

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)

В.И. БОГДАНОВИЧ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

САМАРА
Издательство Самарского университета
2017

УДК 53(075)+54(075)+621.4(075)

ББК 22.3я7+24я7+39.55я7

Б735

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А. Н. К о п т е в,
д-р техн. наук, проф. И. Д. И б а т у л и н

Богданович, Валерий Иосифович

Б735 Физико-химические основы технологии: учеб. пособие /
В.И. Богданович. – Самара: Изд-во Самарского университета,
2017. – 64 с.

ISBN 978-5-7883-1192-0

В учебном пособии с единых позиций излагается материал, устанавливающий логическую связь между классическими дисциплинами физики и химии с технологией производства летательных аппаратов. В отличие от классических учебников, содержащих систематизированный материал по технологическим процессам и технологическим операциям изготовления конкретных изделий, или известных учебных пособий, содержащих материал по отдельным технологическим методам, в данном учебном пособии с единых позиций рассматриваются структура, содержание и системный анализ различных технологических методов. Приведены физико-химические основы деформирования, разделения и соединения твердых тел, акцентируется внимание на термофлуктуационных механизмах разрыва и восстановления межатомных связей и механизмах термической активации технологических и физико-химических процессов.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Подготовлено на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

УДК 53(075)+54(075)+621.4(075)

ББК 22.3я7+24я7+39.55я7

ISBN 978-5-7883-1192-0

© Самарский университет, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Основные понятия о технологическом процессе и направлениях его разработки и совершенствования	5
1.1 Производственный и технологический процессы. Основные понятия и определения.....	5
1.2 Технология машиностроения и ее задачи в разработке и совершенствовании технологических процессов.....	7
1.3 Маршруты технологических процессов и их построение по принципу «сверху-вниз» и «снизу-вверх»	11
1.4 Технология машиностроения и ее взаимосвязь с фундаментальными исследованиями. Инновационные технологии.....	15
1.5 Нанотехнология и наноструктурные материалы.....	18
1.6 Контрольные вопросы по первому разделу	21
2 Структура, содержание и системный анализ технологических методов	23
2.1 Понятие о технологической системе и методах её моделирования	23
2.2 Технологические методы и их классификации	28
2.3 Технологические методы механической обработки	33
2.3.1 Технологические методы обработки резанием	33
2.3.2 Технологические методы обработки давлением	36
2.4 Общие характеристики структуры технологических методов	37
2.4.1 Схематизация структуры технологических методов	37
2.4.2 Технологические воздействия и виды энергии, подводимые к предмету труда	39
2.4.3 Способ подвода энергии к предмету труда.....	43
2.4.4 Физико-химический механизм технологического метода и его рабочий процесс.....	46
2.5 Термодинамический анализ технологических методов.....	48
2.5.1 Закономерности передачи энергии в технологических системах	48
2.5.2 Эффективная и критическая плотности энергии.....	55
2.6 Контрольные вопросы по второму разделу	59
Список использованных источников.....	62

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития техники, основанный на применении инновационных технологий, предъявляет все более глубокие требования к технологической подготовке инженерных кадров. При этом возникает необходимость освоения знаний не только о технологических процессах, но и расширении компетенций специалистов в анализе, выборе и реализации перспективных технологических решений. В соответствии с действующими стандартами технологический процесс подразделяется на технологические операции, содержание которых определяется используемым технологическим методом. То есть именно технологический метод отражает физико-химическую сущность и содержание воздействия технологических факторов на свойства обрабатываемых материалов.

Известно, что все перспективные технологические решения, внедренные в современное производство, были основаны на результатах фундаментальных исследований, которые заложили физико-химическую основу новых технологических методов. При этом именно компетенцией технологов определялась эффективность или неэффективность реализации этих методов в конкретных технологических операциях и в конечном счете в обеспечении качества и конкурентоспособности продукции.

В методическом плане подготовка специалистов в области технологии обычно строится на изучении существующих технологических процессов производства конкретных изделий, на изучении теоретических основ этих процессов для инженерного расчета параметров режимов обработки и точности изготовления продукции. Такой подход гарантирует освоение специалистами существующих производственных процессов, но снижает их компетентность при принятии технологических решений.

Учебное пособие в определенной степени устраняет существующие недостатки и содержит материалы в соответствии с учебной дисциплиной «Физико-химические основы технологии», целью которой является изучение и освоение современных представлений о физико-химических основах технологических методов и их взаимосвязи с технологическими процессами и технологическим обеспечением и повышением качества продукции.

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ И НАПРАВЛЕНИЯХ ЕГО РАЗРАБОТКИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

1.1 Производственный и технологический процессы. Основные понятия и определения

Изготовление любого изделия производится в результате выполнения производственного процесса, который сложен и многообразен. Он включает в себя: изготовление и обработку заготовок для получения из них деталей; сборку из деталей узлов, агрегатов и изделий; их испытание; технический контроль, хранение и перемещение на всех стадиях изготовления деталей, узлов, агрегатов и изделий; организацию снабжения и обслуживания рабочих мест; управление всеми звеньями производства; все работы по технической подготовке производства.

В основе построения производственного процесса лежат исходные положения, предусматривающие достижение заданного качества продукции при наименьших затратах труда и максимальной производительности при рациональном использовании и непрерывном совершенствовании средств производства. Рациональное построение производственного процесса обеспечивается путем его разделения на три основные составные части: технологический процесс; организация технологического процесса в конкретных производственных условиях; управление технологическим процессом. В производственном процессе наиболее важным звеном является технологический процесс.

Технологический процесс – это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изготовлению и (или) определению состояния предмета труда (ГОСТ 3.1109-82). Причем состояние предмета труда (материала, полуфабриката, заготовки, отливки и т.д.) определяется при помощи меры и (или) измерительного прибора, т.е. путем проведения измерений.

Каждый конкретный технологический процесс состоит из технологических операций, представляющих собой законченную часть технологического процесса, выполняемого на одном рабочем месте.

Технологические операции, в свою очередь, разделяются на технологические переходы – законченную часть технологической операции, выполняемую одними и теми же средствами

технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке. Следовательно, технологический переход характеризуется постоянством применяемого инструмента и обрабатываемой поверхности.

Очень часто технологические операции объединяют по единому признаку в технологические переделы (частные технологические процессы), группируя их в специализированных цехах предприятий. Например, заготовительные операции, операции обработки, операции сборки, операции испытания объединяют в цехах с аналогичным названием или с названием заготовительно-штамповочные, литейные, сборочно-сварочные или другие цеха.

Для осуществления технологического процесса необходимы орудия производства и предметы труда. Совокупность орудий производства, необходимых для осуществления технологического процесса, называется средствами технологического оснащения. Средства технологического оснащения подразделяют на оборудование и оснастку.

Технологическое оборудование – это средства технологического оснащения, в которых для выполнения определенной части технологического процесса размещаются материалы и заготовки, средства воздействия на них, а также технологическая оснастка (ГОСТ 3.1109-82). Примерами технологического оборудования служат: литейные машины, прессы, станки, испытательные стенды, гальванические ванны, вакуумные камеры и т.д.

Технологическая оснастка дополняет оборудование для выполнения определенной части технологического процесса. В свою очередь, технологическая оснастка подразделяется на инструменты и приспособления. Инструментом является технологическая оснастка, предназначенная для воздействия на предмет труда с целью изменения или определения его состояния. Технологическое приспособление же предназначено для установки или направления предмета труда или инструмента при выполнении технологической операции.

В зависимости от метода обработки функции инструмента могут выполнять резцы, сверла, фрезы, абразивный круг, штамп – при мехобработке; пучок электронов, электрический разряд – при электрофизической обработке; анодный растворитель – при электрохимической обработке. Конструктивно инструмент выполнен в первом случае в виде твердого тела; во втором случае – это поток

ускоренных частиц (электронов, ионов, атомов и молекул), а сама электронная пушка, плазмотрон или газовая горелка являются, по сути, технологическими приспособлениями; в третьем случае инструментом является ионный и электронный токи, а электрод также является технологическим приспособлением.

Наиболее общее представление о технологическом процессе дает его маршрутное описание. Маршрутное описание технологического процесса – это документ, содержащий сокращенное последовательное описание всех технологических операций в маршрутной карте без указания переходов и технологических режимов, но с указанием их нормировки и средств технологического оснащения. Полное же описание всех технологических операций в последовательности их выполнения с указанием переходов и технологических режимов называется операционным описанием технологического процесса и приводится в операционной карте. Проектирование и разработка технологического процесса делятся на два этапа:

- создание маршрутного технологического процесса, содержащего рациональную последовательность технологических операций;

- разработка операционных технологических процессов, содержащих все необходимые сведения для осуществления каждой операции всего технологического процесса.

Разработка технологического процесса начинается с создания рационального маршрутного описания и завершается разработкой операционного описания, причём целью проводимых работ является получение деталей и изделий в соответствии с требованиями технической документации при наименьшей стоимости и максимальной производительности труда.

1.2 Технология машиностроения и ее задачи в разработке и совершенствовании технологических процессов

Достижение поставленных целей при выполнении производственного процесса невозможно без использования определенных научных разработок, которые создаются технологией машиностроения. Эти научные разработки обычно излагаются в ГОСТах, ОСТах, справочной или другой технической литературе, а также в научно-технических отчетах.

Технология машиностроения – это прикладная наука, занимающаяся изучением связей и закономерностей в производственных процессах изготовления машин. Она рассматривает технологический процесс как многофакторную систему связей (размерных, временных, информационных, экономических, энергетических и материальных) и изменений состояний объектов труда. Целью этой науки является обеспечение качества изделий при наименьшей себестоимости и максимальной производительности [1,2]. Необходимо отметить, что в ряде учебников термин «технология» используется в различных смысловых значениях - как научная дисциплина; как синоним технологического метода, технологического процесса или операции.

В настоящее время установлено (можно сказать, что на печальном опыте конструкторов), что указание в технической документации только марок материалов, точности и параметров шероховатости не гарантирует обеспечение нужного уровня надежности (долговечности, безотказности, сохраняемости и ремонтпригодности) изделий в процессе их изготовления. Это приводит к необходимости указания в технической документации процессов и условий изготовления и обработки деталей, особенно на финишных операциях. Однако оказывается, что этих данных также недостаточно для того, чтобы два изделия, изготовленные по одной технической документации на разных заводах, обладали одинаковыми показателями надежности. В связи с этим во всех развитых странах мира достаточно давно пришли к пониманию того, что практически все основные элементы «know how» новых изделий связаны с технологией их изготовления.

Выбор и отработка технологических процессов осуществляются на основе рекомендаций технологии машиностроения в результате двухстороннего взаимодействия конструкторских и технологических организаций с потребителем и анализом специальных испытаний продукции. Отметим, что распространенной является следующая формула обеспечения качества изделия: качество закладывается на этапе проектирования и разработки конструкции, обеспечивается на этапе изготовления и реализуется на этапе эксплуатации. Высокое качество изделия в общем случае формируется при наличии не односторонних, а двусторонних связей между тремя звеньями: конструкторские организации – технологические организации –

потребитель, что создает замкнутую структуру машиностроительного производства (рис. 1.1).

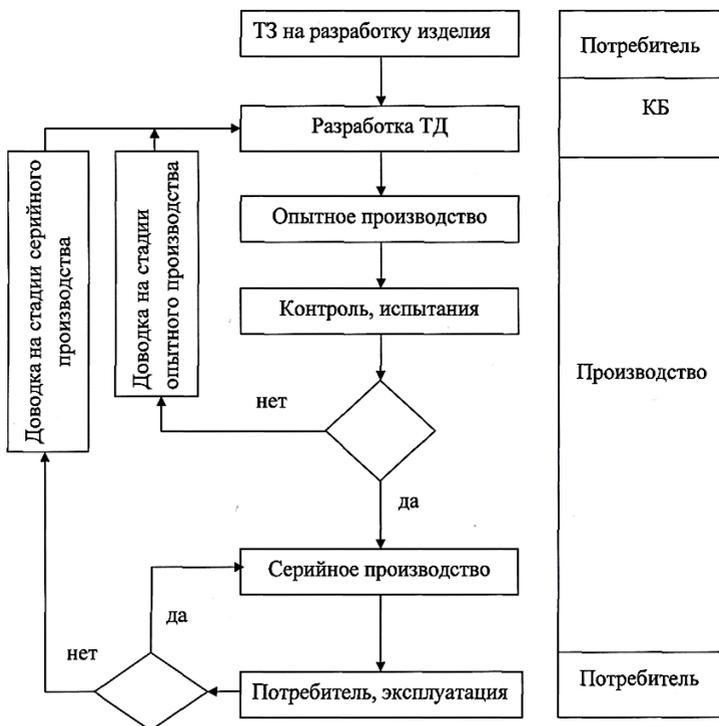


Рис. 1.1. Итерационная схема разработки директивного технологического процесса изготовления изделия заданного качества

Важнейшей особенностью обеспечения качества и надежности вновь изготавливаемых или модернизируемых изделий является этап его опытного производства, связанный с итерационным процессом испытания и выявления отказов изделий, с установлением причин отказов и способов их устранения, с изготовлением усовершенствованных изделий и с постановкой их на новые испытания. Этот итерационный цикл обеспечения заданного качества и надежности изделий, отдельных узлов или агрегатов изделий получил название этапа доводки. Этап доводки часто продолжается и при серийном выпуске изделия за счет поступления информации от потребителя продукции. В результате такой доводки создаётся директивный технологический процесс, характерный для данного

предприятия и который в дальнейшем должен жестко выдерживаться. Этап доводки для вновь изготавливаемых сложных технических изделий (летательные аппараты и их двигатели, двигатели автомобилей и т.д.) может занимать (50...80) % времени постановки изделия в серийное производство, а в стоимостном выражении превышать 80 % всех средств на проект [2,4].

