

Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков

**РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ
ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

УДК 621:33 (075.3)
ББК 65.9(4УКР)305.4я73
К79

Рецензенты:

- Ю.А. Сизый**, докт. техн. наук, профессор кафедры «Технология машиностроения и металлорежущие станки» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»;
- В.В. Коломиец**, докт. техн. наук, профессор кафедры «Теоретическая механика и детали машин» Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко;
- В.В. Нежебовский**, канд. техн. наук, заместитель главного инженера ПАО «Свет шахтера»

*Рекомендовано к печати ученым советом
Института промышленных технологий, дизайна и менеджмента (ИПТДМ)
при Одесском национальном политехническом университете
Протокол № 12 от 16 декабря 2015г.*

Кремнев Г. П.

К79. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении : учебное пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков. – Д. : ЛИРА, 2016. – 297 с.
ISBN 978-966-383-668-3

В учебном пособии рассмотрены основные направления экономии материальных, трудовых и энергетических ресурсов в машиностроении на этапе проектирования, изготовления и эксплуатации машин. Главным направлением экономии является экономия материалов, поэтому в работе рассмотрены разные пути экономии материалов при проектировании машины. Использование специальных материалов или придание обычным материалам специальных свойств, рациональных профилей или назначение рациональных методов получения заготовок может существенно уменьшить расход материалов.

Рациональные технологии изготовления деталей, обеспечение высоких износных свойств пар трения на этапе изготовления и поддержание этих свойств при эксплуатации – залог малых затрат материалов. Применение новых прогрессивных технологий восстановления изношенных пар трения и малый расход энергии при этом – это еще один шаг к уменьшению расхода материалов. В работе затронуты нанотехнологии, как революционный путь в области технологий, снижающий расход материалов, энергии и живого труда.

Учебное пособие рассчитано на ИТР машиностроения и студентов-специалистов и магистров ВУЗов III и IV уровня аккредитации машиностроительных специальностей.

УДК 621:33 (075.3)
ББК 65.9(4УКР)305.4я73

ISBN 978-966-383-668-3

© Кремнев Г.П.,
Новиков Ф.В., 2016
© ЛИРА, 2016

ТЕРМИНЫ

Изделие (И) – это предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии. Изделия бывают основного производства, предназначенные для поставки (продажи), и вспомогательного производства, предназначенные для собственных нужд изготовлявшего их предприятия. Изделия бывают в виде деталей, сборочных единиц, машин, комплексов, комплектов и др.

Процесс – последовательная смена явлений, состояний в развитии чего-нибудь или совокупность последовательных действий для достижения какого-либо результата, например производство какой-либо продукции.

Средства производства – совокупность средств и предметов труда, используемых человеком в процессе производства материальных благ. С помощью средств труда воздействуют на предметы труда. К средствам труда относятся машины и оборудование, инструменты и приспособления, производственные здания и сооружения, транспортные средства, средства связи. В средствах труда выделяются орудия производства: машины, оборудование и др., которым принадлежит определяющая роль.

Предметы труда – это все то, что подвергается обработке и на что направлен труд человека. Они даны природой (уголь, руда, нефть, вода и др.) или же являются продуктами труда (металл, заготовки, древесина и др.). В машиностроении продуктом труда является изделие.

Технологическая система – совокупность функционально взаимосвязанных средств, а также предметов производства и исполнителей для осуществления в регламентированных условиях заданных технологических процессов или операций.

Производственный процесс – совокупность всех действий человека и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления или ремонта выпускаемых изделий.

Технологический процесс – это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда (ГОСТ 3.1109–89). Несколько упрощая ГОСТ, технологический процесс – это часть производственного процесса, включающая в себя последовательное изменение размеров, формы, внешнего вида или внутренних свойств предмета производства и их контроль. Технологический процесс состоит из технологических операций.

Технологическая операция – основная единица и законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте одним или несколькими работниками над одним или несколькими объектами непрерывно (ГОСТ 3.1109–89). Технологическая операция в свою очередь состоит из технологических переходов.

Технологический переход – законченная часть технологической операции, характеризуемая постоянством применяемого инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых в сборке. Как уже было сказано ранее, результатом технологического процесса производства является изделие.

Технология – совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы, сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции.

Высокие технологии – это нетрадиционные технологии, обладающие признаками – наукоемкость, системность, физическое и математическое моделирование с целью структурно-параметрической оптимизации, высокоэффективный рабочий процесс, компьютерная технологическая среда, автоматизирующая все этапы разработки и реализации, устойчивость и надежность, гарантированность качества, рациональность природоиспользования и экологическая чистота.

Технология машиностроения – это наука о производстве машин в определенном количестве, определенного качества в соответствующие сроки с минимальными трудовыми и материальными затратами.

Изделия машиностроения – различные машины или их элементы (механизмы).

Машина – механизм (сочетание механизмов), осуществляющий целесообразное движение для преобразования энергии или производства работ (преобразование материалов, информации).

Качество – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее способность удовлетворять определенным потребностям в соответствии со своим назначением.

Технологическое оборудование – это орудия производства, средства воздействия на материалы или заготовки и источники энергии, обеспечивающие выполнение определенной части технологического процесса (металлорежущие станки, термические печи, литейные машины и др.).

Энергия – общая количественная мера различных форм движения материи. В физике соответственно различным физическим процессам рассматривают энергию механическую, тепловую электромагнитную, ядерную и др.

Закон сохранения энергии – энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает – она может только переходить из одной формы в другую.

Ресурсы – денежные средства, ценности, запасы, возможности, источники средств, доходов, например, природные ресурсы.

Милли – приставка для образования наименований дольной величины, равной $1 / 1\,000$ чего-либо, например, 1 миллиметр = $1 / 1\,000$ метра.

Микро – приставка для образования наименований дольной величины, равной $1 / 1\,000\,000$ чего-либо, например, 1 микрон = $1 / 1\,000\,000$ метра.

Нано – приставка для образования наименований дольной величины, равной $1 / 1\,000\,000\,000$ чего-либо, например, 1 нанометр = $1 / 1\,000\,000\,000$ метра.

ВВЕДЕНИЕ

Успешное решение намеченных в Украине социально-экономических программ связано с рациональным расходованием всех ресурсов, имеющихся у предприятий различных форм собственности, в первую очередь, материальных ресурсов и энергии.

В основе рационального расходования материалов и энергии, как показывает мировой опыт, лежат прогрессивные технологии, и именно они являются сегодня и будут завтра основой национального богатства страны.

Машиностроение – основа промышленного производства Украины. Оно нуждается в решении многих проблем: повышения качества продукции, надежности, ресурса, конкурентоспособности машин и др. От решения этих проблем зависит развитие научного, технического и производственного потенциала страны.

В условиях острого дефицита некоторых полезных ископаемых, истощения ресурсов невозобновляемых ископаемых в стране и дефицита энергоисточников, вопросы экономии всех видов ресурсов и энергии становятся первоочередной государственной программой.

Особое внимание уделяется металлоемкости отдельных отраслей. Металлоемкость – это расходование металла на функционирование машин в общей массе всех материалов. Металлоемкость в Украине имеет катастрофически невыгодные пропорции. Так, сегодня удельная металлоемкость железнодорожного подвижного состава на 50 % выше зарубежного, сельхозмашин – на 30 %, тракторов – на 19 %, автомобилей – на 17 %, а строительно-дорожных машин – в 2,3 раза! На единицу потребительских свойств расходуется в 1,5 раза больше материальных ресурсов, в первую очередь металлов, чем за рубежом.

Для изготовления коленчатого вала автомобиля массой 25 кг необходимо потратить 60 кг железной руды; 0,26 м³ воды; 10 кг топлива; 1,2 кг кислорода и выбросить в атмосферу 27 кг углекислого газа CO₂, т.е. итого без воды почти 100 кг исходных компонентов или почти в 4 раза больше, чем масса изготовленного изделия.

Для понимания стоящей перед Украиной проблемы экономии материалов важно провести анализ крупнейших в мире производителей стали – основы машиностроения (табл. 1).

По данным IISI (International Iron & Steel Institute; Международный институт чугуна и стали, г. Брюссель, Бельгия; крупнейшая мировая ассоциация чугуна и стали, объединяет 180 производителей, с 1967 г.).

Как видно, в 2006 г. Украина занимала 8-ое место в мире, и ее доля составляла 3,3% мирового производства. В 2008–2010 г.г. из-за кризиса эти цифры изменились, но в 2011 г. ситуация возвратилась к показателям 2006 г.

Самое главное состоит в том, какие технологии получения и способы разлива стали существуют.

В табл. 2 наглядно видно, как далеко вперед ушли крупнейшие страны-производители стали благодаря применению новых технологий по сравнению с Украиной.

Таблица 1

Крупнейшие страны-производители стали, млн. тонн

Страна	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.
Китай	150,9	182,2	222,4	280,5	353,4	418,8
Япония	102,9	107,7	110,5	112,7	112,5	116,2
США	90,1	91,6	93,7	99,7	94,9	98,5
Россия	59,0	59,8	61,5	65,6	66,1	70,6
Южная Корея	43,9	45,4	46,3	47,5	47,8	48,4
Германия	44,8	45,0	44,8	46,4	44,5	47,2
Индия	27,3	28,8	31,8	32,6	40,9	44,0
Украина	33,1	34,1	36,9	38,7	38,6	40,8
Италия	26,5	26,1	27,1	28,6	29,3	31,6
Бразилия	26,7	29,6	31,1	32,9	31,6	30,9
Турция	15,0	16,5	18,3	20,5	21,0	23,3
Тайвань	17,3	18,2	18,8	19,6	18,9	20,1
Франция	19,3	20,3	19,8	20,8	19,5	19,9
Испания	16,5	16,4	16,3	17,6	17,8	18,3
Мексика	13,3	14,0	15,2	16,7	16,2	16,3
Канада	15,3	16,0	15,9	16,3	15,3	15,4
Великобритания	13,5	11,7	13,3	13,8	13,2	13,9
Бельгия	10,8	11,3	11,1	11,7	10,4	11,7
Польша	8,8	8,4	9,1	10,6	8,4	10,0
Иран	6,9	7,3	7,9	8,7	9,4	9,8
Всего в мире	850,5	904,0	970,0	1068,9	1139,6	1239,5

Таблица 2

Технологии получения и способы разлики стали в 2006 году

Производители	Технологии, %			Способы разлики, %	
	Конвертерная	Электро- плавление	Мартен	Разливка в слитки	Непрерывная
Мировые произ- водители	68	29	3	7	93
Украина	52	4	44	71	29

В США и странах ЕС в 2000 – 2006 г.г. износ основных фондов составлял 20 и 25 %, а в Украине 65 %; инвестиции на 1 тонну стали были соответственно 30 и 25 долларов, а в Украине – 18 долларов. Из этого следует, что в Украине не обновляются технологии и используются неэкономичные решения.

Если проанализировать только энергозатраты, то в Японии (3-я страна мира) они составляют 21,5 ГДж, в странах ЕС – 24,8 ГДж, в России – 29,8 ГДж, в Украине – 30,8 ГДж, и это имеет место при остром дефиците энергоресурсов

в стране. Кроме того, Украина производит сырье и продукцию низкого передела (слябы, горячекатанный прокат, арматуру и др.), которые низко ценятся.

Таким образом, успешное развитие машиностроения Украины может быть построено только на основе уменьшения расхода ресурсов и энергии, применения новых материало- и энергоэффективных технологических процессов на этапах изготовления и эксплуатации машин.

В данном учебном пособии поставлено несколько целей, представляющих интерес для специалистов, которые учатся решать или уже решают проблемы экономии на разных этапах жизненного цикла машины:

I цель – на этапе технической подготовки производства конструктор и технолог должны заложить в документацию решения, более эффективные применявшихся ранее;

II цель – на этапе изготовления машин необходимо проанализировать потери и отходы при производстве машин и предложить методы их уменьшения или исключения;

III цель – на этапе эксплуатации машин предложить такие технологические процессы восстановления утраченных функций, которые могут быть более эффективными, чем используемые в процессе изготовления;

IV цель – провести анализ энергозатрат на производстве, в процессе, отдельной операции и наметить решения их уменьшения в условиях острого дефицита энергии в стране;

V цель – сформировать некоторые направления развития технологий в ближайшие 10 – 20 лет с учетом бурного развития в мире нанотехнологий.

Для достижения поставленных целей в учебном пособии рассмотрены основные направления экономии материальных, трудовых и энергетических ресурсов в машиностроении на этапе проектирования, изготовления и эксплуатации машин. Главным направлением экономии является экономия материалов, поэтому в работе рассмотрены разные пути экономии материалов при проектировании машины. Использование специальных материалов или придание обычным материалам специальных свойств, рациональных профилей или назначение рациональных методов получения заготовок может существенно уменьшить расход материалов.

Рациональные технологии изготовления деталей, обеспечение высоких износных свойств пар трения на этапе изготовления и поддержание этих свойств при эксплуатации – залог малых затрат материалов. Применение новых прогрессивных технологий восстановления изношенных пар трения и малый расход энергии при этом – это еще один шаг к уменьшению расхода материалов. В работе затронуты нанотехнологии, как революционный путь в области технологий, снижающий расход материалов, энергии и живого труда.

Авторы надеются, что читатель, наметив цели, указанные выше, разберется в проблемах материало- и энергосбережения, возможно, что-то из приведенного ниже использует в своей деятельности, а, возможно, добавит новые или нетрадиционные решения, как говорил классик: «Надежды юношей питают, отраду старым подают...».

1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИИ РЕСУРСОВ

К важнейшим направлениям экономии материальных ресурсов относятся:

- снижение материалоемкости продукции;
- увеличения выхода готовой продукции;
- сокращение и ликвидация потерь;
- использование вторичных ресурсов и отходов.

Снижение материалоемкости продукции обеспечивается путем совершенствования конструкции изделий, создания эффективных технологических процессов, применения новых материалов.

Материалоемкость изделия (М) в соответствии с ГОСТ 14.205–89 «ЕСТП. Технологичность конструкции изделий» – это расход материальных ресурсов, необходимых на изготовление, эксплуатацию и ремонт изделия.

Если под изделием понимают машину, то общий расход материалов на машину M_m составит:

$$M_m = M_{m.произв.} + M_{m.эксpl.} + M_{m.рем.},$$

где $M_{m.произв.}$ – расход материалов на изготовление машины;

$M_{m.эксpl.}$ и $M_{m.рем.}$ – соответственно расход материалов на эксплуатацию и ремонт машины.

В свою очередь

$$M_{m.произв.} = \sum_{i=1}^n M_{деталей} + M_{тех.отх.} + M_{потерь},$$

где $\sum_{i=1}^n M_{деталей}$ – расход материалов на изготовление n деталей, входящих в машину;

$M_{тех.отх.}$ – расход материалов на технологические отходы;

$M_{потерь}$ – расход материалов из-за потерь в ходе производства (брак при изготовлении, потери при транспортировании и хранении и т.д.).

Основными материалами для изготовления машин являются черные и цветные металлы, поэтому о них, в основном, и будет идти речь ниже.

