

Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ.
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА
НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Учебное пособие



Воронеж 2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический
университет»

Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ.
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА
НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Учебное пособие

Воронеж 2020

УДК 621.9.06-529
ББК 34.4я7
С914

Рецензенты:

*кафедра производства, ремонта и эксплуатации машин
Воронежского государственного лесотехнического университета
им. Г. Ф. Морозова (зав. кафедрой д-р техн. наук, доц. В. А. Иванников);
д-р техн. наук, проф. А. В. Кузовкин*

Сухочев, Г. А.

Технология машиностроения. Аддитивные технологии в подготовке производства наукоемких изделий: учебное пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (2,3 Мб) / Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7731-0872-6

В пособии представлены основные сведения по использованию аддитивных технологий в подготовке производства наукоемких изделий машиностроения.

Издание предназначено для студентов направлений 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (профиль «Технология машиностроения»), 15.04.01 «Машиностроение» (программа магистерской подготовки «Современные технологии производства в машиностроении») при изучении дисциплины «Технология машиностроения», специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» при изучении дисциплины «Технология изготовления деталей и сборка ЖРД».

Табл. 1. Ил. 44. Библиогр.: 7 назв.

**УДК 621.9.06-529
ББК 34.5 (я7)**

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ISBN 978-5-7731-0872-6

© Сухочев Г. А., Коденцев С. Н., 2020
© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2020

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху инновационной экономики время, затраченное на производство товара, является важнейшим фактором успеха или неуспеха бизнеса. Даже качественно произведенный товар может оказаться невостребованным, если рынок к моменту выхода новой продукции уже насыщен подобными товарами компаний-конкурентов. Поэтому все больше направлений промышленности активно осваивают АF-технологии. Все чаще их используют производственные, научно-исследовательские организации, архитектурные и конструкторские бюро, дизайн-студии и просто частные лица.

Во многих колледжах и университетах аддитивные машины, или, как их часто называют, 3D-принтеры являются неотъемлемой частью учебного процесса для профессионального обучения инженерным специальностям.

Существует множество технологий, которые можно назвать аддитивными, объединяет их одно: построение модели происходит путем добавления материала (от англ. add – «добавлять») в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путем удаления "лишнего" материала.

При создании наукоемкого изделия в современных рыночных условиях особенно актуальны задачи, которые обеспечивают максимально возможное снижение затрат труда, материалов и энергии на всех этапах жизненного цикла изделий, включая обслуживание и ремонт у потребителя.

Успешное сочетание этих задач зависит от делового творческого содружества создателей новой техники - конструкторов и технологов - и их взаимодействия в части ускоренной подготовки производства с использованием передовых аддитивных АF-технологий.

1. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

1.1. Основные понятия и терминология

Additive Fabrication (AF) или Additive Manufacturing (AM) – принятые в англоязычной технической лексике термины, обозначающие аддитивный, т. е. «добавлением», метод получения изделия (в противоположность традиционным методам механообработки путем «вычитания» материала из массива заготовки). Они употребляются наряду со словосочетанием Rapid Prototyping (или RP-технологии) – Быстрое Прототипирование, но имеют более общее значение, точнее отражающее современное положение. Можно сказать, что Rapid Prototyping в современном понимании является частью AF-технологий, «отвечающей» за собственно прототипирование методами послойного синтеза.

Вопрос терминологии отдельно рассматривался в рамках деятельности организации ASTM International (American Society for Testing and Materials), которая занимается разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг. ASTM (в своем стандарте ASTM F2792.1549323-1) так определяет аддитивные технологии: «The process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to AOn-BGМаBJ_C) manufacturing technologies».

По-русски это можно представить, как: «Процесс объединения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от традиционных «вычитающих» (удаляющих материал с заготовки) производственных технологий».

Под «вычитающими» технологиями понимается механообработка - удаление («вычитание») материала из массива

ва заготовки. Таким образом, сообщество инженеров вынуждено было прибегнуть к антониму - противоположному понятию (subtractive) «вычитание», чтобы определить новое понятие (additive) «добавление», т. е. в самом определении аддитивные технологии трактуются от противного, как противоположность технологиям механообработки. Но не всякие технологии соединения материала, а только те, которые создают объект по данным 3D-модели или из CAD-данных, т. е. на основе трехмерной компьютерной модели. Это второе ключевое слово - CAD. Третье ключевое слово здесь - «послойно».

Рекомендованы два основных термина - Additive Fabrication (AF), и Additive Manufacturing (AM), а также «легитимные» синонимы - additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing и freeform fabrication. Все они в русскоязычном варианте могут быть корректно переведены как «аддитивные технологии». Их также можно называть технологиями послойного синтеза. Тем не менее в интернет-сообществе, в образовательном процессе, в популярной научно-технической литературе и разговорной речи профессионалов можно услышать и прочитать: «выращивание», «3D-печать», «3D-принтер», «3D-принтинг». Де-факто эти термины узаконили себя без санкции ASTM, и их также следует принять в качестве легальных синонимов.

Термин Rapid Prototyping или Быстрое прототипирование не рекомендован, как утративший смысл современных аддитивных технологий. Прототипирование - это лишь часть, и теперь уже не доминирующая, аддитивных технологий. AF- или AM-технологии охватывают все области синтеза изделий, будь то прототип, опытный образец или серийное изделие.

1.2. Классификация аддитивных технологий

Различные авторы подразделяют их:

– по применяемым строительным или модельным материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т. д.);

– по наличию или отсутствию лазера;

– по методам подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т. д.);

– по методам формирования слоя.

Последнее, пожалуй, единственное, что принципиально отличает два вида аддитивных технологий.

Первый вид: сначала формируют слой, например, насыпают на рабочую платформу дозу порошкового материала и разравнивают порошок с помощью ролика или «ножа», создавая таким образом ровный слой материала определенной толщины; затем выборочно (селективно) обрабатывают порошок в сформированном слое лазером или иным способом, скрепляя частички порошка (сплавляя или склеивая) в соответствии с текущим сечением исходной САД-модели.

Эта технология в англоязычной традиции называется «Bed Deposition», т. е. предполагается, что есть некая платформа -Bed (англ. - постель), на которой сначала формируют слой, а затем в этом слое выборочно отверждают строительный материал (рис. 1.1). Положение плоскости построения неизменно.

При этом часть строительного материала (в данном случае - порошка) остается в созданном слое нетронутой. Этой технологии достаточно точно соответствует термин «селективный синтез» или «селективное лазерное спекание» (по-английски SLS - Selective Laser Sintering), если «отвер-

ждающим» инструментом является лазер, который здесь, в отличие от лазерной стереолитографии (SLA-технологии), является источником тепла, а не ультрафиолетового излучения.

Второй вид аддитивных технологий - «Direct Deposition», по-русски не очень точно, но более-менее понятно, можно перевести, как «прямое или непосредственное осаждение (материала)», т. е. непосредственно в точку, куда подводится энергия и где происходит в данный момент построение фрагмента детали (рис. 1.2).

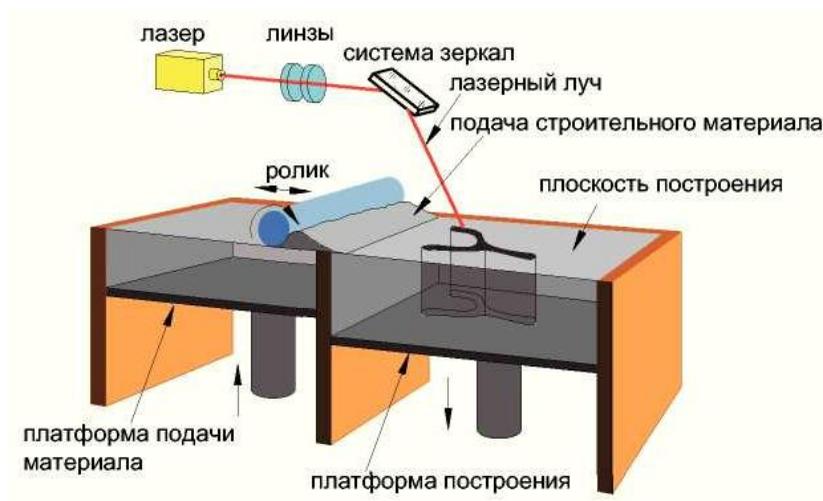


Рис. 1.1. Bed Deposition

Иными словами, в отличие от первого вида, здесь не формируется слой строительного материала, а материал подается в конкретное место, куда в данный момент времени

подводится энергия и где идет процесс формирования детали. Подобно тому, как сварщик вводит материал (электрода) в то место, где за счет электрической дуги формируется зона расплава.

Кроме упомянутых SLS-технологий и SLA-технологий, к первому виду можно отнести такие известные технологии, как:

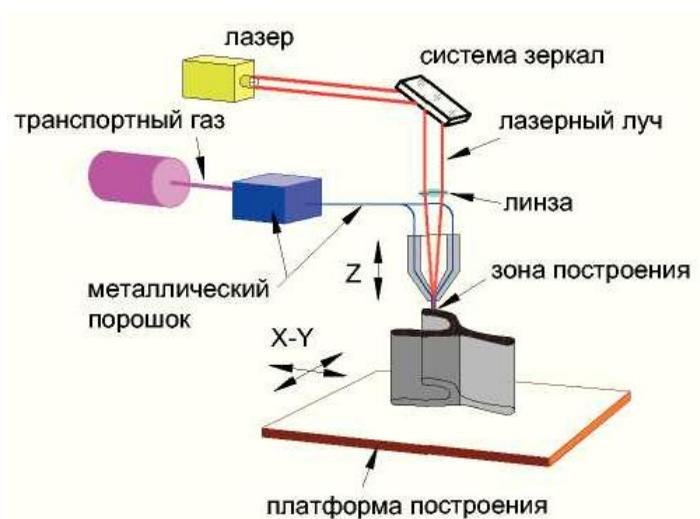


Рис. 1.2. Direct Deposition

- SLM - Selective Laser Melting (компания SLM Solutions, Германия);
- DMLS - Direct metal laser sintering (EOS, Германия);
- EBM - Electron Beam Melting (Arcam, Швеция);
- LaserCusing (Concept Laser, Германия);
- SPLS - Solid Phase Laser Sintering (Phenix Systems,

Франция);

– Ink-Jet или Binder jetting (ExOne, 3D Systems, США) и ряд других.

Ко второму виду можно отнести следующие технологии:

- DMD - Direct Metal Deposition (компания POM, США);

- LENS - Laser Engineered Net Shape (Optomec, США);

– DM - Direct Manufacturing (Sciaky, США);

– MJS - Multiphase Jet Solidification (Fraunhofer IFAM, Германия; FDM, США) и др.

ASTM несколько раз возвращалась к вопросу терминологии, определений и классификации и в последней, 2012 года версии, классифицирует аддитивные технологии следующим образом, разделяя их на 7 категорий:

1. Material extrusion - «выдавливание материала»

2. Material Jetting - «разбрызгивание материала» или «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»;

К первой категории относится, например, вышеуказанная технологий *MJS*, в соответствии с которой в место построения модели через подогреваемый экструдер выдавливается пастообразный строительный материал - смесь металлического порошка и связующего-пластификатора. Построенную таким образом грин-модель («green» - в смысле

«зеленая», не зрелая, сырая) помещают в печь для удаления связующего и дальнейшего спекания, как это делается в традиционных МИМ-технологиях (*Metal Injection Molding*).

Примером следующей технологии может быть технология *Polyjet*, согласно которой модельный материал - обычно фотополимер или воск - подается в зону построения через многоструйную головку. В технической литературе эту технологию иногда именуют как *Multi jetting Material*.

К третьей категории относятся также струйные технологии или Ink-Jet-технологии, где в отличие от технологии *Material jetting*, в зону построения впрыскивается не модельный материал, а связующий реагент (например, технология *ExOne*). К четвертой категории относят технологии, предполагающие использование в качестве строительного материала листового материала в виде полимерной пленки, металлической фольги, листов бумаги и т. д.

Примером, здесь может быть технология *JAM (Ultra-sonic additive manufacturing, Fabrisonic)*, в соответствии с которой тонкие металлические пластины сваривают с помощью ультразвука и затем «лишний» металл удаляют фрезерованием. Это, конечно, не вполне аддитивная технология, скорее, комбинация аддитивной и «вычитающей» технологии.

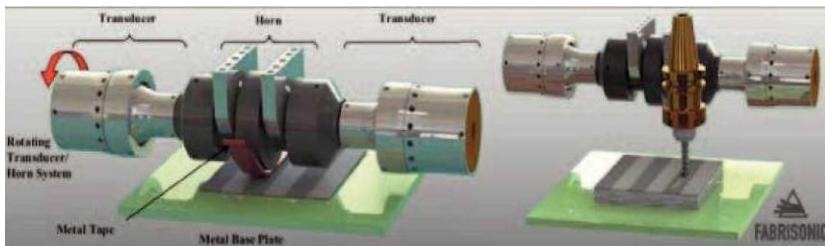


Рис. 1.3. JAM -технология

К пятой категории относят технологии, предполагающие использование жидких модельных материалов - фотополимерных смол, в частности SLA-технология (3D Systems) и DLP-технология (Digital Light Procession, Envisiontec). Это не «металлические» технологии, и в данной работе они не рассматриваются.

В шестую категорию входит многочисленная группа SLS-технологий, в которых применяется лазер в качестве источника тепла, а также ряд других, не лазерных технологий, например, Arcam, где используется электронный луч, или SHS (Selective Heat Sintering (Blueprinter)), в которой источником тепла являются ТЭНы.

В последнюю, седьмую категорию входят технологии, согласно которым строительный материал и энергия для его сплавления подводятся одновременно в место построения изделия. Эти технологии предполагают применение машин, рабочий орган которых - головка, оснащена системами подвода строительного материала и энергии, обычно в виде сфокусированного лазерного излучения (Optomec, POM) или электронного луча (Sciaky). В ряде случаев головку устанавливают на роботизированной «руке».

1.3. Аддитивные технологии и возможная экономия материала

Сокращая длительность периодов технологической подготовки производства (ТПП), традиционной для обычных заводов, аддитивное производство позволяет изготавливать вещи, которые ранее считались слишком сложными для рентабельного производства. Сначала это было вызвано эстетическими соображениями *технического дизайна*, но инженеры ищут и практическое применение.

Например, жидкости более эффективно протекают через каналы круглой формы, чем через угловатые, но очень

сложно проделать такие каналы внутри твёрдой металлической конструкции обычными способами, в то время как 3D-принтер может сделать это без затруднений.

Так, британская фирма, предлагающая услуги аддитивного производства, распечатала коробку передач для гоночной машины со сглаженными внутренними каналами для масла гидравлической системы, вместо того, чтобы пробурить их под прямым углом. Эта коробка передач не только позволяет быстрее менять передачу, она ещё и до 30 % прочнее. Реактивный истребитель по тем же причинам может содержать ряд напечатанных деталей, например, воздуховоды.

Меньший вес тоже входит в число достоинств распечатанных на 3D-принтере деталей. При создании объектов «*слой за слоем*» становится возможным использовать ровно столько материала, сколько требуется для производства собственно детали.

Производство же на обычном заводе требует добавления выступов и подставок, чтобы деталь можно было обработать, фрезеровать и формовать на станке, а также дать предусмотреть поверхность для частей, которые должны быть прикручены или приварены друг к другу. 3D-принтер, скорее всего, распечатает такое изделие как готовую деталь, которая не будет требовать сборки. Он в перспективе сможет изготовить механические объекты с движущимися частями за один проход. Это обещает большую экономию на материалах. В аэрокосмической промышленности металлические детали зачастую изготавливают на станке из сплошного слитка дорогого высокоочищенного титана. Это может означать, что 90 % материала срезаются, а стружка бесполезна при производстве самолётов.

Тем не менее титановый порошок может использоваться для изготовления таких вещей, как кронштейны для

фюзеляжей самолётов или детали ракетного двигателя. Они могут быть такими же прочными, как и деталь, изготовленная на станке, но для изготовления потребуется лишь 10 % сырья, согласно исследователям из EADS, Европейского аэрокосмического консорциума, являющегося материнской компанией Airbus.

1.4. Новые возможности для технического дизайна

Способность изготавливать весьма сложные конструкции с помощью мощного программного обеспечения и обращать их в реальные объекты с помощью 3D-печати формирует новый язык дизайна и конструирования. Предметы, распечатанные на 3D-принтере, часто имеют органический, естественный вид. «Природа создала немало очень эффективных конструкций, и подражание им - хорошая идея», - утверждают в бельгийской компании, использующей аддитивное производство для изготовления ряда продуктов, включая медицинские устройства.

При внедрении тончайшей решётчатой внутренней структуры живой кости в металлический имплантат он может быть изготовлен более лёгким, чем будучи изготовлен на станке, не теряя при этом ни грана в прочности, проще соединяясь с костями самого пациента, и может быть изготовлен в точности для нужд конкретного пациента. Так хирурги из Нидерландов распечатали новую титановую челюсть для женщины, которая страдала от хронической костной инфекции.

Широко развернуты работы по экспресс-оценке эргономики, визуализации, дизайну будущих изделий. Становится возможным оценивать их функциональные параметры: качество сборки, характеристики, практичность использования, габариты.

Кастомизация продуктов потребления, то есть инди-

видуальный подход к дизайну практически любого объекта становится возможным при помощи аддитивных технологий. Красочной иллюстрацией служит случай с аспирантом Массачусетского Технологического Университета (MIT) Питером Шмиттом, он распечатал дедушкины часы, снял их с 3d-принтера, повесил на стену, завел и они заработали.

Ведется подготовка к созданию методами быстрого прототипирования габаритно-весовых и модельных макетов для дальнейшего их применения в производстве. К тому же, это многомерное моделирование и макетирование позволяет более наглядно обрабатывать дизайнерские решения и проекты

1.5. Расширение пользовательской доступности аддитивных технологий

Многие компании интересуются, каким образом аддитивное производство повлияет на их деятельность. Некоторые воспринимают эту технологию очень серьезно; GE, например, изучает, как она сможет использовать 3D-печать во всех видах своей деятельности. В разработке у них уже находится один такой продукт, небольшой ультразвуковой сканер. Такие сканеры используются врачами для получения изображений объектов внутри организма, к примеру, детей в утробе матери.

Размер, вес и стоимость приставок с дисплеем снизилась, но ультразвуковой зонд, прикладываемый непосредственно к телу, практически не менялся, и является самой дорогой частью системы. Датчик отправляет ультразвуковые импульсы и принимает сигналы, используя отражение для обрисовки изображений. Он содержит миниатюрные пьезоэлектрические датчики, которые изготовлены путём тщательной наноразмерной обработки хрупких кусочков керамики.

GE разработала аддитивную систему для распечатки этого зонда. Это сильно снижает стоимость производства и позволяет разработать новые, недорогие портативные сканеры, не только для медицинского применения, но и для исследования критически важных аэрокосмических и промышленных конструкций на предмет трещин.

Как далеко может шагнуть эта технология? Сотрудники лаборатории глобальных исследований GE очень оптимистично настроены: «В один день мы распечатаем двигатель». Но ряд производителей, таких как GE и Rolls-Royce, считают, что появится некий вид гибридной системы для печати. Она изготовит наброски для формы, что поможет сэкономить материалы, а затем заготовка может быть обработана станком для большей точности.

Изготовление одноразовых прототипов может быть невероятно дорогим, но 3D-принтеры способны существенно снизить его стоимость. Многие из товаров массового спроса, механических деталей и моделей для архитекторов предстают в распечатанном виде для оценки инженерами, стилистами и клиентами, до того, как будет выбран окончательный вариант. Любые изменения могут быть своевременно отпечатаны за несколько часов или за ночь, в то время как ожидание нового прототипа, производимого в машинном цехе, может занять недели.

Аддитивное производство не позволяет экономить за счёт роста производства, но такая технология идеально подходит для мелкосерийного производства. Также она позволяет выполнять массовую индивидуализацию готовых деталей. Миллионы различных деталей медицинской техники уже делаются по индивидуальным параметрам с помощью 3D-принтеров. Replicator, роботизированная система по быстрому производству, изготовленная британской компанией Subaman Technologies, уже довольно близка к этому.

Система, размером с большой холодильник, готова как к субтрактивному, так и к аддитивному производству. Она использует систему напыления, управляемую лазером, чтобы создать базовую форму, которую затем обрабатывают на станке. Replicator, как и подобает системе с таким именем, способен к созданию точной реплики объекта, предварительно помещенного внутрь него, при помощи цифрового сканирования для получения необходимых данных.

Replicator ближе всего к тому, насколько современная технология способна воссоздать телепорт из научной фантастики. Он может отсканировать объект в одном месте и дать команду распечатать копию второму Replicator на другом конце мира.

Это означает, например, что срочно требующиеся запасные части могут быть изготовлены в разных местах, без необходимости что-то пересылать. Даже детали, которые уже недоступны на рынке, можно будет скопировать путём сканирования сломанной запчасти, её виртуального восстановления и распечатки новой. Вполне возможно, что появятся цифровые библиотеки деталей и товаров, недоступных на рынке.

Точно так же, как с появлением электронных книг понятие «тиража» в их отношении потеряло смысл, так и детали смогут оставаться доступными навечно. Представьте ремонтников с портативными 3D-принтерами в своих микроавтобусах, или хозяйственные магазины, предлагающие услуги по распечатке деталей с чертежей.

3D-принтеры будут бесценны в удалённых местах. В Ваальском техническом университете ЮАР работают над проектом, который называется Idea 2 Product Lab, использующего дешёвые 3D-принтеры для обучения и для того, чтобы пробудить интерес к конструированию и производству у студентов. Уже есть 3D-принтеры для дома. Про-

мышленные системы 3D-печати стоят от 1500\$ до миллиона долларов и выше. Но дешёвые настольные системы создают новый рынок. Они предназначены для людей, увлечённых своим хобби, энтузиастов, делающих всё своими руками, ремесленников, изобретателей, исследователей и предпринимателей. Некоторые системы могут быть собраны из наборов и используют свободное программное обеспечение. Но крупные производители 3D-принтеров тоже постепенно приходят на рынок.

3D Systems, которые производят широкий спектр станков и устройств для изготовления прототипов, сейчас запускают линию небольших 3D-принтеров для домашних пользователей, называемую Cube.

