалов;
5. *Vat photopolymerization* — фотополимеризация в ванне;
6. *Powder bed fusion* — расплавление материала в заранее сформированном слое;
7. *Directed energy deposition* — прямой подвод энергии непосредственно в место построения.

---

<sup>23</sup> ASTM Standard F2792, Standard terminology for additive manufacturing technologies [Электронный ресурс]. — 2013. — URL: <http://www.astm.org/Standards/F2792.htm>.

**Классификация аддитивных технологий согласно стандарту ASTM F2792**

<b>Группа</b>	<b>Технология</b>	<b>Исходный материал</b>	<b>Источник энергии</b>	<b>Особенности</b>
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Термопластики, керамические суспензии, металлические пасты	Термическая энергия	Невысокая стоимость установок, использование нескольких материалов, ограниченная точность, невысокое качество поверхности
	Contour Crafting			
Material Jetting	Polyjet/Inkjet Printing	Фотополимеры, воск	Термическая энергия/фотоотверждение	Печать из различных материалов, высокое качество поверхности
Binder Jetting	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	Полимерные порошки, керамические порошки, металлические порошки	Термическая энергия	Необходимость пропитки изделий после их построения, широкий выбор материалов, высокая пористость изделий
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Металлические листы, полимерные пленки, керамические ленты	Лазерный луч	Высокое качество поверхности, необходимость удаления остатков материала

Окончание табл. 7

Группа	Технология	Исходный материал	Источник энергии	Особенности
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA)	Фотополимеры, керамики (оксиды Al, Zr, пьезокерамики)	Ультрафиолетовый лазер	Высокая скорость построения, высокая точность изготовления, высокая стоимость исходных материалов
	Selective Laser Sintering (SLS)	Полиамиды, полимеры	Лазерный луч	Высокая точность изготовления, высокая плотность изделий, необходимость использования поддержек
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Selective Laser Melting (SLM) Electron Beam Melting (EBM)	Металлические и керамические порошки	Электронный луч	Возможность ремонта изделий, создание функционально-градиентных изделий, низкое качество поверхности
Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electron Beam Welding (EBW)	Металлические порошки и проволоки	Лазерный луч, электронный луч	

В работе<sup>24</sup> приводится классификация процессов аддитивного производства в зависимости от состояния материала: жидкого, порошкообразного и твердого (табл. 8).

*Жидкостные процессы* включают в себя:

стереолитографию (Stereolithography);

изготовление объектов путем послойной наплавки (Fused Deposition Modeling);

струйную печать (Inkjet Printing).

*Порошковые материалы* используют в таких технологиях, как:

*3D-печать*;

*селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering)*;

*прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering)*;

*селективная лазерная плавка (Selective Laser Melting)*;

*электронно-лучевая плавка (Electron Beam Melting)*;

*прямое нанесение металлов (Direct Metal Deposition)*;

*точное лазерное формование (Laser Engineered Net Shaping)*.

*Твердотельные процессы* включают в себя послойное изготовление объектов из листового материала (Laminated Object Modeling) и произвольное экструзионное формование (Extrusion Free Formation).

Основные отрасли, развивающие внедрение аддитивных технологий: авиаракетостроение, автомобилестроение, космическая техника, энергетическая отрасль, включая атомную промышленность, общее машиностроение, медицина.

В работе<sup>25</sup> отмечается многообразие методов аддитивного производства в зависимости от технологий, материалов, оборудования, программного обеспечения и, конечно, конструкции, массы и габаритов детали, и приводится следующая классификация методов аддитивного производства:

---

<sup>24</sup> Hopkinson N., Hague R., Dickens P. Rapid Manufacturing: an Industrial Revolution for the Digital Age. — Chichester, England : John Wiley, 2006. — 283 p.