Украина является крупнейшим в мире производителем металлов, структура расхода которых на изготовление различных машин такова:

- коэффициент использования черных металлов 0,74 – 0,75;
- отходы в стружку 10 % (возвратные потери);
- потери от коррозии 10 % (безвозвратные потери);
- изготовление запчастей 20,4 – 25 %.

Снижение M_m выпускаемой продукции на 1 % создает дополнительный прирост национального дохода около 1 млрд. грн в год. Улучшение конструк-

ции кольцепрокатного стана КПС–250 (Старокраматорский машиностроительный завод) обеспечивает экономию металла 50 т/год на каждом стане. На Харьковском турбинном заводе изготовлена новая модификация турбины для АЭС мощностью 1 млн. кВт, которая легче на 600 тонн своих предшественников. Разрабатывается новая турбина для ГЭС, которая легче аналога на 900 тонн.

Механизация и автоматизация технологических процессов при сроке окупаемости в 3 – 4 года обеспечит экономию труда, энергии и уменьшает отход в металлообработке на 2 – 3 %. Применение порошковой металлургии почти полностью исключает плавку и литье, сводит до минимума механическую обработку и обеспечивает экономию 1 500 – 2 000 тонн качественного металла на 1 000 т изделий из порошка, при этом трудоемкость изготовления деталей снижается на 50 %.

На Броварском заводе порошковой металлургии выпускают 600 наименований деталей для разных машин, при этом коэффициент использования металла составляет 95 %, на каждой тонне изделий экономится 2 т металла, высвобождается 8 металлорежущих станков и 19 рабочих.

Новый метод повышения качества листового проката, исходя из нижнего предела допусков толщины листа на металлургическом комбинате «Запорожсталь» и металлургическом комбинате имени Ильича (г. Мариуполь), позволяет экономить в год 200 000 т листового проката без введения новых мощностей и увеличения численности персонала.

Выпуск гнутых профилей проката на металлургическом комбинате «Запорожсталь» позволяет машиностроителям экономить до 25 % металла, а металлоемкость машин с применением гнутых профилей снижается на 10 – 15 %.

На ПАО «Завод им. Малышева» (г. Харьков) применяются точные фасонные профили, что позволило коэффициент использования металла увеличить с 0,26 до 0,92, уменьшить массу стружку на 135 т/год, а трудоемкость изготовления уменьшить на 57 000 нормочасов.

На Дружковском машиностроительном заводе за счет применения износо- и коррозионностойкой листовой стали при изготовлении кузовов шахтных вагонеток экономится до 60 % листового проката, а срок службы вагонеток увеличен с 4 до 6,5 лет.

Стоимость материалов в настоящее время составляет около 60 % общей себестоимости продукции машиностроения, и из года в год эта доля закономерно увеличивается. Поэтому практическое решение любой задачи в области машиностроения должно учитывать, наряду с другими вопросами, необходимость экономного расходования материалов. Однако при всем огромном значении экономии затрат на материалы в машиностроении, о чем подробно будет сказано дальше, следует подчеркнуть, что экономия никогда не должна являться самоцелью, а должна подчиняться интересам государства. Например, снижение массы машин, которое выгодно с точки зрения экономии материалов и снижения себестоимости машин, лишено смысла и, более того, вредно, если при этом непропорционально снижается надежность и долговечность машин, т.е. возникают огромные потери при их эксплуатации. Для удобства и упрощения анализа масса машин, материальные затраты и себестоимость изготовления

машин, их надежность, долговечность и затраты на ремонт обычно рассматриваются отдельно, но в действительности экономически они неразрывны, и ни в коем случае общегосударственные интересы не должны приноситься в жертву временным выгодам.

На производство 1 тонны стали в 2008 году в разных странах затраты в долларах США составляли: Россия – 390; Турция – 510; Украина – 550. Следовательно, при больших затратах экономия материалов важна.

Затраты на сырье, топливо, энергию, материалы и комплектующие достигают 50 % валового продукта, а в стоимости продукции машиностроения их доля превышает 75 %, в т.ч. стоимость материалов, в основном металлов, составляет 25 – 26 % для разных машин.

Относительная стоимость материалов в себестоимости готовой продукции колеблется на разных предприятиях в широком диапазоне в зависимости от характера и назначения выпускаемых машин, класса точности, типа и масштаба производства и др.

Так на одесских заводах эти цифры выглядят следующими:

– ОАО «Продмаш»: в мелкосерийном производстве стоимость материалов составляет 60 %, при этом покупаемых изделий – 35 %;

– ОАО «Одессасельмаш»: в крупносерийном производстве стоимость материалов составляет 45 %;

– ОАО «ОСПО»: в мелкосерийном производстве стоимость материалов в радиально-сверлильных станках 52 %, в алмазно-расточных станках – 55 %;

– ОАО «Микрон»: в мелкосерийном производстве стоимость только металлов составляет 30 %.

Удельный вес различных заготовок из черных металлов в структуре машин одного ряда представлен в табл. 3 (данные ОАО «Продмаш»). Анализ этих данных указывает на невысокую эффективность использования металлов, т.к. $K_{исп} = 0,37 - 0,57$.

В результате экономии всего 1 % материалов себестоимость продукции снижается в 4 раза больше, чем экономия капитальных вложений, и в 3 раза больше, чем экономия зарплаты.

Целесообразность экономии материалов очевидна, а пути их экономии следующие:

- уменьшение массы машин;
- применение более дешевых материалов;
- уменьшение отходов и потерь на производстве и при эксплуатации;
- повышение долговечности машин.

При снижении массы детали на 10 % трудоемкость ее изготовления становится ниже на 7 %, а при уменьшении массы детали в 2 раза – приблизительно на 40 %. Выпуск 1 т изделий из пластмасс позволяет сэкономить 4 – 5 т стали и около 3 т цветных металлов при уменьшении трудоемкости изготовления деталей в 7 – 8 раз.

При снижении массы транспортных машин всего на 1 % расход топлива при движении снижается на 0,22 %, при разгоне – на 1,3 % и повышается скорость движения на 0,3 %.

Таблица 3

Заготовки деталей ОАО «Продмаш» (Одесса)

Наименование изделий	Вид заготовок, масса, кг							Кэф-фициент использования, %	
	поковки	чугунное литье	стальной				Всего металла		Чистый вес
			лист	уголок	полоса	круг			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вентилятор 03	$\frac{52}{45,5\%}$	$\frac{31}{27\%}$	$\frac{22}{19,5\%}$	$\frac{5}{4,5\%}$	$\frac{1}{1\%}$	$\frac{3}{2,5\%}$	$\frac{114}{100\%}$	42	37 %
Вентилятор 04	$\frac{73}{39\%}$	$\frac{58}{31\%}$	$\frac{38}{20,5\%}$	$\frac{6}{3\%}$	$\frac{2}{1\%}$	$\frac{10}{5,5\%}$	–	85	45 %
Вентилятор 05	$\frac{119}{36\%}$	$\frac{104}{31,5\%}$	$\frac{92}{28\%}$	$\frac{2}{0,75\%}$	$\frac{2}{0,75\%}$	$\frac{10}{3\%}$	$\frac{329}{100\%}$	185	57 %
Вентилятор 06	$\frac{210}{44\%}$	$\frac{103}{21,5\%}$	$\frac{125}{26\%}$	$\frac{25}{5\%}$	$\frac{3}{0,5\%}$	$\frac{13}{3\%}$	$\frac{479}{100\%}$	210	44 %
Вентилятор 08	$\frac{357}{43\%}$	$\frac{102}{12\%}$	$\frac{234}{28\%}$	$\frac{117}{14\%}$	$\frac{5}{0,5\%}$	$\frac{19}{2,5\%}$	$\frac{834}{100\%}$	380	48 %
Итого:	$\frac{811}{41,7\%}$	$\frac{398}{20,5\%}$	$\frac{511}{26,3\%}$	$\frac{155}{8\%}$	$\frac{13}{0,7\%}$	$\frac{55}{2,8\%}$	$\frac{1943}{100\%}$	902	46 %

У стационарных машин самый большой эффект от расхода топлива достигается при снижении массы их подвижных частей.

Если усложнить конфигурацию деталей при конструировании, то это может привести к росту отходов на производстве.

Увеличивая надежность машины или ее ресурс работы, можно существенно снизить массу расхода материалов на эксплуатацию $M_{\text{экспл.}}$ и ремонт машины $M_{\text{рем.}}$, и за счет этой экономии даже несколько увеличить массу машины, если это оправдано.

В среднем цена металла в конструкции приблизительно в 10 раз выше стоимости металлопроката при его покупке.

Резервов рационального использования материалов несколько: конструктивные; эксплуатационные; технологические; организационно-экономические. Ниже рассмотрим их более подробно.

1.1. Конструктивные направления снижения расхода материалов

Цель – на этапе разработки рабочей документации показать, объяснить и обосновать такие решения разработчика документации, которые приведут к уменьшению расхода материалов, средств на их обслуживание, а также показать альтернативные решения.

Конструктор располагает значительными возможностями изменения расхода материалов при проектировании изделия, которые включают:

1. Выбор прогрессивного типажа.

2. Переход от универсальных машин к специальным машинам.
3. Применение непрерывно действующих машин. Их можно применять взамен действующих машин периодически. К непрерывно действующим машинам для пищевой промышленности относятся: диффузионные аппараты, центрифуги, вакуумаппараты и др.
4. Повышение единичной мощности.
5. Интенсификация рабочих процессов.
6. Переход на новую конструктивную основу (например, клейка швов вместо пайки или сварки).
7. Моделирование и оптимизация конструкций и режимов работы.
8. Применение рациональных кинематических схем и компоновок. Чем короче кинематическая цепь, тем меньше звеньев и меньше масса. Поэтому, например, применение двигателей постоянного тока взамен асинхронных двигателей часто исключает ряд механических цепей.

Конструкцию станка можно оценить коэффициентом компоновки K_k :

$$K_k = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2 + Q_3},$$

где Q_1 – масса деталей, с которых отделяется стружка;

Q_2 – масса деталей, определяющих размеры обрабатываемой за одну установку поверхности или характеризующих габариты и массу устанавливаемых на станке заготовок;

Q_3 – масса деталей, необходимых для создания условий наиболее удобного обслуживания.

Общая тенденция состоит в уменьшении Q_2 и Q_3 .

Если величина K_k становится малой, то конструктор должен перейти от одной конструктивной компоновки или схемы обработки к другой, более рациональной. Создавая новую машину, конструктор должен стремиться найти ее оптимальную кинематическую схему, по возможности сокращая и число кинематических цепей, и количество звеньев в каждой цепи. Так, станок модели 1731 производства завода им. Орджоникидзе (г. Москва) содержал 2 супорта с отдельными гидросистемами для привода. В новой конструкции станка гидросистему упростили, редуктор и насос исключили, что дало экономию в 150 кг металла на станок.

При замене двигателя и редуктора в предохранительной лебедке угольного комбайна для крутопадающих пластов на храповиковую передачу масса машины снизилась с 2,5 т до 0,6 т. Особенно эффективной является замена цилиндрических и червячных редукторов глобоидными редукторами. Так, при одинаковой передаваемой мощности в 9,3 кВт, передаточном числе $i=31$ и числе оборотов $n=1450$ об./мин двухступенчатый редуктор весит около 700 кг, червячный – 500 кг, а глобоидный – всего 130 кг.

Нормирование веса проектируемых машин, основанное на строгом учете прочностных характеристик, габаритов, мощности и других параметров, имеет

важное практическое значение. Обычно нормируются как масса машины, так и ее «относительная масса», представляющая собой отношение массы машины к характерному для данной машины показателю: мощности, грузоподъемности и др. Каждый из этих «относительных» показателей служит четкой характеристикой технического уровня машины и используется для сравнения на любом уровне. В табл. 4 приведены некоторые показатели станков.

Таблица 4

Значение мощности и массы различных станков

№	Тип станка	Основной наибольший размер, мм	Длина, мм	Мощность двиг.гл.дв., кВт	Масса, кг
1	2	3	4	5	6
1	Токарный универсальный револьверный патронный	$D_{изд} = 2h$, где h – высота центров, мм	$L = 2,5 \cdot D_{изд}$	$N = 0,4 \cdot \left(\frac{D_{изд}}{100}\right)^2$	$G = 140 \cdot \left(\frac{D_{изд}}{100}\right)^2 \cong 350 \cdot N$
2	Токарный многорезцовый	$d_{над\ сун.}$ – диаметр изделия над супортом	$L \cong 5D$	$N > 0,04d$	$G \leq 10d$ или $\leq 250N$
3	Сверлильный универсальный вертикальный	$d_{св}$ – диаметр сверла	–	$N \cong 0,12d$	$\Pi \cong 42d$ или $\leq 350N$
4	Радиально-сверлильный	$d_{св}$ – диаметр сверла	–	$N \cong 0,11d$	$G \cong 100$ или $\leq 900N$
5	Горизонтально-расточной универсальный	$d_{шп.}$	–	$N \cong 0,08d$	$G \cong 1,3d^2$ или $\leq 200N^2$

У многих машин 50 – 80 % ее массы составляют массы фундамента, плиты, станины. Поэтому следует снижать, прежде всего, их массу, применяя взамен литосварные, литоштампованные заготовки, гранелит вместо чугуна, полимербетон и другие заменители металла.

9. Научное обоснование запаса прочности, типовые методы расчета и испытаний машин. Запас прочности многих машин колеблется от 1,3 до 6, а иногда доходит до 15. Поэтому, обеспечивая равнопрочность, и осуществляя расчет всех деталей на прочность, можно снизить $M_{дет}$.

10. Рациональные сортаменты и марки материалов. Имеется около 5 000 разновидностей и размеров проката черных металлов. Поэтому, заменив углеродистую сталь (ст. 45) на низколегированную (сталь 25ХГТ), можно сэкономить до 20 % металлопроката из-за повышения долговечности. Легкие сплавы, титановые сплавы и высокопрочный чугун можно эффективно применять вместо стали. Композиционные материалы намного эффективнее однородных материалов, например, железобетона. Рациональные профили позволяют исключить обработку после заготовительного производства.

11. Снижение массы комплектующих изделий. Следует вместо многоступенчатых зубчатых передач применять клиноременные, а вместо цилиндрических или червячных передач – глобоидные передачи, т.к. масса глобоидного редуктора в 5 раз меньше, чем двухступенчатого цилиндрического редуктора.

12. Прогрессивная конструкция, учитывающая малоотходность и безотходность технологии изготовления. Об этом направлении будет сказано ниже.

Хотелось бы обратить внимание, что среди рассмотренных 12 пунктов нет, на первый взгляд, самого простого: почему бы не уменьшить расход материалов через уменьшение допусков, т.е. путем повышения точности как отдельных частей, так и всей конструкции в целом.

Этот так называемый «простой» путь ведет к резкому росту трудоемкости изготовления изделия, а отсюда – к росту его стоимости, что в рыночных условиях недопустимо. Поэтому ниже на нескольких примерах приведено пояснение отсутствия этого пункта в 12 рассмотренных выше, а далее в отдельном разделе еще раз вернемся к проблеме «допуск».

Точность обработки. В последние годы точность измерения повышается каждые 10 лет примерно в 10 раз. Пределом точности являются размеры атомов, которые составляют приблизительно $2 \cdot 10^{-4}$ мкм.