Она была разработана совместно с онлайн-платформой Cubify для того, чтобы предоставлять услуги сообществу своих пользователей. Cube, ценой в 1299\$, печатает при помощи нанесения тонкого слоя материала из картриджа разного цвета. При застывании пластик твердеет.

Эти принтеры могут изготовить деталь размером до 140 мм по трём измерениям, при стоимости материалов в 3,50\$. Качество не будет таким же, как в промышленных принтерах, но для большинства этого будет достаточно. Высококачественные творения могут быть загружены в Cubify. «Новая линейка продуктов означает не просто возможность что-то распечатать. Она создана для того, чтобы упростить процесс создания продукта и позволить людям использовать мощь интернета, чтобы делиться идеями.

Это персональная производственная революция» - утверждают в корпорации «3D Systems». Мы же рассмотрим эти возможности применительно к подготовке производства наукоемких изделий во взаимосвязи с её основными этапами.

Вопросы для самоконтроля

1. Расскажите основные понятия и приведите специальные термины в области аддитивных технологий в машиностроении.

2. Виды и основное назначение различных аддитивных технологий применительно к созданию наукоемких изделий.

3. Поясните сущность и область применения стереолитографии для быстрого прототипирования деталей или заготовок.

4. Каким образом обеспечивается селективное лазерное спекание металлических порошков при быстром прототипировании?

5. В каких случаях проявляются возможности процесса послойного наложения расплавленной полимерной нити при технологической подготовке производства?

6. Что, по-вашему, означает массовая индивидуализация готовых деталей?

7. Из чего складывается возможная экономия материала при использовании различных аддитивных технологий в технической подготовке многономенклатурного производства?

8. Какие новые возможности для технического дизайна открывает использование аддитивных технологий при создании наукоемких изделий?

9. Расскажите перспективы расширения пользовательской доступности аддитивных технологий для индивидуального творчества проектировщиков.

10. Поясните роль Интернета в расширении возможностей и эффективности различных аддитивных технологий в машиностроении.

2. ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НАУКОЕМКОГО ИЗДЕЛИЯ

2.1. Понятие системы технической подготовки производства

Существует определенная система технической подготовки производства (ТПП). Она представляет собой совокупность взаимосвязанных научно-технических процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятия выпускать продукцию с техническими условиями качества.

В рыночных условиях становления промышленности подготовка предприятий к выходу со своей продукцией на международный рынок усложняется, так как объем труда, затрачиваемый на освоение наукоёмкой техники, будет значительно возрастает в следствии сложности и многодетальности конечного продукта. Для того, чтобы уменьшить трудозатраты применяется система единой технической документации по технической подготовке производства - ЕСТПП.

ЕСТПП - это установленная государственными стандартами система организации и управления технической подготовкой производства, непрерывно совершенствуемая на основе достижений науки и техники, управляющая развитием технической подготовки производством на уровнях: государственном, отраслевом, организации, предприятии.

Основная цель ЕСТПП - обеспечение необходимых условий для достижения полной готовности любого типа производства к выпуску изделий заданного качества, в оптимальные сроки при наименьших трудовых, материальных и финансовых затратах. ЕСТПП призвана обеспечить:

– единый для каждого предприятия, организации системный подход к выбору, применению методов и средств технической подготовки производства, соответствующих

передовым достижениям науки, техники и производства;

- высокую способность производства к непрерывному его совершенствованию, быстрой переналадке на выпуск более совершенной продукции;

- рациональную организацию механизированного выполнения комплекса инженерно-технических работ, в том числе автоматизацию конструирования объектов и средств производства;

- разработку технологических процессов и управление технической подготовкой производства;

- взаимосвязь технической подготовки производства с другими автоматизированными системами и подсистемами управления.

Задачи технической подготовки производства решаются на всех уровнях и группируются по следующим четырем принципам:

- обеспечение технологичности изделий;

- разработка технологических процессов;

- проектирование и изготовление средств технологического оснащения;

- организация и управление технической подготовкой производства.

Основу ЕСТПП составляют:

- системно-структурный анализ цикла ТПП;

- типизация и стандартизация технологических процессов изготовления и контроля;

- стандартизация технологической оснастки и инструмента;

- агрегатирование оборудования из стандартных элементов конструкции.

Для разработки стандартных технологических процессов производят классификацию технологических операций путем их расчленения от сложного к простому до получе-

ния мельчайших неделимых элементов технологии с соблюдением технологической последовательности всего процесса. На каждый неделимый элемент или технологическую операцию разрабатывается стандарт предприятия по установленной форме (технологическая карта), где дается исчерпывающее описание всех переходов, из которых формируется данная элементарная операция, со всеми необходимыми объяснениями и примечаниями.

Стандартные технологические процессы разбиваются на операции изготовления стандартных или унифицированных деталей (на предприятиях машиностроения), от качества которых зависит надежность изделия.

ЕСТПП устанавливает три стадии работы над документацией по организации и совершенствованию технической подготовки производства:

- обследование и анализ существующей на предприятии системы ТПП;

- разработка технического проекта ТПП (в нем определяется назначение, формируются требования, которым должны удовлетворять как система ТПП в целом, так и отдельные ее элементы);

- создание рабочего проекта.

На этом этапе разрабатываются:

- информационные модели решения всех задач;
- классификаторы технико-экономической информации);

- оригинальные, типовые и стандартные технологические процессы;

- стандарты предприятия на средства технологического оснащения;

- документация на организацию специализированных рабочих мест и участков основного и вспомогательного производства на основе типовых и стандартных технологи-

ческих процессов и методов групповой обработки деталей;

– рабочая документация для решения задач с помощью ПК;

– информационные массивы;

– организационные и должностные инструкции.

Один из основных показателей ТПП - длительность цикла ТПП. Необходимо для начала установить структуру ТПП.

Структура ТПП - это отношение затрат на отдельные виды работ в составе ТПП к общему итогу затрат на ТПП, выраженное в процентах. Длительность цикла ТПП - это календарное время от начала до окончания ТПП нового изделия или целого производства. Она определяется по формуле:

$$D_{\text{цтпп}} = q_1 T_{\text{ц1}} + q_2 T_{\text{ц2}} + q_3 T_{\text{ц3}} + \dots + q_n T_{\text{цn}},$$

где q_1, q_2, q_3 - коэффициенты коррекции времени, учитывающие параллельное и параллельно-последовательное выполнение работ в процессе ТПП;

$T_{\text{ц1}}, T_{\text{ц2}}$ - время на получение конструкторской, разработку технологической документации, изготовление технологического оснащения, нестандартного оборудования, техническую и организационную перестройку производства, подготовку и переподготовку кадров, на изготовление и проведение испытания и др.

Длительность цикла ТПП оказывает огромное влияние на величину затрачиваемых ресурсов, незавершенного вспомогательного производства, ускорение оборачиваемости оборотных средств, себестоимость работ по ТПП. Основными направлениями его сокращения являются: увеличение объема работ в параллельном и параллельно-последовательном исполнении и снижение трудоемкости на каждом из этапов.

2.2. Конструкторская подготовка производства

Теперь, когда установлены основные этапы проведения ТПП, можно приступать к первой стадии - конструкторской подготовке производства. Конструкторская подготовка производства заключается в проектировании и освоении новой продукции и совершенствовании выпускаемой.

Она осуществляется в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД), предусматривающей следующие этапы (стадии) разработки:

- техническое задание, определяющее назначение наукоёмкого изделия (продукции), его технические характеристики, показатели качества, технологические, организационные и экономические условия производства, требования к конструкторской документации. Техническое задание составляет заказчик для организации-разработчика проекта. Разработчиками являются конструкторские бюро, научно-исследовательские институты, конструкторские отделы предприятий;

- техническое предложение, содержащее технико-экономическое обоснование целесообразности разработки изделия на основании анализа технического анализа заказчика и встречных вариантов проектно-технологических решений по наукоёмкому изделию, всесторонней оценки всех возможных решений с учетом современного состояния проблемы. После согласования предложения с заказчиком и утверждении его в установленном порядке оно является основанием для разработки эскизного проекта;

- эскизный проект состоит из графической части, представляющей собой совокупность конструкторских документов (чертежей), раскрывающие конструкторские решения с указанием параметров, габаритных размеров, дающих *общее представление* о новом изделии, и пояснительной записки с расчетами основных параметров изделия,

описанием принципов его работы, эксплуатационных особенностей.

На основании утвержденного вышестоящей организацией эскизного проекта разрабатывается технический проект, который, так же, как и эскизный, состоит из графической части и пояснительной записки, содержащих окончательные технические решения, дающие *полное представление* об устройстве разрабатываемого изделия и его отдельных узлов и исходных данных для разработки рабочей документации. Указывается так же максимально возможный уровень унификации и применения стандартных сборочных единиц и деталей, приводятся результаты экспериментальных работ по повышению технологичности конструкции. Техническое проектирование часто сопровождается изготовлением макета изделия.

Рабочий проект. В нем содержатся рабочие чертежи на каждую деталь изделия (деталировка) с указанием марки материала, массы детали и других конструктивных данных. ЕСКД устанавливает следующие основные требования к выполнению рабочих чертежей:

- оптимальное применение стандартных и покупных изделий, освоенных ранее производством и соответствующих современному уровню техники;
- рациональное ограничение номенклатуры размеров, предельных отклонений конструктивных элементов, а также марок и сорта материалов и покрытий;
- достижение необходимой степени взаимозаменяемости деталей и узлов;
- наивыгоднейших способов изготовления и ремонта изделий, а также максимального удобства в эксплуатации.

Рабочий проект сопровождается спецификацией, определяющей состав сборочной единицы, узла или комплекта и необходимой для комплектования конструктор-

ских документов и планирования запуска в производство указанных изделий.

Проектирование новой продукции в массовом и серийном производстве заканчивается изготовлением опытных образцов и сдачей технической документации заказчику. В настоящее время все перечисленные стадии конструкторской подготовки используются при создании лишь принципиально новых *наукоёмких* видов продукции. В остальных случаях, как правило, применяется двухстадийное проектирование, при котором совмещаются разработка технического и рабочего проектов, а в ряде случаев опускается также стадия эскизного проектирования.

Обязательным условием конструкторской подготовки является соблюдение требований стандартизации и унификации. Стандарты устанавливают и регламентируют на определенный период прогрессивные требования, нормы, методы, правила, распространяемые на сами изделия, на факторы и условия, влияющие на их качество.

Конструктивная унификация представляет собой ограничение разнообразия изготавливаемых типоразмеров деталей и узлов конструкций путем заимствования из ранее выпущенных конструкций. Унификация может проводиться как в пределах одного завода, специализированного на выпуске определенной продукции, так и в масштабе всей отрасли в целом.

При внутривзаводской унификации одна из конструкций выбирается в качестве «базовой» модели, а затем путем присоединения к ней недостающих или, наоборот, изъятия из нее ненужных частей, узлов, деталей создается ряд производных моделей. В этом случае резко сокращается число оригинальных деталей за счет увеличения унифицированных и ранее освоенных производством.

Таким путем осуществляется конструктивная прием-

ственность изделий, формируются их конструктивные ряды. Уровень стандартизации и унификации определяется системой коэффициентов:

- унификации (K_y);
- повторяемости ($K_{повт}$);
- конструктивной преемственности ($K_{пр}$);
- стандартизации ($K_{ст}$);

Необходимым условием начала производства проектируемой продукции является определение ее экономической эффективности путем сопоставления эффекта и затрат ранее производимого продукта с новым, показатели которого должны быть отражены в техническом задании.

2.3. Технологическая подготовка производства

Следующей стадией технической подготовки является технологическая подготовка производства.

Именно она обеспечивает полную готовность предприятия к выпуску новой продукции с заданным качеством, что, как правило может быть реализовано на технологическом оборудовании, имеющем высокий технический уровень, обеспечивающий минимальные трудовые и материальные затраты.

Технологическая подготовка производства осуществляется в соответствии с требованиями стандартов Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП) и предусматривает в процессе реализации решение следующих задач:

- обеспечение высокой технологичности конструкций, что достигается тщательным анализом технологии изготовления каждой детали и технико-экономической оценкой возможных вариантов изготовления;
- проектирование технологических процессов, включающее разработку процессов традиционной (основной для

данного типа производства) обработки, а также программ для станков с числовым программным управлением, индивидуальных технологических процессов, разработку технических заданий на спецстантку и специальное технологическое оборудование (проектирование средств технологического оснащения проводится в порядке, принятой для конструкторской подготовки производства);

- структурный анализ изделия и на его основе составление межцеховых технологических маршрутов обработки деталей и сборки изделий;

- технологическую оценку возможностей цехов, основанную на расчете производственных мощностей, пропускной способности и т.д.

- разработку технологических нормативов трудоемкости, норм расхода материалов, режимов работы оборудования;

- изготовление средств технологического оснащения;

- отладку технологического комплекса (производится на установочной серии изделий) - технологического процесса, оснастки и оборудования;

- разработку форм и методов организации производственного процесса;

- разработку методов технического контроля.

Технологичность конструкции оценивается количественно посредством системы характеристик, включающей показатели трудоемкости изготовления, удельной материалоемкости, технологической себестоимости, коэффициентов использования материалов, применения типовых технологических процессов, стандартизации, унификации.

Высокая технологичность способствует снижению производственных затрат и поэтому служит критерием экономически более выгодного технологического варианта. Такой выбор производится при совместном решении двух

уравнений:

$$C_{T1}=c_1N+V_1;$$

$$C_{T2}=c_2N+V_2,$$

отражающих соответственно технологические себестоимости C_{T1} и C_{T2} двух вариантов изготовления. В результате определяется критический объем производства

$$N_{кр}=(c_2-c_1)/V_1-V_2,$$

служащий границей экономической целесообразности их применения. При этом c_1, c_2, V_1, V_2 соответственно условно-постоянные и переменные расходы в структуре себестоимости вариантов, N - объем выпуска. При объеме производства меньшем чем $N_{кр}$, будет выгоден вариант 1, при выпуске, большем $N_{кр}$ - вариант 2.

Указанный метод расчета пригоден, когда оцениваются технологические процессы (на уровне участка, цеха), не требующие сколько-нибудь значительных капитальных затрат.

В случаях, связанных с внедрением технологических процессов, требующих существенных капиталовложений, выбор экономически наиболее выгодного варианта производится по методу приведенных затрат. Для повышения эффективности технологической подготовки производства большое значение имеют типизация и нормализация элементов технологии.

Типизация технологических процессов строится на основе технологических рядов. В такой ряд включаются детали, конфигурация и основные параметры которых позволяют вести их изготовление или обработку по одному общему технологическому маршруту.

Типизации предшествует разработка конструктивно-технологической классификации, при которой детали предварительно группируются в классы по признаку служебного назначения.

Дальнейшее разделение на группы (например, по признаку общности материала и способа его обработки) и подгруппы (например, по размерам деталей) приводит к максимальной унификации, позволяющей осуществить принцип групповой обработки, который основывается на конструктивно-технологическом сходстве деталей с последующим выбором из них комплексной детали, имеющей все поверхности обработки, встречающиеся в деталях данной группы.

Это позволяет создать для такой детали специальное приспособление со сменными наладками и с его помощью обработать на одной настройке многоцелевого станка и других средств технологического оснащения все детали данной группы.

Технологические нормы разрабатываются применительно к типовым геометрическим элементам конструкций, например, на радиусы закруглений, припуски, допуски, конусность, на состав шихты, на режимы обработки и пр. и являются информационной базой для использования технологий быстрого прототипирования.

Типизация, нормализация, технологическая унификация дают особенно большой эффект, если проводятся на уровне стандартов предприятий, отраслей производства.

Для обеспечения высокого организационно-технического уровня производства и качества выпускаемой продукции большую роль играет строгое соблюдение технологической дисциплины, т.е. точного выполнения разработанных и внедренных на всех операциях, участках и стадиях производства продукции различных технологических процессов.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные этапы подготовки производства к выпуску наукоемких изделий.
2. Виды и основное содержание различных работ применительно к созданию наукоемких изделий.
3. Поясните сущность и особенности конструкторской подготовке производства.
4. Каким образом обеспечивается заданный уровень технологичности при конструкторской подготовке производства наукоемких изделий?
5. Типизация, нормализация, технологическая унификация и их роль в ускорении технической подготовки производства.
6. Как обеспечивается ускоренная технологическая подготовка производства многономенклатурных наукоемких изделий.
7. Поясните роль стандартизации в технической подготовке производства многономенклатурных наукоемких изделий.
8. Назовите предпосылки для использования аддитивных технологий и их элементов в технической подготовке.

3. ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В УСКОРЕННОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА

3.1. Организация САПР станочных приспособлений

Программное обеспечение, выполняющее функции проектирования станочных приспособлений, не должно заменять собой конструктора, т.е. не должно быть похожим на модель, которую оно представляет. Система автоматизированного проектирования должна осуществлять разделение функций между ЭВМ и конструктором. Ввод-вывод информации осуществляется на основе диалога, который строго регламентируется самой задачей. Следовательно, модель диалога должна строиться на основе описаний входного и выходного интерфейса. На рис. 3.1 представлена структурная схема входной информации для автоматизированного проектирования приспособлений.

Согласно приведенной схеме, весь входной информационный поток можно разделить на два вида: конструкторская информация или геометрические и качественные характеристики обрабатываемого изделия; характеристики технологического процесса, или режимы обработки детали, параметры оборудования, данные о режущем инструменте.

Роль конструктора станочных приспособлений при данной схеме заключается в анализе входной информации, подготовке её и вводе. Учитывая, что диалог – это регламентированный обмен информацией, перед разработчиком встаёт вопрос разработки входного и выходного интерфейса приложения, предназначенного для решения подобных конструкторских задач.

Разработка регламента обмена информацией – наиболее трудоёмкий этап разработки проблемно-ориентированных приложений, по мнению авторов, его

можно отнести к постановке задачи, и в этом случае на помощь разработчику должен прийти опытный конструктор (конструкторы), имеющий опыт в проектировании в той области, для которой разрабатывается специализированное приложение.

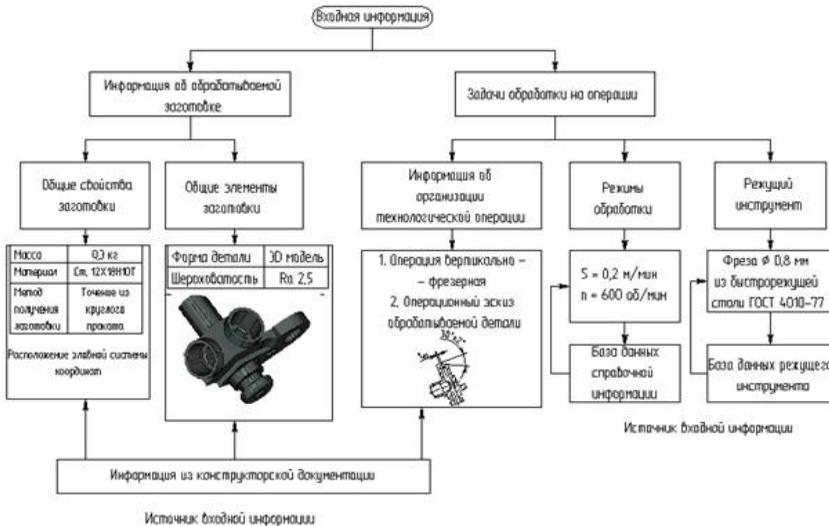


Рис. 3.1. Структурная схема входной информации для автоматизированного проектирования приспособлений

На рис. 3.2 представлен диалог проектирования шайбы, входящей в конструкцию приспособления. Это удачный пример конструкторской задачи, так как геометрические параметры проектируемого изделия известны заранее и пользователю остается лишь ввести их числовые значения.

Намного проблематичнее реализация интерфейса для ввода не априорной информации, в этом случае следует учитывать особенности реализуемой задачи, и именно в этом случае для реализации задачи должен подключаться опытный конструктор.

С его помощью разработчик программного обеспечения оценивает значимость параметров, их размерность, строит структуру интерфейса ввода-вывода приложения.

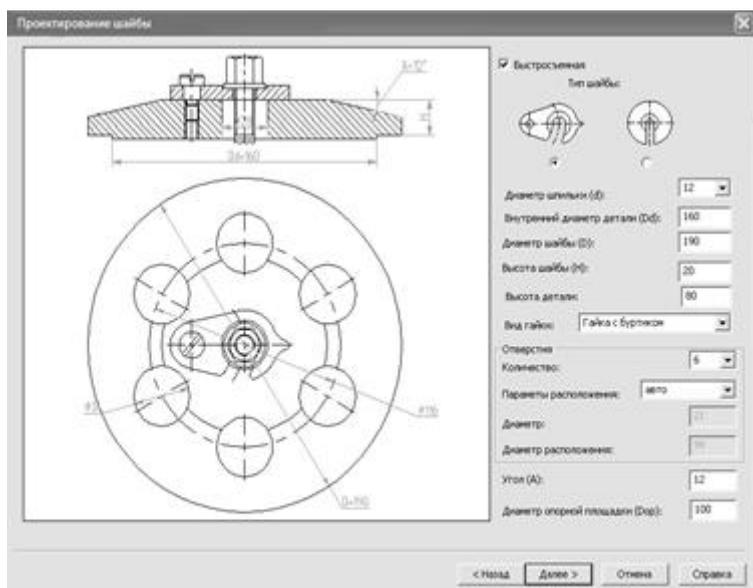


Рис. 3.2. Диалоговое окно проектирования шайбы

При реализации выходного интерфейса следует учитывать вид информации: промежуточная – предназначенная для анализа и поиска дальнейших решений при проектировании приспособлений, и выходная – участвующая в формировании

выходной документации. При расчете сил закрепления определяется место их приложения и направления, а также величины сил резания и моменты их воздействия на обрабатываемую деталь. Силы резания вычисляются по известным зависимостям, прописанным в информационной базе приложения.

Выходная документация для изготовления приспособлений формируется на основе требований ГОСТ и представляет собой комплект чертежей, спецификаций, описаний и т.п. Эта документация формируется в виде твердой копии на бумажных носителях, а также в виде электронной версии, предназначенной для использования в системах автоматизированного проектирования технологических процессов.

Оценка параметров процесса автоматизированного проектирования приспособлений возможна на основании показателей качества или оценки точности выходных показателей системы. В случае разработки САПР СП возможна оценка достоверности, выдаваемой системой конструкторской документации. И в этом случае диалог приобретает такое же важное значение, как и сам алгоритм расчёта. Ошибки при вводе информации могут привести к неудовлетворительному качеству работы всей системы, а также к получению брака в конструкторской документации.