<sup>25</sup> Каблов Е. Н. Аддитивные технологии / Е. Н. Каблов // Интеллект&Технологии. — 2015. — № 2 (11) [Электронный ресурс]. URL: <http://viam.ru/news/2519>

**Классификация процессов аддитивного производства  
по состоянию используемого материала**

Состояние материала	Процесс	Материалы
Жидкое	Стереолитография (SL)	Полимеры
	Изготовление объектов путем послойной наплавки (FDM)	
Порошко-образное	Струйная печать (JP)	Полимеры, металлы, керамика
	3D-печать (3DP)	
	Селективное лазерное спекание (SLS)	
	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	
	Селективная лазерная плавка (SLM)	
Твердое	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Металлы
	Прямое нанесение металлов (DMD)	
	Точное лазерное формование (LENS)	
Твердое	Послойное изготовление объектов из листового материала (LOM) — листы	Полимеры, металлы, керамика и композиционные материалы
	Произвольное экструзионное формование (EFF) — проволока	

*экструзионный* (на основе технологии послойного наплавления, по международной классификации *FDM* или *FFF*);

*проволочный* (производство произвольных форм методом электронно-лучевой плавки (*EBF<sub>3</sub> — Electron Beam Freeform Fabrication*));

*порошковый* (с применением технологий лазерного спекания (*DMLS, SLS*); электронно-лучевой плавки (лазерная наплавка (*SLM*); струйной трехмерной печати (*3DP*); применяемые материалы — гипс, пластик, металлические порошки, песчаные смеси); *ламинирование (LOM)*;

*полимеризация* (используемые методы — стереолитография (*SLA*), цифровая светодиодная проекция (*DLP*)).

По способу нанесения материала аддитивные технологии классифицируют на *струйные* и *лазерные* способы.

К *струйному способу* относятся такие технологии, как моделирование методом наплавления (*Fused deposition modeling*) и *Polyjet*.

Американское общество по испытанию материалов (ASTM International) делит технологии струйной трехмерной печати на две категории: *Material*

*jetting* — разбрызгивание материала и *Binder jetting* — разбрызгивание связующего.

В первом случае через сопла подается непосредственно сам строительный материал, который после нанесения отвердевает. Во втором — на тонкий слой гипсового, полимерного или металлического порошка разбрызгивается клеящее вещество. Технология 3DP в своем изначальном виде представляла именно второй способ.

К *лазерному способу* относят: послойное ламинирование (*Laminated object manufacturing*), селективное лазерное плавление (*Selective laser melting*), селективное лазерное спекание (*Selective laser sintering*), директивное лазерное спекание (*DMLS*), лазерную наплавку металла (*Laser metal deposition*) и лазерную стереолитографию (*Laser stereolithography*), изготовление расслоенных продуктов (*LOM*) и др.

Классификация технологий послыонного синтеза, предложенная Pham

Материалы	Одномерный проход	Двухмерный проход	Массив одномерных проходов	Двумерный проход
Жидкий Полимер	SLA (3D Sys)	Двойной луч SLA (3D Sys)	Object	Envisiontech MicroTEC
Дискретные частицы	SLA (3D Sys), LST (EOS), LENS, Phenix, SDM	LST (EOS)	3D-печать	DPS
Расплавленный материал	FDM, Solidscape		TermoJet	
Твердые листовые материалы	Solido PLT (KIRA)			

*Комплексный метод классификации* предложил Pham, использовавший двумерную классификацию (табл. 9)<sup>26,27</sup>.

Одномерный проход относится к способу, с помощью которого слои построены. В первых технологиях использовался один точечный источник для сканирования поверхности основного материала. В последующих системах количество источников с целью повышения производительности, что стало возможным благодаря технологии осаждения капель, например устройства, которое можно встроить в виде одномерного массива разбрызгивающих сопел.

В комплексном методе классификации Pham использовал четыре отдельные классификации материалов<sup>28</sup>:

жидкий полимер;

частицы порошка;

расплавленный материал;

ламинированные листовые материалы.

Аддитивные технологии прямого *изготовления изделий из металлов и сплавов* (табл. 10) разделяют на две большие группы: *Powder Bed Fusion (PBF)* и *Directed Energy Deposition (DED)*<sup>29</sup>.