В период 1900 – 1950 г.г. средняя точность обработки увеличилась более чем в 4 раза, а предельная – более чем в 10 раз (допуски уменьшились с 0,02 до 0,002 мм). За последующие 60 лет (в период 1950 – 2010 г.г.) точность обработки увеличилась еще примерно в 2,5 раза.

В настоящее время в массовом производстве достигаемая точность отверстий диаметром 50 мм составляет 0,015 мм, допуск на расстояние между осями отверстия $\pm 0,01$ мм, а экономически оправданные допуски – 0,05 мм. Поскольку точность и трудоемкость всегда связаны, то для большинства процессов зависимость «точность – затраты» выглядит так, как это показано на рис. 1.

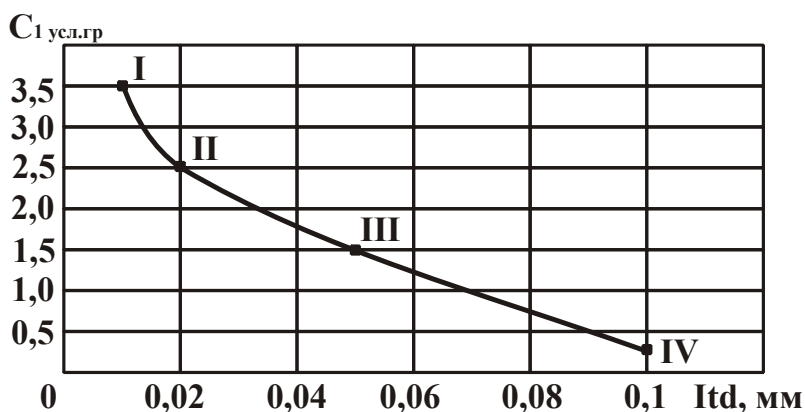


Рис. 1. Зависимость себестоимости обработки от точности обработанных поверхностей:

I – отверстие обработано сверлом, кругом и притиром, вал – кругом и притиром;

II – отверстие обработано сверлом и кругом, вал – резцом и кругом;

III – отверстие обработано сверлом, зенковкой и разверткой, вал – резцом;

IV – отверстие обработано сверлом и зенковкой, вал – холоднотянутый пруток.

Наиболее интенсивно затраты увеличиваются в диапазоне допусков 0,015 – 0,005 мм (рис. 1). В приборостроении увеличение точности в 5 раз приводит к увеличению трудоемкости в 2 – 2,5 раза, т.е. трудоемкость изготовления приборов увеличивается прямо пропорционально корню квадратному из степени повышения их точности. Более подробно упомянутые направления рассмотрены в следующем подразделе.

1.1.1. Пути снижения материалоемкости машин

Во всех отраслях машиностроения резервы рационального использования материалов (металлов) формируются конструктором (снижение массы готового изделия, уменьшение отходов и потерь при его изготовлении за счет совершенствования конструкции), технологом (экономия при внедрении передовых технологий и методов обработки), эксплуатационником (уменьшение расхода материалов на восстановление оборудования и запчасти) и менеджерами-управленцами (экономия за счет использования стандартизации, стимулирования персонала и др.). В табл. 5 приведены направления снижения материалоемкости машин. Процесс снижения материалоемкости машин начинается еще на стадии проектирования изделия. Конструктор выбирает материалы, определяет размеры, профиль и вид заготовки будущих деталей, компоует детали и сборочные единицы машины.

Материалоемкость будущего изделия зависит от выбора типа машины. Одним и тем же требованиям и условиям эксплуатации равнозначно могут соответствовать машины различного типа, например, колесные и гусеничные тракторы в тракторостроении, колонные и наклонные экстракторы в пищевом машиностроении и т.д. В то же время удельная масса гусеничных тракторов почти на 30 % ниже, чем колесных, а удельная масса наклонных экстракторов на 15 % ниже удельной массы колонных. Поэтому, например, в сельскохозяйственном машиностроении прицепные машины заменены навесными.

Смысл использования навесных орудий заключается в том, что все элементы, которые были необходимы для несения рабочих нагрузок (ходовая часть, механизмы управления), исключены из конструкции различных сельскохозяйственных машин и орудий и перенесены на трактор. В результате этого удельная материалоемкость плугов, культиваторов, жаток, сенокосилок уменьшилась на 30 – 40 %. Для передвижения этих машин и управления ими используются шасси и гидросистема трактора.

Снижению материалоемкости машин способствует также переход от универсальных машин к специальным машинам. Например, материалоемкость специализированного вертикального штамповочного пресса почти в 10 раз ниже материалоемкости универсального пресса того же усилия. Концентрация в одной машине разнообразных функций, одновременно не используемых, приводит к завышению массы этой машины.

В сельскохозяйственном машиностроении с целью снижения материалоемкости в последние годы широкое распространение получило агрегатирование. Оно заключается в том, что к одной базовой машине присоединяются

сменные рабочие органы или приспособления для выполнения нескольких различных операций, не совпадающих по времени. Агрегатирование широко применяется в станкостроении и ряде других отраслей.

Таблица 5

Направления снижения материалоемкости машин

Направления	Снижение материалоемкости на стадии			
	проектирования	изготовления	эксплуатации	организационных мер
1	2	3	4	5
Выбор прогрессивного типажа	X	–	–	X
Переход от универсальных машин к специальным	X	–	–	X
Переход от машин периодического действия к машинам непрерывного действия	X	–	–	X
Повышение единичной мощности	X	–	–	X
Интенсификация рабочих процессов	X	–	–	–
Переход на новую конструктивную основу	X	–	–	–
Моделирование и оптимизация конструкции и режимов работы	X	–	X	–
Выбор рациональной кинематической схемы и компоновки узлов	X	–	–	–
Внедрение научно обоснованных запасов прочности, типовых методов расчета и испытаний изделий	X	–	–	X
Применение рациональных сортментов и марок материалов	X	X	X	X
Снижение массы комплектующих изделий	X	–	–	X
Повышение надежности	X	X	X	X
Разработка и применение прогрессивных конструкторских решений, позволяющих использовать малоотходную и безотходную технологию изготовления	X	X	X	–
Использование рациональных способов получения заготовок, методов и режимов упрочнения деталей	X	X	X	X
Повышение в оптимальных пределах точности изготовления деталей	X	X	X	–
Вовлечение в производство отходов материалов	–	X	–	X
Повышение эффективности стандартов	–	–	–	X
Совершенствование механизма ценообразования	–	–	–	X
Концентрация, специализация и кооперирование производства	–	–	–	X
Совершенствование системы материально-технического снабжения	–	–	–	X

Примечание: X – направление поддерживается.

Снижение материалоемкости обеспечивается также при использовании машин непрерывного действия. Например, мощные экскаваторы непрерывного действия имеют не только высокую производительность, но и низкую по сравнению с одноковшовыми экскаваторами удельную массу. Так, масса роторного экскаватора при равной производительности меньше массы не только одно-

ковшового, но и многоковшового цепного, а удельный расход энергии у роторного экскаватора на 20 – 40 % ниже, чем у экскаваторов других типов.

Переход на производство непрерывнодействующего оборудования в пищевой промышленности, например диффузионных аппаратов, центрифуг, вакуум-аппаратов для сахарных заводов, обеспечил получение экономии металлопроката в среднем до 20 %. Это объясняется тем, что в аппаратах непрерывного действия исключаются или сводятся к минимуму малопроизводительные подготовительные и заключительные операции, что способствует повышению производительности аппаратов. Кроме того, аппарат непрерывного действия заменяет, как правило, несколько аппаратов периодического действия, т.е. его единичная мощность выше, чем у аппарата периодического действия.

Повышение единичной мощности агрегата является также эффективной мерой снижения удельной материалоемкости оборудования, поскольку масса и габаритные размеры оборудования всегда увеличиваются, однако в меньшей степени по сравнению с увеличением их мощности или производительности. Увеличение мощности паровых турбин втрое (от 100 до 300 тыс. кВт) сопровождалось увеличением их массы в 2,08 раза, т.е. снижением материалоемкости на 30 %. Производительность шагающего экскаватора ЭШ–50/125 по сравнению с шагающим экскаватором ЭШ–25/100 увеличилась в 3,2 раза, а удельная масса снизилась с 0,208 до 0,12 кг/м³ или почти в 2 раза.

Однако повышение единичной мощности эффективно влияет на снижение материалоемкости машин до определенного предела, после которого следует переходить на новую конструктивную основу (принципиально новую конструкцию) или применять другие методы, например интенсификацию рабочих процессов, моделирование, оптимизацию.

В сочетании с любым из приведенных выше направлений снижения материалоемкости оборудования эффективным следует рассматривать выбор рациональной кинематической схемы машины и компоновки ее узлов. Кинематическая схема машины определяет степень ее сложности, в частности многозвенность, от которой зависят надежность машины и ее масса. Сокращение протяженности кинематической цепи приводит к уменьшению количества деталей машины, а, следовательно, и ее массы.

Упрощение кинематических схем возможно в результате сокращения количества звеньев и передаточных механизмов, уменьшения числа рабочих органов, имеющих привод, выбора более совершенных конструкций передач и передаточных механизмов, использования гидравлических, пневматических приводов и тихоходных электродвигателей.

Материалоемкость машины может быть снижена рациональной компоновкой ее деталей и узлов, которая сводится, например, к сокращению расстояний между опорами и приближению их к месту приложения нагрузок, соединению двух или нескольких механизмов в один, исключению отдельных деталей или узлов в результате передачи их функций другим. При этом необходимо анализировать распределение массы машины по сборочным единицам для выявления наиболее металлоемких из них. Например, для токарных и сверлильных станков, грузовых автомобилей и некоторого другого оборудования

50 – 80 % их массы приходится на фундаментные плиты, станины, шасси. Следовательно, в первую очередь следует снижать металлоемкость этих узлов.

Значительно может быть уменьшена материалоемкость машин при снижении массы малонагруженных или вовсе ненагруженных деталей типа крышек, фланцев, втулок, кронштейнов, колец и других аналогичных деталей при сохранении их механических и эксплуатационных свойств. Например, при изменении круглой формы фланца подшипникового корпуса комбайна СК–2,6 на треугольную форму сэкономлено более 15 % металла, необходимого для изготовления этой детали. При условии ее массового выпуска на ПО «Гомсельмаш» получена годовая экономия металла около 50 тыс. тонн.

Материалоемкость машины зависит в основном от размеров ее нагруженных деталей, которые определяются расчетами на прочность, жесткость и долговечность. Однако, существующие методы инженерных расчетов нагруженных деталей не всегда отвечают современным требованиям. Кроме того, масса рассчитываемых деталей не всегда определяет массу изделия в целом. Например, в редукторе прокатного стана на прочность рассчитываются лишь шестерни, зубчатый венец большого колеса и два вала. Масса этих деталей составляет 6 – 10 % от массы редуктора. Габаритные размеры и толщина стенок остальных деталей выбираются в основном из условий литейной технологии. Иногда конструктор не знает точно, какие нагрузки действуют на деталь и какой характер их приложения, а это приводит к завышению коэффициентов запаса прочности, и, следовательно, к необоснованному повышению массы машин.

Анализ показывает, что запас прочности существующих конструкций машин колеблется в пределах от 1,3 до 6, а иногда доходит и до 15. При расчете деталей машин на прочность, как правило, учитывают коэффициент общего запаса прочности. Перспективны методы расчета, в соответствии с которыми используются дифференцированные коэффициенты запаса прочности. Их величины выбираются в зависимости от степени ответственности детали, точности расчетных формул и полноты учета действующих сил, концентрации напряжений, влияния напряжений при сборке машин и других факторов.

Излишние запасы прочности исключаются не только в результате применения новейших методов расчета конструкций, но и путем уточнения коэффициента запаса прочности на основе экспериментальных данных, получаемых при испытаниях деталей, сборочных единиц и машин в целом. Современные методы испытаний на прочность позволяют определить фактические напряжения и их распределение в деталях машин со сложными конструктивными формами. Это позволяет выполнять расчеты, исходя из действительно необходимых запасов прочности, и добиваться существенного снижения материалоемкости машин. Например, перерасчет запаса прочности деталей буртоукладочной машины на Калиновском машиностроительном заводе позволил снизить ее металлоемкость на 700 кг и получить годовую экономию металлопроката на весь объем выпуска указанной машины около 500 тонн.

При проектировании машин их массу можно снизить также приближением конструкции машины к условиям равного сопротивления действующим усилиям. По условиям равнопрочности масса конструкции будет минимальной,

если все ее элементы обладают одинаковым запасом прочности. Несоблюдение этого принципа приводит к созданию неравнопрочных и неэкономичных конструкций.

Известно, что несущая способность профиля определяется особенностями размещения в нем материала. Поэтому различные профили с одинаковой площадью поперечного сечения могут иметь различные прочностные характеристики. В слабонагруженных местах конструкций можно уменьшить толщину стенок, предусмотреть окна и отверстия, впадины и выемки, полости в литых и штампованных деталях. Например, только за счет образования окон и различных выемок в деталях, изготавливаемых штамповкой из листового проката, их массу можно снизить на 50 %.

Материалоемкость машины существенно зависит от выбора конструкционных материалов. Отечественная металлургия производит более 5 000 разновидностей и размеров проката черных металлов, прокат выпускают также из многих сотен марок стали. Кроме того, в качестве конструкционных материалов широко применяются композиционные, порошковые материалы, различные виды пластмасс и др.

Для одной и той же конструкции можно применить различные конструкционные материалы. Материал выбирается в зависимости от его физико-механических свойств (пределов прочности на растяжение, на сжатие и др.), а также специальных свойств (коррозионной стойкости, теплопроводности и т.п.). Решающее влияние на выбор материалов оказывает критерий экономичности, а также технологические особенности материалов – ковкость, литейные свойства, обрабатываемость и др. Рациональный выбор материалов обеспечивает уменьшение габаритных размеров и массы оборудования, повышение его эксплуатационных характеристик и снижение себестоимости.

Экономия металла в значительной степени зависит от его качества и сортамента. Применяемая в металлоконструкциях углеродистая сталь имеет низкие механические свойства, что обуславливает необходимость увеличения сечения профиля. В результате этого увеличивается расход прочности металла на обеспечение удержания собственного веса конструкции, а прочность, предназначенная для восприятия полезной нагрузки, уменьшается. Замена углеродистой стали на низколегированную сталь позволяет сэкономить не менее 20 % металлопроката. Долговечность металлических конструкций из низколегированных сталей в 1,5 – 2 раза выше, чем из углеродистой стали обыкновенного качества. Так, в результате замены конструкционной стали марки 45 низколегированной сталью 25ХГТ при изготовлении зубчатых колес на ПО «Минский моторный завод» их долговечность повысилась в 6 раз, что позволило получить большой экономический эффект. Одним из резервов экономии металлов является использование полуспокойной и кипящей сталей вместо спокойной (примерно 10 %). Перспективно также использование рулонной стали. В результате применения ее в электротехнической промышленности экономится 6 % металла, а в целом по машиностроению – около 200 тыс. тонн проката.