Во многих практических приложениях критерии оценки выбирают на основе интуитивного представления о целевом назначении оценки, но в настоящее время разработаны теории автоматизации выбора, как критерия оценки, так и ее реализации, такие системы построены на основе нейронных сетей. Но возможно встраивание алгоритмов оценки параметров уже в интерфейс приложения, современные аппаратные средства позволяют с успехом реализовать эту структуру.

Усложнение алгоритма задачи не приведет к существенному увеличению дополнительных затрат на разработку, так как система оценки параметров на базе нейронных сетей может быть реализована на основе отдельного модуля, который можно заказать у стороннего разработчика или приобрести уже существующие разработки.

Даже не производя количественных оценок уровня организации диалога САПР, можно сделать заключение о его эффективности на основании выводов экспертов. Эксперты могут давать общую оценку эффективности САПР или оценивать приложения по заранее определённым параметрам. При реализации приложения САПР СП давалась общая оценка эффективности с учетом полноты представления информации, адекватности отражения, интуитивности интерфейса.

Разработку диалога модели следует вести с использованием библиотек, входящих в состав инструментального средства, используемого при разработке. Использование библиотек позволило сократить время создания САПР СП и избежать излишних затрат на разработку пользовательского интерфейса приложения. К тому же интерфейсы приложения выполнены в едином стиле Windows, что позволяет пользователю быстро освоить работу в САПР СП.

Таким образом, соблюдение требований, изложенных в данном разделе, соблюдаемых при разработке диалога специализированной САПР, позволяет быстро и эффективно реализовать приложение, позволяющее разрабатывать комплект конструкторской документации станочного приспособления.

Проект должен иметь вид, пригодный для дальнейшего изготовления оснастки методами быстрого прототипирования из различных конструкционных материалов.

3.2. Организация интеграции системы проектирования в комплекс программных средств на предприятии

В настоящее время предлагается целый комплекс интегрированных программных средств автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства. Программные продукты решают следующие задачи:

– в области CAD (Computer Aided Design): 2D и 3D моделирование с использованием новейших технологий параметризации, ассоциативных сборок, диалогового управления проектами и другими специальными инструментами; подготовка конструкторской документации (чертежи, спецификации и т.д.) в соответствии со всеми Российскими стандартами; поддержка стандартных форматов XT/XB, IGES, STEP, STL, DXF, DWG.

Использование мощного геометрического ядра Parasolid позволяет создавать модели сложной геометрии, что делает инструменты программ эффективными не только для машиностроения, строительства, радиотехники, но и для авиа-, судостроения.

Система локализована (имеет переведенный интерфейс, документацию, поддерживает стандарты) для Германии, США и Китая, где постоянно увеличиваются примеры успешного внедрения.

– в области CAM (Computer Aided Manufacturing): технологическая подготовка производства, подготовка программ для станков с ЧПУ и проверка программ имитацией обработки.

– в области CAE (Computer Aided Engineering): динамический и кинематический анализ; автоматизированное проектирование приспособлений для металлорежущих станков; расчеты зубчатых передач, пружин; оптимизация листового раскроя; поддержка инженерных решений при

проектировании штамповой технологической оснастки, пресс-форм для термопластавтоматов, электродвигателей.

– в области CAPP (Computer Aided Process Planning): технологическая подготовка производства – выбор технологического оборудования и инструмента, проектирование оснастки, разработка маршрутных и операционных технологий, расчеты режимов и нормативов обработки.

– в области PDM (Product Data Management): поддержка жизненного цикла изделий, технологическая подготовка производства, создание технологической и нормативно-сметной документации, управление проектами и техническим документооборотом (рис. 3.3).

Выделяют несколько основных положений, которые делают такие комплексы программных средств наиболее привлекательными:

1. Все системы, входящие в комплекс, полностью интегрированы между собой, т. е. передача информации от одной системы к другой осуществляется за счет внутренней связи между модулями.

2. Система содержит разработки в соответствующих областях автоматизированного проектирования, которые учитывают специфику российского производства (стандарты, технические условия, оборудование и т.д.).

3. Каждая из систем может работать в комплексе, в любой комбинации или в автономном режиме, что позволяет гибко и поэтапно решать задачи оснащения средствами автоматизации подготовки производства на любом предприятии.

4. Наличие модуля технологической подготовки производства, глубоко интегрированного с системой проектирования изделия, делает комплекс уникальным на рынке средств автоматизации проектирования и подготовки производства.

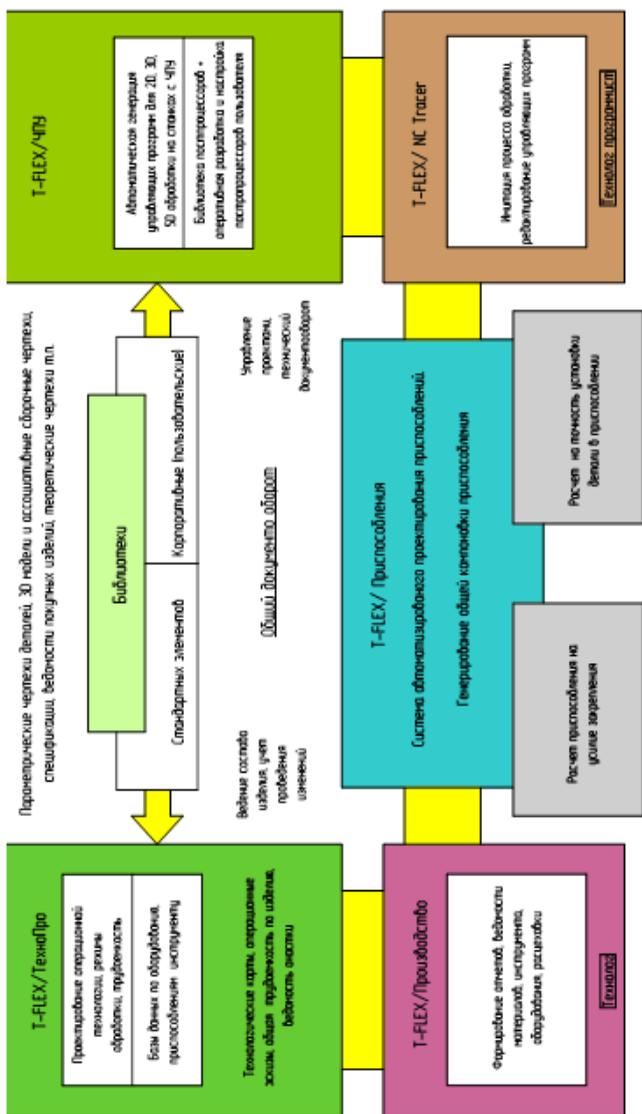


Рис. 3.3. Схема организации автоматизированного проектирования приспособлений на промышленном предприятии

5. Комплекс поддерживает клиент–серверные технологии, позволяющие эффективно управлять производственными процессами и их подготовкой.

6. Открытый программный интерфейс систем комплекса позволяет предприятиям и независимым разработчикам разрабатывать (и интегрировать) свои приложения и САПР.

Предлагаемый комплекс программных средств – удачное по функциональным показателям решение для внедрения ИПЖЦИ (CALS) технологий (информационная поддержка жизненного цикла изделия) на отечественных предприятиях.

3.3. Автоматизированное проектирование приспособлений для последующего прототипирования

Разработанная система представляет собой программную оболочку в виде пошагового диалога проектирования, подключаемую к системе параметрического проектирования T-FLEX CAD . Система состоит из программной оболочки, библиотеки специальных деталей, конструктивных элементов и стандартных элементов СП.

При проектировании СП часто возникает необходимость создания специальных деталей конструкции. Для этого конструктору необходимо вычертить профиль будущей детали, создать 3D модель, точки привязки, системы координат и т. д. Разработанная система позволяет проектировать специальные элементы станочных приспособлений, не прибегая к черчению, тем самым сокращая время проектирования всего приспособления. Это достигается при помощи созданной библиотеки прототипов специальных деталей. В диалогах программы конструктор может выбрать форму выталкиваемого профиля модели (рис. 3.4).

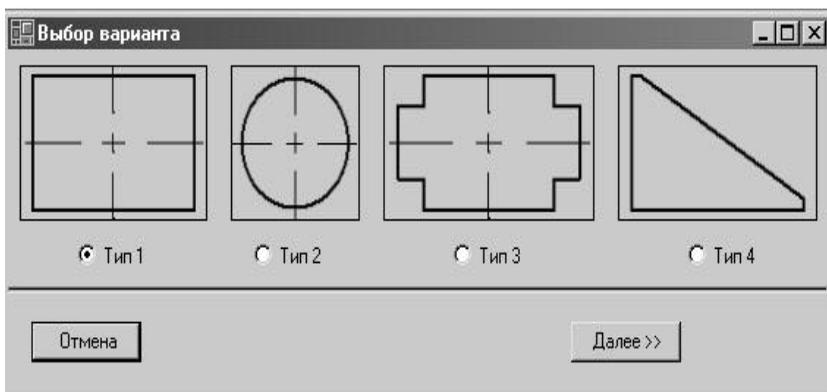


Рис. 3.4. Выбор формы профиля

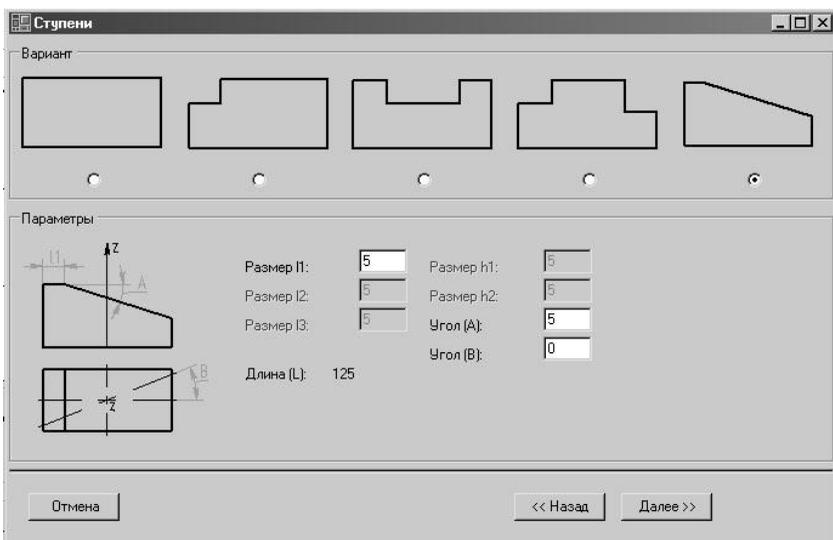


Рис. 3.5. Выбор формы детали сбоку

Затем - вид детали сбоку (рис. 3.5), а также добавить конструктивные элементы.

Для каждого выбранного профиля в программе существует диалог геометрических параметров. Например, для формы 1 (рис. 3.6).

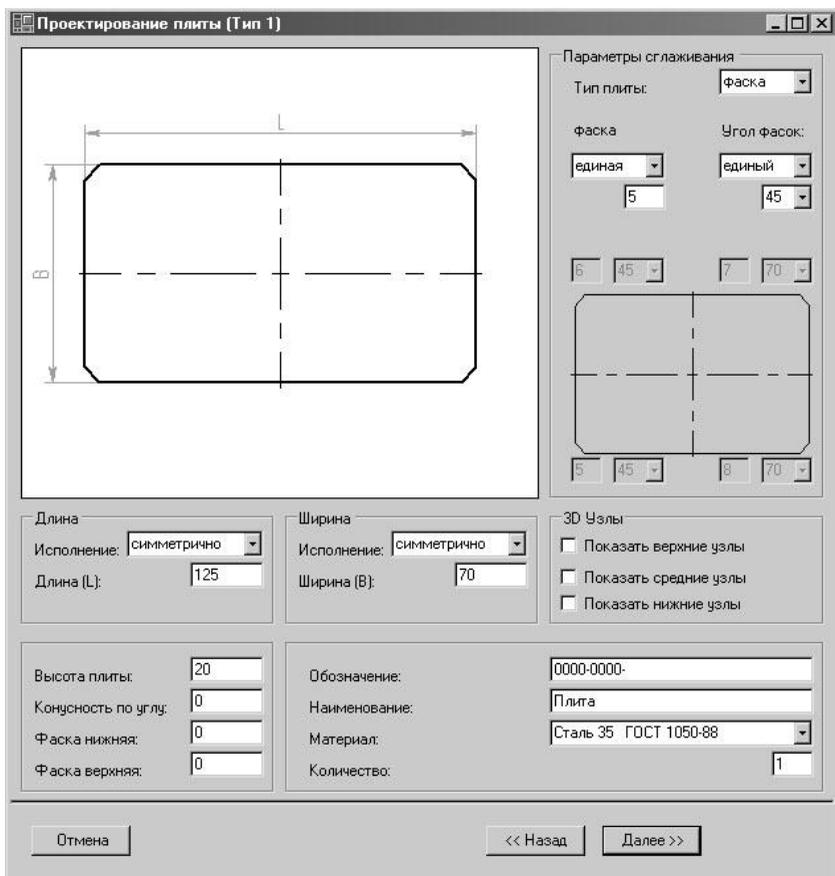


Рис. 3.6. Проектирование прямоугольной плиты

В каждом прототипе созданы 3D узлы, к которым можно привязывать другие элементы сборки. Узлы располагаются на оси модели, в середине ребер верхней и нижней грани, а также в центрах боковых граней.

В диалоге проектирования конструктор указывает, какие узлы ему необходимы для привязки. Рассмотрим пример создания стойки. В начале проектирования конструктору предлагается задать имя файла проектируемой детали, а также имя сборки. Если задать имя сборки, то по окончании проектирования созданная деталь будет вставлена в сборочный файл.

Первая деталь представляет собой квадратную плиту 100×100 мм. Укажем в диалоге проектирования плиты – «Показать верхние узлы» (рис. 3.7).

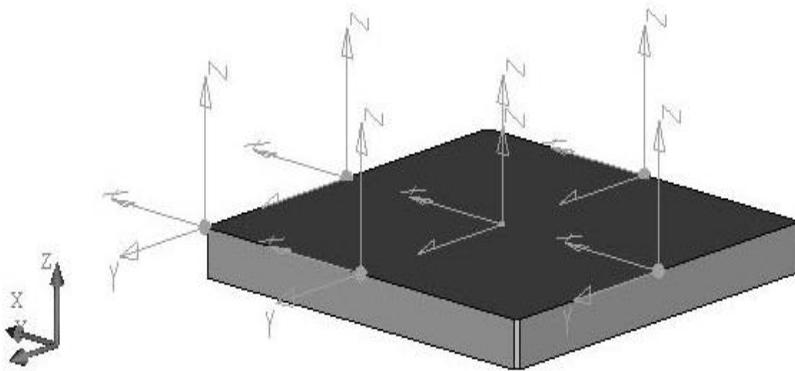


Рис. 3.7. Первая деталь с точками привязки

Далее проектируем вторую деталь и вставляем в сборку.

Указываем систему координат в середине ребра на первой детали и точку вставки второй детали и редактируем положение второй детали относительно оси координат (рис. 3.8).

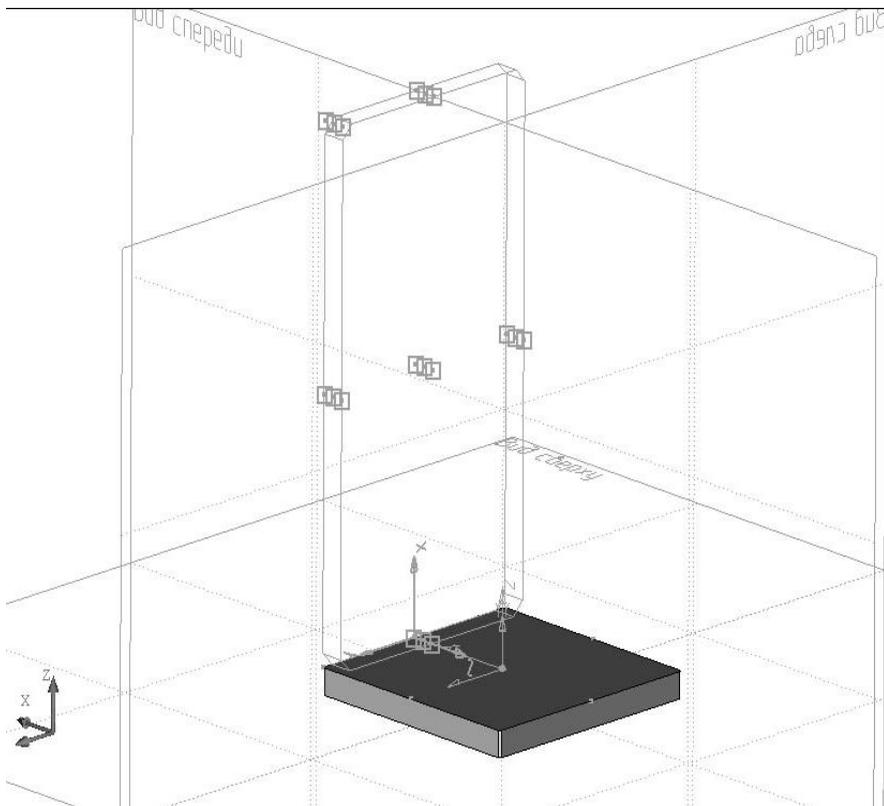


Рис. 3.8. Редактирование положения и вставка второй детали

Таким же образом проектируем и вставляем третью деталь (рис. 3.9).

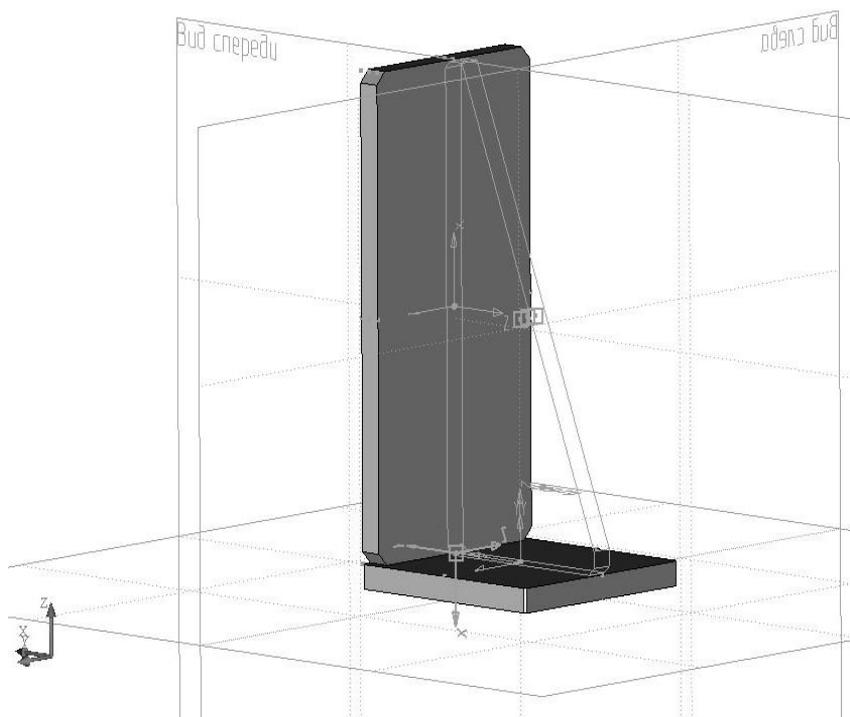


Рис. 3.9. Редактирование положения и вставка третьей детали

После сборки узла изменим первую деталь и добавим крепежный паз (рис. 3.10).

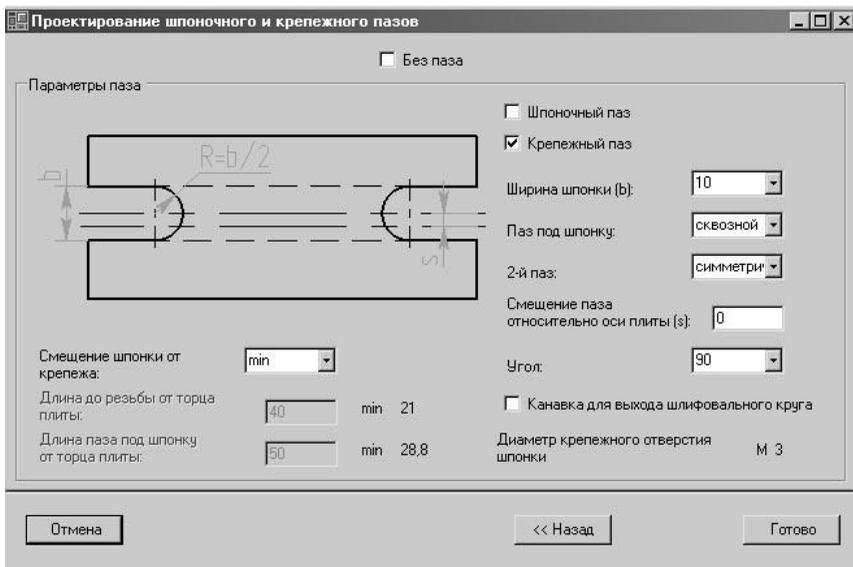


Рис. 3.10. Диалог шпоночного паза

Таким образом мы получили сварную стойку с крепежным пазом (рис. 3.11).

Спроектированная стойка заносится в библиотеку станочных элементов для использования ее в других конструкциях. На саму стойку генерируются ассоциативные виды и оформляется чертежная документация.

Сформированная таким образом база данных в последующем интегрируется в информационный массив технических средств для реализации технологий быстрого прототипирования в условиях многономенклатурного производства наукоемких изделий.