Процессы плавления порошков на подложке — платформе в сформированном слое (PBF) — были одними из первых коммерциализированных технологий АП, из которых первой на рынок была выпущена технология селективного лазерного спекания (SLS — selective laser sintering), разработанная в университете штата Техас в

---

<sup>26</sup> Pham D. T, Gault R. S. A comparison of rapid prototyping // Int. J. Mach Tools Manuf. — 1998. — Vol. 38 (10–11). — P. 1257–1287

<sup>27</sup> Гибсон Я. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство: [пер. с англ.] / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер; под ред И.В. Шишковского. — М.: Техносфера, 2016. — С. 656

<sup>28</sup> Гибсон Я. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство: [пер. с англ.] / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер; под ред И.В. Шишковского. — М.: Техносфера, 2016. — С. 656

<sup>29</sup> Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // Int. J. Adv. Manuf. Technol. — 2015. — № 81. — P. 465–481

Классификация АП для производства металлических деталей

Классификация	Терминология	Ссылка	Материал
Powder bed fusion	Direct metal laser sintering (DMLS)	[183]	Металлический порошок
	Electron beam melting (EBM)	[94]	
	Selective laser sintering (SLS)	[8]	
	Selective laser melting (SLM)	[116]	
Directed energy deposition	Electron beam freeform fabrication (EBF <sub>3</sub> )	[202]	Металлический порошок, металлический провод
	Laser engineered net shaping (LENS)	[14]	
	Laser consolidation (LC)	[65]	
	Directed light fabrication (DLF)	[138]	
Binder jetting	Wire and arc additive manufacturing (WAAM)	[222]	Металлический порошок
	Powder bed and inkjet 3D printing (3DP)	[215]	
Sheet lamination	Laminated object manufacturing (LOM)	[142]	Металлический слоистый материал
	Ultrasonic consolidation (UC)	[113]	Металлическая фольга

Остине. Все остальные процессы PBF модифицируют этот базовый подход тем или иным способом, чтобы повысить производительность машин, включить в обработку различные материалы и/или избежать патентных совпадений с уже известными методиками АП. Наиболее распространенные источники тепла для технологий PBF — лазеры.

В *DED-технологиях* формирование слоя производится путем подачи строительного материала непосредственно в зону расплавления<sup>30,31</sup>. Основной рабочий орган машин — это сопловой аппарат для коаксиальной наплавки, представляющая собой агрегат, в котором расположены: система фокусировки лазера, система охлаждения, система подачи материала, а также возможны элементы системы управления (датчики, видеокамеры и т. д.). В зависимости от сочетания параметров построения детали коэффициент использования материала может варьироваться от 0,2 до 0,9 (т. е. от 20 до 90 % материала, поступившего через сопловые отверстия системы подачи, фактически формируют деталь<sup>32</sup>).

Подбор оптимальных параметров процесса позволяет получать сплошную структуру материала, а применение систем контроля процесса наплавки снижает вероятность образования дефектов и повышает его точность. В процессе используется множество материалов, таких как сплавы на основе железа, титана, никеля, алюминия и др. В технологии DED обычно используется лазер, мощностью до нескольких киловатт и больший по сравнению с селективным лазерным плавлением диаметр пятна, что обеспечивает высокую скорость изготовления деталей<sup>33</sup>.

---

<sup>30</sup> Beam Machines — laser metallic deposition [Электронный ресурс]. URL: <http://www.beam-machines.fr/uk/en/>

<sup>31</sup> LPW Technology [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lpwtechnology.com>

<sup>32</sup> НАМИ [Электронный ресурс]. URL: <http://nami.ru/upload>

<sup>33</sup> Hashmi S. Comprehensive Materials Processing. — Newnes: Elsevier, 2014. — 5634 p.

## 11. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Современные машиностроительные детали и узлы становятся все сложнее, используемое традиционное оборудование и инструмент дороже, требования к срокам изготовления все выше, коэффициент использования материала все меньше. Свойства отдельных узлов и деталей определяют характеристики машины в целом. Во второй половине 90-х годов 20 века зародилась новая технология — 3D печать — соединение порошковой, лазерной и IT технологий. Она прошла период становления, модернизации, разделения на виды, успешного промышленного применения.

Несмотря на то, что технология 3D печати используются уже 30 лет, реально это технология 21 века. Технология проходит этап активного развития. Она уже принципиально изменила процессы проектирования и конструирования, позволяет облегчить подготовку производства новых изделий, сократить затраты времени, средств, опытное опробывание образцов, макетной оснастки. Сегодня имеется уже множество вариантов технологий послойной печати, имеющих сравнительные преимущества и области применения. Эффективность новой технологии демонстрируют примеры активного применения 3D печати в лабораториях, в индивидуальном пользовании, в творчестве.