В последние годы создано большое количество высокопрочных и легких сплавов на алюминиевой, магниевой и титановой основе. Алюминиевые и маг-

ниевые сплавы по удельной прочности не уступают высоколегированной конструкционной стали, а по удельной массе они легче ее соответственно в 2,9 и 4,6 раза. Удельная прочность у титановых сплавов почти в 1,5 раза выше, чем у хромоникелевой стали, а удельная масса примерно в 1,7 раза меньше (более подробно эти вопросы рассмотрены ниже).

Применение биметаллов позволяет экономить дефицитные и дорогостоящие цветные металлы и высоколегированную сталь, обеспечивать повышение надежности работы оборудования при одновременном снижении его металлоемкости.

Использование обычного чугуна вместо стали для изготовления конструкционных деталей продолжительное время сдерживалось из-за низких прочностных свойств чугуна. Впоследствии был получен высокопрочный чугун, по механическим свойствам приближающийся к стали, использование которого позволило снизить материалоемкость литых деталей на 15 – 17 % по сравнению с материалоемкостью стальных отливок. При изготовлении, например, крупных коленчатых валов из стального проката в отходы уходит до 75 % металла, а при изготовлении их из отливок высокопрочного чугуна отходы уменьшаются почти вдвое.

Большим резервом экономии металла и одновременного снижения материалоемкости оборудования является использование пластмасс, которые в два раза легче алюминия и в 5 – 8 раз легче стали и других металлов. По удельной прочности и механическим свойствам пластмассы приближаются к металлам, а некоторые пластмассы превосходят их. В результате применения 1 тонны конструкционных пластмасс можно сэкономить 3 – 5 т стали. Изготовление деталей из пластмасс позволяет повысить коэффициент использования материалов до 0,89 – 0,95.

Прогрессивным направлением в снижении материалоемкости машин является использование рациональных профилей проката, в результате чего уменьшается или вовсе исключается механическая обработка за счет приближения формы профиля к форме будущей детали. По данным некоторых исследователей, несоответствие конструктивных форм прокатываемых профилей металла конструктивным формам деталей машин вызывает потери металла в отходы в различных отраслях машиностроения в среднем в пределах 15 – 20 % от общего объема поступающего проката. При этом почти половина этого количества уходит в стружку.

Особое значение имеет применение тонкостенных и специальных профилей в транспортном, сельскохозяйственном и дорожном машиностроении. Например, применение в сельскохозяйственном машиностроении швеллера с укороченными полками взамен горячекатаной широкополосной стали позволяет сэкономить до 40 % металла. Такой высокий уровень экономии металла обеспечивается в результате применения пустотелого проката вместо сплошного проката. Например, замена цельного квадратного сечения пустотелым прокатом позволяет сэкономить более 200 % металла. Замена открытых профилей замкнутыми также может способствовать значительному снижению металлоемкости машин при сохранении их прочности.

Основное преимущество как облегченных, так и полых профилей состоит в том, что толщина гнутых профилей из металлической ленты может быть менее 1 мм, тогда как минимальная толщина горячекатаных фасонных профилей обычно не бывает менее 3,5 мм. Кроме того, при гибке в холодном состоянии происходит наклеп, вследствие чего значительно возрастают механические свойства металла, характеризующие показатели прочности металла: предел прочности, предел текучести, твердость.

На массу машин оказывает влияние масса комплектующих изделий. Поэтому целесообразно, например, в приводах машин и агрегатов вместо многоступенчатых зубчатых передач применять клиноременные передачи или вместо цилиндрических и червячных передач – глобоидные передачи. При одинаковой передаваемой мощности и одном и том же передаточном отношении масса глобоидного редуктора в 5 раз меньше, чем масса цилиндрического двухступенчатого. Однако при решении задачи снижения материалоемкости машин необходимо учитывать срок их службы и надежность, так как в ряде случаев снижение их массы вызывает необходимость повышенного расхода материалов на запасные части в условиях эксплуатации. В промышленности затраты на капитальный ремонт эксплуатируемых машин, механизмов и других технических средств составляют более 10 % всей стоимости продукции машиностроения. Доля расхода проката черных металлов только на выпуск запасных частей в некоторых отраслях машиностроения составляет около 50 % его годового расхода на производство новых машин.

Применение высококачественных материалов в ряде случаев обеспечивает повышение срока службы деталей машин, а, следовательно, снижение расхода запасных частей. Проблема снижения материалоемкости машин состоит не только в максимальном повышении срока службы отдельных деталей, но и в достижении равномерного их износа. Сложность решения проблемы выравнивания сроков службы деталей и сборочных единиц агрегатов состоит в том, что на их износ влияет большое количество переменных факторов, возникающих как в процессе изготовления, так и при эксплуатации (материал деталей, метод обработки, режим работы, качество и способ смазки и др.). Выбор разных материалов для различно нагруженных деталей одной и той же машины повышает срок службы машины в целом. Для этой же цели применяют различные методы упрочняющей технологии.

В машиностроении важно обеспечить требуемые показатели шероховатости поверхности трущихся деталей и точности их изготовления, поскольку, например, коэффициент трения у поверхностей с небольшой шероховатостью меньше при всех видах трения (подробнее эти вопросы рассмотрены ниже).

Практика показывает, что детали с малой шероховатостью поверхности и высокой точностью хорошо прирабатываются в процессе эксплуатации. В сопрягаемых грубообработанных поверхностях, наоборот, интенсивно происходит износ. Детали с малой шероховатостью поверхности обладают повышенной сопротивляемостью к действию нагрузок, так как на их поверхности отсутствуют очаги концентрации напряжений. Следовательно, от точности изготовления и шероховатости поверхностей деталей зависит надежность их работы.

Несмотря на то, что повышение точности и снижение шероховатости поверхности приводит к увеличению трудоемкости и себестоимости детали, эти требования не должны снижаться в обоснованных случаях. Например, снижение точности и повышение шероховатости поверхности плунжеров гидроцилиндров, применяемых в буртоукладочных машинах и погрузчиках сахарного производства, приводит к течи масла из гидроцилиндров, ненадежной их работе и быстрому выходу из строя.

На стадии проектирования машины решающее значение в снижении ее массы и улучшении использования металла имеет правильный выбор конструктивных форм и материала, а на стадии ее изготовления – технология обработки, рациональный выбор которой обеспечивает получение большой экономии материалов.

Главное направление изменения структуры технологии, обеспечивающее снижение материалоемкости, – это увеличение удельного веса чистовых и чистовых отделочных операций в общем объеме обработки деталей при сокращении удельного веса заготовительных операций. Практика работы машиностроительных заводов показывает, что обрабатываемые детали часто имеют припуск более 10 мм. Это приводит к тому, что объем операций по удалению излишних припусков, достигает 50 %, а иногда и более в общей трудоемкости механической обработки, тогда как объем чистовой обработки составляет 4 – 12 %. При этом коэффициент использования металла не превышает 0,6.

Современная технология прокатного, кузнечного и литейного производств позволяет получать заготовки деталей машин с минимальными припусками и качественной поверхностью, что сводит к минимуму отходы металла, образующиеся в процессе механической обработки. Значительны резервы снижения материалоемкости оборудования на стадии его эксплуатации. Прежде всего, это относится к соблюдению оптимальных режимов работы оборудования, а также своевременному и качественному проведению ремонтных работ. Значительные (нередко единственные) возможности для реализации источников экономии материалов дает стандартизация. Любое прогрессивное техническое решение становится обязательным при введении его в стандарт.

На основе стандартов, руководящих технических и методических документов разрабатываются и используются высокопрочные и коррозионностойкие стали и сплавы, прокат экономичных типоразмеров и сечений, прогрессивные методы проектирования и расчетов, жесткие нормы металлоемкости и показатели надежности, процессы упрочняющей и материалосберегающей технологии, современные методы контроля и испытаний, требования к техническому обслуживанию и ремонту техники. Например, реализация программы комплексной стандартизации изделий химического и нефтяного машиностроения обеспечила снижение расхода металла по буровым установкам на 600 т/год, по кожухотрубным теплообменникам – на 800 т/год. Комплексная стандартизация позволяет экономить металл при производстве гидроэнергетического оборудования на 10 %, проходческих комбайнов – на 5 %, тепловозов – на 10 %.

Снижение материалоемкости достигается также в результате концентрации, специализации и кооперирования производства. В условиях распыленно-

сти литейного, кузнечнопрессового, сварочного, инструментального, ремонтного и других заготовительных и вспомогательных производств тормозится совершенствование технологии, внедрение средств механизации и автоматизации производственных процессов, что приводит к перерасходу металла. Так, в метизном производстве у предприятий, выпускающих до 100 т крепежных деталей в год, примерно 60 % металла идет в отходы, а у предприятий с объемом производства выше 10 тыс. тонн отходы составляют 25 %. Это объясняется тем, что с повышением уровня концентрации производства метизов создаются возможности для применения таких прогрессивных способов изготовления крепежных деталей, как холодная штамповка, высадка и др.

Анализ приведенных выше резервов и путей снижения материалоемкости машин показывает, что они могут быть использованы как отдельно, так и в сочетании друг с другом. Наиболее целесообразным является одновременное сочетание работы конструктора, технолога и эксплуатационника по снижению материалоемкости изделий. Если такое объединение усилий достигается, то до 75 % экономии металлопроката может обеспечить конструктор, технолог может обеспечить до 40 % экономии, прокат улучшенного качества обеспечивает экономию до 30 %, замена металла неметаллами – 8 %, снижение массы машин – более 20 %. Некоторые пути снижения материалоемкости будут рассмотрены ниже в этом подразделе, но это не значит, что неупомянутый нами путь исключен из перечня и не может быть внедрен.

1.1.2. Математическое моделирование и оптимизация

Процесс оптимизации конструкции оборудования начинается с выбора критерия оптимизации. Если масса оборудования не связана с его эксплуатационными параметрами, то в качестве критерия оптимизации необходимо выбирать условие получения минимальной массы изделия. Если с уменьшением массы ухудшаются эксплуатационные параметры оборудования, то в качестве критерия оптимизации необходимо выбирать какой-либо комплексный показатель, например приведенные расчетные затраты. Этот показатель учитывает как капитальные затраты на оборудование, так и текущие затраты на его эксплуатацию. В этом случае масса оборудования может быть снижена до оптимальных пределов, обеспечивающих минимальные суммарные затраты на изготовление и эксплуатацию изделия. После выбора критерия оптимизации составляется целевая функция, представляющая собой зависимость критерия оптимизации от параметров, влияющих на его значение. Взаимосвязь параметров с конструкцией оборудования определяется с помощью математической модели.

В зависимости от диапазона изменения параметров, применяют математические модели различной степени сложности: от упрощенных линейных до полных нелинейных (чем шире диапазон моделирования, тем сложнее модель). Например, если исследуется влияние установившихся режимов работы на конструкцию оборудования, то применяют математические модели статики, а при исследовании нестационарных режимов работы – математические модели динамики. Задача оптимизации сводится к нахождению экстремума (минимума

или максимума) целевой функции. В случае, если экстремум целевой функции находится вне области безопасной работы оборудования, то внутри этой области определяется по возможности большая или меньшая величина целевой функции. Сущность оптимизации заключается в решении компромиссной задачи, когда одни параметры целевой функции увеличивают значение критерия оптимизации, а другие – уменьшают.

Приведенные ниже примеры показывают возможности снижения материалоемкости изделий на основе моделирования и оптимизации их конструкции при проектировании. Важно рассмотреть случай, когда масса изделия не оказывает влияния на его эксплуатационные характеристики. Пусть, например, требуется спроектировать закрытый сборник емкостью V , исходя из условия обеспечения минимальной массы, т.е. необходимо определить его размеры (длину x_1 , ширину x_2 , высоту x_3), удовлетворяющие этому условию (табл. 6).

Таблица 6

Данные для расчета оптимальной массы сборника

x_1 , м	x_2 , м	x_3 , м	F , м ²	Масса, %	x_1 , м	x_2 , м	x_3 , м	F , м ²	Масса, %
4	4	4	96	100,0	8	1	8	160	166,7
4	2	8	110	114,6	4	1	16	168	175,0
2	8	4	112	116,7	1	16	4	168	175,0
2	2	16	136	141,7					

Проектируемый закрытый сборник будет иметь минимальную массу, если суммарная поверхность P дна и стенок его будет минимальной. Задача заключается в минимизации целевой функции F , выражающей эту поверхность:

$$F = 2 \cdot (x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3).$$

Для определения минимального значения функции F необходимо найти частные производные от этой функции по величинам x_1 , x_2 , x_3 и приравнять их к нулю. В результате получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} x_2 + x_3 + x_2x_3 = 0; \\ x_1 + x_1x_3 + x_3 = 0; \\ x_1x_2 + x_1 + x_2 = 0. \end{cases}$$

Определив из первого уравнения системы величину x_2 , из второго и третьего уравнений системы – величину x_1 , получено:

$$\begin{cases} x_2 = -\frac{x_3}{(1+x_3)}; \\ x_1 = -\frac{x_1}{(1+x_1)}; \\ x_1 = -\frac{x_2}{(1+x_2)}. \end{cases}$$

Из сопоставления зависимостей следует, что $x_1 = x_2$. После решения системы уравнений, получено: $x_2 = x_3$. Таким образом, минимальные (оптимальные) поверхность и масса сборника будут достигаться при условии, когда все его стороны равны ($x_1 = x_2 = x_3$), т.е. когда сборник имеет форму куба.

Сторона куба определяется из условия $V = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = x^3$, откуда $x = \sqrt[3]{V}$. При несоблюдении этого условия масса сборника будет больше оптимальной величины.

Примером оптимизации конструкции изделия, масса которого влияет на условия эксплуатации, может служить оптимизация параметров трубопровода. Трубопроводы повсеместно применяются для компоновки технологического оборудования во многих отраслях промышленности. Затраты на трубопроводы составляют в ряде случаев до 25 % затрат на основное оборудование, поэтому снижение массы трубопроводов является актуальной задачей многих производств. Основным параметром трубопровода является его диаметр, так как он определяет массу и стоимость трубопровода (капитальные затраты), а также потерю в нем напора на преодоление гидравлического сопротивления и, следовательно, расход, а также стоимость электроэнергии на транспортирование продукта (эксплуатационные расходы).

Диаметр трубопровода обычно рассчитывают по зависимости:

$$d = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{G}{\omega \cdot \rho}},$$

где G – массовый расход продукта, кг/с;

ω – скорость движения продукта, м/с;

ρ – плотность продукта, кг/м³.

При этом, исходя из приведенной зависимости, не учитываются длина трубопровода, количество колен, наличие регулирующей арматуры и ряд других факторов, от которых зависит величина оптимального диаметра трубопровода. Расчетное значение диаметра трубопровода, исходя из приведенной зависимости, определяется величиной скорости движения среды, которая для капельных жидкостей обычно принимается в пределах 0,5 – 1,5 м/с, для пара – 20 – 40 м/с.

Чем меньше диаметр трубопровода, тем меньше его удельная масса на единицу длины. Однако при этом, вследствие необходимости увеличения скорости и напора продукта, увеличивается гидравлическое сопротивление в трубопроводе. Для его преодоления требуются дополнительные затраты электроэнергии, потребляемой насосом или вентилятором. Поэтому экономически наиболее оптимальным следует принимать значение диаметра, при котором стоимость трубопровода с запорно-регулирующей арматурой и насоса (вентилятора), их монтаж и эксплуатационные расходы, отнесенные к 1 м³ подаваемого продукта (приведенные расчетные затраты), будут минимальными.