Таким образом, перед технологией машиностроения стоит еще одна задача – выявление природы влияния технологических процессов на качество изделий и на этой базе создание новых и совершенствование существующих процессов.

Технология машиностроения, как и любая наука, выступает не только в качестве исполнителя заказов, но и в качестве движущей силы процесса, разрабатывая принципиально новые материалы и способы их обработки и тем самым открывая широкие возможности для создания принципиально новых изделий.

Технология машиностроения выделяет в технологическом процессе два аспекта - физико-химический как совокупность технологических методов и материалов, и функциональный как совокупность технологических операций, средств технологического оснащения, полуфабрикатов, заготовок и деталей [7,9]. Выделение этих двух аспектов оправдано как с методической, так и с практической точки зрения. Действительно, у этих двух аспектов различные первоисточники, способы математической формализации и различные цели. Физико-химический аспект опирается на физические и химические науки, изучает закономерности изменения состояний материалов при различных внешних воздействиях и выявляет сравнительные возможности различных технологических методов применительно к конкретным материалам. Функциональный аспект опирается на эти рекомендации, изучает закономерности получения конкретных деталей, сборочных единиц и изделий в целом и на этой основе разрабатывает рациональные маршрутные технологические процессы, а также средства их технологического оснащения. С математической точки зрения при изучении физико-химического аспекта в основном используется хорошо разработанный математический аппарат теории дифференциальных и интегральных уравнений, а также аппарат математической статистики. При изучении функционального аспекта этот математический аппарат используется в существенно меньшей степени (в основном при создании САПР технологических режимов),

а в основном используется математический аппарат теории множеств, групп, графов и т.д. для построения САПР ТП.

Конкретный вид изделия предопределяет особенности производственных и технологических процессов, а следовательно, и особенности технологии. В связи с этим технологию машиностроения подразделяют на технологии самолетостроения, ракетостроения, автомобилестроения, двигателестроения, космических аппаратов и т.д. Однако в различных технологиях существует и много общего – ряд одинаковых технологических операций, средств технологического оснащения, методических приёмов, методов разработки и построения САПР ТП, технологических методов и т.д. Причем физико-химические аспекты этих технологий в абсолютном большинстве случаев одинаковы и их различие опирается в основном на различия в используемых материалах.

1.3 Маршруты технологических процессов и их построение по принципу «сверху-вниз» и «снизу-вверх»

В любом технологическом процессе присутствуют два направления (маршрута) изготовления продукции по шкале размеров - «сверху-вниз» и «снизу-вверх». Принцип «сверху-вниз» отражает тот процесс, при котором берется заготовка и удалением с нее лишнего материала изготавливается деталь. Принцип «снизу-вверх» отражает процессы, в которых из некоторых элементов путем их объединения образуется заданная форма материала (формообразование) или собирается заданная конструкция (сборка).

Действительно, типовой технологический процесс изготовления изделия содержит переделы и операции, представленные на рис. 1.2. На первом технологическом переделе – формообразовании – мы получаем полуфабрикат, в основном в металлургических процессах за счет кристаллизации расплава. Т.е. исходный материал переводится в состояние, при котором атомы материала приобретают подвижность, характерную для жидкого состояния, а затем из этих атомов при различных внешних воздействиях (температурных, силовых, электромагнитных, ультразвуковых и т.д.) в соответствии с законами равновесной термодинамики выращивается твердое тело полуфабриката, имеющего заданный фазовый состав, структуру и размеры. Этот технологический передел построен по принципу

«снизу-вверх» по шкале размеров, т.к. мы из атомов собираем материал в виде полуфабриката.

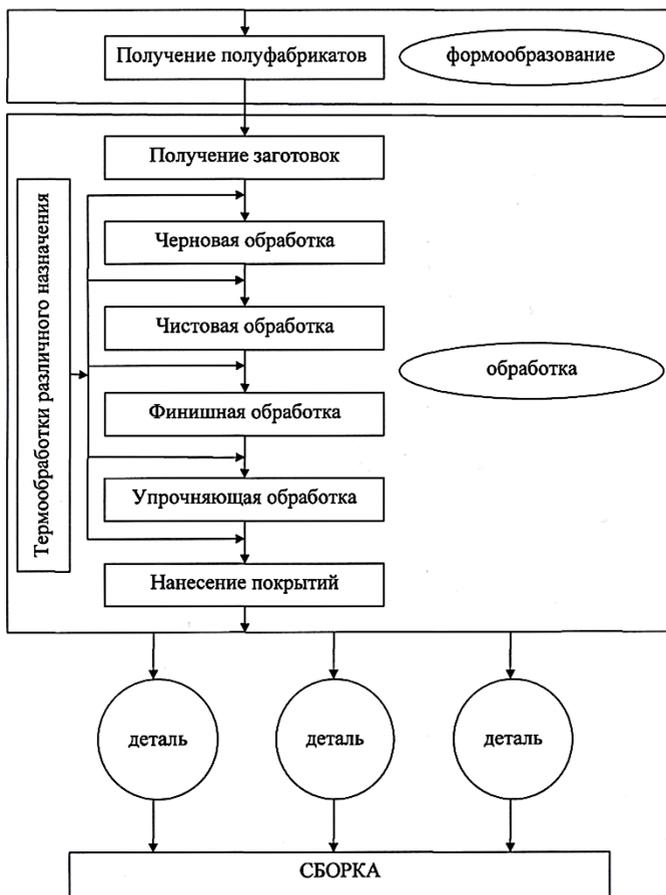


Рис. 1.2. Типовой маршрут технологического процесса

На следующем технологическом переделе получения из полуфабриката заготовок, а затем из них деталей используется маршрут «сверху-вниз», в котором, отделяя излишний материал на полуфабрикате, получают сначала заготовки заданных размеров, затем в процессе их обработки (черновой, чистой, финишной) получают детали заданных размеров и заданной шероховатости

поверхности, а уже затем за счет упрочняющих технологий и технологий нанесения покрытий обеспечивают поверхности детали заданный комплекс физико-механических свойств. При этом для получения заданных объемных и поверхностных свойств как для улучшения обрабатываемости материала, так и получения заданных эксплуатационных свойств проводятся разнообразные операции термической и термохимической обработки. Этот технологический передел очень сложный, трудоемок, дает значительные отходы производства и может содержать несколько десятков различных технологических операций.

После изготовления заданного набора деталей мы опять переходим к маршруту, построенному по принципу «снизу-вверх», когда из деталей собираем узлы, агрегаты, сборочные единицы и сами изделия.

Такое построение маршрута технологического процесса оправдано существующими возможностями технологических операций, рациональной специализацией производств и цехов и принципом разделения труда.

Действительно, производство полуфабрикатов обычно не связано с конкретным изделием и выпускает материал в виде стандартизированного сортамента, который приобретает машиностроительными производствами, специализирующимися на выпуске конкретных изделий. Однако при производстве дорогостоящих и технически сложных изделий часто материалоемкие заготовки (большеразмерные лопатки из титановых сплавов, корпусные детали, специальные сплавы и т.д.) изготавливаются на таких производствах.

Получение заготовок из полуфабрикатов их разделением, литьем, ковкой, прокаткой и т.д. не обеспечивает точность размеров и физико-химических свойств поверхности, требуемых для деталей. Это приводит к необходимости изготовления заготовок со значительным припуском. Снятие этого припуска сразу в заданный размер детали нерационально. Поэтому на первом этапе обработки снимают основную часть припуска на высокопроизводительных технологических операциях (черновая обработка), а затем на высокоточных технологических операциях (чистовая обработка) достигают заданных размеров. Для достижения заданной шероховатости нужны финишные операции (шлифования,

полирования, хонингования, ультразвукового и алмазного выглаживания и т.д.), а для достижения нужных механических и физико-химических свойств поверхности – упрочняющая обработка и нанесение покрытий. Между перечисленными операциями проводятся операции различных видов термообработки для улучшения обрабатываемости материалов, восстановления или повышения их эксплуатационных свойств.

Такая маршрутная многооперационность, приводящая к существенному росту трудоемкости и стоимости производства, привела к тому, что в рамках технологии машиностроения разрабатываются малооперационные маршруты, связанные с совмещением операций и получением высокоточных заготовок с малой величиной припуска или даже без припуска. Получение высокоточных заготовок осуществляется использованием порошковой металлургии, точным литьем, литьем с направленной кристаллизацией, получением монокристаллических заготовок, операциями штамповки, в том числе штамповки полиуретаном и с использованием магнитно-импульсной штамповки.

Однако в методологическом плане идеальными технологическими процессами, к каким должно стремиться производство, являются процессы, представленные в живой природе. В этих процессах по технологии «снизу-вверх» создается живая клетка, которая за счет своего копирования, деления и самосборки производит элементы живой природы в виде человека, животных и растений. Малоотходность такого производства очевидна, как и очевидны другие преимущества таких технологических процессов. Понятно, что для неживой природы, создаваемых нами машин такой процесс пока является фантастикой, однако понимание его преимуществ приводит к копированию некоторых элементов этой технологии. В основном они связаны с формообразующими технологиями, когда по принципу «снизу-вверх» создается в малооперационном процессе деталь или элемент конструкции. Это операции формования из порошковых или волокнистых материалов, некоторые операции литья, гальванопластики, плазменного формообразования и другие. Основные элементы идеального технологического процесса содержит активно развивающаяся нанотехнология, основы которой мы рассмотрим после анализа связей технологии машиностроения с фундаментальными науками.

1.4 Технология машиностроения и ее взаимосвязь с фундаментальными исследованиями. Инновационные технологии

Базой для технологии машиностроения, разработки технологических методов и изучения природы их воздействия на материалы являются фундаментальные физические и химические науки. Практически все технологические методы были либо созданы на базе фундаментальных разработок, либо фундаментальные разработки послужили основой для принципиальной модернизации ранее разработанных методов. Действительно, использование в технологии таких методов как лазерный, электронно-лучевой, плазменный, ионный, ионно-плазменный, ультразвуковой, самораспространяющийся высокотемпературный синтез и т.д. стало возможным после соответствующих фундаментальных разработок. В то же время открытие эффектов Ребиндера, сверхпластичности, нетермической активации, гетерогенного катализа и многих других привело к принципиальной модернизации методов резания, пластического деформирования, поверхностного упрочнения, нанесения покрытий, формообразования и т.д. Важно понимать, что практически все используемые в технологии методы когда-то были предметом фундаментальных исследований, например, обработка резанием и давлением, которая, с одной стороны, была стимулом для фундаментальных исследований и получения новых знаний о прочности и процессах деформации, разрушения и упрочнения материалов, а с другой стороны, сами стали потребителями этих знаний.

Схему взаимодействия фундаментальных исследований, технологии машиностроения и производства можно представить в виде пересекающихся множеств (рис. 1.3).

Можно сказать, что технологические методы являются тем мостиком, через который результаты фундаментальных исследований приходят в производство. Естественно, они приходят не сами, а с помощью инженеров-технологов. Поэтому без глубокой физико-химической подготовки инженеров-технологов, а также без механизмов экономической восприимчивости высоких технологий надеяться на то, что результаты фундаментальных разработок будут реализованы в производстве, не приходится. Разрыв же в звене

фундаментальные разработки – производство ведет к регрессу в машиностроении.



Рис. 1.3. Схема взаимного пересечения фундаментальных наук, технологии машиностроения и производства

Таким образом, существуют объективные, впрочем, как и субъективные причины, по которым новые технологии с большими трудностями осваиваются крупными производственными подразделениями. В связи с этим в последние годы активно пропагандируется понятие об инновационных технологиях и необходимость их быстрого внедрения в производство. В общем случае, инновация – это результат инвестирования в разработку, получения нового знания, инновационной идеи по обновлению сфер жизни людей (технологий; изделия; организационных форм существования социума, таких как образование, управление, организация труда, обслуживание, наука, информатизация и т.д.) и последующий процесс внедрения (производства) этого, с фиксированным получением дополнительной ценности (прибыль, опережение, лидерство, приоритет, коренное улучшение, качественное превосходство, креативность, прогресс). Инновационные технологии – это технологии, разработанные на основе новых знаний, полученных в фундаментальных и прикладных исследованиях, и которые ранее не использовались в производстве. Восприимчивость же производства, которое по своей сути является инерционным, к инновационным технологиям определяется объективными экономическими факторами, существующими в каждой стране. В свою очередь, определенный объём инновационных технологий, освоенных промышленностью некоторого государства,

создает предпосылки для технологических революций и технологического прорыва промышленности этих государств на мировой рынок.

Как уже отмечалось, базой для разработки технологических методов являются фундаментальные науки. Тем не менее, существуют методологические отличия в проведении исследований в технологии и фундаментальных науках. В фундаментальных науках наиболее широко используется метод анализа наблюдаемого явления, который заключается в том, что из всего наблюдаемого явления выделяется интересующий исследователя эффект и проводится его исследование в условиях максимальной изоляции. На основании таких исследований строится математическая модель этого первичного физического или химического явления. По такому принципу, собственно, и построены все разделы физики и химии. Существенно менее исследованы совместные воздействия на материалы двух первичных явлений. Это в основном деформации и нагрев, химические реакции и нагрев, фазовые превращения и нагрев, а также некоторые процессы в рамках физической химии. Совместные же воздействия трех первичных явлений и комплексных процессов в фундаментальных науках практически не исследованы, хотя в последние годы наблюдается большой интерес к ним.