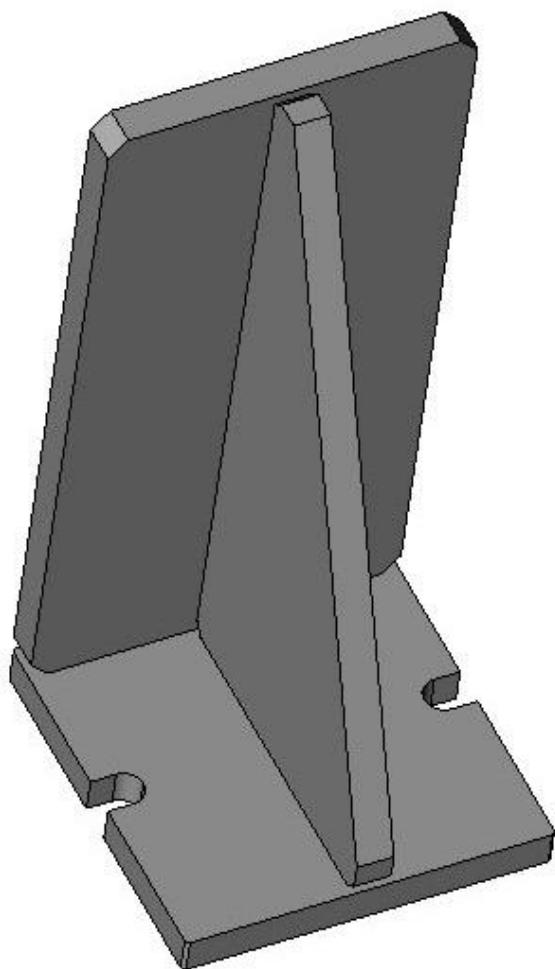


Рис. 3.11. Стойка

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные принципы создания системы автоматизированного проектирования станочных элементов и других средств технологического оснащения.

2. Выделите несколько основных положений, которые делают современные комплексы САПР наиболее привлекательными для технологической подготовки производства наукоемких изделий.

3. Из каких элементов состоит комплекс интегрированных программных средств автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства наукоемких изделий.

4. Виды и основное содержание различных работ по организации интеграции системы автоматизированного проектирования в комплекс программных средств на предприятии по выпуску наукоемких изделий.

5. Поясните важность системы автоматизированного проектирования и комплекса программных средств для конструкторской и технологической подготовки производства.

6. Каким образом с САПР формируется информационная поддержка жизненного цикла изделия на отечественных предприятиях при использовании CALS технологий?

7. Приведите примеры автоматизированного проектирования элементов приспособлений для последующего прототипирования.

8. Как формируется база данных для последующей интеграции в информационный массив технических средств для реализации технологий быстрого прототипирования наукоемких изделий.

4. ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

4.1. Методы сетевого планирования

Планирование технической подготовки производства состоит в распределении, координации и контроле работ: во времени - по стадиям и этапам, по содержанию и объемам - между органами технической подготовки. Планирование производится в соответствии с заданиями годового и перспективного планов развития предприятия. Важнейшей задачей планирования является ускорение технической подготовки и обеспечение производства технической документацией и технологическим оснащением к началу запуска изделия.

Основой для расчета плана подготовки как во времени, так и по объему являются заводские и отраслевые нормативы трудоемкости, позволяющие делать укрупненные расчеты при конструировании изделий или разработке новой продукции.

Трудоемкость, длительность и стоимость технической подготовки производства могут быть определены на основе установленных корреляционных зависимостей по таким факторам, как количество деталей и узлов в конструкции, категория сложности изделия, новизна конструкции, степень унификации, среднее количество операций на одну деталь, коэффициент оснащенности, степень механизации и автоматизации.

После определения длительности всех этапов технической подготовки составляется календарный план ее осуществления – в форме ленточного, линейного или сетевого графика. В целях ускорения подготовки она должна планироваться с возможно высокой степенью параллельности.

Наибольшее распространение на практике получили

графики линейного типа, в особенности при небольшом объеме проектируемых работ и краткосрочности этапов их осуществления. Связано это с простотой и удобством их графического построения, наглядностью изображаемых процессов.

При освоении сложных объектов современной техники планирование и управление разработками выполняется при помощи методов сетевого планирования и управления (СПУ). Эти методы позволяют оптимизировать процесс создания накоёмкой продукции как по времени, так и по стоимости. СПУ основано на графическом изображении определенного комплекса работ, отражающем их логическую последовательность, взаимосвязь и длительность, с оптимизацией разработанного графика при помощи методов прикладной математики и вычислительной техники и его использования для текущего руководства этими работами.

Модель планируемого процесса как технической системы изображается в виде ориентированного графа, называемого сетевым или просто сетью (рис. 2.1).

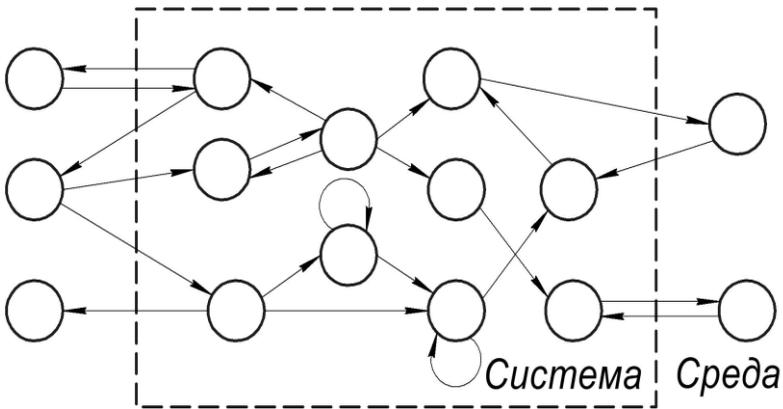


Рис. 4.1. Изображение системы в форме графа

Граф состоит из работ и событий. Работой называется тот или иной процесс (например, изготовление опытного образца продукции), а событием - момент завершения работы, в данном случае момент готовности образца, после которого должна начаться следующая работа (например, его испытание и доводка). События обозначены кружками, работы - стрелками.

Длина стрелки графически не выражает продолжительности выполнения работы, она обозначается числом дней или недель и наносится над стрелкой.

Полный путь в сетевом графике - это любая непрерывная последовательность взаимозаменяемых событий и работ, ведущая от события, исходного для всего графика (1), к завершающему, последнему событию (31) сетевого графика (рис. 4.2).

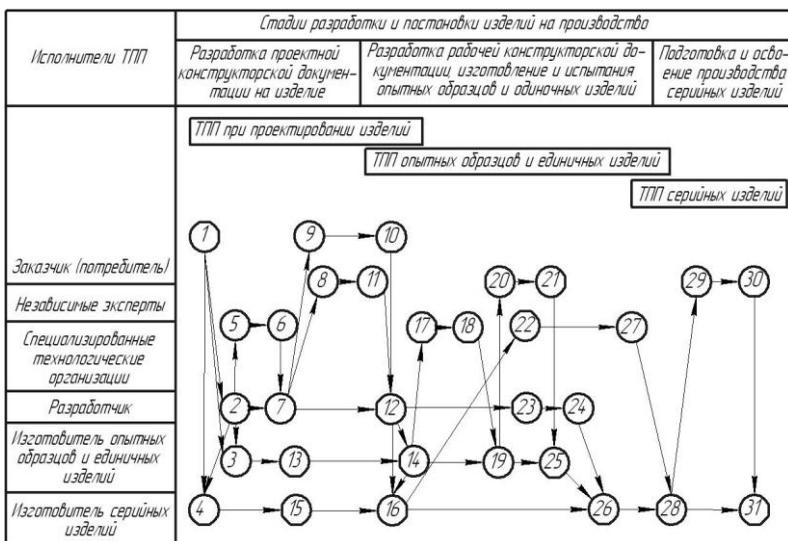


Рис. 4.2. Типовая схема организации ТПП

Кроме полных путей (а их несколько), следует различать:

- путь от исходного события до какого-либо промежуточного события (29-30);
- путь, соединяющий данное промежуточное событие с завершающим (30-31);
- путь между двумя событиями, из которых ни одно не является исходным или завершающим (9-10).

Среди этих путей особое значение имеет критический путь – последовательность работ от исходного до завершающего события, требующая наибольшего времени для их выполнения. Критический путь обычно обозначают жирными стрелками.

Продолжительность работ, лежащих на критическом пути, определяет общий цикл завершения всего комплекса работ, планируемых при помощи сетевого графика. Уменьшение длительности критического пути является основной задачей оптимизации планирования. Термин «событие» применяется в СПУ в смысле вероятного и зависимого события, наступление которого может меняться от 1 до 0.

Термин «работа» и его графическое изображение в виде линии употребляются в более широком понимании: как действие, требующее затрат времени, время ожидания (например, при испытаниях опытного образца) и, наконец, как логическая связь между событиями (фиктивная работа).

Ожидаемое время выполнения работы $t_{ож}$ выводится из сравнения трех оценок: оптимистической t_{min} , пессимистической t_{max} , вероятной t_v . Оно определяется либо экспертным путем, либо берется из статистических данных по аналоговым проектам.

Оптимистическая оценка предполагает наличие самых благоприятных условий для ее выполнения, а пессимистическая - самых неблагоприятных. Наиболее вероятное время

берется как наиболее часто встречающееся в данной статистической совокупности:

$$t_{ож} = (t_{min} + 4t_b + t_{max})/6.$$

Возможность выяснить разницу между продолжительностью критического пути и продолжительностью любого другого пути позволяет вскрывать резервы времени технической подготовки, что является огромным преимуществом СПУ по сравнению с линейным графиком. Кроме того, СПУ позволяет соотносить любые промежуточные работы и события, указанные во времени с основными этапами. Так, из сетевого графика видно, что помимо работ 9-10 и 29-30 к моменту завершения события 31 требуется определить работы 19-55 (размножение и выпуск рабочих чертежей и технической документации), 17-18 (составление технического задания на проектирование технологической оснастки), 5-6 (технологический контроль чертежей).

Расчеты в СПУ значительно увеличиваются в связи с необходимостью обычных частых пересоставлений графиков, так как некоторые работы выполняются досрочно, а часть работ запаздывает. Поэтому для успешного применения СПУ необходимо расчеты производить на ЭВМ с графопостроителем. Это обеспечивает быстрое производство расчетов не только по временным параметрам, но и в денежном выражении по затратам.

Для СПУ необходимо накопление большого статистического материала, требуется труд высококвалифицированных специалистов. Несмотря на это, эффективность СПУ велика, особенно для таких работ, как проектирование новых наукоёмких видов техники, основанных на новых научных принципах, изготовление и монтаж наиболее сложных видов технологического оборудования, капитальное строительство сложных объектов, комплексные работы, выполняемые многими предприятиями различных отраслей.

Сроки технической подготовки производства значительно сокращаются, если механизировать и автоматизировать трудоемкие вычислительные, графические, поисковые, документационно - множительные и другие работы, характерные для большинства этапов конструкторской и технологической подготовке производства.

Эффективность и степень автоматизации и механизации работ определяются их характером и содержанием. Так, процесс непосредственного изготовления проектно-конструкторских и технологических документов до недавнего времени занимал до 50% рабочего времени специалистов.

Поэтому даже широкое использование относительно простых средств и методов, таких, как черчение на масштабно-координатной бумаге с прозрачной основой, использование прозрачных темплетов, аппликаций для формирования чертежа, модельно-макетного проектирования, фотомонтажа документов, чертежей-заготовок типового представителя не способствовало значительному сокращению трудоемкости этих работ.

Главным направлением здесь является автоматизация. В настоящее время широко используются компьютерные системы автоматизированного проектирования. Другим существенным направлением механизации и автоматизации технической подготовки является использование автоматизированных информационно-поисковых систем (ИПС).

Конструктор, приступая к новой разработке, изучает, пользуясь фондом, накопленным в ИПС, наиболее современные элементы конструкций, принципы действия, патенты, стандарты, тем самым значительно сокращая длительность этапов проектирования и обеспечивая современные и перспективные требования к конструкции.

При технологическом проектировании ИПС представ-

ляет материалы для решения задач: классификации деталей, технологических процессов, группировки деталей применительно к действующим унифицированным технологическим процессам. На основе информации производятся расчеты размеров поверхности обработки, расхода материалов, составляется их спецификация, определяется последовательность технологических маршрутов, перечень технологического оборудования.

Наибольший эффект от механизации и автоматизации технической подготовки производства достигается объединением САПР, автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП), автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП) в рамках автоматизированной системы управления производством (АСУП).

Особая роль здесь отводится аддитивным технологиям, без которых «сквозное» проектирование наукоёмкой техники неэффективно.

Только в этом случае обеспечивается ускорение и повышение технического уровня конструкторских и технологических разработок, выбираются оптимальный технологический процесс, рациональное использование производственных мощностей, материальных и трудовых ресурсов, повышения качества продукции и всей хозяйственно-экономической работы предприятия по выпуску наукоёмкой техники.

Но разработать процесс производства и технологию - это еще не все. Для нормального функционирования системы нам необходимо обеспечить нормальное техническое обслуживание и снабжение всеми необходимыми комплектующими, а также организовать бесперебойную эксплуатацию средств технологического оснащения.

4.2. Планирование энергоснабжения в подготовке производства

Для большинства процессов на предприятии, начиная с основного производства и заканчивая ремонтом оборудования необходимо снабжение различными видами энергии. Эту задачу берет на себя энергетическое хозяйство предприятия. Назначение энергетического хозяйства - бесперебойное обеспечение всех подразделений предприятия необходимыми видами энергетических услуг при минимальных затратах на содержание данной службы. Для этого ее усилия должны быть направлены на решение следующих основных задач:

- получение со стороны энергии общепромышленного назначения и производство собственными силами отдельных ее видов;

- организацию и планирование рационального потребления энергии всеми подразделениями предприятия;

- надзор за правильной эксплуатацией энергетического оборудования, его техническим обслуживанием и ремонтом;

- разработку и осуществление мероприятий по экономии энергоресурсов.

Потребности промышленных предприятий в энергоресурсах обеспечиваются за счет трех источников:

- централизованного снабжения;

- собственного производства энергии;

- использования вторичных энергоресурсов.

Основным источником в современных условиях является централизованное снабжение предприятия энергоресурсами общепромышленного назначения:

- электроэнергией, паром, горячей водой - от районных теплоэлектроцентралей;

- природным газом - от государственной сети газо-

снабжения;

– твердым и жидким топливом - в порядке поставок от предприятий топливодобывающих отраслей через систему договоров заключенных с этими предприятиями.

Собственное производство энергии силами самого предприятия организуется применительно к тем ее видам, централизованное обеспечение которыми либо технически невозможно, либо нерационально из-за утери его полезных свойств при передаче на большое расстояние при значительной удаленности предприятия от источника централизованного обеспечения. Это относится к таким энергоносителям, как сжатый воздух, насыщенный пар и т.д.

Важная роль в организации рационального энергоснабжения принадлежит также использованию вторичных энергоресурсов на предприятиях:

– использованию тепла печей для производства горячей воды, пара;

– вторичное использование пара, горячей воды для отопления помещений и хозяйственных нужд и т.д.

В состав энергохозяйства предприятия входят *теплосиловой, энергосиловой, газовый, слаботочный, электроремонтный* участки и др. Теплосиловой участок охватывает котельные, компрессорные установки, тепловую и канализационную сети, водоснабжение. Его назначение – обеспечение производства паром, водой, сжатым воздухом. Электросиловой участок объединяет понижающие подстанции, электрические сети, генераторные и трансформаторные установки. Его задача - обслуживание всех подразделений предприятия электроэнергией.

Газовый участок располагает газовыми сетями, кислородными и ацетиленовыми станциями, холодильными установками, промышленной вентиляцией. Он отвечает за обеспечение производства кислородом, ацетиленом и другими

газами. Слаботочный участок охватывает всю заводскую телефонную и радиотрансляционную связь, а также другие виды связи и сигнализации, обеспечивая их бесперебойную работу в установленном режиме. Электроремонтный участок располагает соответствующими средствами и кадрами для осуществления ремонта электрооборудования и электроаппаратуры. Руководит энергетическим хозяйством на крупных предприятиях главный энергетик, опирающийся в своей работе на отдел главного энергетика. В составе отдела обычно выделяют бюро энергоиспользования и энергооборудования, а также лаборатории - электрическую и тепловую. На небольших предприятиях руководство энергохозяйством осуществляет заместитель главного механика по энергетической части.

Рациональное использование энергетических ресурсов предполагает строгое нормирование их выработки и расхода. Разработка соответствующих норм ведется отделом главного энергетика для служб, вырабатывающих энергоресурсы, для производственных цехов и других подразделений, расходующих энергию для производства основной продукции, инструмента, на хозяйственные нужды и т.д.

Разработка норм расхода электроэнергии, пара, сжатого воздуха, газа, воды, вспомогательных материалов ведется на единицу продукции. Для подразделений, вырабатывающих энергоресурсы, нормы устанавливаются применительно к следующим единицам продукции:

- для электростанций - 100 кВт×ч выработанной электроэнергии;
- для котельных - 1 т нормального пара или 1 МКал тепла;
- для кислородных установок - 1 м³ газообразного кислорода и т.д.

Для основных цехов нормы разрабатываются приме-

нительно к следующим единицам продукции:

- литейные и кузнечные цехи - 1 т годных отливок, поковок или штамповок, прошедших обрубку;
- цехи покрытий - 1 м² покрываемой поверхности;
- механические цехи - машинокомплект деталей;
- сборочные цехи - сборочная единица или машина.

Методика расчета норм расхода энергетических ресурсов определяется отраслевыми методическими указаниями. Планирование расхода энергии ведется отдельно по каждому виду ресурсов на основе норм их расхода и производственной программы на планируемый период. При этом рассчитывается потребность отдельно на основные и вспомогательные нужды. Учитываются также потери энергии в сетях. Например, расход электроэнергии механическим цехом на производство продукции на плановый период может быть определен по следующей формуле:

$$P_{\text{пл}} = H_{\text{эл}} N,$$

где $P_{\text{пл}}$ – расход электроэнергии на планируемый период, кВт×ч;

$H_{\text{эл}}$ – норма расхода электроэнергии по цеху на машинокомплект, кВт×ч;

N – программа планового периода в машинокомплектах.

Потребность в электроэнергии на вспомогательные нужды рассчитывается исходя из количества источников расхода энергии, режима их работы и соответствующих норм расхода. Потери электроэнергии в сетях рассчитываются по разработанным нормативам. Суммирование потребности по всем трем составляющим определит общий расход электроэнергии по цеху в плановом периоде. Расчеты по отдельным цехам и службам сводятся отделом главного энергетика в общий план расхода электроэнергии на

плановый период по предприятию в целом.

Важная роль в организации и планировании энергохозяйства принадлежит сводному энергобалансу предприятия, составляемому с учетом видов энергии. Энергобаланс состоит из приходной и расходной частей. В приходной части указывается общее поступление энергии с учетом ее источников, в расходной - направление использования энергии по ее видам и потребителям. Энергобаланс содержит:

- общее поступление энергии;
- направление использования энергии по ее видам;
- затраты по отдельным видам энергоносителей и эффективность их использования.

На его основе разрабатывается план выработки и использования энергии, потребность в материальных ресурсах и кадрах на плановый период, эффективность использования ресурсов. Основными технико-экономическими показателями, характеризующими эффективность организации энергетического хозяйства, являются:

- коэффициенты потерь в сетях по видам энергии;
- эффективность использования энергоустановок;
- абсолютное потребление топлива и других исходных материалов;
- удельный расход на выработку единицы определенного вида энергии;
- себестоимость каждого вида энергии;
- коэффициент энерговооруженности рабочих.

Промышленное производство является крупнейшим потребителем энергетических ресурсов. На его долю приходится большая часть потребляемой электроэнергии. Поэтому последовательное проведение мероприятий по экономии энергетических ресурсов на промышленных предприятиях имеет большое значение. По направлению использования различают *технологическую, двигательную, осветительную*

и отопительную энергию. Основными путями рационализации потребления энергии по указанным направлениям являются:

- ликвидация прямых потерь топлива и энергии;
- правильный выбор энергоносителей; использование вторичных энергоресурсов;
- совершенствование технологии и организации основного производства;
- проведение общехозяйственных мероприятий по экономии топлива и энергии.

Поскольку одни и те же процессы могут выполняться с использованием разных энергоносителей, важно разработать сравнительные характеристики этого использования, с тем чтобы на обоснованно осуществлять их выбор для конкретных условий. Выбор этот зависит от ряда параметров: особенностей технологического процесса, источника обеспечения (например, ТЭЦ или собственная котельная) и др. Использование вторичных энергоресурсов:

- печных отходящих газов;
- физического тепла генераторного газа, конденсата пара, охлаждающей воды,
- остывающей продукции;
- коксового и доменного газов и др.

Основными технологическими мероприятиями по рационализации использования энергии являются:

- интенсификация производственных процессов (скоростные режимы обработки);
- внедрение более совершенной технологии и техники производства.

Для экономии двигательной энергии большое значение имеет лучшее использование мощности оборудования. В числе мероприятий в этом направлении можно назвать повышение коэффициента использования мощности токо-

приемников за счет:

- перераспределения электродвигателей в соответствии с характером выполняемых работ и мощностью;
- повышение загрузки оборудования в смену.

В целом техническая подготовка производства производится в соответствии с проектом технической подготовки, который состоит из следующих пунктов:

- подбор и размещение технологического оборудования, систем холодильных установок, энергоснабжения, санитарно-технических коммуникаций;
- определение методов удаления отходов производства и их утилизации;
- расчет численности производственно-технического персонала, определение сроков окупаемости предприятия и его рентабельности;
- организация технологического процесса производства предприятия в целом и отдельных его цехов;
- разработка объемно-планировочной схемы здания, отвечающей технологическому процессу.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные принципы планирования технической подготовки производства.
2. Виды и основное содержание различных работ по организации подготовки к выпуску наукоемких изделий.
3. Поясните важность САПР для конструкторской и технологической подготовки производства.
4. Каким образом формируется система планирования энергоресурсов при подготовке производства?
5. Приведите примеры текущего планирования.
6. Взаимосвязь возможностей автоматизированного планирования со сроками ускоренной подготовки производства наукоемких изделий.

5. ТИПОВЫЕ ОБЪЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА НАУКОЁМКИХ ИЗДЕЛИЙ

5.1. Высокозатратные в подготовке производства конструктивные элементы наукоемких изделий

В качестве примера низкого уровня технологичности и требующие значительного объема подготовки производства показательны нагруженные *корпусные детали* с внутренними полостями и *лопастные детали* лопаточных машин с винтовыми лопастями и узкими межлопаточными каналами сложного профиля.