Приведенные расчетные затраты Z на единицу продукции в общем случае представляют собой сумму себестоимости и нормативной прибыли:

$$Z = C + E_n \cdot K_{y\partial},$$

где C – себестоимость;

$E_n \cdot K_{y\partial}$ – нормативная прибыль;

E_n – нормативный коэффициент эффективности;

$K_{y\partial}$ – удельные капитальные вложения в производственные фонды на единицу продукции.

Приведенные расчетные затраты как критерий оптимизации для комплекта, состоящего из трубопровода и насоса, выражаются целевой функцией:

$$Z = \frac{1}{Q \cdot \tau} \cdot [b_1 \cdot (K_n + K_{mp}) + b_2 \cdot K_{з\partial} + c_1 \cdot N \cdot \tau + E_n \cdot (K_n + K_{mp} + K_{з\partial})],$$

где Q – расход продукта, м³/ч;

τ – время работы за год, час;

b_1, b_2 – норма амортизационных и эксплуатационных расходов соответственно на оборудование и здание, доли от начальной стоимости;

$K_n, K_{mp}, K_{з\partial}$ – капитальные затраты соответственно на насос, трубопровод и часть здания для размещения оборудования, грн.;

c_1 – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, грн.;

N – мощность, потребляемая насосом, кВт.

После подстановки в приведенную зависимость всех составляющих, выраженных через диаметр трубопровода d , производится расчет целевой функции Z аналитическим или графическим способами, в том числе с помощью ЭВМ.

При решении аналитическим способом, как и в описанном выше случае, целевая функция Z подчиняется необходимому условию экстремума, т.е. целевая функция Z дифференцируется по диаметру трубопровода d , а полученное алгебраическое уравнение приравнивается к нулю и решается относительно d . Однако получаемое при этом выражение для определения оптимальной величины диаметра трубопровода d довольно сложное и неприменимо для инженерных расчетов. Поэтому более простым способом решения является графический способ, а для массовых расчетов – на основе применения ЭВМ. В этом случае составляющие затрат определяются по ниже приведенным формулам.

Капитальные затраты на трубопровод:

$$K_{mp} = (a_1 d + a_2 d^2 + a_3 d^3 + a_4 d^4) \cdot L \cdot A,$$

где a_1, \dots, a_4 – постоянные коэффициенты;

L – длина трубопровода;

A – коэффициент, учитывающий повышение стоимости при наличии теплоизоляции.

Капитальные затраты на насос, запорно-регулирующую арматуру и на сооружение части здания для размещения оборудования выбираются по прейскурантам цен. Потребляемая насосом электрическая мощность определяется:

$$N = a_5 + a_6 \cdot (Q - a_7),$$

где a_5, \dots, a_7 – постоянные коэффициенты;

Q – расход продукта, определяемый из решения системы уравнений, являющихся характеристиками трубопровода и насоса.

Характеристика насоса или зависимость его напора H_n от расхода Q определяется:

$$H_n = a_8 - a_9 \cdot (Q - a_{10})^2.$$

Характеристика трубопровода:

$$H_{mp} = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + h + \frac{8 \cdot Q^2 \left(\lambda_{mp} \cdot \frac{L}{d} + \sum \varepsilon \right)}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g},$$

где P_1, P_2 – давление соответственно на всасывающей и нагнетающей сторонах трубопровода, Па;

ρ – плотность продукта, кг/м³;

h – высота подъема продукта, м;

Q – расход продукта, м³/с;

λ_{mp} – коэффициент сопротивления трения по длине трубопровода;

L – длина трубопровода, м;

$\sum \varepsilon$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Принимая ряд значений диаметра трубопровода вблизи предполагаемого его оптимального значения, производится расчет n уравнений. Наименьшее значение величины приведенных расчетных затрат будет соответствовать оптимальному диаметру трубопровода.

В табл. 7 приведены результаты расчета трубопровода с насосом типа СОТ–150 по предложенному алгоритму, из нее следует, что оптимальным диаметром трубопровода является $d=0,2$ м, т.к. в этом случае приведенные затраты минимальны. Вместе с тем, без учета затрат электроэнергии на эксплуатацию трубопровода оптимальной величиной диаметра трубопровода следует считать $d=0,17$ м, т.к., согласно табл. 7, этому значению диаметра соответствует минимальная стоимость трубопровода на единицу производительности K_{mp}/Q .

Отклонение диаметра трубопровода от его оптимального значения в обе стороны приводит к увеличению приведенных затрат по следующим причинам. При малых значениях d приведенные затраты Z увеличиваются вследствие увеличения эксплуатационных затрат.

Как следует из табл. 7, величина относительной стоимости энергозатрат $c_1 \cdot N \cdot \tau / Q$ достигает наибольшего значения при малых значениях d вследствие большого гидравлического сопротивления трубопровода. При больших

значениях d увеличение приведенных затрат Z происходит в результате увеличения удельной стоимости трубопровода $K_{тр} / Q$.

Таблица 7

Данные для расчета оптимального диаметра трубопровода

Показатель	Диаметр трубопровода, м										
	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25
$K_{тр} \cdot 10^3$, грн.	1,485	1,585	1,686	1,787	1,888	1,990	2,092	2,194	2,296	2,399	2,503
Q , м ³ /час	194,7	211,2	225,3	236,9	246,8	254,7	261,3	266,6	270,1	274,5	277,4
$K_{тр} / Q$, грн./ (м ³ /час)	7,63	7,50	7,48	7,54	7,65	7,81	8,00	8,23	8,50	8,74	9,02
H , м	46,9	46,4	44,8	43,5	42,2	41,2	40,3	39,5	38,9	38,3	37,9
N , кВт	40,3	41,9	43,5	44,7	45,7	46,5	47,2	47,8	48,2	48,6	48,9
$c_1 \cdot N \cdot \tau$, грн.	696,4	724,0	751,7	772,4	789,7	803,5	815,6	826,0	832,9	839,8	845,0
$c_1 \cdot N \cdot \tau / Q$, грн./ (м ³ /час)	3,58	3,43	3,34	3,26	3,20	3,15	3,12	3,10	3,08	3,06	3,05
$3 \cdot 10^{-3}$, грн./м ³	2,6966	2,5899	2,5420	2,4830	2,4581	2,4497	2,4510	2,4611	2,4786	2,4991	2,5247

П р и м е ч а н и е. Исходные данные для расчета и значения коэффициентов: $P_1=0$; $P_2=2 \cdot 10^5$; $\rho=1002$; $h=15$; $L=100$; $\sum \varepsilon=11$; $Q=0,0694$ м³/с (250 м³/ч); $\tau=2880$; $E_n=0,15$; $b_1=0,199$; $b_2 \cdot K_{30}=0$; $c_1=0,006$; $A=1$; $a_1=97,999$; $a_2=a_3=5,001$; $a_4=35,001$; $a_5=22$; $a_6=0,104545$; $a_7=20$; $a_8=53$; $a_9=0,391 \cdot 10^{-3}$; $a_{10}=80$.

Следует отметить, что при расчете диаметра трубопровода по приведенной зависимости для условий, приведенных в табл. 7, его величина получается равной 0,24 м ($\omega=1,2$ м/с), т.е. масса трубопровода завышается на 20 % по сравнению с оптимальной массой.

В целевой функции, связывающей параметры трубопровода (капитальные затраты, расход продукта, эксплуатационные расходы) с критерием оптимизации Z , использованы зависимости, выражающие связь указанных параметров с конструкцией трубопровода (диаметр, длина, конфигурация и др.) и режимами работы трубопровода и насоса (напор жидкости, гидравлическое сопротивление и др.). Эти зависимости представляют собой математическую модель трубопровода и насоса.

При оптимизации сложного многоемкостного оборудования количество таких уравнений резко возрастает. Их устанавливают аналитически или экспериментально и объединяют в системы уравнений, дополняя рядом вспомогательных зависимостей. В этом случае оптимизации оборудования предшествует этап его моделирования.

Подробно вопросы моделирования машин и аппаратов освещены в специальной литературе, так как разработка математических моделей конкретных видов оборудования имеет свою специфику.

1.1.3. Выбор материалов, обеспечивающих коррозионную стойкость изделия

В машиностроении используются в основном конструкционные углеродистые стали, коррозионная стойкость которых снижена главным образом наличием примесей серы. Для повышения коррозионной стойкости стали легируются обычно хромом и никелем. Коррозионностойкие хромоникелевые стали и сплавы широко применяются в машиностроении. Однако большинство из них имеют высокую стоимость, что ограничивает их применение. Стоимость безникелевых нержавеющей сталей ниже, поэтому они в определенных условиях не уступают по коррозионной стойкости хромоникелевым сталям. Применение безникелевых сталей в ряде случаев обеспечивает значительный экономический эффект. Так, электросварные трубы из безникелевой нержавеющей стали 08X18T1 по коррозионной стойкости в сахарных соках и сиропах идентичны трубам из хромоникелевой стали 12X18H10T, а их стоимость в 1,4 раза ниже. Поэтому применение труб из стали 08X18T1 взамен стали 12X18H10T для теплообменных аппаратов сахарной промышленности позволяет долучить значительный экономический эффект.

Основная масса деталей машин изготавливается из черных металлов – чугунов и сталей различных марок, которые подвержены коррозионному разрушению, особенно стали различных марок. Поэтому в работе им уделено основное внимание.

Для экономии остродефицитных металлов и сплавов целесообразно заменять их биметаллами, состоящими из различных по свойствам металлов и сплавов. Экономический эффект такой замены для 1 тонны биметаллов составляет примерно 3 000 грн и достигается за счет того, что дефицитные материалы используются в виде тонкого плакирующего слоя (или двух слоев) в сочетании с основой, стоимость которой ниже стоимости дефицитного материала. Толщина плакирующего слоя обычно составляет от 5 до 20 % общей толщины листа.

Основной слой в биметалле обеспечивает требуемую прочность конструкции, необходимую пластичность, хорошую свариваемость, высокую теплопроводность и другие требования. Плакирующий слой, как правило, служит в качестве антикоррозионного слоя. Его обычно изготавливают из нержавеющей, кислотостойких сталей, сплавов, а также цветных металлов.

Если для изготовления 1 тонны листовой нержавеющей стали расходуется в среднем 1,4 – 1,5 тонн нержавеющей стали X18H10T в слитках, то для изготовления 1 тонны двухслойного листа тех же размеров расходуется не более 0,5 тонны нержавеющей стали в слитках. Экономия хрома и никеля в этом случае составляет соответственно около 200 и 100 кг, причем антикоррозионные свойства биметаллов не уступают свойствам однородного металла, а устойчивость против коррозионного растрескивания и коррозионной усталости у биметаллов, иногда выше, чем у однородного металла.

В отечественной промышленности и за рубежом применяются биметаллы с различными сочетаниями металлов и сплавов: углеродистая и нержавеющая сталь, сталь и медь, сталь и титан, алюминий и нержавеющая сталь и др.

Выше отмечалось, что около 10 % потерь металла (безвозвратные потери) связано с его коррозией, поэтому конструкция изделия и его элементы должны обеспечивать возможность сопротивляться коррозии или быть защищенными путем нанесения и обновления защитных покрытий, удобства консервации и расконсервации. Качество и долговечность защитных покрытий в значительной мере зависят от равномерности их нанесения, которая, в свою очередь, зависит от формы покрываемой поверхности: она не должна иметь острых углов, углублений и выпуклостей, глубоких царапин, складок и других неровностей.

При проектировании крупногабаритного оборудования необходимо предусматривать вспомогательные устройства, предназначенные для осмотра и нанесения покрытий на конструктивные элементы изделия.

Если не удастся на отдельных участках избежать интенсивного коррозионного разрушения, то эти участки целесообразно выделять в отдельные конструктивные элементы, чтобы можно было их легко и быстро заменить. Коррозионная стойкость материала определяется интенсивностью его коррозии (табл. 8) и в значительной мере определяет материалоемкость изделия.

Таблица 8

Десятибалльная шкала коррозионной стойкости (ГОСТ 13819–89)

Скорость проникновения коррозии, мм/год	Коррозионный балл	Скорость проникновения коррозии, мм/год	Коррозионный балл	Скорость проникновения коррозии, мм/год	Коррозионный балл
До 0,001	1	0,05 – 0,1	5	1,0 – 5,0	8
0,001 – 0,005	2	0,1 – 0,5	6	5,0 – 10,0	9
0,005 – 0,01	3	0,5 – 1,0	7	Свыше 10,0	10
0,01 – 0,05	4				

При выборе геометрических размеров элементов конструкции конструктор предусматривает запас на коррозионное разрушение. Так, расчетная (из условий прочности, жесткости и других требований) толщина стенки корпуса диффузионного аппарата свеклосахарного производства равна 10 мм, срок службы аппарата – 10 лет, а скорость проникновения коррозии в условиях эксплуатации аппарата – 1 мм/год. Поэтому толщина стенки принимается 20 мм (т.е. $10+10 \cdot 1$). Таким образом, половина металла впоследствии идет на безвозвратные потери. Если скорость проникновения коррозии уменьшить в 10 раз путем выбора коррозионностойкого материала, то толщина стенки может быть принята равной 11 мм, а металлоемкость корпуса в этом случае будет снижена почти в 2 раза. Для выбора материалов, коррозионностойких к различным агрессивным средам, могут быть использованы данные, приведенные в табл. 9. Как правило, детали одного изделия выполняются из различных материалов, а контакт деталей из разнородных материалов приводит к разрушению одной из деталей в результате контактной коррозии. Поэтому при конструировании учитывают, что при скорости коррозии анода в атмосферных условиях и парах от 50 до 150 г/(м²·год) контакты условно допустимы (требуют смазки, периодической очистки, покраски), а при скорости более 150 г/(м²·год) – недопустимы.