В то же время результат воздействия любого технологического метода на материал невозможно объяснить только на основе первичных явлений. Физико-химический механизм любого метода представляет собой комплексное интегрированное воздействие многих первичных явлений, протекающих в специфических для данного метода условиях. Простейший пример - резание -это механическое разрушение, протекающее обычно при предварительном пластическом деформировании в условиях переменности температур, воздействия химической среды смазочно-охлаждающих жидкостей, при непрерывных структурных изменениях материала, комплексных трибологических явлениях на режущих кромках, причем все эти явления протекают в условиях переменности воздействия внешних нагрузок, хотя бы из-за колебаний в системе СПИД (станок – приспособление – инструмент –деталь). В связи с этим моделирование в технологии всегда представляет собой более сложную как в физико-химическом, так и математическом плане задачу.

Поэтому в технологии основной задачей является задача синтеза наблюдаемых явлений, т.е. исследование комплекса первичных явлений, протекающих в специфических для данного метода условиях. Естественно, первым этапом таких исследований является решение задачи анализа, так же, как и в фундаментальных науках, но с учетом специфики технологического метода.

Вместе с тем задачи, решаемые в технологии, уже более конкретны – качество детали, производительность, экономичность и экологическая чистота процесса.

Конечным этапом любой научной разработки является создание математических моделей. Только после их создания можно дать прогноз развития процесса и перейти к его оптимизации. Созданные модели технологических методов служат основой для построения моделей более высокого уровня и создания систем автоматизированного проектирования технологических операций и технологических процессов (САПР ТО и САПР ТП). В последние годы в САПР включаются не только процессы, детали и средства технологического оснащения в целом, но и переменные описывающие отдельные элементы и средства технологического оснащения. Поэтому оптимизация всего процесса проводится с учетом изменения переменных, описывающих оборудование и оснастку, тем самым создаются индивидуализированные системы под конкретное изделие. Такие системы для серийных производств обладают самой высокой экономической эффективностью.

1.5 Нанотехнология и наноструктурные материалы

Последние десятилетия 20-го века позволили освоить промышленные технологии, успешно работающие на микроуровне по шкале размеров, и перейти к исследованию возможностей работы на субмикронном уровне. Характеристикой микронного уровня обычно является $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$. На этом уровне были достигнуты впечатляющие успехи в микроэлектронике при миниатюризации различных активных элементов, в технологии машиностроения при повышении физико-химических свойств конструкционных и функциональных материалов и т. д. В частности, было понято, что конструкционная прочность машиностроительных конструкций определяется свойствами материалов на микроуровне. В этих исследованиях было установлено, что ещё более широкие

возможности в создании различных, в том числе и принципиально новых изделий, открываются при переходе к технологическим воздействиям на материалы на наноуровне, то есть на уровне $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$.

Термин «нанотехнология» впервые был введен японским профессором Нориео Танигучи (Norio Taniguchi) в его докладе «Основные принципы нанотехнологии» на международной конференции «International Conference of Precision Engineering» в Токио в 1974 г. Первоначально в это понятие закладывался смысл о комплексе процессов, обеспечивающих высокоточную обработку поверхности с использованием сверхтонкого травления высокоэнергетическими электронными, фотонными и ионно-плазменными пучками и нанесением покрытий. Однако в этих процессах манипуляции на атомарном уровне реализуются статистически, а не локально. И только в 1982 году с появлением сканирующих туннельных микроскопов и в 1986 с появлением атомно-силовых микроскопов появилась возможность наблюдать за процессами на атомарном уровне и контролировать их. Практически только с появлением сканирующего проектора электронно-лучевой литографии были реализованы контролируемые манипуляции на атомном уровне.

В настоящее время термин «нанотехнологии» понимается в существенно более широком смысле, включая в себя все виды процессов, протекающих локально или кооперативно на атомарном уровне и приводящих к кардинальному изменению макропараметров обрабатываемых систем за счет размерных эффектов, связанных с образованием нанообъектов. Под нанообъектами понимают создаваемые в таких процессах объединения атомов, имеющие хотя бы в одном направлении размеры в пределах от единиц нанометра до нескольких десятков. Учитывая, что размеры изолированных атомов характеризуются величиной порядка 10^{-10} м , а их размеры в кристаллических структурах характеризуются величиной – $(1 - 3) \cdot 10^{10}$, легко установить, что нанообъекты должны содержать хотя бы в одном направлении не более нескольких сотен или тысяч атомов. Выделяют основные типы нанообъектов – кластерные или нульмерные (0D) объекты, имеющие минимальные из указанных наноразмеров во всех трех направлениях; одномерные (1D) (нановолокна, нанопрутки или нанотрубки), имеющие наноразмеры только в двух направлениях; двумерные (2D) (нанопленки и

нанослой), имеющие наноразмер в одном направлении; трехмерные (3D) объекты типа объемных композитов, упрочненные нанообъектами 0D-2D типов с разделительным размером между ними до тысяч нанометров (рис. 1.4).

Наиболее впечатляющие результаты нанотехнологии получены в микроэлектронике и разработке наноструктурных материалов для изделий машиностроения.

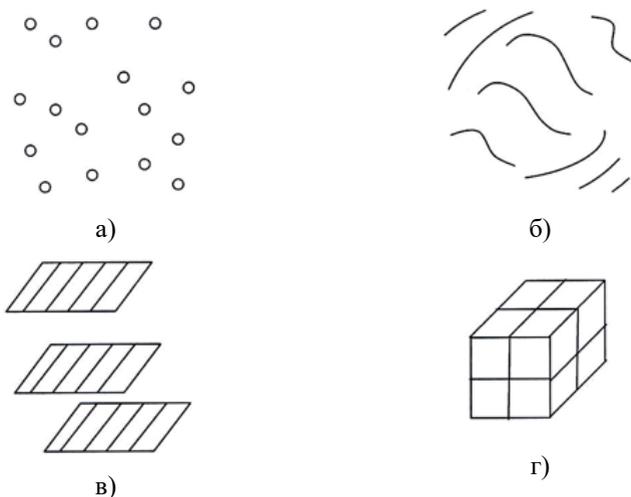


Рис. 1.4. Виды кристаллических наноматериалов: а) 0D – нульмерные (кластерные) нанообъекты; б) 1D – одномерные нанообъекты типа нановолокон, нанотрубок и нанопрутков; в) 2D – двухмерные нанообъекты типа пленок и слоев; г) 3D – трехмерные нанообъекты типа объемных композитов

Термин наноструктурные материалы впервые в начале 80-х годов предложил немецкий профессор Г. Гляйтер, практически реализовав способ получения компактных материалов с кристаллитами структуры размерами в десятки нанометров. Начиная с этого времени компактные и дисперсные материалы, содержащие нанокристаллы структуры, стали называть наноструктурными материалами. Отметим, что часто эти материалы называют нанокристаллическими или даже наноматериалами, что не вполне корректно, так как термин «наноматериалы» в русском языке может обозначать только малое количество материала, что применимо только к дисперсным частицам, а термин же «нанокристаллический» материал не вполне

является синонимом того, что размеры структурных элементов кристаллического твердого тела составляют нанометры, тем более, что при таких размерах структура материала часто является не кристаллической, а аморфной.

Эффект изменения многих механических и физико-химических показателей материалов при уменьшении размеров их структурного зерна наблюдался и исследовался последние (50...80) лет во многих странах мира и в этих исследованиях высказывались предположения об их дальнейшем изменении при переходе от традиционных структур крупнозернистого материала (размеры (1 – 10) мкм) к субмикроструктурным (размеры (0,1 – 1) мкм). Однако обнаруженные эффекты не монотонного, а многократного, часто скачкообразного изменения этих свойств при получении наноструктурных материалов были неожиданными и привели к наблюдаемому в настоящее время буму в нанотехнологиях и в получении наноструктурных материалов.

Надо отметить, что классическими технологиями получения наноструктурных материалов являются различные вакуумные и ионно-плазменные технологии, однако в настоящее время доказано, что такие материалы можно получать при высокоинтенсивных тепловых воздействиях, при многократных пластических деформациях и даже в традиционных процессах образования новых фаз при термообработке.

1.6 Контрольные вопросы по первому разделу

1. Производственный процесс, технологический процесс, операция, переход и передел. Определение понятий и примеры.
2. Средства технологического оснащения, технологическое оборудование, оснастка, приспособление и инструмент. Определение понятий и примеры.
3. Маршрутная и операционная карта технологического процесса. Рациональная схема разработки технологического процесса.
4. Технология машиностроения и ее задачи. Физико-химический и функциональный аспекты технологического процесса. Понятие об элементах «know how» технологического процесса. Основные этапы и итерационная схема разработки директивного технологического процесса.

5. Понятия и примеры технологических процессов, построенных по принципам «сверху-вниз» и «снизу-вверх» по шкале размеров.

6. Типовой многооперационный маршрут технологического процесса и обоснование его многооперационности. Малооперационные технологические процессы и их преимущества.

7. Схема и необходимые условия для внедрения результатов фундаментальных исследований в производство. Понятие об инновационных технологиях.

8. Особенности и отличия проведения фундаментальных и технологических исследований.

9. Нанотехнология. Классификация нанообъектов. Наноструктурные материалы и методы их получения.

2 СТРУКТУРА, СОДЕРЖАНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

2.1 Понятие о технологической системе и методах её моделирования

Технологический процесс, технологическая операция, физико-химический процесс и т. д. – примеры сложных систем, в которых протекает комплекс разнообразных процессов. Основной задачей изучения сложных систем является создание математического способа их описания. Только после создания такого способа описания можно гарантировать предсказание поведения системы с нужной степенью точности и выдвинуть математически обоснованные рекомендации об оптимизации её структуры в соответствии с заданными требованиями.

Первым этапом разработки такого описания является формализация представлений о реальном процессе путём замены его некоторым идеализированным процессом, отражающим только некоторые стороны реального процесса в соответствии с задачами его изучения. Степень такой идеализации зависит от поставленной цели, и при её изменении изменяется и степень идеализации процесса путём его усложнения или упрощения.

Формализованное представление о технологическом процессе строится на основании введения понятия о технологической системе (ГОСТ 27.004-85). Под технологической системой понимают совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов труда и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов.

Технологическая система является частью производственной системы и, как любая другая система, имеет свою структуру. Все технологические системы разделяют на четыре иерархических уровня: технологические системы операций, технологические системы процессов, технологические системы производственных подразделений и технологические системы предприятий.

Рассмотрим технологическую систему некоторой технологической операции. На вход такой системы подаётся исходный предмет труда (заготовка). После выполнения регламентированной технической документации действий в

технологической системе на выходе получается продукт производства (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Схема преобразования предмета труда при выполнении технологической операции

Регламентированные действия в технологической системе определяются нормативно-технической документацией на технологическую операцию, то есть операционной картой технологической операции, содержащей все необходимые действия для её выполнения.

Формализованное описание преобразования предмета труда в технологической системе основывается на том, что в исходном предмете труда выделяются некоторые количественные показатели – $X_i(0)$, которые после выполнения регламентированных действий в ТС операций принимают некоторые другие значения – $X_i(1)$. Показатели $X_i(0)$ носят название входных параметров, а $X_i(1)$ – выходных параметров ТС операций.

Целью такого преобразования предмета труда является получение значений показателей – $X_i(1)$, которые лежат в диапазонах значений, регламентированных технической документацией. Значения этих показателей $X_i(1)$ изменяются в зависимости от режимов выполнения технологических операций, особенности СТО и особенности действий исполнителей, и даже при регламентации всех этих действий имеют различные значения в продуктах серийного производства в силу стохастической природы технологических процессов. Поэтому формализованное (математическое) описание технологической системы операций должно содержать математическую модель технологической системы и такой её

показатель – $P(i, 1, t)$ как вероятность выполнения технологического задания технологической системой (в данном случае обозначенной индексом «I») по i -му показателю на данном этапе времени t её эксплуатации.

Напомню, что вероятность выполнения технологического задания системой является вероятностью того, что при данных значениях управляющих показателей и показателей состояния системы величина выходного параметра попадает в заданный диапазон значений.

Таким образом, формализованную схему технологической системы технологической операции можно представить в виде рис. 2.2.

Понятно, что в общем случае для разработки технологического процесса нужны сами результаты математического моделирования, при этом понимание сути процессов, протекающих при выполнении технологической операции, является не обязательным. Однако без знания этой сути и природы физико-химических процессов, протекающих в предметах труда, невозможно разработать широко информативную математическую модель, понять суть влияния технологических процессов на эксплуатационные свойства предмета труда, совершенствовать и разрабатывать новые технологические процессы и из большого их разнообразия выбирать наиболее эффективные.

В связи с этим в технологической системе технологической операции выделяют подсистему – технологический метод, которая, отвлекаясь от размеров и исполнения предмета труда, позволяет проанализировать суть физико-химических процессов, протекающих при воздействии технологических факторов на предмет труда, и создать математические модели протекающих процессов.

Математическая модель технологической системы обычно разрабатывается с использованием двух основных подходов – статистического и детерминированного.

Статистический подход, так называемый метод «чёрного ящика», связан с отказом от попыток анализировать структуру системы и физико-химическую природу протекающих в ней процессов. Он применяется для систем, строение которых изучено недостаточно или строение которых слишком сложное. Сущность этого подхода заключается в том, что вся область используемых значений входных

параметров обследуется экспериментально и на основе данных эксперимента устанавливаются соотношения между входными и выходными параметрами. При этом используются методы математического планирования эксперимента, дисперсного, регрессионного и корреляционного анализов.