Классифицируя такие детали, можно выделить следующие типовые объекты:

- односторонние открытые колеса насосов (рис. 5.1, а) и компрессоров (рис. 5.1, б) с малой закруткой лопаток, шнеки (рис. 5.1, в) с небольшой высотой лопастей, которые поддаются лезвийной и абразивной обработке;

- шнеки с постоянным и переменным шагом, с различным профилем винтовых каналов и лопастей (рис. 5.1, в, 5.2);

- рабочие колеса агрегатов турбонаддува, где доступ традиционного металлообрабатывающего инструмента затруднен из-за сложного пространственного профиля лопаток (рис. 5.3);

- винтовые турбины высоконапорных вихревых насосов и вентиляторов (рис. 5.4) с очень большим количеством лопаток и экономически нецелесообразной трудоемкостью механической обработки;

- турбины высокооборотных компрессоров (рис. 5.5) с большим количеством лопаток и винтовыми лопастями, характеризующиеся экономически нецелесообразной трудоемкостью обработки;

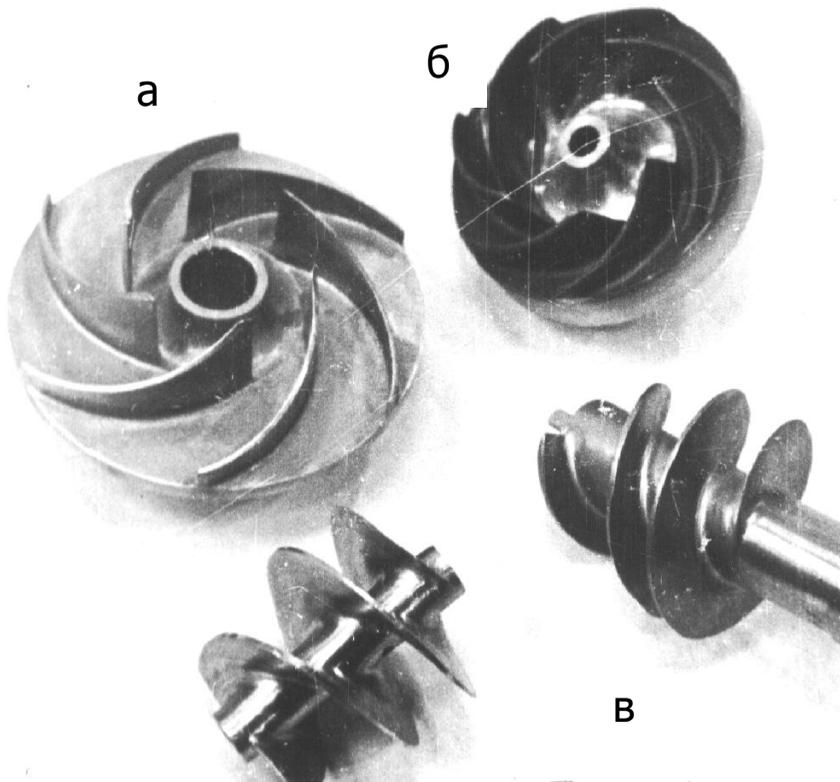


Рис. 5.1. Типовые детали с открытыми винтовыми
Каналами, доступными для традиционной обработки:
а, б – крыльчатки; в - шнеки

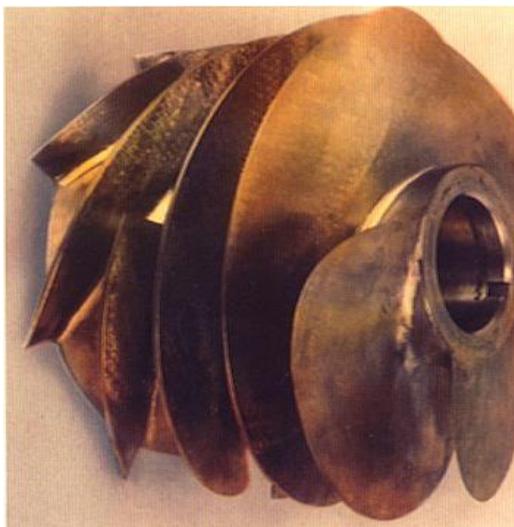


Рис. 5.2. Шнек с различным профилем винтовых каналов и лопастей



Рис. 5.3. Рабочее колесо компрессора агрегата турбонаддува

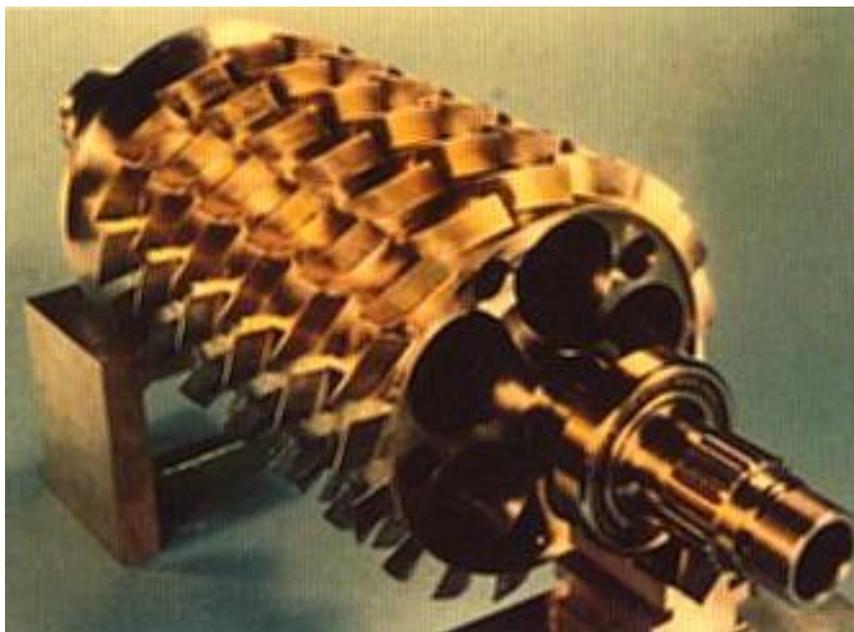


Рис. 5.4. Ротор высоконапорной вихревой турбины

– турбины высокооборотных турбонасосных агрегатов с узкими межлопаточными каналами, выполненными в цельной заготовке и недоступными для профилированного инструмента (рис. 5.6) и покрывным диском (рис. 5.7);

– корпусная деталь насосного агрегата с внутренними полостями (рис. 5.8).

Таким образом, к нетехнологичным лопаточным деталям наукоемких изделий в первую относятся конструктивные элементы агрегатов транспортных систем, имеющие внутренние закрытые и открытые полости (каналы) с выходом наружу.



Рис. 5.5. Комбинированная турбина с винтовыми лопастями

Это межлопаточные каналы центробежных и осевых рабочих колес и сопловых аппаратов насосных агрегатов, турбокомпрессоров и агрегатов турбонаддува, работающих при больших перепадах давления, температуры, нестационарных вибрационных нагрузениях и высоких окружных скоростях.



Рис. 5.6. Турбина с закрытыми узкими межлопаточными каналами, выполненными в цельной заготовке

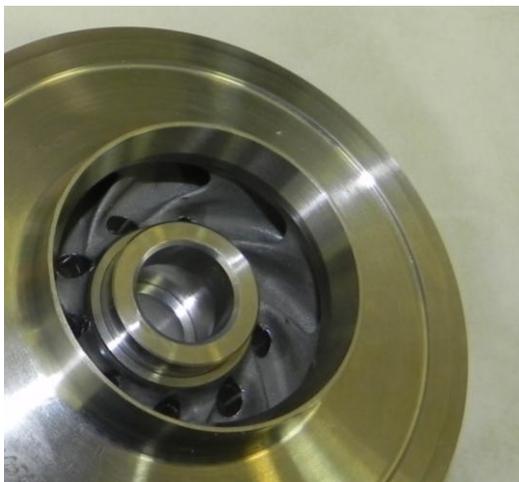


Рис. 5.7. Литая крыльчатка с покрывным диском



Рис. 5.8. Корпусная деталь насосного агрегата

5.2. Конструкторско-технологические проблемы заготовительного производства

Широта и разноплановость задач, решаемых при выборе конструкционных материалов для нагруженных элементов наукоемких изделий, привела к необходимости использования не только новых материалов с повышенными механическими характеристиками, способных сопротивляться воздействию циклических нагрузок широкого спектра частот и совместимых с водородом, но и совершенно новых технологий, ранее не применяемых в производстве.

Традиционные технологические и материаловедческие приемы – литье,ковка, штамповка, дополнительное легиро-

вание, термообработка и т. п. практически полностью исчерпали себя и не могут обеспечить радикального повышения служебных характеристик сталей и сплавов.

Кроме того, дополнительное легирование приводит, как правило, к снижению технологических свойств жаропрочных сплавов, затрудняет горячую деформацию (ковку и штамповку) и обработку резанием, что в свою очередь вызывает уменьшение коэффициента использования металла, как для деталей, изготавливаемых из поковок и на станках с ЧПУ штамповок с очень низким коэффициентом использования материала (рис. 5.9).

В связи с этим на первый план выходят принципиально новые технологические процессы обработки материалов и изготовления деталей. К таким процессам, в частности, относится технология металлургии гранул в сочетании с горячим изостатическим прессованием (ГИП). Гранульная технология используется главным образом при изготовлении деталей ответственного назначения из сплавов на основе никеля и титана.

Сравнительный анализ механических характеристик и структуры литых и гранульных деталей из сплавов аналогичного химического состава выявил несомненные преимущества гранульных материалов, скомпактированных методом ГИП.

Во-первых, гранульные материалы имеют практически 100 % плотность и не содержат дефектов, неизбежных при литье (пор, раковин, рыхлот, неметаллических включений). Во-вторых, структура этих материалов характеризуется мелким зерном, однородностью и изотропностью свойств независимо от размера сечения деталей, чего невозможно добиться при изготовлении деталей литьем, ковкой или штамповкой. Кроме того, в сравнении с литейными аналогами гранульные сплавы на основе никеля имеют в 1,3–1,5

раза большую прочность и в два с лишним раза большую пластичность.



Рис. 5.9. Детали, целиком обработанные на станках с ЧПУ

Механические характеристики гранульных титановых сплавов находятся на уровне деформированного металла. В связи с этим процесс ГИП стал неотъемлемой частью при производстве деталей ответственного назначения. Часто РК изготавливают из титановых или алюминиевых сплавов. В таблице для некоторых материалов РК приведены механические характеристики материалов при температуре 293 К и 20 К.

Механические характеристики материалов

Материал	ρ , кг/м ³	σ_b , МПа		σ_{02} , МПа		ψ , %	
		293 К	20 К	293 К	20 К	293 К	20 К
Титановый сплав ВТ5–1КТ деформированный	4420	800	1500	750	1300	25	14
Титановый сплав ВТ6С деформированный	4450	850	1550	850	1500	25	-
Алюминиевый сплав АК6 деформированный	2750	470	630	390	470	33	20
Титановый сплав ВТ5–1КТ, полученный ГИП	4460	736	1324	687	1226	20	15

В заготовках, получаемых методом ГИП, не только обеспечивается высокая прочность и пластичность материала, но и практически отсутствуют дефекты, достигается однородная мелкозернистая структура материала в сравнении с литым вариантом изготовления.

Заготовка основного диска РК штампованная. Лопатки РК формируются и одновременно сращиваются с основным диском методом ГИП. После прессования заготовки межлопаточные каналы РК не подвергаются механической обработке ввиду отсутствия технологических методов и средств. При испытаниях РК получены скорости, соответствующие разрушению, до 780 м/с в воздушной среде нормальной

температуры и до 930 м/с в среде водорода при рабочей температуре. Разница между максимальной и минимальной разрушающими скоростями при комнатной температуре составляет всего 8%, для криогенных температур (60 К) значение разрушающей скорости вращения на 20–25 % выше разрушающей скорости вращения при комнатной температуре. Диск, лопатки и бандаж колеса турбины выполняются из гранул за одно целое.

Качество турбины контролируется ультразвуковым методом. В турбине, как и в других высоконагруженных деталях, механические характеристики материала контролируются испытаниями на растяжение стандартных образцов. При испытаниях в воздушной среде нормальной температуры получена скорость, соответствующая разрушению, до 725 м/с. При длительных испытаниях двигателей на повышенных режимах наблюдались дефекты на лопатках рабочего колеса второй ступени турбины, причиной которых явилось сочетание действующих высоких напряжений от центробежных сил бандажа и высокотемпературного водорода. К тому же, метод ГИП не позволяет получать заготовки с узкими глубокими полостями и каналами. В связи с этим широкое применение нашла технология изготовления рабочего колеса турбины из заготовки, получаемой методом газостатического прессования с последующей электрофизической обработкой узких межлопаточных каналов (рис. 5.10).

Одним из эффективных способов устранения внутренних литейных дефектов усадочного и газового характера является высокотемпературная газостатическая обработка (ВГО). Такой обработке подвергаются отливки из нержавеющей сталей, никелевых и алюминиевых сплавов после устранения внешних дефектов. После ВГО производится дополнительный контроль литейных дефектов в заготовках.

С помощью ВГО устраняется до 50 % дефектов типа рыхлот в отливках из нержавеющей стали и до 80% в отливках из никелевых сплавов. При этом наблюдается повышение плотности материала до 0,5 %. В отливках из алюминиевых сплавов количество внутренних дефектов после ВГО уменьшается более чем на 50 %.

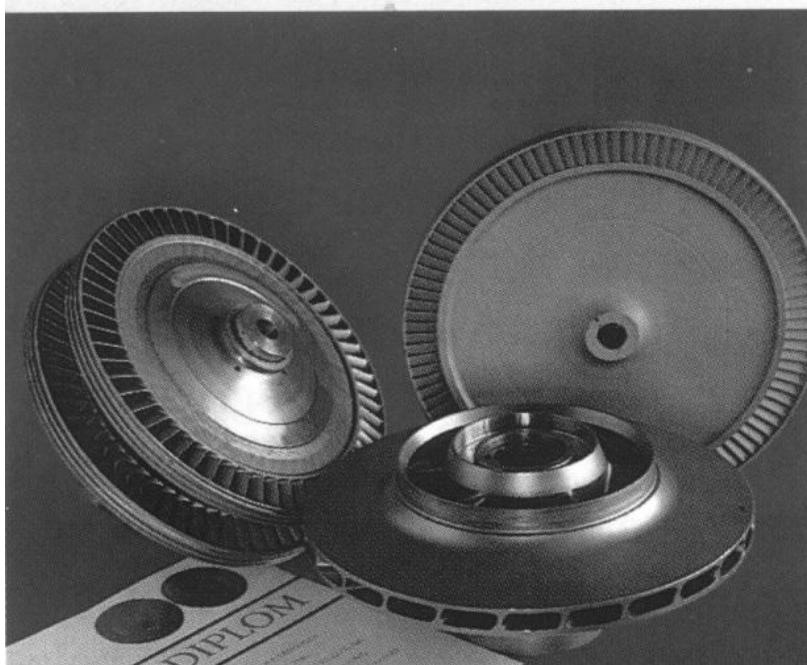


Рис. 5.10. Детали, из заготовок, получаемых методами ГИП с последующей ЭФО каналов

Как правило, ВГО назначается для ответственных деталей, к которым предъявляются повышенные требования по герметичности. В силу отмеченных достоинств высокотемпературная газостатическая обработка является неотъ-

емлемой частью процесса производства высококачественных отливок (рис. 5.11).

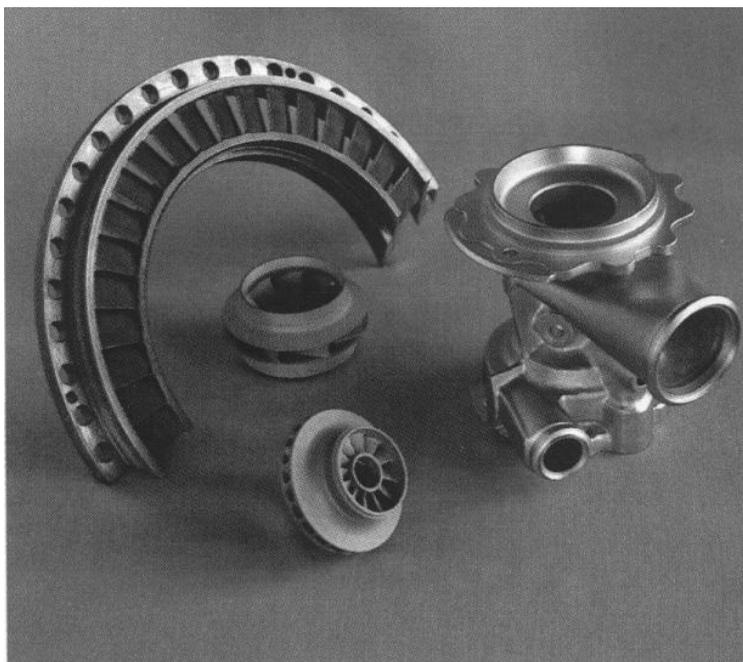


Рис. 5.11. Заготовки, получаемые методами литья по выплавляемым моделям

Применяя принципы групповой обработки, можно создавать комплексную технологию их получения, включающую операции и переходы индивидуальных технологических процессов. В рассматриваемых типовых деталях обрабатываются закрытые полости, в которые ограничен, или исключен доступ режущего инструмента. В этом случае приоритет отдается нетрадиционным комбинированным методам поверхностной обработки, сочетающим в одном про-

цессе несколько видов воздействий различного рода (электрические, механические, лучевые, плазменные и т.д.).

Вследствие низкой производительности таких технологий актуальным является получение заготовок с минимальными технологическими припусками или вовсе без них (например, с помощью аддитивных технологий).

Вопросы для самоконтроля

1. Какие изделия машиностроения относятся к наукоемким. Приведите примеры типовых деталей.

2. Приведите примеры известных Вам конструктивно-технологических решений для наукоемких изделий отечественного машиностроения.

3. Дайте технологическую классификацию типовых нагруженных конструктивных элементов на примере лопаточных деталей.

4. В чем заключается особенность эксплуатации рабочих поверхностей деталей наукоемкого изделия в экстремальных условиях?

5. Какие прогрессивные технологии используют при изготовлении сложных конструктивных элементов наукоемкого изделия в машиностроении.

6. Приведите примеры новых технологических решений для заготовительного производства наукоемких лопаточных машин.

7. Поясните роль аддитивных технологий в получении заготовок для нагруженных деталей наукоемких изделий в машиностроении.

6. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА

6.1. Понятие и виды аддитивного производства

Аддитивное производство (Additive Manufacturing, AM) - новаторская технологическая концепция, активно разрабатываемая во всех высокоразвитых странах со второй половины XX века. Принцип заключается в том, что изделие создается при помощи послойного добавления материала различными способами, например, наплавляя или напыляя порошок, жидкий полимер, композитный материал.

Данная концепция призвана дополнить традиционные методы производства, основанные на удалении первичного материала (например, фрезерование или точение).

Технология позволяет получать микронные внутренние полости различной конфигурации (цилиндрические, конические, спиральные каналы, ячейки и пр.), которые являются недоступными для традиционных способов изготовления изделий.

Суть самой распространенной технологии - стереолитографии в следующем: в рабочей зоне принтера находится жидкий фотополимер. При освещении ультрафиолетовым светом фотополимер затвердевает и превращается в достаточно прочный пластик (фотополимеры, например, активно используются дантистами для пломбирования).

Для засветки полимера используется либо ультрафиолетовый лазер, либо обычная ультрафиолетовая лампа. Луч лазера фактически попиксельно сканирует рабочую плоскость и формирует отдельные твердые «пиксели», пока не нарисует на пластике сечение модели. Затем уровень фотополимера повышается (точнее, опускается рабочий стол вместе со сформированной частью модели), и поверх него рисуется следующий слой, пока модель не будет полностью

готова.

Стереолитография позволяет получить точность «отпечатка» порядка десятых долей миллиметра, хорошо воспроизводит мелкие детали и обеспечивает достаточно ровную поверхность объекта. Эта технология лучше всего обкатана и наиболее широко распространена. Впрочем, не лишена она и недостатков - установки, равно как и расходные материалы, достаточно дороги (цена такого принтера составляет порядка сотен тысяч долларов). К тому же обрабатываемый материал ограничивается только фотополимерами.

Аддитивное производство с использованием лазера называется селективным лазерным плавлением (СЛП), – новаторская и уникальная технология прямого изготовления трехмерных объектов с определенными механическими свойствами из металлических порошков (в том числе наноструктурированных). Конечные свойства материала изделия после процесса спекания сопоставимы со свойствами исходного монолитного материала.

Альтернативный метод трехмерной печати называется лазерным спеканием (Selective Laser Sintering - SLS). Тут, как легко догадаться, тоже используется лазер, но в качестве рабочего материала выступает уже не фотополимер, а порошок какого-нибудь относительно легкоплавкого пластика.

Пластик в рабочем объеме SLS-машины нагревается почти до температуры плавления, а чтобы он не загорелся и не стал окисляться, в рабочую зону подается азот. Затем мощный лазер опять же рисует по пластиковому порошку сечение детали, пластик нагревается выше температуры плавления и спекается. Сверху насыпается следующий слой и процедура повторяется. В конце работы лишний порошок просто стряхивается с готовой модели.

Лазерное спекание тоже обеспечивает достаточно высокое качество деталей, хотя поверхность у них получается пористой. Зато полученные методом SLS модели - самые прочные и эту технологию, в принципе, можно использовать для малосерийного производства. Правда, установка SLS достаточно сложная и дорогая, а скорость производства составляет всего несколько сантиметров (высоты) в час (плюс, несколько часов на нагревание и остывание установки).

При помощи технологии селективного лазерного плавления также можно получить биметаллические изделия за счет переменной подачи разного порошка, например, медного и из нержавеющей стали. Технология селективного лазерного плавления применяется как для быстрого прототипирования, так и мелко- и среднесерийного производства промышленных изделий.

Особенность производства указанным методом заключается в том, что данная технология не требует предварительного трудоемкого процесса технологической подготовки производства. Изделия сложной геометрической формы создаются непосредственно из САПР в течение нескольких часов и не требуют дополнительной механической обработки на станках.

Технология СЛП обеспечивает изготовление деталей с высокой точностью в полном соответствии с техническими требованиями к изделию и механическими свойствами, указанными в 3D-модели. Кроме неплохой точности изготовления и высокой прочности полученных "распечаток", SLS обладает еще несколькими важными достоинствами.

Во-первых, лазерное спекание позволяет изготавливать модели с подвижными частями - например, с работающими петлевыми соединениями, нажимающимися кнопками и так далее.