Экономические преимущества замены традиционных технологий на аддитивное производство:

- сокращение себестоимости при малых партиях,
- уменьшение размеров необходимых производственных площадей;
- высокая точность размеров изготавливаемых изделий;
- возможность создания изделий со сложной формой;
- индивидуальность изделий;
- резкое снижение (на порядок) времени производственного цикла; снижение сроков и стоимости подготовки производства;
- исключение инструментального обеспечения;
- повышение коэффициента использования материалов.

Экономические недостатки аддитивных технологий:

послойное формирование детали, что влечет анизотропность свойств;

ограниченный набор используемых материалов;

невысокие точность изготовления и качество поверхности деталей;

высокие капитальные вложения;

высокая стоимость материалов;

отличия в геометрии и свойствах между «идентичными» деталями, изготовленными на разных установках;

закрытая архитектура большинства используемых установок.

Технологии позволяют применять новые высокоэффективные материалы, новые методы управления и таким образом обуславливают новое функциональное содержание продукта.

Применение аддитивных технологий совместно с технологиями компьютерного инжиниринга позволяет оптимизировать: массу, жесткость, прочность, вибрационные характеристики, долговечность конструкции. При этом сокращается время проектирования, изготовления и вывода продукции, исключается инструментальная оснастка, сокращается число стадий технологического процесса.

Для промышленности принципиальный прогресс связывается с развитием технологии прямого металлического лазерного спекания, использующей практически любой металлический сплав в виде порошка. Это наиболее эффективный технологический процесс большей производительности, большей технологической гибкости, но более сложный в организации и управлении. Технология активно совершенствуется, и одна из ее разновидностей гетерофазная технология прямого лазерного спекания отличается условиями спекания, при которых частицы сплава не полностью плавятся. Изделия, получаемые по этой технологии прочнее литых, что объясняется малым размером зерен, образующихся в результате быстрого охлаждения, при этом зарождающиеся кристаллы, соприкасаясь друг с другом, формируют мелкозернистую структуру. Подобная технология активно разрабатывается в Германии, Китае, России. Области применения: космонавтика, авиастроение, автомобилестроение, машиностроение, силовые установки, медицина.

3D печать занимает особое место в отраслевой структуре экономики страны. Ее нельзя рассматривать как разновидность металлургии или машиностроения, так как она включает последовательное осуществление в едином цикле операций получения порошка и формирования его в изделие.

Развитие 3D печати обусловило прогрессивные сдвиги в промышленном производстве за счет создания, в первую очередь, новых материалов, а также существенного повышения эксплуатационных свойств деталей и инструмента, перехода на новые более производительные и менее металлоемкие технологические процессы.

Возможность получения готовых изделий спеканием порошка в процессе 3D печати позволяет исключить большое число операций механической обработки, для которых характерны значительные трудозатраты и большие отходы металла.

Технологии, использующие непосредственную подачу исходного материала в область расплава заготовки, применяются как для создания новых изделий, так и для ремонта уже существующих. В отличие от технологий, предусматривающих выращивание изделия в толще порошка, такие технологии обладают большей производительностью, позволяют получать функционально-градиентные изделия (изделия из нескольких материалов либо с плавным переходом), но имеют ограничения при изготовлении тонких стенок и сложности геометрии изделий. Также качество поверхности у технологий с непосредственной подачей материала оказывается ниже (табл. 11).