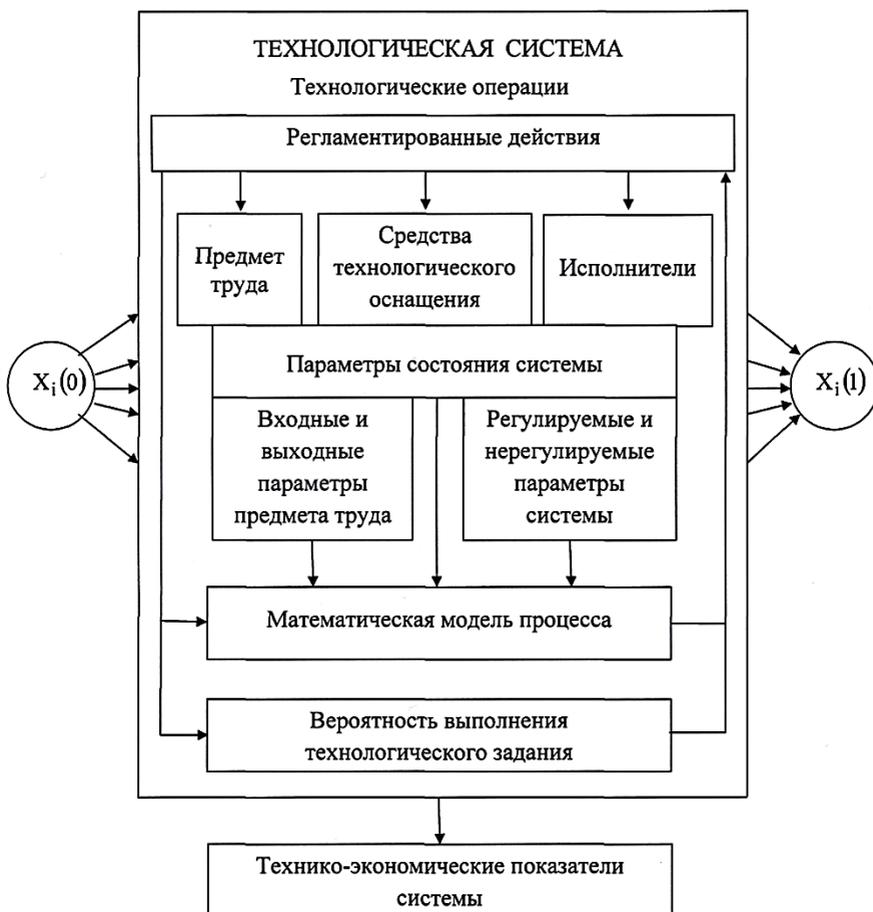


Рис. 2.2. Формализованное представление технологической системы технологической операции

В качестве главных достоинств метода «чёрного ящика» можно выделить его простоту, алгоритмическую разработанность и

гарантированность результата. Наряду с этим он обладает рядом недостатков, в основном связанных с малой информативностью модели и ограниченностью области, подвергнутой экспериментальному исследованию, а получаемые модели не вскрывают истинную физико-химическую природу явлений.

Детерминированный подход основан на изучении внутренней структуры системы и изучении природы физико-химических явлений, протекающих в ней. В этом случае входные и выходные параметры системы связывают друг с другом на основании законов физики и химии. Такой подход обладает рядом преимуществ. Полученное математическое описание имеет высокую информативность, широкую область применения, универсальность и позволяет усовершенствовать и разрабатывать новые методы обработки. К недостаткам детерминированного подхода следует отнести сложность физико-химических процессов, сложность математического аппарата моделирования и недостаточную изученность ряда первичных и комплексных физических и химических воздействий на материалы.

В чистом виде оба подхода допускают эффективное их применение только по отношению к небольшому классу задач. В большинстве случаев технологических исследований применяется комбинация этих методов, позволяющая объединить их преимущества.

Фактически наличие этих двух методических подходов к моделированию технологических систем предопределяет выделение технологией машиностроения двух аспектов в технологических процессах – функционального и физико-химического. Функциональный – основан на использовании математических моделей для достижения целей технологического процесса – получения продукции в соответствии с нормативно-технической документацией при наименьшей себестоимости и максимальной производительности при существующих нормативных ограничениях. Физико-химический аспект технологии, основанный на глубоком изучении влияний технологических воздействий на предмет труда, позволяет прогнозировать влияние технологических воздействий на эксплуатационные свойства предмета труда и целенаправленно улучшать технологические процессы производства.

В связи с этим в технологии машиностроения выделены два взаимозависимых понятия: технологическая операция и технологический метод.

2.2 Технологические методы и их классификации

В основе каждой технологической операции лежит технологический метод как одна из составляющих сложной системы. Однако один и тот же технологический метод может использоваться в различных технологических операциях, а одна и та же технологическая операция может использовать различные технологические методы. Например, в основе операции точения, сверления, фрезерования, шлифования может лежать механический метод резания, в то же время операцию фрезерования можно осуществить механическим, химическим, электрохимическим и электрофизическим методами.

Что же такое технологический метод? В общем случае метод - это совокупность приёмов практического или теоретического освоения действительности, подчинённых решению конкретных задач.

ГОСТ 3.1109-82 конкретизирует понятия метода применительно к технологии. Технологический метод - это совокупность правил, определяющих последовательность и содержание действий при выполнении формообразования, обработки, покрытия, сборки, перемещения, включая технический контроль, испытания в технологическом процессе изготовления или ремонта, и установленных безотносительно к наименованию, типоразмеру или исполнению изделия.

В соответствии с этим определением все технологические методы разделены на группы формообразования, обработки, покрытия, сборки, контроля, испытаний и перемещений (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Классификация технологических методов

Особенностью определения технологического метода является тот факт, что метод рассматривается безотносительно к наименованию, типоразмеру и исполнению изделий, а отражает только последовательность и содержание действий при выполнении технологической операции. Такое определение технологического метода позволяет рассматривать его как подсистему системы технологической операции и, не отвлекаясь на наименование, типоразмер и исполнение предмета труда, изучать влияние содержания действий технологического метода на изменение свойств предмета труда и технико-экономические показатели технологической операции. Содержание таких действий отражает физико-химические процессы, протекающие в предметах труда.

Таким образом, технологический метод по своей сути является физико-химической основой технологической операции. Технологическая операция, при отвлечении от конкретизации технологического метода, которым она реализуется, отражает функциональный аспект технологического процесса – последовательность регламентированных действий, обеспечивающих получение из заготовки конкретной детали с заданными в нормативно-технической документации размерами и другими её показателями.

Необходимо отметить, что в ряде учебников по технологии понятие технологический метод используется не в соответствии с ГОСТ 3.1109-82, а как группа технологических операций, объединённых рядом единых признаков [1,3], либо вместо понятия метод используется название физико-химического процесса [7], лежащего в основе реализации метода. Существующая многозначность в использовании понятия метод должна учитываться при использовании различных литературных источников.

Под формообразованием понимают изготовление заготовок или изделий из жидких, порошковых или волокнистых материалов. Обработка - это действие, направленное на изменение свойств предмета труда при выполнении технологического процесса. Покрытие – это образование на поверхности слоя нового материала. Сборка - образование соединений составных частей изделий. Контроль и испытание заключаются в определении состояния и свойств предмета труда при помощи меры или измерительного прибора. Причём состояние и свойства предмета труда определяются

через его размеры, объём, форму, твёрдость, шероховатость и другие физико-химические и механические показатели.

Для практического использования методов необходима их более детальная классификация, позволяющая, с одной стороны, объединить методы по физико-химической природе явлений, происходящих в материале, а с другой стороны, объединить методы по их применимости к функционально однородным группам технологических операций. Первое направление классификации технологических методов имеет преимущества на этапе разработки метода и позволяет с единых позиций анализировать явления, протекающие в материалах. Второе направление целесообразно при проектировании технологических операций, так как в зависимости от назначения операции существует возможность выбора наиболее эффективного метода для её реализации.

В основу классификации технологических методов по физико-химической природе явлений, происходящих в материале, удобно было бы положить вид энергии, вводимой в зону обработки. Однако вид энергии, вводимой в материал, в общем случае однозначно не определяет вид физико-химического механизма реализации метода. Поэтому названия технологических методов, детализирующих группы методов (рис. 2.3), носят в общем случае неоднородный по классификационному признаку характер.

Группа метода формообразования делится на подгруппы: литьё, формование, спекание, гальваноластика, селективное лазерное спекание и плазменное формование. Литьё – это изготовление заготовки или изделия из жидкого материала заполнением им полости заданных размеров и формы с последующим затвердеванием. Формование основано на заполнении полости заданных форм и размеров порошковым или волокнистым материалом с последующим сжатием формовки. При спекании осуществляется нагрев и выдержка порошковой формовки при температуре ниже температуры плавления основного компонента с целью обеспечения заданных механических и физико-химических свойств. К гальваноластике относится формообразование заготовки или изделия из жидкого материала при помощи осаждения металла из раствора под действием электрического тока.

Группа методов обработки делится на подгруппы [1]: механической, термической, химической, электрохимической, электрофизической и комбинированной обработки.

Механическая обработка – это обработка резанием и давлением.

Обработка резанием заключается в образовании новых поверхностей отделением поверхностных слоев материала с образованием стружки.

Обработка давлением заключается в пластическом деформировании или разделении материала, причем разделение материала происходит без образования стружки.

Отметим, что, например, резка ножницами использует технологический метод обработки давлением, а не резанием. Возникающее в этом случае некоторое противоречие связано с тем, что термин «резка» ножницами отражает устоявшееся название технологической операции, а не название технологического метода.

Термическая обработка направлена на изменение структуры и свойств материала заготовки вследствие тепловых воздействий.

При химической обработке происходит изменение формы, размеров и (или) свойств поверхности заготовки в результате применения химически активных для данного материала сред. Наложение на такую среду электрического тока приводит к новой группе методов, получивших название электрохимических методов обработки. Частным случаем электрохимической обработки является обработка, заключающаяся в изменении формы, размеров и (или) шероховатости поверхности заготовки вследствие растворения её материала в электролите под действием электрического тока.

Электрофизическая обработка заключается в изменении формы, размеров и (или) шероховатости поверхности заготовки с применением электрических разрядов, магнитострикционного эффекта, электронного или оптического излучения, плазменной струи.

Комбинированные методы основаны на сочетании перечисленных методов, например, химико-термическая, электроконтактная, плазменно-механическая обработка и т.д. Надо отметить, что по сути электрохимическая обработка является комбинированным методом, что заключено уже в его названии. Комбинированные методы значительно повышают производительность и точность обработки, увеличивают стойкость инструмента по сравнению с отдельными составляющими методами. Помимо этого, в ряде случаев освоение комбинированных методов позволяет достигнуть новых технических эффектов, не существовавших в составляющих методах.

Технологические методы нанесения покрытий подразделяют на механические, химические, электрохимические и физические. Каждая из этих групп, в свою очередь, подразделяется также на большое количество методов. Отметим, что в настоящее время в технологии используется более 100 методов нанесения покрытий и проводятся разработки по созданию новых.

Технологические методы сборки основаны на образовании соединений составных частей изделия, причем соединение может быть как разъёмным, так и неразъёмным. Примерами методов образования неразъёмных соединений являются методы клёпки, склеивания, сварки и пайки.

Большое многообразие технологических методов и технологических операций на их основе приводит к необходимости дать классификацию методов обработки на основе признака функционального назначения [1]. Обработка может быть направлена на уменьшение объёма заготовки путём её разделения или снятия припуска. Припуск - это слой материала, удаляемый с поверхности заготовки в целях достижения заданных свойств обрабатываемой поверхности. Разделение заготовки и снятие припуска может проводиться механическим, термическим, химическим, электрохимическим, электрофизическим и комбинированным методами.

Обработка может проводиться без макроизменения объёма заготовки. В этом случае она может быть направлена на её формоизменение (механическая обработка пластическим деформированием), на изменение свойств заготовки во всём объёме (термическая и электрофизическая обработка) и на изменение свойств её приповерхностного слоя (все технологические методы обработки).

При обработке может увеличиваться её объём за счёт нанесения покрытий, то есть образования на заготовке поверхностного слоя из инородного материала. Нанесение покрытий может также проводиться с использованием всех технологических методов.

Надо отметить, что методы обработки, в результате которых снимается припуск, часто называют методами разделения полуфабриката и удаления излишнего материала [1]. В этом случае также используют название обработки резанием [3,7]. Причём термину «резание» придаётся значение, отличное от регламентируемого ГОСТ 3.1109-82 – изготовление детали путём

снятия с заготовки слоя материала в результате всех возможных видов воздействия. Под стружкой же понимают материал, удалённый с заготовки в любой фазе.

Приведённая классификация технологических методов и далеко не полное перечисление только их названий показывает, что в технологии в настоящее время используется значительное число технологических методов. Это связано с тем, что общепризнанной является точка зрения об отсутствии универсального технологического метода, в равной степени эффективного для изготовления различных деталей из различных материалов для различных условий эксплуатации. Каждый технологический метод имеет свою конкретную область рационального применения. В связи с этим идёт постоянный процесс поиска новых и совершенствования существующих методов, число которых непрерывно растёт.

2.3 Технологические методы механической обработки

2.3.1 Технологические методы обработки резанием

Обработка резанием – это механический метод обработки, заключающийся в отделении поверхностных слоёв материала с образованием стружки.

В этом наиболее широко распространённом в машиностроении технологическом методе отделение стружки производится с помощью инструмента в виде режущего клина. Очевидно, что твёрдость этого режущего клина должна существенно превышать твёрдость обрабатываемого предмета труда.

В зависимости от исполнения режущего клина обработку резанием подразделяют на лезвийную, абразивную и ультразвуковую.