Во-вторых, для SLS-процесса разработаны специальные материалы, позволяющие напрямую изготавливать металлические детали. В качестве порошка здесь используются микрочастицы стали, покрытые сверху слоем связующего пластика. Спекание пластика происходит как обычно, а затем «отпечатанная» деталь обжигается в печи. При этом пластик выгорает, а освободившиеся поры заполняются бронзой. В результате, получается объект, состоящий на 60% из стали и на остальные 40% из бронзы. По своим механическим характеристикам он превосходит алюминий и приближается к классической нержавеющей стали.

Фактически, SLS уже сейчас позволяет производить полноценные металлические предметы, причем произвольной формы. Кроме того, имеется аналогичный материал с керамической или стеклянной сердцевиной - из него можно делать модели, устойчивые к высоким температурам и агрессивным химическим веществам.

В целом *Аддитивное производство* – перспективная технология изготовления изделий единичного и мелкосерийного производства во многих отраслях промышленности (машиностроение, авиационная и космическая отрасли, медицина и пр.).

Использование таких технологий позволяет изготавливать детали с внутренними криволинейными отверстиями, недоступными изготовлением другими методами обработки. Прямое производство с САПР и отсутствие множества переходов и переустановов детали на станке, как при традиционных методах изготовления, позволяет получить высокую точность и качество наукоемкого изделия.

6.2. Аддитивные технологии в литейном производстве

Технология подразумевает использование в качестве модельного материала специального фотополимера –

светочувствительной смолы. Основой в данном процессе является ультрафиолетовый лазер, который последовательно переводит поперечные сечения модели на поверхность емкости со светочувствительной смолой.

Фотополимер затвердевает только в том месте, где прошел лазерный луч. Затем новый слой смолы наносится на затвердевший слой, и новый контур намечается лазером. Процесс повторяется до завершения построения модели. Стереолитография – наиболее популярная RP-технология для получения высокоточных моделей. Она охватывает практически все отрасли материального производства от медицины до тяжелого машиностроения. SLA-технология позволяет быстро и точно построить модель изделия практически любых размеров. Качество поверхностей зависит от шага построения. Современные машины обеспечивают шаг построения 0,025 – 0,15 мм.

Под литьём полиуретановых смол, пластмасс и воска в силиконовые формы при изготовлении изделий малыми сериями понимают метод получения пластмассовых деталей или выплавляемых восковых моделей («восковок») с помощью силиконовых форм. Этот метод также предполагает «участие» стереолитографии или послойного синтеза в любом другом виде.

Суть данного метода состоит в том, что стереолитографическая модель используется в качестве мастер-модели для изготовления литейной оснастки – формы из силикона, с помощью которой в дальнейшем идет тиражирование пластмассовых деталей или «восковок».

Мастер-модель детали, заливают жидким силиконом. Силиконовая смесь приготавливается непосредственно перед получением формы в специальном смесителе и затем подается в опоку, обычно прямоугольной формы, в которой находится мастер-модель.

Предварительно, с помощью специальных технологических приемов на мастер-модели формируется будущий разъем формы. В камере, где находится опока, создается вакуум, что обеспечивает удаление пузырьков воздуха из силикона.

После полимеризации силикона форму разрезают и извлекают мастер-модель. Полученную форму используют для тиражирования «восковок» или для получения отливок пластмассовых деталей из специальных двухкомпонентных полиуретановых смол. Стойкость формы зависит от сложности модели и составляет в среднем 30-50, а иногда до 100 циклов заливки (рис. 6.1).



Рис. 6.1. Полистирольная модель и отливка

Принципиально технологии литья по восковым и по полистирольным моделям не отличаются. Используются те же формовочные материалы, то же литейное и вспомогательное оборудование.

Разве что восковая модель - «выплавляемая», а полистирольная модель - «выжигаемая». Отличия лишь в нюансах формования и термообработки опок. Однако эти нюансы имеют значение.

Работа с полистирольными моделями требует внимания при выжигании: выделяется достаточно много газов (горючих), которые требуют нейтрализации, материал частично выгорает в самой форме, есть опасность образования золы и засорения формы.

Также нужно предусмотреть возможность стекания материала из застойных зон, безусловным требованием является использование прокалочных печей с программаторами, причем программа выжигания полистирола существенно отлична от программы вытапливания воска. Но в целом, при определенном навыке и опыте, литье по выжигаемым полистирольным моделям дает очень хороший результат (рис. 6.2).

К недостаткам технологии нужно отнести следующее. Процесс спекания порошка - это тепловой процесс со всеми присущими ему недостатками: неравномерность распределения тепла по рабочей камере, по массиву материала, коробление вследствие температурных деформаций.

Во-вторых, порошок полистирола не сплавляется, как например, порошки полиамида или металла, о которых речь пойдет ниже, а именно спекается - структура модели пористая, похожа на структуру пенопласта. Это делается специально для облегчения в дальнейшем удаления материала модели из формы с минимальными внутренними напряжениями при нагревании.



Рис. 6.2. Полистирольная модель (после выращивания и инфильтрации) и отливка (чугун)

Для придания прочности и удобства работы с ней (сочленения с литниковой системой, формовки) модель пропитывают специальным составом на восковой основе - процесс называется инфильтрацией. Модель помещают в специальную печь и при температуре около 80°C пропитывают указанным составом (на фотографии показаны инфильтрированные модели красного цвета, из машины же извлекаются полистирольные модели снежно-белого цвета).

При опытным и мелкосерийном литье металлов непосредственно заливка металла происходит на установке литья с перепадом давления, которая позволяет создать вокруг литейной формы вакуум, а сразу после заполнения ее металлом «поддавить» избыточным давлением аргона только что залитый металл. Вакуум так же можно создать и внутри литейной формы, а также в плавильной камере. Установки оснащают индукционным нагревом и 10-ти литровым графитовым тиглем (27 кг AL, или 87 кг Бронзы), а плавка происходит в среде инертных газов.

Аддитивные технологии позволяют решать ранее не решаемые задачи, «выращивать» литейные модели и формы, которые невозможно изготовить традиционными способами. Радикально сократились сроки изготовления модельной оснастки.

Развитие технологий литья, в том числе вакуумного, по формам и моделям, полученным аддитивными технологиями, дало возможность уменьшить время изготовления опытных образцов в несколько раз, а в ряде случаев серийной продукции – на порядок.

Уход от традиционных технологий, применение новых методов получения литейных синтез-форм и синтез-моделей за счет технологий послойного синтеза дало возможность радикально сократить время на создание новой продукции. Например, характерная для автомобильного двигателестроения деталь – блок цилиндров.

Для изготовления первого опытного образца традиционными методами требуется не менее 6-ти месяцев, причем основные временные затраты приходятся на создание модельной оснастки для литья «в землю».

Использование для этой цели технологии Quick-Cast (выращивание литейной модели из фотополимера на SLA-машине с последующим литьем по выжигаемой модели) сокращает срок получения первой отливки с полугода до двух недель (рис. 6.3).

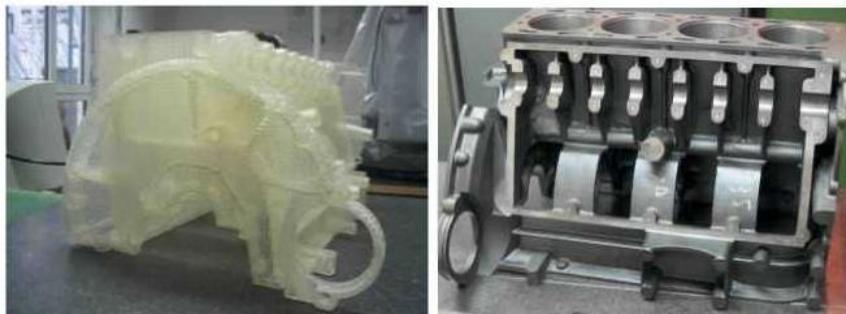


Рис. 6.3. Quick-cast модель и отливка блока цилиндров

Эта же деталь может быть получена менее точной, но вполне пригодной для данных целей технологией – литьем в выращенные песчаные формы на машинах типа S-Max.

Значительная часть «обычных» литейных изделий, не имеющих специальных требований по точности литья или внутренней структуры, может быть получена в виде готовой продукции в течение нескольких дней:

- прямое выращивание восковой модели или Quick-cast-модели (1 день);

- формовка + сушка формы (1 день);

- прокалка формы и собственно литье (1 день).

Итого: 3-4 дня с учетом подготовительно-заключительного времени.

AF-машины используют для получения:

- литейных моделей;

- мастер-моделей;

- литейных форм и литейной оснастки.

Модельные материалы:

- полистирол, полиметилметакрилат (для выжигаемых моделей);

- акриловые фотополимеры (для выжигаемых моделей и мастер-моделей);

- воск (для выплавляемых моделей);

- полиамид (для литейной оснастки);

- литейные пески (для литейной оснастки).

Технологический процесс вакуумного литья в опытном производстве обычно включает следующие этапы:

- получение мастер-модели (на станках с ЧПУ или AF-оборудовании);

- получение силиконовой (или иной эластичной) формы;

- изготовление восковых моделей посредством вакуумного литья в силиконовые формы;

– проектирование и изготовление литниковой системы, установку восковой модели в сборе с литниковой системой в опоку;

– формование–заливка опоки формомассой, получение литейной формы;

– вытапливание восковой модели из формы и прокатку формы;

– установку опоки в вакуумную камеру литейной машины;

– собственно литье, извлечение опоки из вакуумной машины и охлаждение;

– удаление формомассы (размывка) и очистка отливки, удаление литниковой системы.

В MJM – процессе (Multi Jet Modelling), построение модели путем нанесения расплавленного материала с помощью многоструйных головок (по типу струйных принтеров). Модели строятся на 3D-принтерах с использованием специального модельного материала, в состав которого входит светочувствительная смола - фотополимер на акриловой основе, и литейный воск более 50% по массе).

Фотополимер является связующим элементом. Материал посредством многоструйной головки послойно наносится на рабочую платформу, отверждение каждого слоя производится за счет облучения ультрафиолетовой лампой.

Модельный материал – литейный воск. Применяется для непосредственного выращивания восковой модели и дальнейшего получения металлической отливки методом литья в оболочковые или гипсокерамические формы. Обеспечивает возможность быстрого получения отливки из металла без изготовления литейной оснастки (рис. 6.4).

В «стандартном» режиме толщина слоя построения 36 мкм, «высокоточном» режиме - 16 мкм. Точность построения (в зависимости от конфигурации, ориентации и разме-

ров модели) 0,025-0,05 мм на длине один дюйм. Принтер позволяет надежно строить модели с толщиной стенок до 1 мм, в отдельных случаях до 0,8 мм. Крупные модели могут быть построены частями и затем склеены.

Недостатком технологии является относительно высокая стоимость расходных материалов. Тем не менее, эта технология имеет и неоспоримые преимущества - скорость получения модели и, не менее важное, высокое качество модельного материала с точки зрения собственно технологии литья по выплавляемым моделям (формовки, вытапливания модели).



Рис. 6.4. Оболочковая форма и и отливка корпуса турбины, полученные по восковой синтез-модели

Также особенностью данной технологии является наличие так называемых поддерживающих структур. Поддержки строятся для удержания нависающих элементов модели в процессе построения. В качестве материала для поддержек используется восковой полимер с низкой температурой плавления, который после построения модели удаляется струей горячей воды.

Современные машины имеют возможность работы на двух модельных материалах – литейном воске и акриловом

фотополимере.

При *селективном лазерном спекании* модели создаются из порошковых материалов за счет эффекта спекания при помощи энергии лазерного луча. В данном случае, в отличие от SLA-процесса, лазерный луч является не источником света, а источником тепла.

Попадая на тонкий слой порошка, лазерный луч спекает его частицы и формирует твердую массу, в соответствии с геометрией детали. В качестве материалов используются полиамид, полистирол, песок и порошки некоторых металлов. Существенным преимуществом SLS-процесса является отсутствие так называемых поддержек при построении модели.

В процессах SLA и MJM при построении нависающих элементов детали используются специальные поддержки, предохраняющие свежестроенные тонкие слои модели от обрушения. В SLS-процессе в таких поддержках нет необходимости, поскольку построение ведется в однородной массе порошка. После построения модель извлекается из массива порошка и очищается (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Модели, полученные SLS

PSL (Plastic Sheet Lamination) – построение модели путем послойного склеивания ПВХ-пленки на 3D-принтерах, работающие по технологии PSL - Plastic Sheet Lamination. Такие устройства иногда называются LOM-машинами, от Laminated Object Manufacturing – послойное склеивание пленочных материалов, например, полимерной пленки или ламинированной бумаги с последующим формированием («вырезанием») модели с помощью лазерного луча или режущего инструмента.

Например, 3D-принтер Solido SD 300 относится к категории самых дешевых RP-машин для быстрого прототипирования.

Модельным материалом служит полихлорвиниловая пленка толщиной 0,15 мм пяти цветов: полупрозрачная (янтарная), красная, синяя, кремовая, черная. Формирование модели производится путем последовательного склеивания слоев пленки и вырезания контура модели с помощью лезвия, закрепленного на подвижной головке.

Модель строится на специальной магнитной подложке, устанавливаемой на подвижной (вверх-вниз) платформе. Клеевой состав наносится на всю поверхность слоя пленки, а в те места, где после построения необходимо обеспечить легкое удаление пленки, наносится «анти-клей». Т. е. тело модели формируется за счет последовательного склеивания пленки, а «пустоты» остаются не склеенными, чтобы обеспечить легкое удаление «лишней» пленки из этих «пустот» в процессе последующей обработки.

Анти-клей наносится с помощью специальных «карандашей» или «фломастеров» с различным диаметром стержня 1, 3 и 6 мм. В зависимости от размеров полости модели, которую необходимо сформировать, используется соответствующего размера фломастер.

В связи с невысокой ценой, как самих машин, так и

расходных материалов, 3D принтеры нашли применение в учебных заведениях, в макетных и архитектурных мастерских и дизайн-студиях.

Модели из ПВХ-пленки могут использоваться в качестве мастер-моделей при литье в силиконовые формы полиуретановых смол, а также восковых моделей для последующего литья металлов по выплавляемым моделям. Точность построения на 3D-принтере в пределах 0,1-0,12 мм на длине 150 мм по всем осям.

6.3. Аддитивные технологии синтеза литейных форм

Литейные формы - это отдельный и большой раздел АФ-технологий. Особо динамичное развитие получило направление непосредственного выращивания песчаных форм для литья металлов, а также выращивание металлических изделий, в частности, пресс-форм для литья пластмасс. Здесь, как нигде, в полной мере находит практическое воплощение принцип «безбумажных технологий»: производство изделия в принципе не нуждается в сопровождении посредством традиционной бумажной документации в виде чертежей, технологических карт и т. д.

Меняется и традиционный подход к кадровому обеспечению работ. Конструктор и технолог работают не последовательно, а параллельно и зачастую конструктор выполняет функцию технолога, создавая параллельно с САД-моделью детали САД-модели технологической оснастки для литья детали.

Для производства песчаных литейных форм используются две АФ-технологии:

- послойное спекание плакированного песка лазерным лучом (фирма EOS);
- послойное нанесение связующего состава или Inkjet-технология (ProMetal).

Первая технология - это разновидность упомянутой выше SLS-технологии, с той лишь разницей, что в качестве модельного материала используется литейный (силикатный или циркониевый) предварительно плакированный полимером песок.

После спекания получается так называемая «грин-модель» (в смысле - «сырая»), которая требует весьма аккуратного обращения при очистке. Для облегчения этого процесса, очищенные места сразу же обрабатывают пламенем газовой горелки, закрепляя их таким образом. После очистки фрагменты формы помещают в прокалочную печь и окончательно (при температуре 300-350 °С) делают твердым массив формы.

Вторая технология похожа на MJM-технологию с той разницей, что на рабочую платформу впрыскивается не строительный материал, а связующий состав. Конструкционный же материал (литейный песок) подается и разравнивается на рабочей платформе послойно с шагом 0,2-0,4 мм аналогично SLS-системам. В этом случае дополнительной термообработки формы не требуется.

Независимо от метода построения собственно формы, алгоритм действий конструктора-технолога практически одинаков. Последовательность операций выглядит следующим образом:

- создается CAD-модель изделия (рис. 6.6);
- назначаются припуски на обрабатываемые поверхности;
- согласно рекомендациям технолога проектируется литниковая система, которая сочленяется с основной CAD-моделью;
- получают технологическую CAD-модель, модель масштабируют в соответствии с коэффициентом усадки литейного материала;

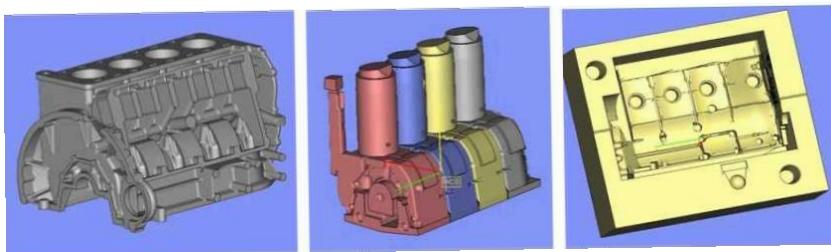


Рис. 6.6. САD-модели блока цилиндров и фрагментов песчаной формы для его отливки

– создается модель (будущего) песчаного блока - обычно в виде параллелепипеда, куда заключена технологическая САD-модель;

– затем блок разрезается на несколько частей в зависимости от размеров рабочей камеры АF-машины;

– создаются негативы - «отпечатки» технологической модели в песчаном блоке или его фрагментах; таким же образом методом вычитания создаются модели стержней;

– в завершение процесса проектирования создаются stl-файлы формы.

Далее - дело техники, а именно технологической АF-машины, которая строит фрагменты формы.

После завершения построения фрагменты песчаной форма с известными предосторожностями собирают: стыкуют, герметизируют швы, устанавливают холодильники и т. д.

Затем - собственно заливка металла, остывание, извлечение и очистка (предварительная обработка) отливки (рис. 6.7).



Рис. 6.7. Сборка формы и отливка (чугун)

6.4. Аддитивные технологии и порошковая металлургия

В данном разделе речь пойдет о новых технологиях с еще неустоявшейся терминологией, находящихся на стыке разных традиционных технологий, и которые невозможно отнести к какой-либо из них. Имеется в виду, в частности, так называемая технология *spray forming*.

Она объединяет в себя и литейные знания, поскольку имеет место плавка металла, и технологии распыливания металла, а это сфера знаний порошковой металлургии, и знания по металлографии, а это вопросы общего металлостроения, при этом в конечном итоге мы получаем то же, что и при литье в изложницу - заготовку, но это не просто заготовка: она также получается посредством послойного синтеза, что и роднит технологию *spray forming* с АФ-технологиями.

Spray forming - новая технология получения заготовок из конструкционных и специальных сплавов посредством распыливания (атомизации) металла, предложена в суть технологии заключается в послойном напылении металла на подложку и «выращивании» болванки (заготовки) для последующей механообработки. Металл расплавляется в пла-

вильной камере и затем посредством специального сопла распыляется потоком инертного газа, частички металла (размером 10-100 мкм) осаждаются на подложку, формируя таким образом массив болванки (рис. 6.8).

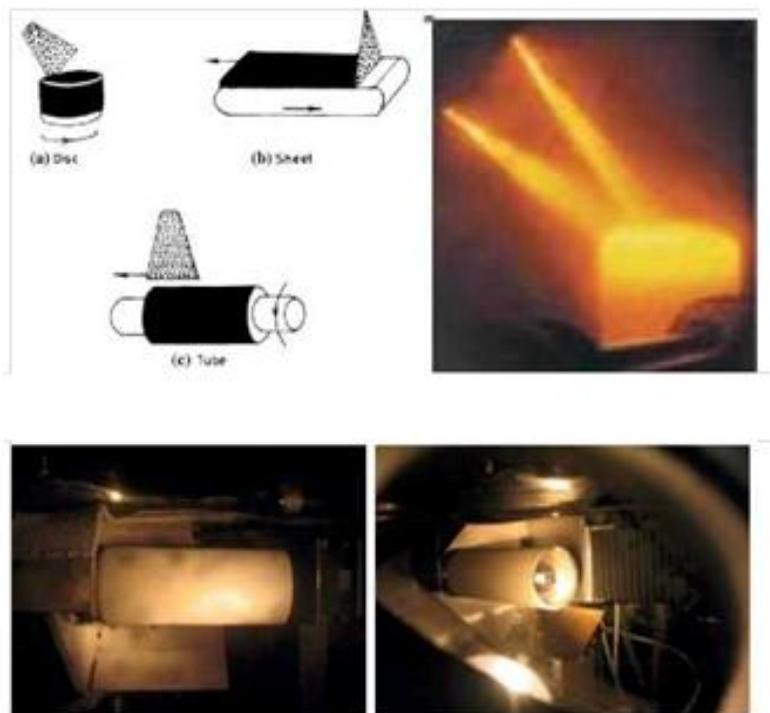


Рис. 6.8. Схемы технологии Spray forming для получения цилиндрической заготовки (болванки)

В отличие от литой заготовки, полученной простым сливом металла в изложницу, болванка, изготовленная ме-

тодом spray forming, имеет высокую однородность микро- и макроструктуры материала.

Технология «*Spray forming*» разработана в первую очередь для изготовления ответственных деталей аэрокосмического назначения из специальных сплавов с повышенными требованиями. Однако она нашла коммерческое применение и в серийном производстве, в частности, для изготовления гильз цилиндров из сплава AL-Si для двигателей автомобилей Мерседес.

Данная технология успешно применяется для получения заготовок из сплавов, склонных к ликвации при кристаллизации, в частности, медь-содержащих сплавов, используемых для производства суперпроводников (CuSn), высокопрочных инструментов (CuMnNi, CuAlFe) для нефтедобывающей и горнорудной промышленности.

Равномерность распределения ингредиентов по массиву заготовки и равномерность микроструктуры являются главными преимуществами данной технологии. К недостаткам следует отнести относительно высокие потери материала - до 20%, при атомизации и осаждении металла на подложку и относительную сложность управления процессом, требующим высоких профессиональных навыков персонала.

К особенностям процесса следует отнести наличие микропор в структуре материала, появление которых связано с захватом молекул газа при атомизации и осаждении частичек металла и с «неплотным» спеканием частиц друг с другом при кристаллизации. Пористость металла устраняют посредством горячего изостатического прессования (ГИП) и последующей обработки давлением - прокатки иликовки.