В технологической основе сложившихся процессов получения металлоизделий и порошковой металлургии лежат различные принципы. Металлургическая и машиностроительная технологии ориентированы на деформацию металла в пределах пластического течения на стадиях металлургии и механического резания в металлообработке. Порошковая металлургия базируется на «первоначальном разрыве связей» частиц, а затем восстановлении этих связей при задании внешней формы изделия. Сопоставление этих принципиально различных принципов требует анализа работы

деформации, которая зависит от температуры тела, химического состава материала, внешних магнитных и электрических полей, размера зерна, кристаллической структуры и ряда других факторов. Наряду с технологической предпочтительностью порошковая металлургия 3D печати обеспечивает более высокую стабильность структуры и изотропность свойств изделий. В результате детали и инструмент, полученные из порошка имеют лучшие эксплуатационные показатели. Объясняется это тем, что конструктивная прочность изделий определяется внутренними дефектами. Мельчайшие частицы порошка таких дефектов практически не имеют, и их соединение прессованием и спеканием позволяет подойти к теоретически значениям прочности изделий. Перенос порошка в газовой струе, плавление частиц лазерным лучом, реализация тепловых процессов в зоне роста зерна, кристаллизация двухфазной смеси, формирование микроструктуры изделия позволяют получать изделия с уникальными свойствами. Размер рабочей зоны реализуемый сегодня достигает  $2,5 \times 1,5 \times 1$  м.

Детали выпускают в виде готовых конструкций и изделий, требующих незначительной механической обработки. Применение таких деталей повышает надежность и долговечность конструкций и машин, снижает расходы на их эксплуатацию. Области применения: производство опытных образцов, мелкосерийное производство, медицинские имплантаты, индивидуальные изделия и др.

Критерии, определяющие выбор варианта технологии, масштаб установки 3D печати: размер рабочей зоны, достижимая толщина слоя, точность позиционирования платформы, точность позиционирования системы формообразования, производительность оборудования, требуемая точность размеров с учетом усадки, шероховатость поверхность изделия, свойства получаемого изделия, возможности по форме поверхности изделия (переходы, наплывы, углы, выривание толщины и др.), степень автоматизации процесса, необходимость финишной обработки, требуемая производственная территория, требуемое энергообеспечение.

Сравнительные характеристики технологий<sup>34</sup>

Характеристика Процесса	PBF	DED
Зона построения	Ограничена	Большая и изменяемая
Размер луча	0,05–0,1 мм	2–4 мм
Толщина слоя	100–100 мкм	500–1000 мкм
Скорость построения	Невысокая, 1–5 см <sup>3</sup> /ч	Высокая, 16–320 см <sup>3</sup> /ч
Поверхность Построения	Хорошая, шероховатость: $R_a=5-12$ мкм, $R_z=20-40$ мкм	Грубая, шероховатость: $R_a=20-50$ мкм, $R_z=150-300$ мкм, в зависимости от размера луча
Остаточные Напряжения	Высокие	Высокие
Термическая Обработка	Термическая обработка для снятия напряжений, горячее изостатическое прессование	Термическая обработка для снятия напряжений, горячее изостатическое прессование
Химический состав	Незначительное выгорание элементов	Незначительное выгорание элементов
Возможности Построения	Возможность построения со сложной геометрией с очень высоким разрешением. Возможность построения полых каналов	Относительно простая геометрия с небольшим разрешением. Ограничения при построении полых каналов

Ремонт / восстановление металла	Возможно только в ограниченных случаях (необходима горизонтальная поверхность)	Способность добавлять металл на любые поверхности
Добавление металла на имеющиеся детали (наплавка)	Ограничено	Возможно. В зависимости от размеров возможна внутренняя наплавка
Построение функционально-градиентных Материалов	Ограничено	Возможно
Мелкодисперсная структура, высокие механические свойства	Да	Да
<i>In-situ</i> синтез спла- ВОВ	Да	Да

<sup>34</sup> Santos E. C. et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming // Int. J. Mach. Tools Manuf. — 2006. — Vol. 46, № 12—13. — P. 1459—1468

Особенно выгодно применение технологии прямого лазерного выращивания в случае сложных изделий, когда требуется многоэтапное проектирование, конструирование, создание демонстрационных образцов, корректировку проекта, изготовление прессформ, штампов, оснастки для серийного производства. В этом случае меняется сама конструкция, методы ее проектирования. Прогрессивность новой технологии доказана примерами изготовления ключевых элементов конструкции космических аппаратов, самолетов, ракетных двигателей, энергетических машин. Прочные и сложные детали для космических аппаратов с минимальными затратами производит Space X

Прямое послойное наложение порошкового материала в луче лазера при изготовлении конструкции отличает:

- непрерывность процесса;
- меньший масштаб производственных площадей;
- высокая скорость, до 50 мм<sup>3</sup> в сек. (малое время изготовления);
- большая площадь печати;
- возможность использования новых материалов;
- возможность получения деталей с изменяемыми свойствами;
- возможность сочетания различных сплавов в одной детали (можно непрерывно переходить от одного сплава к другому, кардинально меняя свойства конструкции). Разные части конструкции могут обладать принципиально разными характеристиками, но конструкция в целом будет сохранять прочность;
- высокая степень использования материала;
- высокое разрешение;
- надежность;
- возможность использования технологии непосредственно у потребителя (оперативное превращение идеи в конструкцию);
- переходом, используя технологию САПР, к изготовлению детали, не делая чертежей.

Прямое лазерное выращивание отличается способностью создавать сложные формы, которые невозможно создать с помощью стандартных технологий (возможность создавать наиболее тонкие конструкции, способные переносить большие и длительные нагрузки).

ки, возможность создавать бионические конструкции). Изготавливаемая конструкция в целом повышает прочность и снижаются затраты на изготовление.

Компания Aerojet Rocketdyne создала двигатель, состоящий только из трех частей (инжектор и узел обтекателя; камера сгорания; участок горла воздухозаборника и сопла). Создание двигателя с помощью новой технологии продемонстрировала принципиальное изменение процесса изготовления конструкции, сократив время на проектирования и изготовления с одного года до 4 месяцев, снизив стоимость на 65 %.

Важно отметить, что модификация конструкции узлов обеспечивает не только экономию в процессе изготовления узлов, получаемая интегральная конструкция, например в виде элементов ракетных двигателей и космических аппаратов меньшего веса, дает экономию на затратах космического запуска полезной нагрузки, т. е. эффект проявляется в сфере применения изделия.

Крупнейшие авиастроители General Electric и Snecma, создавая новый двигатель, большинство компонентов планируют изготавливать с помощью 3d печати (повышается эффективность двигателя, уменьшаются (до ликвидации) выбросы оксидов азота). Фирма Mercedes-Benz, используя технологию стереолитографии при разработке двигателя M-111, сократила сроки подготовки производства в 3 раза, снизила затраты на 80 %. Компания Pratt and Whitney, разрабатывая новый двигатель для Airbus A320, за счет использования новой технологии планирует снижение расхода топлива на 15 %.

Затраты на создание прототипа снижаются в десятки раз, а время — в разы.

### **Методика оценки**

#### *Прямой экономический эффект*

Технология 3D печати при изготовлении конкретной конструкции оценивается сравнением цены конструкции:

$$Ц = (M + T)(1 + R), T = H \times ц, M = m(1 + k)s,$$

где  $M$  — затраты на материалы;  $T$  — затраты на изготовление;  $H$  — нормативная трудоемкость;  $ц$  — цена одного часа работы

оборудования;  $m$  — масса готовой конструкции;  $k$  — коэффициент выхода годного при технологическом процессе;  $s$  — цена материала;  $R$  — рентабельность производства.

Технология 3D печати отличается большими значениями  $c$  и  $s$  но меньшими значениями  $H$  и  $k$ .

Привлекательность использования технологии 3D печати оценивается разницей:

$$p = \Pi_0 - \Pi_1$$

где  $\Pi_0$  — цена изделия при 3D печати,  $\Pi_1$  — цена изделия при традиционной технологии изготовления.

Для станка 3D печати в целом оценка привлекательности равняется

$$P = \sum_i p_i n_i - V \geq 0, \quad t = V/P \leq t_0$$

где  $p_i$  — привлекательность  $i$ -го изделия;  $n_i$  — количество изготавливаемых  $i$ -х изделий,  $V$  — цена станка;  $t$  — время окупаемости капитальных вложений,  $t_0$  — допустимое время окупаемости капитальных вложений.