Коррозионная стойкость основных конструкционных материалов
в химических средах

Среда	Алюминий	Латунь	Бронза	Чугун	Никель	Сплав никеля с хромом	Сплав никеля с медью	Сплав никеля с железом	Нержавею- щая сталь	Углеродис- тая сталь	Титан	Цинк
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Аммиак:												
сухой	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	С	К
влажный	С	К	К	С	С	С	К	С	С	С	С	К
Нитрат алюминия	С	К	К	С	С	–	–	–	С	К	С	–
Спирт:												
бутиловый	С	С	С	С	С	–	С	–	С	С	С	С
этиловый	С	С	С	С	–	С	–	С	С	С	С	С
метиловый	С	С	С	С	С	–	С	–	С	С	С	С
Хлорид кальция	О	С	С	С	С	С	С	С	К	О	С	С
Гидроокись кальция	С	С	С	О	–	–	–	–	С	С	–	О
Растворы углекислоты	С	С	С	С	С	–	С	–	С	С	С	С
Хлорированный растворитель	О	С	С	С	С	–	С	–	О	О	С	К
Хлор:												
сухой	С	С	С	К	С	С	С	С	С	С	К	С
влажный	К	К	К	К	К	К	К	К	К	К	С	К
Кислота:												
хромовая	О	С	–	С	К	–	–	–	О	С	С	К
лимонная	С	С	–	К	К	К	С	С	О	К	С	К
муравьиная	С	С	–	С	К	К	С	С	К	К	С	К
серная	О	С	С	О	О	К	С	С	О	К	С	К
соляная	К	К	К	К	О	О	О	К	К	К	С	К
уксусная	С	С	С	С	К	К	С	С	О	К	О	К
фосфорная	К	С	С	К	К	С	С	С	О	К	С	К
фтористоводородная	К	С	С	К	О	О	С	–	К	О	С	К
азотная	О	К	К	К	К	О	К	К	С	К	К	К
Жирные кислоты	С	К	–	О	С	С	С	С	О	К	С	К
Моющие средства	С	С	–	С	С	–	–	–	С	С	С	О
Перекись водорода	С	К	К	С	О	–	–	–	С	К	С	–
Хлорид магния	К	С	С	К	С	С	–	С	К	О	С	К
Сульфат магния	С	С	С	С	С	–	–	С	С	О	С	–
Углекислый калий	К	С	С	С	С	–	–	–	С	О	–	К
Едкий калий	К	С	С	С	С	С	С	С	О	О	С	К
Хлористый натрий	С	С	С	С	С	С	С	С	К	С	С	К
Едкий натрий	К	С	С	С	С	С	С	С	О	О	С	К

П р и м е ч а н и е. В таблице введены такие условные обозначения: К – корродирующие материалы; О – ограниченно применяемые; С – стойкие. Прочерк обозначает отсутствие данных.

Если определить скорость коррозии сложно, рекомендуется пользоваться распределением металлов по группам, в пределах которых контакт может считаться допустимым. Чем дальше расположены друг от друга металлы в ряду напряжений металлов (табл. 10), тем сильнее коррозия при их контакте.

Таблица 10

Ряд напряжений металлов

Металл	Стандартный электродный потенциал, В	Металл	Стандартный электродный потенциал, В	Металл	Стандартный электродный потенциал, В
Магний	-2,370	Железо	-0,430	Свинец	-0,126
Бериллий	-1,850	Кадмий	-0,400	Медь	+0,337
Алюминий	-1,660	Кобальт	-0,270	Серебро	+0,800
Марганец	-1,180	Никель	-0,250	Платина	+1,190
Цинк	-0,760	Молибден	-0,200	Золото	+1,500
Хром	-0,740	Олово	-0,136		

Защитные покрытия. Эффективной мерой борьбы с коррозией металла являются защитные покрытия. В Украине предусмотрено увеличение производства металлов с различными покрытиями на 20 – 23 % ежегодно. Нанесение покрытий производится также на заводах–изготовителях оборудования и предприятиях–потребителях в процессе его эксплуатации и ремонта. Наиболее широкое распространение получили лакокрасочные, металлические и полимерные покрытия (табл. 11 – табл. 14).

Таблица 11

Области применения лакокрасочных материалов

Лакокрасочный материал	Цвет	Область применения
1	2	3
Алкидные лакокрасочные материалы		
Грунтовка:		
ГФ-017	Темно-коричневый	Грунтовка кабин автомобилей и других подобных изделий
ГФ-020	Красно-коричневый	Грунтовка поверхностей изделий из черных металлов (вагоны, автобусы, троллейбусы, трамваи, тракторы, сельскохозяйственные машины и др.)
ГФ-031	Желтый	Грунтовка поверхностей деталей из стали, алюминиевых и магниевых сплавов, работающих при температуре до 473 К
ГФ-032	Коричневый	Защита от коррозии предварительно фосфатированных (или оцинкованных) поверхностей стальных деталей или систем покрытий с перхлорвиниловыми эмалями

1	2	3
Грунт-шпатлевка ГФ-018	Желтый, серый	Исправление небольших дефектов (риски, царапины и другие повреждения) поверхности кузовов и других деталей легковых автомобилей, загрунтованных глифта-левыми, пенталевыми и др. грунтовками
Шпатлевка: ГФ-0075	Розовый, серый	Выравнивание дефектов на загрунтованных грунтовкой ГФ-020 и окрашиваемых нитроэмалями поверхностях
Шпатлевка: ПФ-002	Красно-коричневый	Выравнивание дефектов предварительно загрунтованных поверхностей металлических и деревянных деталей
Эмаль: ПФ-115	Различный	Окраска железнодорожных вагонов, троллейбусов, автобусов, трамваев, дорожных машин и других изделий, работающих в атмосферных условиях
Эмаль: ПФ-223	Различный	Окраска поверхностей предварительно загрунтованных деталей из различных сплавов, работающих внутри изделий
Эмаль: ГФ-571	Серый	Нанесение эмали по грунт-шпатлевке ГФ-018 для выравнивания поверхности лакокрасочного покрытия кузова легкового автомобиля
Эмаль: ГФ-820	Серебристо-алюминиевый	Окраска поверхностей деталей из различных металлов и сплавов, подвергающихся нагреву до 523 К
Алкидностроительные лакокрасочные материалы		
Грунтовка МС-067	Красно-коричневый	Грунтовка поверхностей деталей приборов и оборудования под окраску алкидными, алкидно-стирольными или нитроцеллюлозными эмалями
Шпатлевка: МС-006	Розовый	Исправление мелких дефектов на поверхности приборов, оборудования, кузовов автомобилей и других изделий
Эмаль: МС-17	Черный	Окраска поверхностей деталей шасси автомобиля
Эмаль: МС-17	Светло-серый	Окраска поверхностей автодвигателей
Сополимерно-винилхлоридные лакокрасочные материалы		
Эмаль: ХС-119	Различный	Окраска железнодорожных вагонов, мостов и других изделий и конструкций, эксплуатируемых в атмосферных условиях
Эмаль: ХС-759	Различный	Окраска железнодорожных цистерн и других металлических конструкций, предварительно загрунтованных грунтовкой ХС-059, для защиты от воздействия щелочей, кислот и агрессивных газов
Лак ХС-724	Бесцветный	Повышение защитных свойств предварительно загрунтованных и окрашенных железнодорожных цистерн и других изделий

Полиакриловые и алкидноакриловые лакокрасочные материалы		
Грунтовка АК-069, АК-070	Желтый	Грунтование поверхностей металлических деталей, а также применение в качестве компонента в системах быстросохнущих покрытий на основе нитроцеллюлозы, перхлорвиниловых, акриловых и других смол
Эмаль: АК-171	Белый	Окраска поверхностей домашних холодильников, стиральных машин и другой бытовой техники

Лакокрасочные материалы в зависимости от группы и марки обладают различными свойствами и имеют широкую область применения (табл. 11). Однако используются они в основном только для сред слабой агрессивности, а для сред сильной и средней агрессивности используются металлические, полимерные и ряд других покрытий.

Металлические покрытия наносятся обычно на углеродистую сталь. Металлы, используемые для покрытий, делятся на две группы: анодные (с более отрицательным по отношению к стали потенциалом; см. табл. 12) и катодные (с более положительным потенциалом). По стоимости металлы покрытий можно разбить на три группы: группа низкой стоимости (цинк, свинец), промежуточная группа (никель, олово, кадмий, алюминий) и группа дорогостоящих металлов (серебро, палладий, золото, родий). Наиболее твердыми (износостойкими) являются хромовые и никелевые покрытия, наименее твердыми – медные и цинковые.

Характерные области применения металлических покрытий и методы их нанесения приведены в табл. 12.

Полимерные покрытия в последнее время все более широко применяются благодаря ряду ценных свойств. Полимерные материалы обладают высокими механическими и гидроизоляционными свойствами, высокой химической термостойкостью, высокими адгезионными, герметизирующими, звукоизолирующими и другими положительными свойствами.

Различают полимерные покрытия на основе термопластичных (термопласты) и терморезистивных (реактопласты) полимеров. Для выбора полимерных материалов можно использовать данные об их химической стойкости в различных средах, приведенные в табл. 13 и табл. 14.

1.1.4. Металлы со специальными свойствами и их заменители

Высокопрочный чугун. До недавнего времени чугун, применяемый как конструкционный материал, имел предел прочности при растяжении не более 200 – 250 МПа, что ограничивало его использование. Впоследствии был получен чугун с шаровидной формой графита, предел прочности которого составляет 400 – 800 МПа, т.е. выше, чем у ковanej стали. Стоимость чугунных отливок из высокопрочного чугуна примерно в 3 раза ниже, чем стоимость стальных отливок.

Области применения металлических покрытий

Покрытие	Основной материал	Область применения	Метод нанесения
1	2	3	4
Цинковое	Сталь, сплавы алюминия	Детали, подвергающиеся воздействию атмосферы, бензина, воды и почвы	Горячее погружение, электроосаждение, металлизация, вакуумное осаждение
Алюминиевое	Сталь	Детали, подвергающиеся воздействию атмосферы (в том числе промышленной) и воды, работающие в контакте с почвой, подвергающиеся высокотемпературному окислению или воздействию горячих газов	Горячее погружение, металлизация или вакуумное – осаждение
	Алюминиевые сплавы	Детали, подвергающиеся воздействию агрессивной среды, погружаемые в воду или почву; защита алюминиевых сплавов от коррозии под напряжением	Металлизация или плакирование
Кадмиевое	Сталь, цветные металлы	Детали, подвергающиеся воздействию влаги, морской воды, хлористых солей, паров органических веществ; поверхности, требующие хорошей плавкости, зажимы с резьбой низкого скручивающего усилия и конструктивные элементы, контактирующие с алюминием	Электроосаждение или осаждение из паров
Хромовое	Сталь	Детали, подвергающиеся износу, воздействию атмосферы, сероводорода, высоких температур (до 1073 К)	Электроосаждение, диффузионное покрытие
	Алюминий, медь, цинк и их сплавы	Детали, подвергающиеся износу и высокотемпературному окислению	Диффузионное покрытие
Никелевое	Сталь, сплавы цинка, медь и ее сплавы, алюминий	Детали машин, подвергающиеся воздействию атмосферы, высокой температуры и находящиеся в контакте с пресной или морской водой (используемые обычно вместе с медными грунтовыми покрытиями и хромовыми верхними покрытиями), детали химических установок – для обеспечения твердости и износостойкости деталей	Электроосаждение, металлизация, плакирование, химическое осаждение
	Пластмасса	Предварительное покрытие	Химическое восстановление и электроосаждение

Химическая стойкость полимерных материалов в различных средах

Полимер	Вода и растворы солей	Основания		Кислоты		Окислители (исключая кислоты)	Бензин, масло, жидкое топливо	Углеводороды		Галогенуглеводороды	Кетоны	Эфиры		Спирты
		слабые	сильные	слабые	сильные			алифатические	ароматические			простые	сложные	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Термопласты														
Полиэтилен: высокого давления	В	В	В	В	С	С	Н	О	О	Н	Н	О	О	О
низкого давления	В	В	В	В	С	С	О, С	О	О	Н	Н	С	Н, В	Н
Полипропилен	В	В	В	В	С	В, С	О, Н	В, О	Н	Н	В	О	О	О
Полиизобутилен	В	В	В	В	С	О	Н	Н	Н	Н	В	Н	С	В
Полистирол	В	В	В	В	О, С	С	О, Н	О	Н	Н	Н	Н	Н	В
Полиметилметакрилат	В	В	О	В	О	Н	В	В	Н	Н	Н	Н	Н	Н
Поливинилхлорид: жесткий	В	В	В	В	В	С	В	В	Н	Н	Н	В	Н	О
пластикат	В	В	О	В	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	О	Н	В
Поливинилденхлорид	В	В	–	В	–	–	В	В	В	–	Н	–	В	В
Политетрафторэтилен	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В
Политрифторхлорэтилен	В	В	В	В	В	В	С	В, С	С	О	В	Н	Н	В
Поливинилиденфторид	В	В	В	В	В	В	–	В	В	В	С	С	С	–

Примечание. В таблице введены следующие обозначения: В – вполне стойкие; С – стойкие; О – относительно стойкие; Н – нестойкие.

Химическая стойкость полимерных материалов в различных средах

Полимер	Вода и растворы солей	Основания		Кислоты		Окислители (исключая кислоты)	Бензин, масло, жидкое топливо	Углеводороды		Галогенуглеводороды	Кетоны	Эфиры		Спирты
		слабые	сильные	слабые	сильные			алифатические	ароматические			простые	сложные	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Реактопласты														
Полимиады	В, С	С	О	Н	Н	Н	В	В	В	С	В	В	В	В
Поликарбонат	В	Н	Н	В	С, О	С	В	В	Н	Н	Н	Н	Н	В
Полиформальдегид	В	В	В, С	Н	Н	С	В	В	С	В, С	О	В	Н	–
Пентапласт	В	В	В, Н	В	В	Н	В	В	В	В, О	В	В	В	–
Фенолформальдегидные	В	С	Н	С	Н	О	В, С	В	С	С	В	С	С	–
Фиолит	В	С	Н	В	В	Н	В	В	В	В	–	–	–	–
Фурановые	В	В	В	В	В	С, Н	В	В	В	В	В	В	В	–
Кремнейорганические	В	Н	Н	В	Н	О	О	Н	Н	Н	В	Н	Н	–
Полиэфирные	В, С	Н	Н	О	О	О, Н	В	В	Н	С, О	Н	О	О	–
Полиуретановые	В	В	Н	О	Н	О, Н	В	В	В	О	Н	В	С	–
Эпоксидные	В	В	О, В	В	С, С	Н	В	В	В	О, С	О	В	О	–

Примечание. В таблице введены следующие обозначения: В – вполне стойкие; С – стойкие; О – относительно стойкие; Н – нестойкие.

В машиностроении высокопрочный чугун используют для производства коленчатых валов двигателей, шатунов, валков, рольгангов, ступиц, рычагов и других деталей. Замена 1 тонны стального литья (поковки) высокопрочным чугуном обеспечивает экономию около 700 грн, а масса деталей при этом уменьшается в среднем на 7 – 8 %. Так, в результате изготовления двух деталей автомобиля «Таврия» из высокопрочного чугуна взамен штамповки из стали 35X получен годовой экономический эффект свыше 1,7 млн. грн.

Низколегированные стали. Применение низколегированных сталей (09Г2, 10Г2С1, 14Г2 и др.) повышенной прочности взамен углеродистых сталей позволяет значительно уменьшить массу деталей (заготовок) при сохранении прочностных и технологических характеристик изделий. Особенно эффективно применение этих сталей для изготовления подъемно-транспортных машин, судов, работающих под давлением, строительных и сельскохозяйственных машин, сварных конструкций.

Ориентировочные расчеты показывают, что в результате замены углеродистых на низколегированные стали масса изделий снижается в среднем на 20 %. Например, в случае применения низколегированных сталей марок 10ХСНД, 15ХСНД взамен углеродистых сталей для изготовления кузовов и кабин машин на Белорусском и Минском автозаводах экономится 15 – 18 % металла. Термическое упрочнение листов из низколегированной стали также обеспечивает снижение металлоемкости оборудования и повышение срока их службы.