Платформа с подложкой, на которой «выращивается» заготовка может совершать возвратно-поступательное движение - тогда получается заготовка в виде ленты, или вра-

щательное движение относительно оси потока распыливаемого металла - для получения цилиндрической заготовки в виде болванки, или вращательное движение относительно оси, перпендикулярной оси потока - для получения заготовки типа «кольцо» или «труба».

Технология spray forming открывает широкие возможности для создания так называемых градиентных материалов (с переменными по сечению физико-химическими свойствами), которые могут быть получены путем послойного нанесения различных материалов через - два (или более) распылительных сопла.

В связи с развитием и повышением технического уровня прототипирующих машин может представлять интерес практическое применение технологии Spray forming для получения изделия путем напыления металла на керамическую модель (реплику). Суть технологии в следующем.

По CAD-модели на прототипирующей машине, например, SLA-установке, выращивается стереолитографическая мастер-модель. По ней изготавливается силиконовая или RIM-форма, в форму заливают жидкую керамику и получают керамическую модель-реплику, которую затем устанавливают в Sprayforming-машину, где на керамическую модель послойно напыляют расплавленный металл.

Таким образом получают «слепок» с керамической реплики. После механической обработки (удаления облоя и обработки в размер по посадочным поверхностям) получают конечное изделие. Наиболее интересна эта технология для получения пресс-форм и технологической оснастки вообще.¹

Компания RSP Tooling (RSP - Rapid Solidification Process) является разработчиком нового способа изготовления инструментальной оснастки с использованием технологии Spray forming. Машина RSP (рис. 6.9) представляет собой

сочетание плавильной машины и атомайзера (устройства для распыливания).



Рис. 6.9. Машина RSP для изготовления инструментальной оснастки

Металл (различные сплавы широкого спектра) плавится в тигле в инертной атмосфере и под давлением направляется к распылительному соплу, где посредством струи азота происходит мелкодисперсное дробление жидкого металла и быстрое отверждение частиц.

Около 70 % частиц «долетают» до керамической модели уже в твердом состоянии, остальные 30 - в полужидкой фазе. Оставшегося тепла достаточно, чтобы связать (сварить) между собой все частицы.

Исследования показали, что металл имеет более однородную и мелкозернистую структуру с менее выраженной сегрегацией, чем при литье. Частицы металла налипают на керамическую модель, формируя тело «слепка». Платформа, на которой закреплена керамическая модель, имеет возможность перемещения в пространстве рабочей камеры машины и оператор, поворачивая платформу, обеспечивает равномерное нанесение металла.

После завершения процесса и остывания в течение полутора-двух часов керамическая модель извлекается из металлического «слепка» и производятся стандартные технологические операции: механо- и термообработка.

Машина RSP может изготавливать детали с максимальными размерами 180x180x100 мм. Продолжительность рабочего цикла 3-4 часа. Таким образом, в течение одного рабочего дня может быть изготовлено 2-4 изделия.

Одним из преимуществ данной технологии является возможность получения биметаллических композиций. Например, рабочая часть кокиля формируется из специальной стали, а тело из обычной недорогой стали или цветного металла с повышенной интенсивностью теплоотдачи.

Данная технология вышла на уровень промышленного применения и представляет несомненный интерес. Примеры деталей ракетных двигателей, полученных из гранульных заготовок никелевых сплавов по технологии Spray forming приведены на в разделе 5 на рис. 5.10.

Сплавы Al-Zn-Cu-Mg традиционно относятся к высокопрочным материалам, однако дальнейшее улучшение их прочностных характеристик сдерживается макросегрегацией, возникающей в заготовке, получаемой литьем. Технология spray forming ослабляет эти проблемы. Сплавы, полученные новым способом, показали более высокую ударную вязкость и усталостную прочность, чем кованный алюминий.

Одним из ограничений в применении сплавов Al-Li является анизотропия у деталей, изготавливаемых из литых заготовок. Сплав, полученный по технологии spray forming с увеличенным содержанием лития, имеет улучшенную изотропию, экспериментально показано отсутствие проблем с растрескиванием отливки и макросегрегацией, которые отличаются содержанием кремния 70 % по весу, такой сплав невозможно получить методами литья из-за катастрофического охрупчивания вследствие выпадения крупных зерен кремния при кристаллизации и засорения оксидами

Получен сплав с содержанием лития 4 % по весу, имеющий плотность 2,4 г/куб. см и с удельной жесткостью на 30% выше, чем у обычных алюминиевых сплавов. Были также получены сплавы Al-Cu-Mg-X с улучшенными по сравнению с литейными сплавами прочностными свойствами и износными характеристиками при повышенных температурах.

Одним из самых важных достоинств данной технологии является возможность создания новых материалов с уникальными свойствами, а также разнообразных покрытий.

Получены композиционные материалы (MMC, metal matrix composite), в которых матричная основа усилена керамикой до 15 % по объему, и которые показали повышенную жесткость и сопротивление износу. Эти материалы изготовлены путем вдувания частиц керамики в распыленный поток металла в процессе осаждения металла по технологии spray forming. Получен уникальный материал Al-Si.

Из алюминия могут быть получены сплавы с заданным коэффициентом термического расширения (постоянным в широком диапазоне температур), которые имеют большие перспективы применения в микроволновых устройствах и пленочных радиаторах, использующихся в

телекоммуникационных системах, аэрокосмической и оборонной промышленности.

Большие перспективы данная технология имеет для создания новых конструкционных наноструктурных материалов, в частности, для дальнейшего развития отечественной технологии ИПД - интенсивной пластической деформации.

Известно, что ИПД методом, например, равноканального углового прессования - РКУП, уже сейчас позволяет получать массивные наноструктурные заготовки размерами до Ø85 и длиной до 300 мм, пригодные для использования в машиностроении.

При реализации РКУП заготовка неоднократно продавливается в специальной оснастке через два пересекающихся под углом 90 градусов канала с одинаковыми поперечными сечениями при комнатной или повышенной температурах, в зависимости от деформируемого материала (рис. 6.10).

«Наноструктурность» материала получают за счет очень малого размера зерен, содержат в структуре большое количество границ зерен, которые играют определяющую роль в формировании их необычных физических и механических свойств.

При «традиционных» методах упрочнения - прокатке, волочении, ковке повышение прочности материала, как правило, сопровождается уменьшением его пластичности. Наноструктурированные за счет ИПД материалы имеют высокую прочность и уникальную пластичность.

Для формирования наноструктур методом ИПД весьма важными являются не только число проходов, но и однородность исходного массива, равномерность распределения веществ, составляющих сплав, по объему исходного

материала. Технология spray forming позволяет получить хорошо подготовленный для ИПД материал.



Рис. 6.10. Схема процесса РКУП

Интересным и перспективным направлением использования наноматериалов является подшихтовка ультрадисперсных порошков в распыливаемый расплав основного, матричного металла.

Такой метод дает возможность создания уникальных сплавов с *равномерным* включением в объемную структуру

металла наночастиц различных материалов - металлов, включая редкоземельные, оксидов и пр. Здесь же приведем некоторые данные об оборудовании - атомайзерах, с помощью которого могут быть реализованы проекты с использованием технологии spray forming.

Процесс распыливания металла (и получения порошка) - атомизация (от англ. atomization - распыление) различен в зависимости от исходного металла.

Обычно атомайзер содержит плавильную камеру, где в условиях вакуума или инертной среды производят расплав металла, и распылительную камеру, где струю расплавленного металла, вытекающую из плавильной камеры, разбивают на мелкие капли с помощью высокоскоростного потока аргона, воздуха или водяного пара в зависимости от исходного металла и требований к форме частичек порошка.

Конструкция машин позволяет получать металл в слитках (слив в изложницу), либо в виде порошка, либо в виде spray forming-заготовки. Слитки получают для последующей обработки давлением (прокат, ковка) и проведения необходимых исследований.

Владение такой техникой, кроме возможности проводить широкий круг научно-исследовательских работ в области создания перспективных технологий и материалов, снимает зависимость исследователей от поставщиков металлических порошков, позволяет создавать в требуемом количестве «свои» порошки для решения конкретных задач, а также обеспечивать расходными материалами АФ-машины для послойного синтеза совсем готовых деталей без последующей механической обработки.

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите основные понятия и опишите виды аддитивного производства.
2. Расскажите сущность метода стереолитографии при получении литейных моделей.
3. Приведите примеры использования других аддитивных технологий в литейном производстве.
4. Дайте технологическую классификацию аддитивных методов синтеза литейных форм.
5. Для какой цели используются технологии Quick-Cast?
6. В чем заключается построение модели путем послойного склеивания ПВХ-пленки на 3D-принтерах?
7. Опишите порядок производства песчаных литейных форм с использованием AF-технологии.
8. Приведите примеры аддитивной технологии в порошковая металлургия для заготовительного производства наукоемких лопаточных машин.
9. Какие могут быть получены композиционные материалы с помощью технологии spray forming?
10. Каким образом реализуется возможность создания уникальных сплавов с равномерным включением в объемную структуру металла наночастиц различных материалов?
11. Опишите метод равноканального углового пресования и его возможности по наноструктурированию материалов.

7. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СИНТЕЗА ОСНАСТКИ НАУКОЁМКИХ ИЗДЕЛИЙ

7.1. Область использования «металлических» АМ-технологий в изготовлении оснастки

Обычно, когда говорят о серийном производстве, подразумевают количество, измеряемое тысячами или сотнями тысяч единиц. Однако существует и другое серийное производство, измеряемое десятками или сотнями изделий. Таких изделий, зачастую сложной геометрии, из специальных материалов достаточно много в авиационной промышленности, космической индустрии, энергетическом машиностроении и ряде других отраслей.

Именно там возник интерес к АМ-технологиям, «непосредственному выращиванию» металлических изделий, в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для производства не прототипов или опытных образцов, а вполне товарной продукции. Причем мотивацией здесь является не возможность создать что-то уникальное, с необычными свойствами, а экономическая целесообразность. В ряде случаев при объективных расчетах реальных затрат аддитивные технологии оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные.

Одним из перспективных направлений применения АМ-технологий является изготовление технологической оснастки - приспособлений и инструментов для серийного производства. В частности, изготовление вставок для термопласт-автоматов (рис. 7.1).

Современное пост-индустриальное производство характеризуется относительно быстрой сменой продуктов, причем часто меняется не основные компоненты, определяющие функциональные качества продукта, а дизайн - корпусные детали, элементы декора, обычно изготавливаемые литьем, в частности и на термопласт-автоматах. По этой причине в ряде случаев отпадает

необходимость в дорогостоящей инструментальной оснастке, выдерживающей десятки и сотни тысяч циклов. Посредством АМ-технологий можно сделать матрицу или пресс-форму из легкого сплава с меньшим ресурсом.

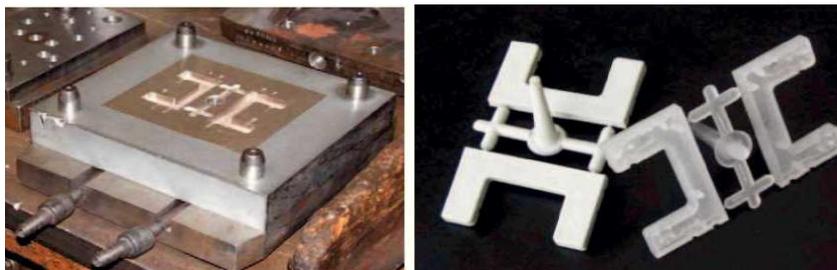


Рис. 7.1. Вставка для термопласт-автомата и отливки из ABS-пластика

Но и для традиционного литейного производства технологий АМ-технологии дают новые возможности. Например, пресс-форма может быть выращена вместе с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки. АМ-машины POM, Omtomes и Fabrisonic успешно используют для изготовления пресс-форм с медными охлаждающими сердечниками, а также с так называемой конформной системой охлаждения, конфигурация которой соответствует геометрии формуемой детали (рис. 7.2).

Иными словами, каналы охлаждения прокладываются в массиве формы так, как необходимо, а не так, как позволяют традиционные методы.

Применение литейных форм с равномерным или регулируемым охлаждением позволяет сократить время пребывания отливки в форме до 30%. В данном случае АМ-технологии это не противопоставление традиционной ЧПУ-обработке, а предложение новых возможностей для оптимизации затрат и повышения эффективности производства.

Обслуживание серийного производства также связано с необходимостью изготовления специальных приспособлений, шаблонов, кондукторов и т. д., и здесь применение АМ-технологий может быть экономически эффективно. Многие компании сталкиваются с проблемой оценки реального объема производства какого-либо изделия. От этого зависят затраты на технологическую подготовку.



Рис. 7.2. Выращенная пресс-форма

И все чаще возникает вопрос, какую стратегию принять: вырастить партию деталей на АМ-машине, или делать «нормальную» оснастку, но с риском, что через короткое время потребуются внесение изменений и оснастку придется переделывать,

или, что продукт «не пойдет» на рынке по каким-либо причинам?

Фундаментом коммерческого успеха предприятия является постоянное обновление выпускаемой продукции.

Конкуренция на рынке товаропроизводителей заставляет в новых проектах, кроме повышения технических характеристик, постоянно совершенствовать эстетический дизайн и эргономические параметры, использовать новые материалы, новые технологические процессы. Новые формы требуют более сложной оснастки.

Затраты на подготовку производства возрастают в геометрической прогрессии по мере продвижения к моменту выпуска изделия. Это связано с многочисленными корректировками конструкции деталей, оснастки - из-за недочетов в дизайне, ошибок конструирования (по результатам испытаний опытных образцов и оснастки).

Запаздывание с «выходом» на рынок приводит к потерям части ожидаемого дохода. Сократить время подготовки производства и затраты возможно, применяя современные технологические процессы, в том числе технологии послойного синтеза.

7.2. Организация производства оснастки при применении технологии послойного синтеза

Изготовление на первых этапах разработки дизайна изделия, концепт-модели, маркетинг-модели является определяющим дальнейшую разработку. Важно знать мнение заказчиков об изделии до запуска его в производство. На этом этапе оптимизируются ключевые критерии при производстве изделий - качество и стоимость.

Хотя возможности визуализации образа (модели) в современных системах весьма высоки (и продолжают совер-

шенствоваться), это не может заменить точной физической модели будущего изделия, которая помогает в предметном диалоге конструктора изделия с конструктором оснастки быстро и на ранних стадиях разработки оптимизировать конструкцию с точки зрения её технологичности, стоимости проектирования и изготовления литьевой формы, её испытаний, при необходимости - доработки, в итоге - оптимизировать фактическую стоимость готовой продукции.

Перед запуском изделия в производство желательно тщательно проверить не только её конструкцию, но и возможность выполнения функциональных требований, в частности, собираемости. Чтобы конструкция изделия не претерпела в дальнейшем существенных изменений, не обойтись без проведения ряда реальных испытаний.

Прочные, термостойкие полимерные, а также металлические и керамические материалы, применяемые в технологии послойного синтеза, позволяют проводить такие испытания, по результатам которых корректируется компьютерная модель; подобные процедуры могут, если необходимо, повторяться, не требуя изготовления дорогостоящей оснастки, экономя время и средства на переделках пресс-форм.

Современные технологии послойного синтеза позволяют получать опытные или малые партии деталей, свойства которых если не абсолютно, то очень близко соответствуют свойствам деталей, полученных в массовом производстве с применением традиционных способов переработки пластмасс (это направление получило название Rapid Manufacturing - быстрое производство)

Для производства опытных образцов и малых партий наукоёмких изделий применяют так называемую «быструю» оснастку, недорогую и нетрудоемкую в изготовлении.

Например, эластичные (силиконовые) формы, которые

эффективны для получения 20-50 отливок. Наиболее часто они используются для получения опытных образцов и небольших партий пластмассовых деталей любой сложности и габаритов, копирования деталей и выплавляемых моделей по методу литья в вакууме. Отливаемые детали и копии могут быть эластичными, жесткими, термостойкими, ультрафиолетостойкими, прозрачными, различных цветов - в зависимости от перерабатываемых материалов.

Хотя принцип изготовления деталей копированием в эластичных формах известен давно, технико-экономическая пригодность метода, т.е. обеспечение размерной точности, возможность воспроизведения мельчайших деталей сложных форм, любой текстуры поверхности и цвета, а также возможность обеспечения различной твердости и термостойкости реально подтверждается в настоящее время.

Металлополимерные формы. Уже более сорока лет эпоксидные материалы используются для изготовления форм при выпуске опытных партий пластмассовых изделий. В последние годы, благодаря программному 3D-проектированию и развитию технологии послойного синтеза, стал возможен качественный скачок в применении эпоксидных смол для литьевых металлополимерных форм:

- компьютерная модель детали легко модифицируется (с учетом конкретной усадки);

- на основании компьютерной модели детали легко получить «негатив» - формообразующие части оснастки;

- технологии послойного синтеза позволяют получить за короткое время мастер-модели для оснастки.

Но основным толчком в применении металлополимерных форм стало появление эпоксидной («инструментальной») смолы с высокими характеристиками по прочности, теплопроводности, усадке, термостойкости. Существуют такие формы для прессования и литья под давлением де-

талей из термопластов.

В формах с формообразующими из металлополимерной композиции обычно используют нормализованные плиты, толкатели и ряд других элементов. В случае изменений в конструкции детали или необходимости изготовления деталей большего количества, чем ресурс металлополимерной формы, изготавливается её дублер.

Для этого изношенные формообразующие детали извлекаются из плит, а новые «перезаливаются» по вновь изготовленной мастер-модели. Нормализованные элементы конструкции формы используют повторно.

Технология изготовления металлополимерных форм имеет определенные преимущества, например, перед фрезерованием легкообрабатываемых материалов.

Во-первых, поскольку обработка и доводка наружных элементов в несколько раз проще, чем внутренних, постольку гораздо эффективнее глубокие формообразующие участки получать копированием мастер-модели, доведенной до необходимого качества выступающих поверхностей.

Во-вторых, обеспечивается смыкание по линии разъема формообразующих частей. В процессе изготовления металлополимерной формы формообразующие детали получают последовательной заливкой эпоксидной («инструментальной») смолы на мастер-модель.

После отверждения одной из частей металлополимерной формообразующей и удаления подмодельной плиты, т.е. плоскости, следующая заливка «абсолютно» повторяет поверхность предыдущей. Для многоэлементных форм это огромное преимущество.

В-третьих, легко обеспечивается практически любая фактурированная поверхность. При заливке металлополимерная композиция копирует фактуру поверхности мастер-модели, которую просто получить предварительной меха-

нической обработкой, окрашиванием специальными красками, наклейкой фактурированной пленки.

Селективное лазерное спекание порошковых материалов. Производители установок селективного лазерного спекания предлагают широкий ассортимент материалов:

- термопласты, в том числе композитные;
- эластичные термопласты;
- термопласты для получения выжигаемых моделей.

Для изготовления металлических формообразующих вставок применяют композитные материалы - металлический порошок с полимерным наполнителем. Спекание «идет» по полимерному наполнителю.

Это весьма важно для обеспечения точности формы, позволяет изготавливать формообразующие с минимальным припуском. Следующий этап - инфильтрация (пропитка) бронзой уже спеченной в установке модели. Этот процесс осуществляют вне установки.

Селективное лазерное плавление металла. Селективное лазерное плавление - это последовательное послойное расплавление порошкового металлического материала с помощью лазерного излучения.

Методу присущи определенные проблемные моменты, последовательное решение которых привело к разработке различных вариантов, получивших собственные названия, например, в установках Realizer фирмы MCP-HEK GmbH метод называется Selective Laser Melting, а в установках Concept Lazer GmbH - Lazer CUSING.

Получение формообразующих вставок для форм с минимальным припуском - одно из эффективных применений таких установок. Но наиболее ценно - это возможность получения каналов охлаждения вблизи рабочей поверхности вставок, т.е. создание конформного охлаждения, позволяющего сократить технологический цикл литья детали, т.е. по-

высить производительность, а значит - снизить стоимость производства деталей.

Так как для технологии послойного синтеза нет особых ограничений в получении сложной геометрии деталей, каналы охлаждения можно располагать практически по любой траектории, близкой к конфигурации формующей полости, что расширяет технологические возможности средств оснащения.

7.3. Выбор конкретной технологии и оборудования послойного синтеза оснастки

Производители оборудования для технологии послойного синтеза постоянно его совершенствуют: увеличивается скорость построения, повышается точность, предлагается широкая гамма материалов. Все это положительно отражается на общем имидже технологии послойного синтеза.

Критерии оценки различных технологий послойного синтеза, которые могут повлиять на конкретный выбор:

- максимальные габариты детали, которую можно построить, применяя конкретную технологию послойного синтеза (однако, при современных возможностях, большие детали могут быть изготовлены по частям и затем собраны в одну деталь);

- скорость построения модели (однако, разница в 2-3 часа между однотипными технологиями послойного синтеза разных производителей имеет не такое уж большое значение в общем времени подготовки производства, которое составляет обычно несколько недель или месяцев);

- применяемые материалы - существенный критерий, особенно при использовании технологии послойного синтеза в производстве оснастки;

- точность изготовления модели, которая зависит от точности воспроизведения системой разработанной CAD-

модели, свойств материала и способа его обработки и, в какой-то степени, от толщины слоев при построении;

– стоимость производства детали конкретной технологии послойного синтеза, которая определяется стоимостью самой системы (величиной амортизационных отчислений в структуре цены детали), эксплуатационных расходов по обеспечению работы технологии послойного синтеза, стоимостью материала. металла

Машины, как и технологии, можно разделить на две основные группы. Первая группа - Bed Deposition

SLS-машины представлены на рынке наиболее многочисленной по производителям и разнообразной по моделям группой. Большая часть компаний-производителей использует в своих машинах лазер в качестве источнике энергии для соединения частиц металлопорошковых композиций. К ним относятся:

- Arcam (Швеция);
- Concept Laser (Германия);
- EOS (Германия);
- Phenix Systems (Франция);
- Realizes (Германия);
- Renishaw (Великобритания);
- SLM Solutions (Германия);
- 3D Systems (США).

Компания Arcam одна из немногих, которая использует в своих машинах EBМ-технологию, где вместо лазера работает электронный луч (рис. 7.3). Особенности технологии, во всяком случае, сейчас ограничивают размер пятна электронного пучка в зоне расплава диаметром 0,2 -1,0 мм, тогда как при использовании лазера эта величина на порядок меньше. Поэтому в плане чистоты поверхности и точности EBМ-технологии уступают лазерным SLM-технологиям.