В лезвийной обработке используется режущий клин в виде твёрдого тела с регламентируемыми размерами и регламентируемым направлением его внедрения и перемещения. В абразивной и ультразвуковой обработке резанием роль режущего клина выполняют грани абразивных частиц некоторого регламентированного диапазона их характерных размеров (дисперсности). Режущие грани этих абразивных частиц при внедрении в поверхность предмета труда располагаются в пространстве хаотически.

Таким образом, лезвийная обработка резанием – это обработка, направленная на отделение поверхностных слоёв материала в виде стружки за счёт внедрения в поверхность материала режущего клина с регламентированными размерами и регламентированным направлением внедрения и последующего перемещения.

Типовую схему лезвийной обработки можно представить в виде рис. 2.4.

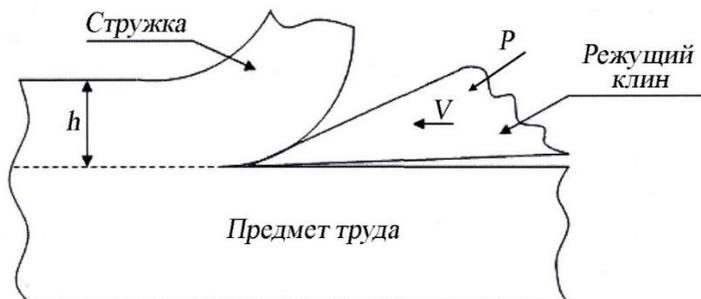


Рис. 2.4. Схема лезвийной обработки

Под действием усилия резания P режущий клин внедряется в обрабатываемую поверхность на глубину резания h и перемещается со скоростью V относительно поверхности предмета труда.

Механическая лезвийная обработка лежит в основе следующих технологических операций: точение; отрезка или распиловка резцами, дисковыми или ленточными пилами; фрезерование; сверление; зенкерование; развёртывание; протягивание; нарезание резьбы метчиками, плашками, резцами, гребёнками и т. д.

В абразивной обработке отделение поверхностных слоёв материала в виде стружки осуществляется внедрением в поверхность материала хаотически ориентированных режущих клиньев, которые являются гранями абразивных частиц.

Абразивная обработка может осуществляться связанным абразивом, когда абразивные частицы скреплены между собой специальным связующим составом, и свободным абразивом, который подаётся к поверхности струёй воздуха, специального газа или жидкости.

Абразивная обработка связанным абразивом отличается от обработки несвязанным тем, что в связанном абразиве регламентируются усилие резания P и скорость резания V , а в свободном абразиве усилие резания является переменной величиной, определяемой кинетической энергией, которую получают абразивные частицы в потоке газа или жидкости. Кроме того, из-за отсутствия направленной скорости резания V при действии свободного абразива отделение стружки с поверхности происходит по более сложному механизму.

Обработка связанным абразивом в виде кругов, лент, брусков и т. д. лежит в основе следующих технологических операций: шлифования, полирования, хонингования, суперфиниша и т. д.

Обработка несвязанным абразивом проводится для снятия поверхностного слоя с целью его очистки и придания заданной развитой шероховатости перед другими видами обработки (покраски, нанесения покрытий, сварки, пайки и т. д.), а также для гидрополирования поверхности (абразивно-жидкостная полировка).

Ультразвуковая обработка резанием основана на выкрашивании твёрдых и хрупких материалов при импульсном вдавливании в их поверхность абразивных частиц, совершающих ультразвуковые колебания. Схема ультразвукового резания приведена на рис. 2.5.

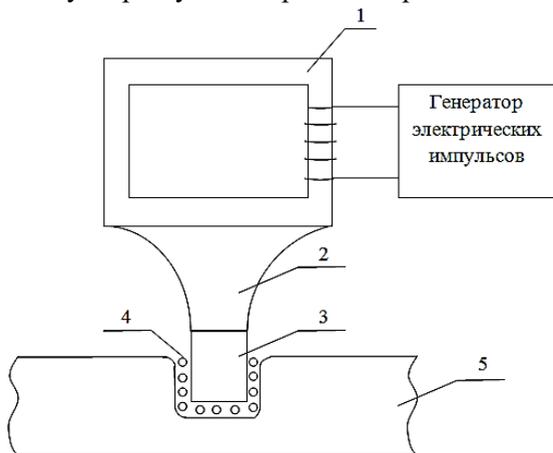


Рис. 2.5. Схема ультразвукового резания: 1 – ультразвуковой преобразователь (магнитостриктор); 2 – концентратор ультразвуковых колебаний; 3 – инструмент; 4 – суспензия на основе абразивных частиц; 5 – обрабатываемая деталь

Абразивные частицы при ультразвуковой обработке могут подаваться в зону резания в виде свободного абразива в суспензии, или абразивные частицы могут быть в связанном состоянии, закреплённые на торце инструмента. Амплитуда колебания инструмента (20–60) мкм, а частота колебаний (18–25) кГц.

Надо отметить, что возбуждение ультразвуковых колебаний материала в зоне обработки также используется для интенсификации различных технологических методов.

2.3.2 Технологические методы обработки давлением

Обработку давлением подразделяют на холодную обработку давлением, горячую обработку, обработку с локальным подогревом и обработку материала в сверхпластичном состоянии.

Холодная обработка давлением подразделяется на так называемую листовую обработку (хотя было бы правильно говорить на обработку листовых заготовок), обработку трубчатых и профилированных заготовок, обработку пластическим деформированием поверхностных слоёв заготовок (методы ППД – поверхностного пластического деформирования) и объёмную штамповку.

При обработке давлением листовых, трубчатых и профилированных заготовок используют механическую энергию перемещения твердых или эластичных сред, энергию импульсного электромагнитного поля (магнитно-импульсная обработка – МИОМ), энергию взрыва взрывчатых веществ, высоковольтный электрический разряд. Передача давления заготовке может происходить через твёрдое тело, резину, полиуретан или через жидкость в высоковольтном разряде.

Типовые технологические операции, реализуемые в этих методах, носят названия: гибка, обтяжка, рельефная формовка, отбортовка, раздача, обжим, выдавливание и т. д.

Типовые технологические операции, реализуемые методом объёмной штамповки, называются осадка, высадка, калибровка, объёмная формовка, холодное прессование, накатывание резьбы и т. д.

Типовые технологические операции, реализуемые деформированием поверхностных слоёв, носят названия:

обкатывание и раскатывание шариками и роликами; виброударное упрочнение, алмазное выглаживание и т. д.

2.4 Общие характеристики структуры технологических методов

2.4.1 Схематизация структуры технологических методов

В настоящее время в технологии используется очень большое число различных технологических методов. Каждый метод характеризуется:

- 1) назначением и своими функциональными возможностями;
- 2) технико-экономическими показателями средств технологического оснащения самого метода;
- 3) структурой и физико-химической сущностью процессов, протекающих при его реализации.

Назначение технологического метода – изменение геометрических размеров и физико-химических свойств материалов предмета труда в заданной области в соответствии с заданными требованиями. Эта область предмета труда, в которой необходимо провести заданные изменения, носит название зоны обработки. Зона обработки может быть локальной или охватывать весь предмет труда, может быть задана геометрическими параметрами, а может не регламентироваться технической документацией.

Для реализации любого технологического метода необходимо посредством инструмента подвести к предмету труда некоторые технологические воздействия: механические усилия, тепло, электрические токи, высокоэнергетические потоки энергии, электрические разряды и т. д. Эти технологические воздействия подводятся к определенной области предмета труда (зоне подачи технологических воздействий) и они порождают в материале предмета труда разнообразные физико-химические процессы, которые приводят к изменению его геометрических размеров и физико-химических свойств.

В количественном плане такие изменения отличаются по величине в различных областях предмета труда, но в зоне обработки они должны достигать значений, заданных в технической документации. Область предмета труда, через которую вводят технологические воздействия, не обязательно совпадает с зоной обработки (например, область сгиба листового материала и область приложения изгибающих усилий), а вид технологического

воздействия не обязательно соответствует тому физико-химическому процессу, который приводит к реализации метода.

Например, при лазерном фрезеровании или резке материала к поверхности предмета труда через область с габаритами порядка миллиметра, подводится электромагнитное излучение в виде потока квантов в оптическом или инфракрасном диапазоне. Эта электромагнитная энергия частично отражается, а оставшаяся часть поглощается в узком (доли микрометров) приповерхностном слое металла. За счёт сложного взаимодействия между квантами электромагнитного поля и электронами проводимости металла, а затем между электронами проводимости и ионами кристаллической решётки в результате энергообмена происходит нагрев материала до температуры плавления, а затем испарения. В результате происходит испарение и взрывное вскипание материала из этого объема, которое мы диагностируем как процесс реализации технологического метода в виде резания или фрезерования. Таким образом, в данном случае зона ввода технологического воздействия в предмет труда – это тонкий приповерхностный слой толщиной доли микрометров и площадью порядка миллиметра в квадрате. Технологическое воздействие – луч лазера, представляющий собой поток квантов (фотонов) электромагнитного поля, а вводимый вид энергии – энергия электромагнитного поля. Зона обработки – это зона удаленного материала, которая может иметь существенно более значительную ширину и глубину по сравнению с зоной ввода воздействия, а реализация технологического метода осуществляется за счёт тепловой энергии в процессах испарения и взрывного вскипания материала.

Такой же анализ можно провести и для любого другого технологического метода, сохраняя выделенные в примере характерные элементы:

1) вид технологического воздействия и вид энергии, подводимой к предмету труда;

2) способ подвода энергии, содержащий характеристики зоны подвода энергии и закономерности относительного перемещения этой зоны по предмету труда;

3) физико-химический механизм технологического метода, отражающий закономерности преобразования вводимой энергии в другие её виды и раскрывающий физико-химическую природу процесса реализации технологического метода и влияния протекающих физико-химических процессов на свойства материала предмета труда;

4) рабочий процесс технологического метода, отражающий закономерности взаимного влияния способа подвода энергии и физико-химических процессов в обрабатываемом предмете труда на точность и качество обработки, технические и экономические показатели метода.

2.4.2 Технологические воздействия и виды энергии, подводимые к предмету труда

Для реализации любого технологического метода необходимо от средств технологического оснащения через инструмент передать предмету труда некоторые технологические воздействия, которые в общем случае характеризуются конкретными физическими показателями и видом подводимой энергии.

Для удобства физического и технологического описания этих воздействий, в соответствии со сложившейся традицией в различных разделах физики, химии и технологии, их подразделяют на механические, тепловые, химические, электромагнитные и гравитационные воздействия, воздействия электрического тока и электрического разряда и комбинированные воздействия.

Однако по своей физической природе такие воздействия могут быть сведены только к четырём видам взаимодействий с различной физической природой: электромагнитные взаимодействия; гравитационные взаимодействия; слабые обменные взаимодействия, называемые также химическими взаимодействиями, проявляемыми из-за наличия химических связей между атомами в молекуле или в твёрдом теле; сильные обменные взаимодействия, называемые также ядерными взаимодействиями, проявляемыми из-за наличия связей между частицами атомного ядра.

Все эти воздействия характеризуются следующими формами энергии: кинетической направленного и хаотического движения и потенциальной энергией. При этом в потенциальной форме энергии выделяют не только четыре её вида, связанных с четырьмя видами различных физических взаимодействий, но и вводят другие её наименования, например, потенциальная энергия упругой деформации, потенциальная энергия взаимодействия атомов, дислокаций, точечных дефектов, поверхностная энергия твёрдого тела и жидкости и т. д. Естественно, все эти виды – вновь вводимые

виды энергий, в конечном счете сводятся к энергиям четырёх различных видов физических взаимодействий.

Механическая энергия к зоне ввода технологических воздействий может подводиться в виде статической, периодической или динамической нагрузки инструментом в виде твёрдого или резиноподобного (например, полиуретана) тела, инструментом в виде жидкости или газовой среды, или инструментом в виде ускоренного потока электронов, ионов или нейтральных атомов. Эта механическая энергия, определяемая работой внешних сил и кинетической энергией инструмента, порождает деформацию поверхности предмета труда, которая, в свою очередь, порождает поле механических деформаций и напряжений, распространяющееся вглубь материала. В случае ввода механической энергии потоком ускоренных элементарных частиц (электронов, ионов или нейтральных атомов) моделирование процесса обычно проводится без использования понятий механики сплошных сред о деформациях и напряжениях, а используется моделирование на основе анализа парного взаимодействия элементарной частицы с атомом узла кристаллической решетки. Такой процесс характеризуется глубиной внедрения элементарных частиц, распылением поверхности и возникновением дефектов в кристаллической решетке твердого тела. Подведённая механическая энергия частично преобразуется в другие виды энергии, например, тепловую.

Тепловая энергия, характеризуемая средней кинетической энергией хаотического движения частиц, обычно подводится к зоне ввода технологических воздействий в виде направленных или конвекционных потоков нагретого газа, потоков пламени или потоков плазменных струй. Эта энергия передается атомам поверхности твердого тела, повышает их температуру и поле температур распространяется вглубь твердого тела в соответствии с законами теплопроводности.

Химическая энергия – энергия, выделяемая или поглощаемая при протекании химических реакций, подводится к зоне ввода технологических воздействий обычно подачей химически активной для материала предмета труда среды в виде жидкости, газа или твёрдого тела. Главной особенностью использования химической энергии является необходимость начальной, периодической или постоянной активации протекания химической реакции. Эта активация обычно осуществляется или за счёт подачи тепловой

энергии (нагрева системы), или подачи электрического тока. Химическое взаимодействие протекает на поверхности, а в случае диффузии и приповерхностном слое.