Серьезные требования, предъявляемые к деталям современных машин вызывают появление новых материалов и поэтому в настоящее время большинство встречающихся в природе элементов применяются в промышленности. Среди элементов, которые приобрели за последнее время важное значение, следует назвать титан, алюминий, германий и цирконий. В будущем, вероятно, важнейшими конструкционными материалами будут всевозможные синтетические вещества, обладающие разносторонними свойствами или композиты на их основе. В настоящее время основным материалом, применяемым для изготовления машин, является железо и его сплавы – так называемые черные металлы. С достаточным основанием можно сказать, что современный металлический фонд всех стран, накопленный за длительное время и содержащийся в конструкциях машин, оборудовании, транспортных средствах, предметах коммунального обслуживания и т.п., составляет – 25 млрд. тонн черных металлов.

Титан и его сплавы. Титан, особенно легированный, характеризуется высокими антикоррозионными, прочностными и пластическими свойствами при невысокой плотности ($4,5 \text{ г/см}^3$). Это обусловило широкое применение его, а также сплавов этого металла в машиностроении для замены традиционных видов материалов при изготовлении металлоемкого оборудования, крупногабаритных аппаратов. Особенно эффективно использование титана и его сплавов для изготовления машин и аппаратов, подвергающихся воздействию агрессивных сред. Важным фактором в решении проблемы снижения металлоемкости оборудования имеет применение титановых сплавов повышенных значений прочности и коррозионной стойкости взамен технического титана. Вместе с

тем, использование титана должно быть экономически обосновано, так как стоимость этого металла и его сплавов высока.

Примером эффективного применения титана может служить замена различных материалов титановыми сплавами в гидролизных аппаратах, подогревателях и выпарных аппаратах химико-металлургического производства, дымососах, работающих в агрессивных средах. Например, в химической промышленности годовой экономический эффект от использования 1 тонны титановых изделий составляет 155 – 510 тыс. грн. В цветной и черной металлургии использование тонны титанового оборудования взамен традиционного обеспечивает экономический эффект 100 – 150 тыс. грн. В пищевой промышленности в результате применения титанового оборудования вместо оборудования из традиционных металлов достигается экономический эффект в пределах 60 – 70 тыс. грн на 1 тонну титана.

Алюминиевые сплавы характеризуются следующими свойствами: низкой плотностью ($2,7 \text{ г/см}^3$), высокой коррозионной стойкостью во многих средах, высокой тепло- и электропроводностью, удовлетворительной свариваемостью (в среде аргона), высокими литейными и другими технологическими свойствами.

Алюминиевые сплавы делят на деформируемые (дуралюмины) и литые (силумины). Силумины обладают высокими литейными, но низкими механическими свойствами, а дуралюмины имеют более высокие механические свойства по сравнению с литейными сплавами. Алюминиевые сплавы широко применяются в авиа- и автомобилестроении. Они используются для изготовления поршней двигателей, коробок передач, дисков колес и многих других деталей. Замена стали алюминиевым сплавом, например, при изготовлении колесных дисков и ступиц колес автомобиля позволяет снизить вес диска с ободом на 55 %, ступицы – на 70 %, диска со ступицей в сборе – на 60 %.

Металлический алюминий был впервые получен в 1825 г. и лишь через 20 лет, в 1845 г., удалось получить сплошной белый металл. Алюминий экспонировался на выставках и в музеях как диковинка. Его добыча стоила дороже золота, а поэтому промышленное использование было невозможно. Решительный перелом в производстве алюминия произошел благодаря крупным достижениям в электротехнике и открытию в 1886 г. способа получения алюминия путем электролиза.

Важнейшим фактором, определяющим экономику получения алюминия, является расход электроэнергии. Еще до недавнего времени на получение 1 тонны алюминия затрачивалось около 25 тыс. кВт/час электроэнергии. Отсюда становится ясным, что важнейшим условием развития алюминиевой промышленности является обеспечение заводов по производству алюминия дешевой электроэнергией. Алюминий обычно используется не в чистом виде, а в виде сплава. Применение алюминиевых сплавов определяется следующими важнейшими их свойствами:

1. Удельный вес алюминиевых сплавов колеблется (в зависимости от марки сплава) в пределах от $C=2,65$ до $C=2,95$; чаще всего в пределах

$C=2,7 - 2,8$. Следовательно, эти сплавы приблизительно в 2,7 – 2,5 раза легче чугуна и в 3 – 2,7 раза легче стали.

2. Удельная теплоемкость и теплопроводность алюминия соответственно в 2 и в 4 – 5 раз выше, чем у чугуна.

3. Удельное сопротивление электрическому току для алюминия (2,82 мкОм при 20 °С) несколько больше чем для меди (1,72 мкОм) и во много раз меньше чем для стали (около 15 мкОм).

4. Алюминиевые сплавы легко обрабатываются резанием и давлением, обладают высокими литейными свойствами и благодаря этому изделия из них могут получаться отливкой в кокиль и под давлением.

5. Предел прочности алюминиевого сплава при растяжении, например, дуралюмина марки Д16–Т равен $\sigma_g=4200$ кг/см², а его модуль продольной упругости $E=7,5 \cdot 10^5$ кг/см², тогда как среднеуглеродистая сталь 45 имеет $\sigma_g=6\ 000$ кг/см², т.е. в $(6\ 000/4\ 200)=1,43$ раза и $E=2,1 \cdot 10^6$ кг/см², т.е. в $(2,1 \cdot 10^6/7,5 \cdot 10^5)=2,8$ раза выше, чем у дуралюмина Д16–Т.

6. Склонность к окислению алюминиевых сплавов ниже, чем у черных металлов, поэтому внешний вид алюминиевых деталей дольше сохраняет свой естественный металлический блеск.

Очень часто более высокая цена алюминия как материала перекрывается сокращением затрат на механическую обработку благодаря тому, что алюминиевая деталь даже сложной формы, полученная литьем под давлением, почти не требует обработки резанием. Так как все это не может быть учтено в общем виде, то наиболее правильным является сравнение себестоимости конкретных деталей. Только в этом случае можно полностью учесть все отличительные особенности таких конструкционных материалов, как, например, алюминий и чугун или сталь. Поэтому рассмотрим применение алюминия в автомобильной промышленности, которое характеризуется его непрерывным увеличением. В настоящее время в индустриально развитых странах на производство автомобилей расходуется 30 – 40 % общего потребления алюминия.

Алюминий используется для изготовления головок блоков цилиндров, поршней, картеров коробок передач, а также отдельных частей двигателя, масляных поддонов, картеров водяных и масляных насосов, всевозможных крышек, корпусов термостатов, дисков колес и тормозных барабанов. Детали из алюминия в узлах автомобиля распределяются следующим образом (в %):

Колеса (и барабаны).....	30 – 40
Блоки двигателей	20 – 25
Буфера	10 – 15
Головки цилиндров	10 – 12
Радиаторы	5 – 6
Впускные патрубки	5
Глушители	4 – 5

Что дает применение алюминиевых сплавов в автомобиле? Расчеты показывают, что при замене деталей из черных металлов деталями из алюминиевых сплавов вес грузового автомобиля снижается на 20 – 25 %, легкового автомо-

биля – на 25 – 30 %, а автобуса – на 30 – 35 %. Применение 1 кг алюминия в конструкции двигателя снижает его вес на 1 кг. При этом на каждые 100 кг уменьшения веса автомобиля расход горючего снижается на 0,8 – 1,2 л на 100 км пробега.

При уменьшении веса автомобиля на 20 % расход резины сокращается на 50 – 60 %. Наибольший экономический эффект достигается при замене литых корпусных чугунных деталей алюминиевыми, отлитыми в кокиль или под давлением (примерно 84 % алюминия в легковых автомобилях – отливки). При этом сокращение веса и себестоимости достигается одновременно за счет нескольких составляющих: меньшего удельного веса, меньшей толщины стенок и ребер, меньших припусков на обработку и меньшей трудоемкости механической обработки. Для сопоставления необходимо сравнить затраты на изготовление блока цилиндров из алюминия и серого чугуна.

Показатели	Серый чугун	Алюминий
Вес необработанной отливки, кг	85,0	34,0
Вес обработанной отливки, кг	75,0	30,0
Соотношение цен на заготовки, %	100	160
Время обработки, мин	750	170
Соотношение себестоимости обработанной отливки, %	100	99

Из приведенных данных видно, что, несмотря на значительно большую, по сравнению с чугуном, цену на алюминий, себестоимость алюминиевого блока оказывается ниже, чем чугунного. Следовательно, эксплуатационные преимущества от такого снижения себестоимости алюминиевого блока достигаются без увеличения затрат на его изготовление.

В табл. 15 приведены примеры использования алюминиевых сплавов.

Магниеые сплавы. Среди металлов, применяемых в промышленности, магний обладает наименьшей плотностью (1,8 г/см³). Магниеые сплавы могут воспринимать более высокие ударные нагрузки, чем алюминиевые сплавы. Однако прочность магниевых сплавов ниже, чем прочность алюминиевых сплавов. Тем не менее, вследствие меньшей плотности конструкции из магниевого сплава могут оказаться в ряде случаев прочнее конструкций алюминиевого сплава того же веса. Коррозионную стойкость магниевых сплавов можно считать удовлетворительной, однако она ниже коррозионной стойкости алюминиевых сплавов.

Магниеые сплавы применяются в приборостроении, авиационной, автомобильной, текстильной, металлургической и других отраслях промышленности. Они используются для производства деталей кино- и фотоаппаратов, оптических приборов, аппаратов связи и др.

Способность воспринимать ударные нагрузки позволяет использовать магниевые сплавы для деталей, подверженных сильным ударам, например для колес автомобилей, деталей конвейеров.

Заменители металла. К эффективным заменителям металла в изделиях машиностроения относятся железобетон и пластмассы.

Применение алюминиевых сплавов

Основание для применения алюминия, алюминиевых сплавов	Детали, узлы и машины, изготавливаемые из алюминия и алюминиевых сплавов
1	2
1. Облегчение труда, достигаемое благодаря уменьшению веса узла, машины	Ручные механизированные инструменты (дрели, зубила, гайковерты, рубанки, пилы и т.п.); бытовые приборы
2. Уменьшение тяговых усилий, мощности, расхода горючего на подъем и перемещение масс; повышение наибольших достижимых скоростей, высот, дальности полета	Детали и узлы быстроперемещаемых транспортных устройств: спутников, ракет, самолетов, железнодорожных вагонов и локомотивов, судов, и т.п.
3. Уменьшение масс или моментов инерции для уменьшения динамических нагрузок в приводах, а также потерь энергии и времени на процессы пуска и торможения	Быстроходные шкивы в приводах с частыми пусками (например, в алмазно-расточных станках), детали, движущиеся возвратно-поступательно (например, шатуны зубодолбежных станков, головки хонинговальных станков и т.п.)
4. Уменьшение степени неуравновешенности	Быстровращающиеся шкивы и роторы, крылатки вентиляторов и т.д.
5. Уменьшение габаритов и расхода материала на противовесы и другие уравновешивающие устройства	Корпуса многошпиндельных головок вертикально-сверлильных, расточных и других станков
6. Уменьшение деформаций, главным образом изгиба, под действием собственного веса	Концевые, свешивающиеся с направляющих части столов шлифовальных станков; крановые стрелы и мосты
7. Снижение тепловой напряженности благодаря улучшению теплоотвода	Тормозные барабаны автомобилей, поршни и цилиндры двигателей, различные емкости
8. Снижение коррозионной стойкости благодаря улучшению внешнего вида	Кровля, кухонная посуда, декоративные элементы
9. Повышение грузоподъемности подъемнотранспортных устройств без увеличения их собственного веса, необходимое при реконструкции действующих предприятий	Стрелы, мосты и другие детали крановых конструкций (при замене обычных мостовых кранов аналогичными из алюминиевых сплавов можно повысить их грузоподъемность на 20 – 25 % без изменения опорных конструкций; крановые стрелы из алюминиевых сплавов позволяют увеличить грузоподъемность на 20 – 25 % или при сохранении грузоподъемности увеличить длину стрел на 15 – 20 %)
10. Облегчение и удешевление производства	Детали сложной формы, отливаемые в кокиль или под давлением (гидропанели, картеры и корпуса коробок передачи и двигателей, головок цилиндров двигателей и т.п.), получаемые штамповкой, глубокой вытяжкой, прессованием

Железобетон. Железобетонные конструкции характеризуются высокой прочностью, жесткостью, точностью и трещиностойкостью, длительным сопротивлением, многократно повторяющимся ударным и вибрационным нагрузкам. Это позволяет в отдельных случаях эффективно применять их вместо металлических конструкций в различных отраслях машиностроения.

Замена металла железобетоном в станинах, опорных плитах и других базовых элементах различного оборудования позволяет значительно уменьшить расход металла (масса металла, применяемого для армированной железобетонной плиты, в 2 раза меньше массы стружки, получаемой при механической обработке такой же чугуновой плиты), снизить стоимость изделий, сократить сроки их изготовления, уменьшить вибрацию оборудования и уровень шума при его работе.

Железобетонные конструкции по жесткости, точности, надежности и долговечности не уступают металлическим конструкциям, а в ряде случаев даже превосходят их. Уменьшение в 20 – 30 раз по сравнению с чугуном усадки бетона позволяет использовать в железобетонных изделиях заранее обработанные закладные детали без их последующей механической обработки. Закладные детали служат для крепления различных конструкций к железобетонным изделиям и изготавливаются из арматурной стали периодического профиля диаметром, в 2 – 2,5 раза превышающим диаметр крепежного болта. Глубина их заделки в бетон составляет не менее пяти собственных диаметров. Изготовление железобетонных конструкций в металлических матрицах обеспечивает необходимую шероховатость поверхности и точность привалочных плоскостей.

Как в зарубежной, так и в отечественной промышленности накоплен значительный опыт применения железобетонных плит в качестве фундамента под тяжелые насосы, станки и другие виды оборудования. Это позволяет данное оборудование эффективно эксплуатировать на многих предприятиях различных отраслей промышленности.

Применение железобетона для станин гидравлических и механических прессов снижает расход металла на 40 – 60 %, а стоимость – на 35 – 40 % по сравнению с расходом его на металлические конструкции аналогичного назначения. Для станин с встроенными гидроцилиндрами снижение расхода металла и стоимости станины при замене металла железобетоном достигает соответственно 85 и 60 %.

В отдельных случаях железобетон может использоваться и для различных рабочих деталей и сборочных единиц. Примером замены металла железобетоном в рабочих органах машин может служить применение железобетонных гидроцилиндров и плунжеров в мощных прессах усилием до 5 тыс. тонн. При этом рабочие органы изготавливаются в виде трубобетонных элементов в замкнутой металлической обечайке. Это уменьшает расход металла на 50 – 60 % и исключает применение сплошных уникальных поковок.

Пластмассы. Использование синтетических материалов в машиностроении – один из основных путей экономии металла и снижения материалоемкости машин. Применение пластмасс вместо проката черных металлов обеспечивает в машиностроении более половины всей получаемой экономии металла. Опыт

свидетельствует о том, что использование 1 тонны пластмасс позволяет высвободить до 6,5 тонн черных металлов или 3 – 3,5 тонн алюминия. В гальваническом производстве каждая тонна пластмасс, использованная для футеровки ванн, заменяет 5,5 тонн свинца и обеспечивает экономию от снижения себестоимости продукции 27 тыс. грн.