Рис. 7.3. Машина Arcam

Однако существует множество приложений, когда деталь «обречена» на финишную обработку на ЧПУ, будь она получена литьем или с помощью АМ-технологий. В этих случаях чистота поверхности построенной детали не имеет значения, более важным является плотность и однородность материала. И здесь технология Arcam имеет преимущество.

Ряд независимых экспертов отмечает, что при сравнительно низкой частоте поверхности плотность материала деталей от Arcam выше, и его структура лучше, чем при использовании лазерных технологий.

И если принять во внимание высокую производительность ЕВМ-машин - 55-80 см/ч против 2-20 см³/ч у анало-

гичных по размерам лазерных машин, то станет понятно, почему эти машины занимают доминирующее положение в сфере производства титановых протезов, имплантов и др. более-менее серийной продукции медицинского назначения.

Компания продала более 100 систем в десять стран мира. Особенностью технологии Arcam является то, что процесс построения детали происходит в камере, предварительно откакумированной до $<1 \times 10^4$ мбар. Газовая среда - воздух или иной газ, создает слишком высокое сопротивление электронному лучу, поэтому рабочую камеру вакуумируют.

Но это позволяет получать качественные изделия из титана и титановых сплавов. При этом обеспечивается приемлемая точность построения - на уровне $\pm 0,2$ мм на длине 100 мм.

Практически все перечисленные машины либо в базовой версии, либо опционально могут работать с наиболее востребованными на индустриальном рынке металлопорошковыми композициями: инструментальные стали (типа H13), мартенситностареющие стали (типа 18%NiMaraging 300), алюминиевые сплавы (AlSi10Mg, AlSi12), чистый титан и его сплавы (типа Ti6Al4V и особо чистый Ti6Al4V ELI), сплавы Co-Cr, жаропрочные стали (Inconel и др.).

Почти все компании, использующие лазер, по-разному называют свои технологии, вероятно, чтобы таким образом как-то отличит себя на рынке от конкурентов, однако по технической сути все они являются технологиями селективного лазерного сплавления - SLM-технологиями, но именно это название негласно закреплено за компанией SLM Solutions.

Общей особенностью технологий, использующих лучевой источник тепла, является необходимость применения специальных поддержек - своеобразных якорей, которые

удерживают строящуюся деталь от термических деформаций.

При построении деталей из полимерных порошков в этом нет необходимости, деталь при построении находится в массиве порошка, и неспеченный порошок сам выполняет функцию поддержек.

При сплавлении металлических порошков концентрация тепловой энергии в рабочей камере чрезвычайно высока, и без удерживающих «якорей» деталь может «уплыть», покособиться и даже повредить элементы дозирующей системы машины.

Соответствующее программное обеспеченное АМ-машины предлагает оператору конфигурацию поддержек, но многое зависит и от оператора, от его опыта и мастерства - часто приходится редактировать предлагаемое машиной решение. Кроме того, удаление поддержек - это достаточно ответственный процесс.

Необходимо, во-первых, снять остаточные напряжения. Для этого нужно иметь соответствующее термическое оборудование. Во-вторых, необходимо иметь подходящий инструмент для аккуратного отделения построенной детали от платформы и последующего удаления поддерживающих структур. В-третьих, необходимо оборудование для пост-обработки построенных деталей.

Кроме того, АМ-машины - это целый комплекс, включающий в себя устройства для просеивания и смешения порошков, загрузки, разгрузки и очистки машины, системы фильтрации и охлаждения, системы хранения порошков, системы генерации и подачи инертных газов и др.

Все это необходимо иметь ввиду при решении вопроса о приобретении такой машины для рационального обустройства места инсталляции.

7.4. Обработка оснастки после послойного синтеза

Безразмерная обработка. При применении технологии послойного синтеза на поверхности модели, детали образуется слоистая структура. Для неотчетливых участков изделия достаточно применения дробеструйной, пескоструйной, стеклоструйной, гидроабразивной, вязкоабразивной и т.п. обработок и ручной доводки.

Для достижения высокого качества поверхностного слоя внутренних поверхностей оснастки сложной формы наиболее перспективна технология комбинированной обработки с использованием токопроводящих микрогранул и газожидкостной рабочей среды.

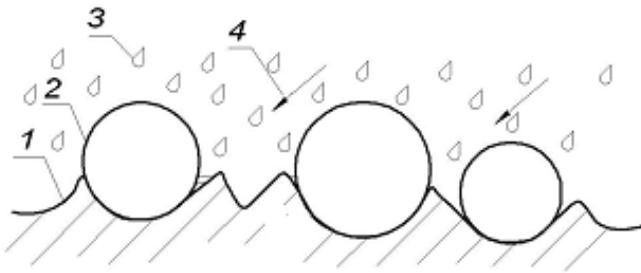
Предложенный способ комбинированной обработки внутренних поверхностей деталей токопроводящими микрогранулами с наложением низковольтного электрического поля в условиях использования газожидкостной слабопроводящей среды позволяет организовать в протяженном отверстии поток постоянно и равномерно (не менее 95% сплошности покрытия) воздействующего поэтапно на все участки прерывистой поверхности, создавая равномерный наклеп.

Выравнивается и снижается технологически наследованную шероховатость за счет интенсивного анодного растворения сдеформированных и уплотненных микрогранулами вершин микровыступов.

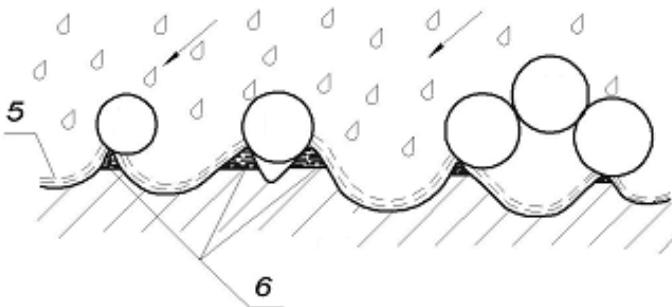
Последнее позволяет обеспечить стабильность силовых и электрохимических параметров комбинированного воздействия микрогранул на всей длине проточной части деталей. На рис. 7.4 показаны основные стадии предложенного способа комбинированной обработки.

Получение равномерной степени наклепа и устранения микротрещин по всей обрабатываемой поверхности достигается тем, что обработка поверхностей по предлагае-

тому способу заключається в подачі на оброблювані поверхності стиснутим повітрям потоку мікрочастинок.



а)



б)

Рис. 7.4. Схема и основные этапы реализации процесса:
1 – деталь оснастки; 2 – микрошарики; 3 – токопроводящая газожидкостная среда; 4 – направление движения микрошариков; 5 – жидкостная пленка; 6 – микровыступы

Процесс обработки проходит в два последовательных этапа в газожидкостной слабопроводящей среде с наложением низковольтного электрического поля.

Полости синтезированной оснастки отличаются нестабильностью исходного макрорельефа поверхности. Микротрещины в поверхностном слое могут выходить на поверхность или оставаться замкнутыми в материале подповерхностного слоя и выходить на поверхность в процессе эксплуатации оснастки под действием знакопеременных нагрузок из-за пульсаций рабочего давления при формовке заготовок.

Внутренние рабочие поверхности, особенно сложного профиля, имеют в большинстве случаев различные пазы и полости, недопустимые уступы, трещины и погрешности формы, выходящие зачастую за допуски на номинальные размеры, что в случаях гидродинамического, абразивного трения, знакопеременных нагрузок резко снижают работоспособность дорогостоящего в изготовлении и эксплуатации оборудования.

Формирование благоприятного для различного рода эксплуатационных свойств поверхностного слоя проходит в несколько этапов. Во-первых, на исходную дефектную поверхность 1 (рис. 7.4,а) с направлением к ней 4 под углом β не более 60° подают микрошарики 2 более крупной фракции (150-200 мкм), которые за счет деформационного сдвига перераспределяют выступы и впадины и залечивают микродефекты.

Наличие жидкостной токопроводящей среды 3 образует постоянно обновляющуюся пленку жидкости и препятствует перегреву мест соударений гранул с поверхностью и образованию остаточных напряжений растяжения, а также ускоряет процесс за счет явления анодного растворения материала. Затем, подают более мелкую фракцию микро-

шариков 2 (50-80 мкм), которая окончательно выравнивает микроповерхность (рис. 7.4, б). Выравнивание микрогеометрии значительно зависит от скорости анодного растворения в месте микровыступов 6, которая в момент контакта шарика с деталью через жидкостную токопроводящую пленку 5 резко увеличивается из-за повышения удельной проводимости в месте соударения и тогда время обработки составляет около 15 с на участок эффективного пятна распыла.

Технологическое оборудование и оснастка часто имеют внушительные габариты. В связи с этим настройка процесса происходит при проверке и корректировке предварительно рассчитанных режимов на имитаторе внутренней прерывистой поверхности (рис. 7.5).

На основе разработанного способа обоснован механизм обработки, в котором комбинированное воздействие является обобщенным управляемым процессом формирования высоких стабильных показателей качества поверхностного слоя.

Механизм комбинированного воздействия представляет собой совокупность двух процессов, происходящих одновременно: механического воздействия гранул на внутреннюю прерывистую поверхность и анодного растворения при низких напряжениях, исключающих короткие замыкания между гранулами и обрабатываемым материалом.

Анодный процесс растворения микронеровностей происходит под действием тока в слабопроводящей жидкой пленке технической воды, подаваемой в зону обработки в распыленном до капельной фракции виде одновременно с микрогранулами.

Окисные пленки на микрогранулах и на заготовке утончаются и разрушаются, при этом достигается плотность тока, необходимая для анодного растворения поверхностно-

го слоя материала заготовки. Разреженная капельная фракция жидкостной составляющей практически не мешает микрогранулам получать от напора сжатого воздуха кинетическую энергию, достаточную для деформирования и осадки микровыступов и подается в зону обработки отдельно от микрогранул.



Рис. 7.5. Имитатор с настоечными образцами в камере струйно-динамической установки

Для того, чтобы единичного контакта (или серии контактов) было достаточно для выравнивания микрогеометрии за счет механического воздействия и анодного растворения осуществляется управление энергией соударений.

Так как микрогранулы подают в зону обработки струйным методом, то и параметры процесса изменяют регулированием кинетической энергии потока, варьируя расход и давление сжатого воздуха. Конкретную концентрацию капельной фракции устанавливают экспериментально на настроечном имитаторе, исходя из обеспечения постоянной жидкостной пленки.

При моделировании режимов процесса принимаются исходные данные:

- физико-механические свойства материала микрогранул и детали;

- радиус кривизны (диаметр) обрабатываемой поверхности;

- исходная и требуемая величина наклепа поверхностного слоя и высота микронеровностей.

Для очень точных участков требуются другие подходы.

Например, при подготовке стереолитографических мастер-моделей для изготовления металлополимерных форм на поверхность модели наносится контрастная краска (рис. 7.6).

Далее проводится механизированное тонкое шлифование поверхности до исчезновения рисок от покраски (рис. 7.7).

Некоторые современные технологии послойного синтеза предлагают различные по толщине слоя стили построения. Например, в установках SLA от фирмы 3D Systems реализован стиль построения с толщиной слоя 0,025 мм. В этом случае значительно уменьшается объем ручных доводочных операций.

С другой стороны, скорость построения слоя для систем технологии послойного синтеза - величина фиксированная, общее время построения модели определяется ко-

личеством слоев. Возможность изменять стиль построения предоставляется на выбор заказчику.



Рис. 7.6. Поверхность модели, окрашенной контрастной краской

Размерная обработка. При изготовлении металлических вставок для форм с применением технологии послойного синтеза получить точную геометрию только ручной доводки бывает недостаточно, особенно обеспечить точное сопряжение отдельных вставок и поверхность разъема.

Металлические заготовки вставок, как при селективном лазерном спекании, так и в селективном лазерном плавлении, строятся с припуском 0,3-0,5 мм. Получение

окончательной геометрии вставки - финишная обработка, ведется с применением станков с ЧПУ, фрезерованием контура, электроэрозией (при необходимости), т.е. обычными методами.

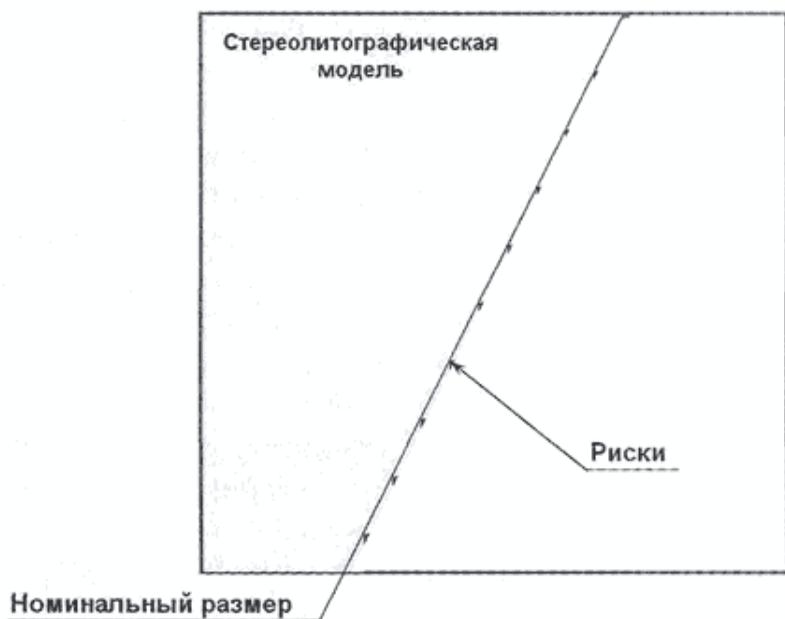


Рис.7.7. Поверхность модели после шлифования до исчезновения рисок

Для обеспечения контроля на всех этапах обработки уже при конструировании формы необходимо предусмотреть базовые точки измерения. Значительно упрощает межоперационные переходы использование специальных систем позиционирования. Так, например, установки фирмы CONCEPT Laser позволяют начинать формирование вставок

на основании EROWA, которые обеспечивают позиционирование выращенных вставок с микронной точностью на всех этапах обработки и измерений

Оцифровка и контроль геометрии. Оцифровка, т.е. получение информации не только об отдельных точках, но и геометрии в целом, имеет важнейшее значение для сложных элементов оснастки, изготавливаемых по конкретной технологии послойного синтеза.

Например, оптическая система оцифровки и измерений ATOS фирмы GOM GmbH позволяет за короткое время с высокой точностью оцифровать объект с поверхностью любой сложности и получить информацию о размерах и отклонениях от CAD-модели.

При этом решаются задачи, возникающие на этапе изготовления оснастки:

– оцифровка геометрически сложных объектов (мастер-модели, вставки и оснастка в целом);

– сравнение оцифрованного объекта с математической моделью или с эталонным образцом и получение результатов (в виде цветовой градации) о величинах отклонений в сечениях, точках;

– компьютерный анализ сопряжения оцифрованных элементов оснастки;

– инспекционный контроль оснастки, полученной от сторонних производителей.

На этапе налаженного производства названная выше система решает задачу выявления дефектов оснастки, её износа и позволяет производить периодическую аттестацию.

Сдерживают внедрение технологии послойного синтеза, как обычно, значительные первоначальные затраты на приобретение необходимого оборудования, которое окупается довольно длительное время.

Применяя, начиная с ранних стадий подготовки и реа-

лизации проекта, технологии быстрого изготовления моделей и оснастки, в конечном счете, как показывает опыт, возможно сэкономить до 40% средств и вдвое сократить сроки «выхода» нового изделия на рынок. Не случайно в последние годы ежегодно мировой рост продаж установок технологии послойного синтеза увеличивается на 30%.

Реализация организационных и технологических решений по применению систем технологии послойного синтеза позволит:

- повысить отдачу капиталовложений и снизить риски перехода к новому дизайну продукции;

- проводить практическое изучение рынка (СНГ и западных стран) и постоянное обновление моделей продукции;

- разработать стратегию выпуска продукции на долгий период; повысить имидж предприятия;

- подготовить финансовые решения по развитию предприятия;

- обеспечить возможность для постоянной модификации дизайна выпускаемой продукции.

Получается наиболее эффективно в том случае, когда конкретная технологии послойного синтеза приобретает вместе с технологическими решениями, учитывающими конкретные требования и специфику работы предприятия и пакетом гарантированных условий подготовки специалистов, способных решать поставленные технические задачи.

При технической подготовке производства наукоёмких изделий они должны быть четко проблемно ориентированы

Вопросы для самоконтроля

1. Приведите область использования металлических АМ-технологий в изготовлении оснастки для наукоемких изделий.

2. Организация производства оснастки при применении технологии послойного синтеза из металлических порошков.

3. Как проводится выбор конкретной технологии и оборудования послойного синтеза оснастки для заготовительного производства наукоемких машин?

4. Приведите примеры использования других аддитивных технологий в производстве средств технологического оснащения.

5. Дайте технологическую классификацию аддитивных методов синтеза средств технологического оснащения из металлических порошков.

6. Как происходит обработка оснастки для наукоемких машин после послойного синтеза?

7. В чем заключается безразмерная обработка после применения технологии послойного синтеза для ответственных участков поверхности оснастки?

8. Опишите целесообразность использования специальных систем позиционирования при финишной обработке оснастки машин после послойного синтеза для упрощения межоперационных переходов.

9. Приведите примеры размерной обработки для ответственных участков поверхности оснастки наукоемких лопаточных машин.

10. Какие задачи решают оцифровка и контроль геометрии для сложных элементов оснастки, изготавливаемых по конкретной технологии послойного синтеза?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пособии подробно рассмотрены вопросы обеспечения ускоренной технической подготовки производства наукоемких изделий, даны определение и исходные понятия аддитивных технологий и их классификация. Отдельные разделы посвящены рассмотрению: методов и средств реализации подготовки производства с использованием технологий быстрого прототипирования, требований к средствам технологического оснащения заготовительного производства для наукоемкого изделия.

В частности, подробно отражены необходимые сведения о роли аддитивных технологий в техническом дизайне наукоемкого изделия и использования информационных ресурсов для автоматизации подготовки производства наукоемкого изделия.

В данном учебном пособии в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлениям 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (профиль «Технология машиностроения»), 15.04.01 Машиностроение (программа магистерской подготовки «Современные технологии производства в машиностроении»), дисциплине «Технология машиностроения», по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», дисциплине «Технология изготовления деталей и сборка ЖРД» сформированы тематические разделы, изучение которых позволяет приобрести знания, необходимые для глубокого понимания теоретических и практических задач технического, экономического и организационного характера, возникающих при создании наукоемких изделий, их производстве и эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухочев Г. А. Технология машиностроения. Проблемно ориентированное обеспечение производственной технологичности конструкций и изделий: учеб. пособие / Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев, Е. Г. Смольяникова. Воронеж: ВГТУ, 2015. 168 с.

2. Сухочев Г.А. Технология машиностроения. Наукоемкие технологии для повышения технологичности продукции многономенклатурного производства: учеб. пособие / Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев, Е.Г. Смольяникова. Воронеж: ВГТУ, 2013. 139 с.

3. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие / А.Г. Григорьянц и др.; под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 278 с.

4. Астахов В.Г. Совершенствование технологической подготовки производства при автоматизированном проектировании станочных приспособлений с учетом баз данных стандартных деталей / В.Г. Астахов // Технология машиностроения. – 2009. – № 3.

5. Аверченков В.И. Автоматизация проектирования технологических процессов: учеб. пособие для вузов / В.И. Аверченков, Ю.М. Казаков. Брянск: БГТУ, 2004. 228 с.

6. Зленко М.А., Забеднов П.В. Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Литье металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм. - «Металлургия машиностроения», 2013 — № 2,3.

7. Каширцев Л.П., Морозов В.В. ЛВМ. Стереолитография в изготовлении моделей. Электронное учебное издание. Москва, 2013, МГТУ им. Н.Э. Баумана. - <http://wwwcdl.bmstu.ru>

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Техничко-экономические возможности аддитивных технологий	4
1.1. Основные понятия и терминология	4
1.2. Классификация аддитивных технологий	6
1.3. Аддитивные технологии и возможная экономия материала	11
1.4. Новые возможности для технического дизайна	13
1.5. Расширение пользовательской доступности аддитивных технологий	14
Вопросы для самоконтроля	18
2. Особенности подготовки производства наукоемкого изделия	19
2.1. Понятие системы технической подготовки производства	19
2.2. Конструкторская подготовка производства	23
2.3. Технологическая подготовка производства	26
Вопросы для самоконтроля	30
3. Элементы системы автоматизированного проектирования в ускоренной подготовке производства	31
3.1. Организация САПР станочных приспособлений	31
3.2. Организация интеграции системы проектирования в комплекс программных средств на предприятии	36
3.3. Автоматизированное проектирование приспособлений для последующего прототипирования	39
Вопросы для самоконтроля	47
4. Планирование процесса технической подготовки производства	48

4.1. Методы сетевого планирования	48
4.2. Планирование энергоснабжения в подготовке производства	55
Вопросы для самоконтроля	61
5. Типовые объекты использования аддитивных технологий в подготовке производства наукоёмких изделий	62
5.1. Высокотратные в подготовке производства конструктивные элементы наукоёмких изделий	62
5.2. Конструкторско-технологические проблемы заготовительного производства	68
Вопросы для самоконтроля	75
6. Аддитивные технологии в подготовке производства	76
6.1. Понятие и виды аддитивного производства	76
6.2. Аддитивные технологии в литейном производстве	79
6.3. Аддитивные технологии синтеза литейных форм	90
6.4. Аддитивные технологии и порошковая металлургия	93
Вопросы для самоконтроля	103
7. Технология и оборудование для синтеза оснастки наукоёмких изделий	104
7.1. Область использования «металлических» АМ- технологий в изготовлении оснастки	104
7.2. Организация производства оснастки при при- менении технологии послойного синтеза	107
7.3. Выбор конкретной технологии и оборудования послойного синтеза оснастки	112
7.4. Обработка оснастки после послойного синтеза	117
Вопросы для самоконтроля	127
Заключение	128
Библиографический список	129

Учебное издание

**Сухочев Геннадий Алексеевич
Коденцев Сергей Николаевич**

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ.
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПОДГОТОВКЕ
ПРОИЗВОДСТВА НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Подписано в печать 20.10.2020.
Объем данных 2,3 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14