Электромагнитная энергия к зоне ввода технологических воздействий подводится либо в виде излучения электромагнитной волны, либо созданием разности электрических потенциалов между инструментом и предметом труда, при которой в этом промежутке протекает электрический ток или возникает электрический разряд. При этом разность потенциалов может быть постоянная, периодическая или импульсная. Электромагнитные волны могут иметь различную длину волны и, в зависимости от ее длины, принято разделять электромагнитное излучение на следующие диапазоны: низкочастотное электромагнитное излучение с частотой менее 1 кГц и длиной волны более 300 км; радиочастотное излучение (длинные, короткие и ультракороткие волны) с частотой 300 кГц – 300 МГц и длиной волны 1000 м – 1 м; высокочастотное (ВЧ) излучение с частотой 300 МГц – 3 ГГц и длиной волны 1 м – 0,1 м; сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение с частотой 3 ГГц – 300 ГГц и длиной 10 см – 0,1 мм; инфракрасное излучение с длиной волны 20 мкм – 0,7 мкм; оптическое излучение с длиной волны 0,7 мкм – 0,3 мкм; ультрафиолетовое излучение с длиной волны 0,3 мкм – 0,1 мкм; рентгеновское излучение с длиной волны 0,1 мкм – 0,1 нм; жесткое γ -излучение с длиной волны менее 0,1 нм.

Электромагнитное излучение в диапазоне до инфракрасного излучения обычно хорошо моделируется электромагнитной волной, в диапазоне инфракрасного и оптического излучения моделируется либо волной, либо квантом электромагнитной волны – фотоном, а в диапазоне рентгеновского и γ -излучения – фотонами.

Электромагнитное излучение проходит через диэлектрические материалы, частично поглощаясь материалом с выделением тепла, но в проводники проникает только на определенную глубину, получившую название скин-слоя. Глубина скин-слоя зависит от электропроводности проводника и частоты (или длины волны) электромагнитного излучения и составляет, например, для частоты 50 Гц (промышленная частота) – 1 см, для частоты 500 кГц – 0,1 мм, а для частоты 1015 Гц (оптический диапазон с длиной волны 0,3 мкм) на глубину порядка 0,02 мкм. В то же время коротковолновое рентгеновское и жесткое γ -излучение проникают в металлы на

значительные глубины, рассеиваясь на электронах твердого тела. Под действием электромагнитной волны в скин-слое возникают электрические вихревые токи, которые из-за взаимодействия с падающей волной приводят к возникновению механических пondeмоторных сил (типа сил Ампера), приложенных к объёму материала в скин-слое. Кроме того, оставшаяся часть электромагнитной энергии переходит в тепловую, нагревая скин-слой. Механические пondeмоторные силы порождают поле деформаций и напряжений, распространяющееся на весь объем предмета труда, а тепло из скин-слоя по законам теплопроводности также распространяется на весь объем материала.

Сама по себе электромагнитная энергия напрямую редко используется в реализации технологического метода. В реализации технологического метода обычно используются другие виды энергии (например, тепловая или механическая энергия деформации), которые образуются в зоне обработки при взаимодействии электромагнитного излучения с материалом предмета труда.

Отметим, что, когда на поверхность твёрдого тела воздействуют электронные, ионные или ускоренные потоки нейтральных частиц, к зоне обработки подводится механическая энергия – кинетическая энергия направленного движения частиц, а также потенциальная энергия неравновесного состояния этих частиц – то есть и химическая энергия.

Ядерная энергия, являясь продуктом самопроизвольного распада радиоактивных элементов, в технологии используется косвенно как источник жёсткого γ -излучения и нейтронов для дефектоскопии материалов, а также как источник тепла в атомных реакторах.

Гравитационная энергия, в нашем случае энергия поля притяжения Земли, используется для сообщения кинетической энергии некоторым ударным устройствам, а также в некоторых процессах сепарации материалов. Понятно, что в первом случае к зоне обработки подводится механическая энергия.

В процессах реализации некоторых технологических методов активно используется электрический ток как способ получения тепловой энергии (энергия Джоуля - Ленца) или как способ доставки заряженных частиц (ионов или электронов) в зону обработки для протекания химических реакций или возникновения электрических

разрядов. В этом случае часто говорят об электрической энергии, вкладывая в это понятие указанный выше смысл.

Часто к предмету труда подводится несколько видов из перечисленных энергий для реализации комбинированных методов обработки. Например, электромеханическая, химико-термическая, резание с плазменным подогревом, резание с наложением ультразвуковых колебаний и т.д.

2.4.3 Способ подвода энергии к предмету труда

Способ подвода энергии к предмету труда определяется геометрическими параметрами зоны, к которой подводят энергию, взаимным наложением предмета труда и рабочих поверхностей инструмента в пространстве и характером изменения этого положения во времени.

В способе подвода энергии выделяют два главных аспекта. Первый – характеристики зоны, к которой подводится энергия, и характер изменения потоков энергии. Второй – кинематическая схема технологического метода, определяемая кинематикой перемещения зоны подвода энергии по поверхности труда.

Характеризуя зону, к которой подводится энергия, выделяют локальный способ, когда энергия подаётся к определённому участку предмета труда, и интегральный, когда область подвода энергии не локализуется.

Способ подвода энергии может быть контактным или бесконтактным. В контактных методах энергия подводится через зону контакта инструмента в виде твёрдого тела с предметом труда. В бесконтактных методах инструментом является не твёрдое тело, а потоки различной энергии.

Основным недостатком контактного метода подвода энергии является износ, деформация и изменение физико-химических свойств инструмента, приводящие к потере точности и качества обработки предмета труда. В контактных методах также наблюдается возбуждение автоколебаний.

В последние годы все чаще стали применяться в обработке бесконтактные методы с высококонцентрированными источниками энергии (плазменными, лазерными, электронно-лучевыми, магнитно-импульсными, ударными волнами и т.д.). Бесконтактные методы

обработки имеют гораздо большие преимущества в связи с развитием гибкого автоматизированного производства (ГАП).

Один и тот же вид энергии можно ввести в зону обработки различными способами. Например, электрическую энергию можно подвести контактным методом, бесконтактным или комбинированным. В первом случае (электроконтактная обработка) контакт осуществляется по микронеровностям поверхностей инструмента и заготовки. Во втором случае подвод электрической энергии может осуществляться через канал разряда (электроэрозионная обработка), пучком электронов (электронно-лучевая обработка) или электромагнитной волной (магнитно-импульсная обработка).

Контакт инструмента (источника энергии) с заготовкой характеризуется формой контакта, который может быть точечным, линейным, плоским или пространственным. Форма этого контакта оказывает большое влияние на физико-химические процессы в материалах, так как определяет, например, схему напряжённого состояния, распределение температур в материале, распределение и величину зоны наклёпа и остаточных напряжений и т.д.

Способ подвода энергии бывает стационарным, когда обработка материала происходит при неизменных условиях, и нестационарным (прерывистый, вибрационный, импульсный и т.д.).

Надо отметить, что в последние годы большое внимание уделяется различным нестационарным способам ввода энергии или наложения на стационарный процесс нестационарных воздействий. При рациональном вводе таких нестационарных воздействий удаётся существенно интенсифицировать физико-химические процессы и расширить технологические возможности метода. Например, в случаях: шлифования прерывистыми кругами; ударно-прерывистого резания; резания и обработки давлением, химической и электрохимической обработки с наложением ультразвуковых колебаний, магнитно-импульсной обработки и т.д.

Кинематика перемещения зон ввода энергии по поверхности заготовки и схема расположения этих зон определяют кинематическую схему технологического метода и схему обработки поверхности.

Обычно кинематическая схема метода, характеризуемая закономерностями относительного движения инструмента и заготовки, задаётся в первом приближении без учёта физических

явлений, протекающих в зоне ввода энергии. Она определяет совокупность относительных движений, необходимых для получения заданной поверхности или свойств материала в заданном объёме или на поверхности. В этом случае при разработке кинематической схемы систему СПИД принимают абсолютно жёсткой, не теплопроводящей, химически неактивной и не пропускающей электрический ток. В дальнейшем по результатам натуральных испытаний кинематическая схема может корректироваться.

При механической обработке резанием кинематическая схема состоит из сочетания прямолинейного и вращательного движения. Однако в связи с тем, что количество элементарных движений в различных схемах может быть различным и применяются эти движения в различных сочетаниях, кинематические схемы принято разделять на восемь групп: первая – одно прямолинейное движение; вторая – два прямолинейных движения; третья – одно вращательное движение; четвертая – одно вращательное и одно прямолинейное движение; пятая – два вращательных движения; шестая – два прямолинейных и одно вращательное движение; седьмая – два вращательных и одно прямолинейное движение; восьмая группа – три вращательных движения.

Наибольшее распространение имеют способы обработки, выполняемые согласно кинематическим схемам четвёртой группы: продольное точение и расточка – вращательное движение осуществляет деталь, а инструмент перемещается прямолинейно вдоль оси вращения детали; поперечное точение и отрезка резцами – вращательное движение осуществляет деталь, а инструмент перемещается прямолинейно, перпендикулярно оси вращения детали; сверление, зенкерование, развёртывание, нарезание резьбы метчиками (на сверлильных станках) – вращательное и поступательное движение осуществляет инструмент; фрезерование – вращательное движение осуществляет инструмент, а поступательное движение навстречу инструменту или попутно с ним – деталь.

В соответствии с этим траекторией движения каждой точки режущей кромки относительно детали будут: при продольном точении и расточке, сверлении, зенкеровании, развёртывании, нарезании резьбы метчиками – винтовая линия; при поперечном точении и отрезке – архимедова спираль; при фрезеровании – циклоида. Эта же классификация кинематических схем применима и при других методах обработки материалов.

Однако идеализированное представление о том, что кинематическая схема обеспечивает получение заданной формы поверхности, не всегда оправданно из-за физико-химических явлений в зонах ввода технологических воздействий и обработки.

Например, при обработке резанием из-за нежёсткости системы СПИД (станок – инструмент – приспособление – деталь) и физико-химических явлений в зоне контакта инструмент – деталь в системе возникают динамические автоколебания, приводящие к образованию волнистости и повышенной шероховатости. Упругое пружинение при обработке давлением приводит к необходимости уточнения формообразующих поверхностей пуансона и матрицы.

Возникновение автоколебаний наблюдается не только в контактных, но и бесконтактных методах. Например, при лазерном или электронно-лучевом разделении материала облако пара экранирует поступление энергии, что приводит к снижению интенсивности испарения. Но снижающаяся интенсивность испарения позволяет большому количеству энергии попасть в зону обработки, то есть опять в системе возникают автоколебания, наблюдаемые как пульсация облака пара. Такие обратные связи, приводящие к автоколебаниям или другим динамическим процессам, должны учитываться при проектировании кинематической схемы технологического метода.

2.4.4 Физико-химический механизм технологического метода и его рабочий процесс

Физико-химический механизм технологического метода определяется основным физико-химическим процессом, обеспечивающим реализацию данного метода [1,4,7,8]. Очень часто название метода происходит от названия механизма. В абсолютном большинстве случаев механизм метода является комплексным физико-химическим процессом, протекающим в специфических для данного метода условиях. Чтобы выявить суть этого понятия, необходимо выявить, в какие виды энергии преобразуется энергия, подводимая к зоне обработки, какие физические и химические явления протекают при этом и какие процессы приводят к реализации данного метода.

Например, при лазерной резке металла подводится электромагнитная энергия в оптическом или инфракрасном

диапазонах. Она поглощается в узком поверхностном слое металла. За счёт сложного взаимодействия между квантами электромагнитного поля и электронами проводимости, а затем между электронами и ионами кристаллической решётки происходит нагрев материала в объёме и его испарение или взрывное вскипание. Следовательно, хотя к зоне обработки подводится электромагнитная энергия, разделение материала происходит из-за его интенсивного испарения и вскипания, то есть из-за тепловой энергии.

При этом в лазерной резке многих металлов электромагнитная энергия с очень низкой эффективностью переходит в тепловую. В связи с этим перед резкой проводят нанесение на поверхность металла специальных покрытий (часто графитовых) для повышения эффективности перевода электромагнитной энергии в тепловую.

В общем случае при реализации любого метода в материалах могут происходить механические, теплофизические, химические, электрические, электромагнитные и плазменные явления. Эти процессы, рассматриваемые на уровне описания традиционных разделов физики и химии, мы будем называть первичными физическими и химическими явлениями и в рамках системного анализа относить к системам первого уровня.

Уровень описания этих явлений может быть различным как на основе статистической термодинамики и физической кинетики (микроуровень или рассмотрение явлений на атомарном уровне), так и на основе феноменологических теорий. Отметим, что физико-химическую сущность явления можно раскрыть, только рассматривая явление на атомарном уровне. Рассмотрение явления на основе феноменологического описания приводит только к объяснению количественной взаимосвязи макропараметров в рамках ограничений и допущений, сделанных при формулировке феноменологической теории.

Изучение и моделирование первичных явлений строится всегда путём постепенного усложнения системы как вглубь самого первичного явления, так и за счёт установления связей с другими первичными явлениями. Однако рассмотрение изолированного первичного явления не позволяет создать модель физико-химического механизма технологического метода.

Поэтому на втором уровне сложности необходимо рассматривать группы взаимосвязанных первичных явлений. Только после

рассмотрения явлений второго уровня можно провести анализ и выделить комплексный физико-химический процесс, определяющий механизм метода.

На третьем уровне обычно рассматривают комплексные физико-химические процессы, протекающие в специфических для данного метода условиях, определяющие технические показатели деталей и технико-экономические показатели процесса. Один из таких комплексных процессов и является по своей сути механизмом технологического метода. Все остальные комплексные процессы называют в этом случае дополнительными.