#### Примеры сравнения

Показатель	Литье, сварка	Лазерное выращивание
Расход материала, кг	2693,8	200
Коэффициент исп. материала	0,07	0,94
Цена материала, долл./кг	1,5	500
Трудоемкость, нормо-часы	3320	120
Цена нормо-часа, долл.	35	350
Количество деталей в узле, шт.	113	1
Себестоимость, тыс. долл. за узел	160	110

Цена порошка простых сталей от 2500 руб./кг, нержавеющей сталей от 4000 руб./кг, супер жаропрочные стали — 25000–35000 руб./кг, титановые сплавы — 18000–36000 руб./кг. Цена оборудования — от 200 до 700 тыс. долл. Загрузка машины 15–20 час. в сутки. Себестоимость изготовления одной детали, без учета стоимости материала, 500–800 долл.

*Полный экономический эффект*

В полном экономическом эффекте прямой экономический эффект дополняется выигрышем в сфере применения изделия:

$$P = \sum_i p_i n_i + F_1 + F_2 - V \geq 0, \quad t = V/P \leq t_0,$$

где  $F_1$  — выигрыш от сокращения сроков проектирования и изготовления;  $F_2$  — выигрыш при использовании изделия в готовой конструкции за счет снижения массы, улучшения показателей готовой конструкции (повышение скорости, сокращение расхода топлива, повышение температуры и т. д.). Значение  $F_1$  сопоставимо с величиной прямого эффекта, а значение  $F_2$  многократно превышает прямой эффект.

Например, подпорная конструкция, используемая в самолете Airbus A350, была создана по аддитивной технологии компании Concept Laser GmbH, что снизило ее массу на 30 %, исключило 75 % возвратных металлических отходов, ускорило процесс изготовления. Снижение массы самолета это экономия на топливе в процессе полета либо повышение массы полезного груза (доходности полета).

В настоящее время развитие гетерофазной лазерной технологии прямого спекания направлено на изучение влияния параметров процесса на свойства различных сплавов, расширение номенклатуры получаемых изделий, создание станков различной мощности.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Предложена классификация продукции порошковой металлургии, позволяющая выявить основные области применения этого нового вида материала. При этом используется несколько разнородных уровней детализации.

2. Предложены принципы экономического анализа технологических решений производства изделий из порошков, включающий анализ технической, организационной и экономической целесообразности применения средств и способов производства.

3. Разработанная методика экономического анализа вариантов производства и применения изделий из порошков обеспечивает детализированный по уровням информированности расчет себестоимости, капитальных вложений и экономического выигрыша в зависимости от полноты необходимых данных, характеризующих изделие, технологический процесс, используемое оборудование, экономико-организационную ситуацию производства изделий и области применения порошковых деталей.

4. Исследована экономическая эффективность получения порошков различными способами: распылением, восстановлением, дроблением. Выявлены особенности каждого процесса. Получены количественные экономические оценки различных направлений улучшения процессов и возможные перспективные изменения.

5. Исследована экономическая эффективность методов получения заготовок из порошков.

6. Анализ экономической эффективности производства и применения деталей общемашиностроительного назначения позволил определить возможности замены метода металлообработки на порошковую металлургию, дать количественные оценки использования показателей экономической эффектив-

ности этих процессов в перспективе и установить степень влияния изменения технологических режимов на эффективность этих процессов.

7. Проведено экономическое исследование целесообразности применения инструмента из порошка. В качестве основной характеристики принят экономический выигрыш, получаемый в металлообработке.

8. Для экономического анализа вариантов интервальных оценок экономических показателей при различной степени неопределенности исходной информации выделены уровни информированности об исходных данных по детали, технологии производства (состав операций технологической схемы и используемое оборудование), экономико-организационной ситуации и областях применения порошковых изделий. Результатом анализа на данном этапе явилось построение «конусов» экономических показателей в зависимости от неопределенности исходной информации.

9. Предложены графики и номограммы областей экономически допустимых значений отдельных параметров технологических процессов и нормативно-справочных величин, оценивающих технологические процессы получения и применения продукции порошковой металлургии. Использование этих графиков и номограмм позволяет определить значения экономического выигрыша.

*Глухов Владимир Викторович  
Некрасова Татьяна Петровна*

# **ЭКОНОМИКА ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Компьютерная верстка *Н. В. Стасеевой*  
Дизайн обложки *О. В. Костюшенко*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

---

Подписано в печать 26.07.2017. Формат 60×84/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 9,25. Тираж 100 экз. Заказ 15739б.

---

Отпечатано с оригинал-макета  
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14