Однако именно вся совокупность комплексных процессов будет определять технические показатели деталей и технико-экономические показатели процесса. Совокупность механизма метода, дополнительных физико-химических процессов и способа подвода технологических воздействий получила название рабочего процесса технологического метода.

Таким образом, вся совокупность явлений и процессов, определяющая технические показатели деталей и технико-экономические показатели процесса, является рабочим процессом технологического метода, а один из основных комплексных процессов, протекающих в специфических для данного метода условиях и определяющий возможность реализации метода, является его механизмом.

2.5 Термодинамический анализ технологических методов

2.5.1 Закономерности передачи энергии в технологических системах

Любая технологическая обрабатывающая (формообразующая или сборочная) система в период выполнения технологического процесса, с точки зрения взаимодействия с окружающей средой, может быть изолированной (не обменивается ни энергией, ни массой), закрытой (не обменивается массой) и открытой. Примером изолированной системы служит ванна с химическим реактивом, закрытой – оборудование, потребляющее непрерывно электрическую энергию от промышленной сети, а открытой – токарный станок, осуществляющий точение детали, если устройства для сбора стружки не включены в технологическую систему.

С точки зрения начального состояния все системы подразделяют на системы с равновесным и неравновесным начальным состоянием.

В системах с неравновесным начальным состоянием для реализации технологического метода может не требоваться поступление энергии и массы извне. Технологический процесс может идти за счет начальной неравновесности системы. В изолированных неравновесных системах процессы неуправляемы и с течением времени замедляются. Поэтому для них требуется периодическое энергетическое и материальное обновление. Например, в случае химического травления требуется замена химического реактива, в случае магнитоимпульсной и электровзрывной обработки – заряд разрядного конденсатора и т.д.

Для систем, находящихся в начальном равновесном состоянии, реализация метода требует подвод энергии, а технологические процессы идут при взаимодействии с окружающей средой. Для таких систем характерно наличие двух типов процессов:

- самораспространяющихся;
- несамораспространяющихся.

В самораспространяющихся процессах система в начальный момент находится в равновесном состоянии, например, азот и титан. Однако, если в этой системе дать начальный толчок реакции и создать условия для её изолированности, то энергия, выделяющаяся в экзотермической реакции образования нитрида титана, будет достаточна для поддержания процесса до тех пор, пока не провзаимодействует полностью одна из компонент. Этот процесс получил название самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Однако, для осуществления любого процесса необходимо создание в системе определенной неравновесности – начальной или регулярно восстанавливаемой (поддерживаемой) в период реализации метода.

В технологической системе всегда можно провести условную поверхность, отделяющую предмет труда от остальной части системы. Через эту поверхность в предмет труда вводится энергия $E_{п}$ для создания или поддержания нужной степени неравновесности.

При любом внешнем воздействии в заготовки будут протекать те или иные процессы. С точки зрения технологических методов важны

только процессы, изменяющие свойства материала. Поэтому рациональным является выделение в любой заготовке трех характерных областей – зоны обработки, переходной зоны и зоны начального состояния заготовки. Под зоной обработки будем понимать область материала, в которой осуществляется реализация данного метода (разделения, формоизменения и т.д.). Под переходной зоной будем понимать зону, в которой происходит существенное изменение свойств заготовки, но отсутствуют изменения, реализующие данный метод. Зона основного материала характеризуется несущественным для предполагаемого использования материала изменением его свойств. Наличие переходной зоны связано с невозможностью точной локализации зоны ввода энергии как из-за ограниченной возможности концентрации энергии за счет ее фокусировки, так и из-за обменных процессов взаимодействия между различными частями материала. Естественно, что точную геометрическую поверхность, разделяющую эти зоны, провести невозможно. Сама граница между зонами занимает некоторый конечный объем и, в определенном смысле, является также переходной зоной.

В начальном состоянии любая заготовка обладает определенной начальной плотностью внутренней энергии – $\varepsilon_0(\vec{r}, t)$, которая зависит от её температуры, количества и распределения дефектов по объёму, степени упрочнения материала, химической неравновесности структур, упругой энергии системы из-за наличия остаточных напряжений и напряжений, возникающих из-за взаимодействия её с технологическими приспособлениями, и т.д. Вводя энергию в предмет труда, мы перераспределяем энергию в системе. Максимальна она в зоне обработки, а в переходной зоне изменяется от некоторого значения $\varepsilon_{кр}(\vec{r}, t)$ до $\varepsilon_1(\vec{r}, t)$ (рис. 2.6).

Выделение зоны в обрабатываемом материале может производиться не обязательно на энергетической шкале, для этого может использоваться шкала температур, напряжений и т.д. Так, при обработке резанием зона обработки состоит из зоны, из которой будет удален материал, а переходная зона будет занимать объём пластически деформированного приповерхностного слоя. При термическом разделении материала плазменной струей зона обработки будет определяться объёмом материала, нагретым до температуры плавления (именно этот объём будет уноситься

плазменной струей), а переходная зона лежит в пределах, ограниченных температурой плавления и, например, температурой отпуска материала.

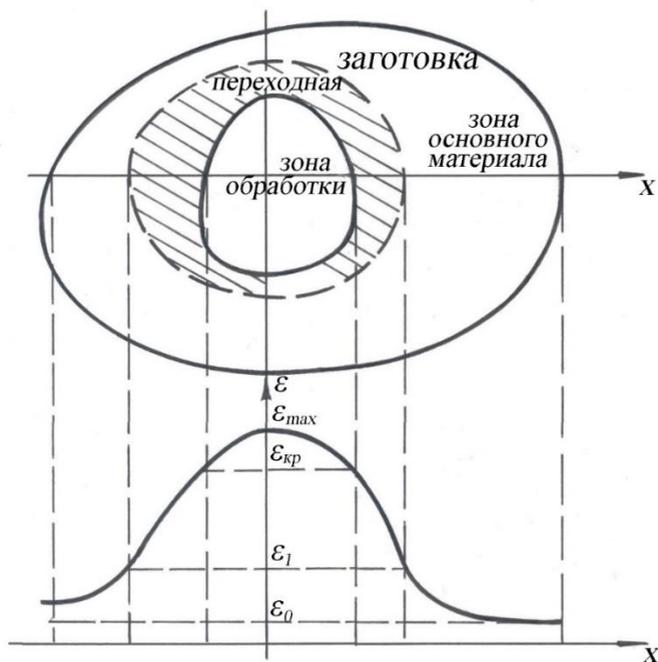


Рис. 2.6. Схема расположения характерных зон в предмете труда при реализации технологического метода и распределение плотности внутренней энергии в них

При реализации любого технологического метода в материале наблюдается всегда два взаимосвязанных явления – рост и уменьшение плотности внутренней энергии. Рост плотности внутренней энергии происходит за счет работы внешних сил и подведённого тепла и проявляется в том, что возрастает амплитуда колебаний атомов, скорость движения электронов проводимости, растёт количество различных элементарных дефектов и повреждений, растёт общая площадь межзеренных границ, возникают структуры и фазы материала в более высоких энергетических состояниях и т.д. Уменьшение плотности внутренней энергии связано с явлениями, обратными перечисленным. Однако,

если провести энергетический анализ реализации любого технологического метода в системе, изначально находившейся в равновесном состоянии, то видно, что реализация любого метода происходит только тогда, когда плотность внутренней энергии в зоне обработки достигает некоторой характерной величины $\varepsilon_{кр}$, зависящей от вида материала, условий его получения, вида энергии и особенностей самого технологического метода. Это утверждение носит название основного термодинамического принципа реализации технологического метода.

После реализации метода чаще всего наблюдается интенсивное выделение энергии в виде тепла.

Изменение плотности внутренней энергии в некоторой точке зоны обработки можно представить в виде рис. 2.7.

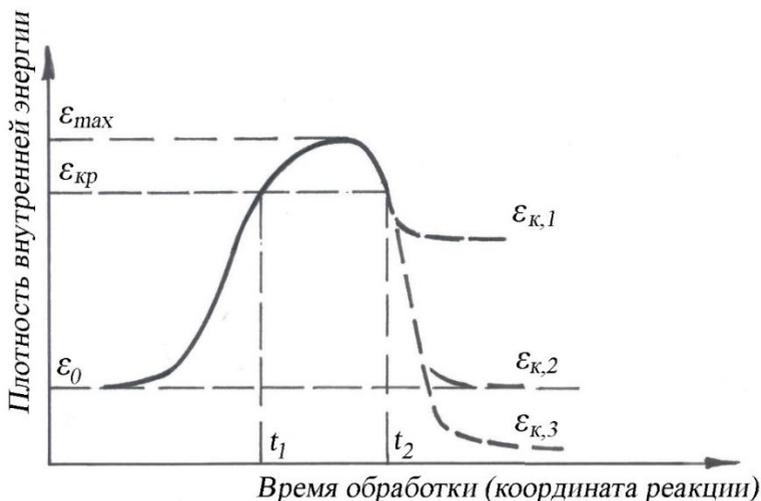


Рис. 2.7. Энергетическая схема реализации технологического метода

Плотность энергии $\varepsilon_{кр}$ соответствует тому характерному значению плотности, при котором происходит реализация метода. Следовательно, в момент времени t_1 в этой области зоны обработки начинается реализация технологического метода. В силу особенностей процесса энергопередачи плотность внутренней энергии в этой

области может превышать $\varepsilon_{кр}$ и достигать некоторого значения – ε_{\max} . В момент времени t_2 завершается процесс реализации технологического метода и величина плотности внутренней энергии убывает до $\varepsilon_{кр}$ и продолжает убывать далее за счет рассеивания энергии. На практике обычно вместо характерного значения плотности энергии $\varepsilon_{кр}$ указывают величины, более удобные для измерения – температуру, давление, механические напряжения и т.д.

Таким образом, за счет внешнего источника энергии происходит увеличение внутренней энергии в зоне обработки. При этом система приобретает энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера, и затем она переходит в новое состояние. Внутренняя энергия системы, в новом состоянии ε_K , может быть как больше, так и меньше начальной ε_0 . Величина энергии $\varepsilon_{\max} - \varepsilon_K$ обычно выделяется в виде тепла, которое по законам теплообмена уходит из зоны обработки.

Надо отметить, что для завершения процесса реализации метода необходимо не только поднять энергию в системе выше $\varepsilon_{кр}$, но и предусмотреть возможность эффективного отвода $\varepsilon_{\max} - \varepsilon_K$, так как эта энергия может быть стимулом для дальнейших превращений в материале или даже вернуть систему в первоначальное положение. Типовыми примерами явлений, в которых особенно явно проявляется роль выделившейся энергии $\varepsilon_{\max} - \varepsilon_K$, служат явления закалки, получения аморфных материалов, алмазов и т.д.

В абсолютном большинстве процессов (за исключением релаксационных) $\varepsilon_K > \varepsilon_0$. В этих случаях материал становится более чувствительным ко всем внешним воздействиям (требуется меньше внешней энергии для преодоления потенциальных барьеров). Широко известен пример, что образец, упрочненный за счет пластического деформирования, требует меньшего количества тепла для его плавления по сравнению с таким же, но не упрочненным, образцом. Разность этих количеств тепла и равна изменению внутренней энергии системы.

Величина и физический смысл характерной энергии $\varepsilon_{кр}$, необходимой для реализации технологического метода, могут быть

установлены только после конкретизации механизма технологического метода, что будет рассматриваться нами на протяжении всего курса. Однако можно заранее выделить два уровня рассмотрения механизма технологического метода, при которых плотность энергии имеет различную величину и физический смысл.

Во-первых, в качестве первого приближения к рассмотрению механизма технологического метода можно представить этот механизм как идеализированное физическое или химическое явление, протекающее в однородном по свойствам материале. В этом случае характерное значение энергии имеет строго определенный физический смысл – это энергия активации соответствующего явления. Например – энергия активации гомогенных и гетерогенных реакций; энергия активации дефектообразования; энергия активации диффузии; энергия активации фазовых переходов и т.д.

В этих случаях энергия активации является величиной, определяемой природой химических связей атомов, не зависит от температуры системы и влияет на скорости процессов через фактор Больцмана $\exp(-(\varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_0)/kT)$.

Во-вторых, при рассмотрении механизма технологического метода (как комплексного физико-химического процесса, протекающего в реальных материалах и специфических для данного метода условиях) характерное значение энергии $\varepsilon_{кр}$ приобретает смысл некоторой средней величины, усредненной как по совокупности различных последовательных и параллельных первичных явлений, так и по объёму заготовки. Совершенно очевидно, что в этом случае характерное значение плотности энергии $\varepsilon_{кр}$, называемое критической плотностью, теряет строго определенный физический смысл, а её величина может на несколько порядков отличаться от энергии активации соответствующего первичного явления.

Обычно на этом уровне описания выделяют три характерные по плотности энергии области – область критических плотностей меньше плотности энергии плавления; больше этой плотности, но меньше плотности энергии испарения; больше плотности энергии испарения.

2.5.2 Эффективная и критическая плотности энергии

Кроме критической плотности энергии, необходимой для описания энергоёмкости механизма технологического метода, необходимо ввести понятие эффективной критической плотности, учитывающей потери энергий в переходной зоне.

Установим связь между эффективной критической энергией и критической плотностью $\varepsilon_{кр}$.

Энергия E_{II} , введённая в заготовку через зону обработки, распределяется по всей заготовке (рис. 2.6). Будем считать, что основная доля энергии приходится на зону обработки и переходную зону, то есть

$$E_{II} \cong E_{3.0} + E_{II.3} = \int_{(V_{3.0})} \varepsilon_{3.0} dV + \int_{(V_{II.3})} \varepsilon_{II.3} dV = \langle \varepsilon_{3.0} \rangle V_{3.0} + \langle \varepsilon_{II.3} \rangle V_{II.3}, \quad (2.1)$$

где индексы «з.о» и «п.з» относятся к зоне обработке и переходной зоне, $\langle \varepsilon \rangle = (\int \varepsilon dV)/V$ – среднее значение плотности энергии по соответствующему объёму V .

Учитывая, что $\langle \varepsilon_{II.3} \rangle \cong 0,5 \langle \varepsilon_{3.0} \rangle = 0,5 \varepsilon_{кр}$ и деля (2.1) на объём зоны обработки, получаем:

$$\varepsilon_{эф} = \frac{E_{II}}{V_{3.0}} \cong \left(1 + \frac{1}{2} \frac{V_{II.3}}{V_{3.0}} \right) \varepsilon_{кр}, \quad (2.2)$$

где $\varepsilon_{кр} = E_{3.0}/V_{3.0}$ – критическая плотность энергии, необходимая для реализации данного метода.

Соотношение (2.2) позволяет сделать ряд выводов о направлениях снижения энергоёмкости технологических методов. Из (2.2) видно, что для снижения энергоёмкости технологического метода требуется:

- 1) снижение потенциального барьера для реализации метода;
- 2) уменьшение объёма переходной зоны.

Например, при точении сталей с величиной подачи порядка 0,04 мм глубина наклёпанного слоя достигает (0,2 – 0,3) мм, следовательно $V_{II.3}/2V_{3.0} = (5-8)$, что приводит к необходимости увеличения энергии, вводимой в зону обработки, в (6-9) раз. Ещё более существен вклад переходной зоны в процессах термического

разделения материала. Кроме того, переходная зона часто является зоной дефектного материала, для удаления которого необходимо применять дополнительные операции.

Поэтому в технологии стараются либо уменьшить величину переходной зоны за счет увеличения интенсивности выделения энергии в зоне обработки (из-за конечной скорости передачи энергии в материале величина переходной зоны будет меньше при меньшем времени подъёма энергии от ε_0 до $\varepsilon_{кр}$), либо получить переходную зону с комплексом свойств, повышающих качество деталей. Увеличение интенсивности выделения энергии в зоне обработки осуществляют за счет применения импульсных методов нагружения, сверхвысокоскоростного резания, лазерной и электронно-лучевой обработки. В ряде этих случаев удаётся даже изменить сам механизм метода, так при высокоскоростной и импульсной обработке можно перейти от механического разрушения с предварительным пластическим деформированием к хрупкому механическому разрушению, а при термическом лазерном резании или высокоскоростной пробивке материала получить на поверхности реза высококачественную ультрамелкодисперсную структуру зерна или даже аморфный слой материала.

Чтобы понять физическую природу возможных направлений снижения $\varepsilon_{кр}$, рассмотрим случай отделения материала в виде дисперсной стружки. В этом случае в (2.1) можно считать, что $\varepsilon_{3,0} \cong \alpha S$, где α – удельная поверхностная энергия, S – общая площадь вновь образованных поверхностей в стружке, имеющей объём $V_{3,0}$. Обозначая $V_{3,0}/S = kD$, где D – дисперсность стружки, k – коэффициент, характеризующий её геометрическую форму, из (2.2) получим:

$$\varepsilon_{эф} \cong \left(1 + \frac{1}{2} \frac{V_{п.з}}{V_{3,0}} \right) \frac{\alpha}{kD}. \quad (2.3)$$

Из (2.3) следует, что с уменьшением дисперсности стружки требуется увеличение плотности эффективной энергии, вводимой в зону обработки.

Экспериментальные зависимости удельной (Дж/см³) эффективной плотности энергии от площади сечения снимаемого слоя можно представить в виде

$$\varepsilon_{эф} \left(\frac{Дж}{см^3} \right) \approx 538 + 17,6/S_0 - \text{для точения};$$

$$\varepsilon_{эф} \left(\frac{Дж}{см^3} \right) \approx 10^4 + 902/S_0 - \text{для развёртывания}$$

при изменении S_0 в пределах от 0,05 до 0,6 мм² при точении и от 0,01 до 0,3 при развёртывании.

При переходе от точения к шлифованию величина $\varepsilon_{эф}$ изменяется более, чем в 100 раз (табл. 2.1). Ещё более сильно возрастает удельный расход энергии при реализации механизмов, связанных с разделением материалов и образованием стружки в атомарной фазе (табл. 2.2). На рис. 2.8 представлена зависимость $\varepsilon_{эф}$ от толщины обрабатываемого слоя и вида обработки.

Таблица 2.1. Влияние вида операции и площади снимаемого слоя на удельную эффективную плотность энергии, вводимой в зону обработки

Технологическая операция	Площадь сечения снимаемого слоя, мм ²	$\varepsilon_{эф}, \times 10^3 \text{ Дж/см}^3$
Точение	1,0	0,5 – 0,7
Протягивание	0,5	2,5 – 3,7
Фрезерование	0,3	5,0 – 7,5
Развёртывание	0,1	12 – 30
Шлифование	$5 \cdot 10^{-5}$	55 – 70

Таблица 2.2. Удельный расход энергии при реализации некоторых технологических методов

Технологический метод	Удельный расход энергии, 10^{-5} Дж/см ³
Электроискровая	(11 – 30)
Электроимпульсная	(3,5 – 7,1)
Электроконтактная	(2,3 – 4,6)
Электрохимическая	(4,2 – 4,3)
Ультразвуковая	(6 – 36)
Электронно-лучевая	(2,4 – 5,8)
Лазерная	(280 – 470)

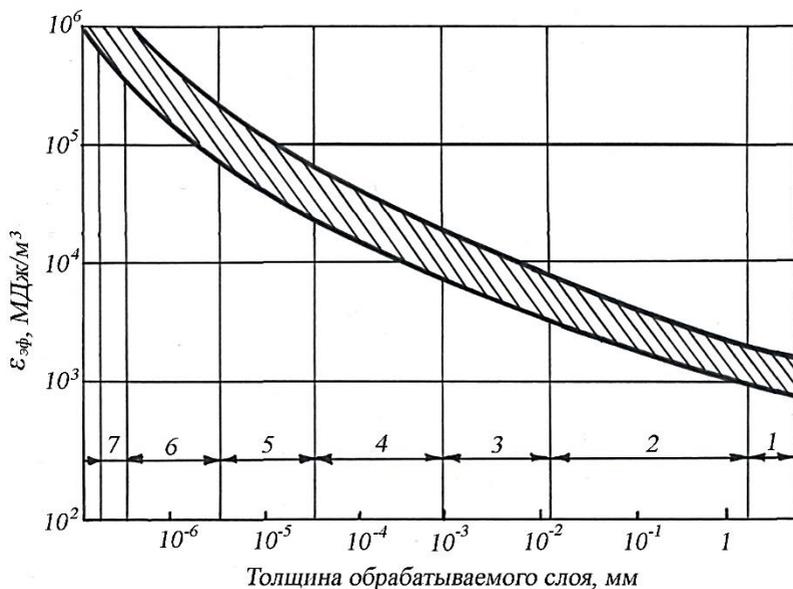


Рис. 2.8. Энергозатраты на удаление объема материала (стали) заготовки в зависимости от толщины обрабатываемого слоя: 1 – пластическое деформирование; 2 – точение, сверление, фрезерование; 3 – протягивание; 4 – шлифование; 5 – доводка; 6 – электрофизические методы; 7 – лучевые методы

Уменьшение удельной поверхностной энергии α также приводит к прямому (без учета тепловых и других процессов на поверхности) снижению $\varepsilon_{эф}$. Типичным примером снижения α является использование смазочно-охлаждающих жидкостей с добавками поверхностно-активных веществ. Явление снижения прочности поверхностного слоя за счет применения поверхностно-активных веществ, не приводящих к химическим реакциям, получило название эффекта Ребиндера. Особенно наглядно проявился этот эффект при добавлении в шлифовальные круги наполнителей ($\sim 10\%$) в виде тонкодисперсных порошков соединений легкоплавких непереходных металлов. Работа диспергирования обрабатываемого материала в этом случае уменьшалась в среднем до 10 раз.

Кроме описанных параметров для оценки энергоёмкости технологических методов используют также удельную плотность энергии, необходимой для обработки единицы поверхности, а также параметры, характеризующие эффективность передачи энергии в системе $k_c = E_{II}/E_c$, $k_{3,0} = E_{3,0}/E_{II}$, где E_c , E_{II} и $E_{3,0}$ – энергии, введённые в технологическую систему, в предмет труда и зону обработки. Иногда используются и другие параметры для оценки энергетической эффективности систем.

2.6 Контрольные вопросы по второму разделу

1. Технологическая система и ее формализованное представление. Вероятность выполнения технологического задания.
2. Математическая модель. Статистический и детерминированный методы разработки математических моделей.
3. Технологический метод и его отличие от технологической операции.
4. Классификация технологических методов.
5. Определение и примеры методов формообразования, обработки, покрытия, сборки, перемещения, контроля и испытаний.
6. Классификация методов формообразования. Определение и примеры формообразования литьём, формованием, спеканием, гальванопластикой и плазменным формованием.
7. Классификация методов обработки. Определение и примеры обработки механическим, термическим, химическим,

электрохимическим, электрофизическим и комбинированным методами.

8. Классификация методов покрытия и сборки.

9. Методы механической обработки резанием. Определение лезвийной, абразивной и ультразвуковой обработки. Схемы реализации методов и примеры их применения в технологических операциях.

10. Методы механической обработки давлением. Классификация методов. Способы передачи давления предмету труда. Примеры применения метода в технологических операциях.

11. Анализ структурных составляющих технологического метода на примере фрезерования лазерным методом. Зона ввода технологического воздействия, зона обработки, вид и способ подвода технологического воздействия, физико-химический механизм реализации технологического метода.

12. Виды технологических воздействий, используемых в технологических методах. Особенности ввода и преобразования механической, тепловой, химической, электромагнитной, электрической и гравитационной энергий в предмете труда.

13. Способ подвода технологических воздействий к предмету труда. Локальный и интегральный, контактный и бесконтактный, стационарный и нестационарный способы.

14. Кинематическая схема технологического метода. Классификация кинематических схем. Влияние процессов в зоне ввода энергии на кинематическую схему и точность обработки.

15. Физико-химический механизм технологического метода. Перечень основных механических, теплофизических, химических, электрических и электромагнитных явлений, протекающих в твердых телах при реализации технологических методов.

16. Понятие о рабочем процессе технологического метода.

17. Понятие об изолированных, закрытых и открытых технологических системах. Виды начального состояния системы.

18. Самораспространяющиеся и несамораспространяющиеся процессы при реализации технологических методов.

19. Понятие о зоне обработки и переходной зоне в предмете труда.

20. Энергетический барьер реализации технологического метода. Критическая плотность внутренней энергии и энергия, выделяющаяся после реализации технологического метода.

21. Основной термодинамический принцип реализации технологического метода.

22. Понятие об энергии активации реакций.

23. Эффективная критическая плотность внутренней энергии и ее связь с критической плотностью. Способы снижения энергоемкости технологического метода за счет уменьшения величины критической плотности энергии и уменьшения объема переходной зоны при обработке.

24. Влияние дисперсности удаляемого материала на величину критической плотности внутренней энергии.

25. Снижение поверхностной прочности материала. Эффект Ребиндера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технология самолетостроения [Текст]: учебник для авиационных вузов / А.Л. Абибов, Н.М. Бирюков, В.В. Бойцов [и др.]; под. ред. А.Л. Абибова. – М.: Машиностроение, 1982. – 551 с.
2. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов [Текст]: учебник для вузов / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, П.А. Бордаков [и др.]; под. ред. В.А. Барвинка. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
3. Камалов, В.С. Производство космических аппаратов [Текст]: учебник для вузов / В.С. Камалов. – М.: Машиностроение, 1982. – 280 с.
4. Основы технологии производства летательных аппаратов [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.С. Чумадин, В.А. Барвинок, В.И. Богданович [и др.]. – М.: Наука и технологии, 2005. – 912 с.
5. Теоретические основы авиа- и ракетостроения (в конспектах лекций) [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.С. Чумадин, В.А. Барвинок, В.И. Богданович [и др.]. – М.: Дрофа, 2005. – 784 с.
6. Избранные главы по авиа- и ракетостроению (в конспектах лекций) [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.С. Чумадин, В.А. Барвинок, В.И. Богданович [и др.]. – М.: Наука и технологии, 2005. – 656 с.
7. Подураев, В.Н. Технология физико-химических методов обработки [Текст] / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1989. – 263 с.
8. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей [Текст]: учеб. пособие / Ю.С. Елисеев,

В.В. Крымов, А.А. Митрофанов [и др.]; под. ред. Б.П. Саушкина. – М.: Дрофа, 2002. – 656 с.

9. Богданович, В.И. Системный анализ технологических методов обработки [Текст]: учеб. пособие / В.И. Богданович, В.А. Барвинок. – Куйбышев: КуАИ, 1989. – 66 с.

10. Богданович, В.И. Физико-химические механизмы электрофизических методов обработки [Текст]: учеб. пособие / В.И. Богданович. – Куйбышев: КуАИ, 1990. – 72 с.

Учебное издание

Богданович Валерий Иосифович

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Редактор Т.К. Крестина
Компьютерная вёрстка А.В. Ярославцевой

Подписано в печать 01.11.2017. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 4,0.

Тираж 25 экз. Заказ . Арт. 21 /2017.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Изд-во Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.