Наибольшее количество пластмасс используется для изготовления деталей конструкционного назначения, корпусных деталей, зубчатых колес, шкивов, маховиков и трубопроводов. В последние годы наметилась тенденция к расширению применения пластмасс в конструкциях новых и модернизированных машин. Так, в машиностроение используется 16 % всего вырабатываемого полиэтилена, 18 % – полипропилена, 60 % – полистирола, 20 % – поливинилхлорида, 75 % – фенольных пресс-порошков (вопросы применения полимеров рассмотрены ниже).

Более $\frac{3}{4}$ общего объема пластмасс изготавливается без применения механической обработки (методом прессования – около 46 % и методом литья – около 30 %). Поэтому трудоемкость изготовления деталей из пластмасс в 1,4 – 1,7 раза ниже, чем трудоемкость изготовления их из металла, что также обеспечивает высокую эффективность применения пластмасс в машиностроении.

Наиболее важным экономическим показателем оценки применения пластмасс является влияние их на себестоимости машин и оборудования. Себестоимость изготовления деталей из пластмасс в 1,3 – 2,5 раза ниже, чем себестоимость изготовления деталей из традиционных материалов.

1.1.5. Материалы для изготовления деталей узлов трения

1.1.5.1. Износостойкие материалы с малым взаимным внедрением на микроучастках поверхностей трения

Для уменьшения взаимного внедрения материала на участках контакта необходимо, чтобы одна из трущихся поверхностей обладала высокой твердостью и однородностью механических свойств. Например, высокая твердость электрического хрома и его однородность позволяют повысить износостойкость многих деталей в 5 – 15 раз. Характерно, что хром не только отличается высокой износостойкостью, но в большинстве случаев значительно уменьшает износ сопряженной детали. В качестве износостойких покрытий для рабочих поверхностей калибров и других приборов и инструментов применяют алмазную крошку, соединенную с подложкой сплава какого-либо твердого металла металлом, нанесенным гальваническим способом. Кроме алмазной крошки могут быть использованы отработанные алмазы, алмазная пыль, корунд или карбиды кремния, бора и вольфрама.

В связи с большой перспективой применения титана вследствие его малой плотности и высокой прочности при повышенных температурах возникла необходимость улучшения его антифрикционных свойств, которые весьма низки. Последние работы показали возможность значительного повышения износостойкости титана обработкой в струе азота при температуре 850 °С в течение

16 – 30 часов. После азотирования титан показал удовлетворительные результаты: без применения смазки в паре с чугуном, твердым хромовым покрытием и азотированным титаном, а при испытании со смазкой – в паре с бронзой, углеродистой сталью, легированной сталью и бакелитом.

1.1.5.2. Износостойкие самосмазывающиеся материалы

В последние годы разработано большое количество новых самосмазывающихся материалов, которые можно рекомендовать для применения в машиностроении. Такие материалы удобны в эксплуатации, поскольку не требуют смазки. К их числу следует отнести материалы: АМАН-2, АМАН-22, АМАН-4 и АМАН-24. Детали из материала АМАНа могут работать без смазки при нормальной и повышенной (до 250 °С) температурах. Заготовки деталей из АМАНа изготавливают на Любучанском заводе пластмасс. АМАН обладает высокой вибропрочностью, может быть использован для втулок подшипников скольжения, сепараторов шарикоподшипников, смазывающихся вкладышей и зубчатых колес.

На рис. 2 приведены графики зависимости коэффициента трения f от времени испытания и линейного износа I_h во времени для вкладышей из АМАНа (кривые 1 и 3) и Малениума (кривые 2 и 4), выпускаемых фирмой «Моликотт» (США). В ходе проведения экспериментов вал диаметром 40 мм вращался со скоростью 0,4 м/с, устанавливалось давление в зоне трения, равное 500 Н/см². Как следует из рис. 2, линейный износ материала АМАН оказался выше при практически одинаковом коэффициенте трения.

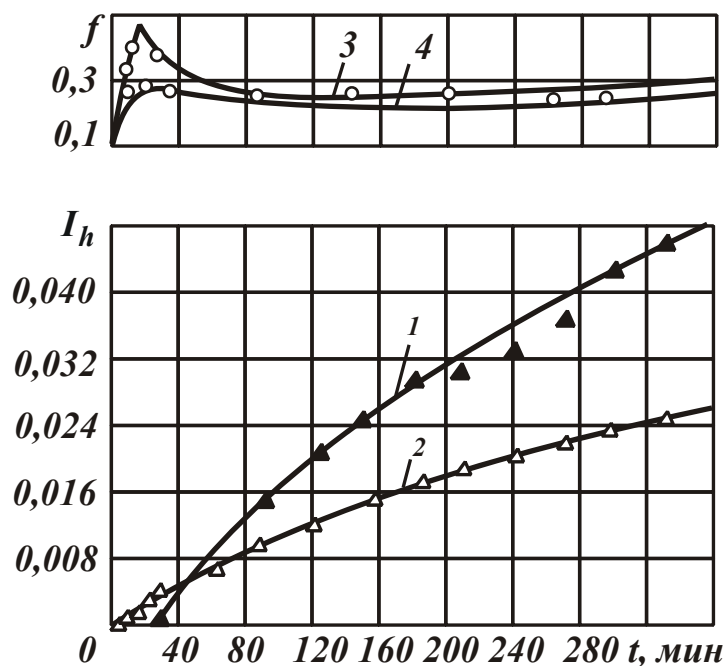


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения f и линейного износа I_h от времени испытания вкладышей

Фрикционную теплостойкость материалов АМАН и АФЗ определяют результаты исследований, показанные на рис. 3.

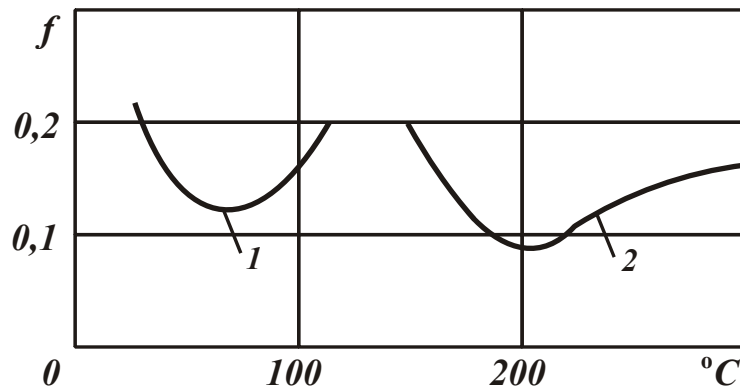


Рис. 3. Влияние температуры на коэффициент трения f

Условные обозначения: 1 – АМАН; 2 – АФЗ.

В Англии фирма «Глассир» выпускает подшипниковый материал, который имеет в своей основе пористую бронзу, заполненную фторопластом–4 с примесью олова или свинца с дисульфидом молибдена. Вследствие низкого коэффициента трения (около 0,002) этот материал может работать без смазки. Материал стоек при воздействии на него кислот, газов, а также пыли, работоспособен в интервале температур от -200 до $+280$ °С.

Из асбофрикционных материалов, применяемых для тормозов и сцеплений, наибольший интерес представляют три материала: эскол, 6КВ10 и ретинакс (ГОСТ 10851–89).

Высокими значениями коэффициента трения f и фрикционной теплоустойчивости характеризуется металлокерамика ФМК–11, представляющая собой железный пористый металлический каркас, пропитанный фенолформальдегидной смолой.

В узлах трения все больше применяются армированные пластмассы. В ближайшем будущем появятся новые комбинации: металл – пластмасса, металл – стекло, пластмасса – стекло, керамика – стекло.

Получили применение отечественные материалы на основе графита АГ–1500, АГ–600, АО–1500 и АО–600.

Из тугоплавких металлов значительный интерес представляют молибден и его сплавы, вольфрам, хром, колумбий и тантал. Молибден обладает высокими механическими свойствами (при высокой температуре) и низким коэффициентом теплового расширения. Коэффициент трения молибдена по молибдену при температуре 480 °С равен примерно единице. С увеличением температуры он уменьшается, принимая значение 0,3 при температуре 649 °С. При температуре свыше 760 °С коэффициент трения быстро увеличивается. Такое изменение объясняется тем, что окисная пленка MoO_5 образуется при температуре свыше 482 °С, а при температуре более 760 °С пленка MoO_5 разрушается и ее смазывающее действие прекращается. Антифрикционные свойства несмазанного вольфрама во многом совпадают с молибденом, однако он сильно подвержен окислению. Механические свойства хрома более низкие, чем у других тугоплавких материалов, он менее подвержен окислению, коэффициент трения его ниже, чем у вольфрама и молибдена. Из специальных сплавов используют сплавы на железной основе, которые применяют до температуры 540 °С.

Существуют твердые сплавы из карбидов металлов и из окиси алюминия, которые можно применять как для пар скольжения, так и для пар качения. Положительные результаты для работы в подшипниках при температурах до 870 °С показал сплав на основе карбида титана с содержанием 17 % Ni и 3,2 % Mo. Сплавы из окиси алюминия Al_2O_3Cr и Mo могут работать до температуры 1 200 °С с высоким сопротивлением окислению. При температурах примерно 1 100 °С удовлетворительно работают пары из керамических материалов MgO – SiO; MgO – Al_2O_3 ; Al_2O_3 – TiC; SiC – TiO.

1.1.5.3. Материалы для пар трения, работающих в условиях высокого вакуума

В условиях вакуума защитные пленки не образуются или их образование весьма затруднено, поэтому узлы трения необходимо смазывать или применять самосмазывающиеся материалы. Применяются и находятся в стадии исследования пары: металл – твердый сплав на основе окислов или карбидов, металл – пластик, металл – самосмазывающиеся композиции, металл по металлическому покрытию и металл – алмаз. Тефлон и найлон (полиэстр) удовлетворительно работают по закаленной стали, металлокерамике, а также в паре с золотом и серебром. Самосмазывающиеся композиции состояются на основе меди и серебра, другими компонентами являются тефлон и смазывающиеся вещества типа дисульфида молибдена. В условиях повышенных температур в качестве твердой смазки используют порошки легкоплавких металлов: свинца, олова, цинка, кадмия, сплава Вуда. Из указанных порошков свинец в паре с нержавеющей сталью показал наименьший коэффициент трения. Использование титана как конструкционного материала при низких его антифрикционных свойствах возможно при нанесении на его рабочие поверхности диффузионным способом металлических покрытий из хрома, кобальта, железа, золота, платины, серебра и олова.

1.1.5.4. Полимерные материалы для узлов трения

Полимеры обладают более низким коэффициентом трения, меньшим износом, не чувствительны к ударам и колебаниям, более дешевы и технологичны. Способность полимеров работать при смазке водой является важным их преимуществом перед металлами. Однако необходимо учитывать определенную специфику каждой отдельной конструкции. Известно, что пластмассы имеют «склонность» к набуханию в воде, невысокую теплостойкость, обладают ползучестью при нормальной температуре и низким модулем упругости. Все это показывает, что прямая замена металла полимерами не всегда целесообразна. Поэтому деталь из пластмассы не должна повторять металлическую, а должна конструироваться с учетом специфики полимерного материала. Сам же полимерный материал должен изготавливаться с учетом конструкции детали и условий ее работы путем подбора рецептуры и создания необходимой макроструктуры. Наиболее перспективны для узлов трения (табл. 16) комбинации полимеров с другими материалами, например, в полиамидные порошки вводят антифрикционные наполнители (графит, дисульфид молибдена, тальк и др.).

Выбор материалов и способов повышения эксплуатационных свойств для деталей машин

Наименование деталей	Характер работы	Материалы, применяемые для изготовления деталей	Основные виды повреждений в эксплуатации	Способы повышения эксплуатационных свойств
1	2	3	4	5
Болты и шпильки резьбовых соединений, собираемых с предварительной затяжкой и нагружаемых силами, вызывающими переменные напряжения	Статические напряжения от предварительной затяжки и переменные напряжения от изменяющихся во время работы нагрузок	Стали углеродистые качественные марок от 10 до 45, стали конструкционные хромистые марок 35Х, 40Х, 45Х	Усталостные изломы, деформация	Повышение прочности стали, уменьшение концентрации напряжений, уменьшение жесткости болта, повышение класса чистоты поверхности резьбы болта, накатка резьбы болта роликами
Колеса зубчатых передач	Изгиб зубьев, деформации контактного сжатия и сдвига рабочих поверхностей зубьев, трение и удары торцов зубьев зубчатых колес коробок передач при включении скорости	Стали конструкционные (для зубчатых передач, передающих большие мощности и работающих при высоких скоростях): углеродистые марок от 35 до 50; легированные стали марок 35Х, 40Х, 45Х, 40ХН, 45ХН, 18ХГТ, 30ХГТ, 12ХНЗА, 12Х2Н4А, 40ХНМА, 38ХМЮА. Чугуны серые марок СЧ 15 до СЧ 35 и ковкие (для зубчатых передач малонагруженных, тихоходных, большей частью открытых). Пластмассы (текстолит, нейлон или капрон) или древесно-слоистые пластики	Излом зуба (усталостный или из-за кратковременной перегрузки), осповидное выкрашивание, изнашивание или пластическая деформация рабочих поверхностей зубьев, торцовый износ зубьев зубчатых колес коробок передач, заедание зубьев	Корригирование, улучшение, сплошная или поверхностная закалка зубьев, цементация, азотирование, нитроцементация рабочих поверхностей зубьев (стальных зубчатых колес)

1	2	3	4	5
Червяк и червячное колесо червячной передачи	Скольжение витков червяка по рабочим поверхностям зубьев червячного колеса, изгиб зубьев червячного колеса	Червяки – конструкционные углеродистые или легированные стали. Червячные колеса – бронзы марок Бр.01-10-1, Бр.ОНФ, Бр.АЖ9-4; серые чугуны марок от СЧ 15 до СЧ 21	Заедание, изнашивание рабочих поверхностей, пластическая деформация и излом зубьев червячного колеса	Корригирование зубьев червячного колеса. Повышение класса чистоты, закалка или цементация рабочих поверхностей витков червяка
Звездочки цепных передач	Удары и трение рабочих поверхностей звездочек об элементы цепи	Серый чугун марки СЧ конструкционные углеродистые или легированные стали	Изнашивание рабочих поверхностей зубьев	Проектирование звездочек с вогнутым профилем зубьев, повышение класса чистоты, закалка или цементация рабочих поверхностей зубьев
Валы и оси	Деформация изгиба и кручения, трение скольжения между цапфой и опорой	Углеродистые стали обыкновенного качества марок Ст3, Ст4, Ст5 и качественные марок от 25 до 45; легированные стали, модифицированные чугуны	Усталостные изломы, изнашивание и задиры цапф, заедание	Уменьшение влияния концентраторов напряжений (увеличение радиусов галтелей, исполнение шпоночных канавок с плавным выходом и т.п.), шлифование цапф (тяжелонагруженных валов по всей длине), поверхностный наклеп галтелей, поверхностная закалка, азотирование
Опоры скольжения (подшипники и подпятники)	Трение скольжения между опорой и цапфой	Антифрикционные сплавы на основе олова, свинца, меди, алюминия, цинка; антифрикционные чугуны; металлокерамические антифрикционные материалы; твердые породы дерева (бук, дуб, ольха, самшит); пластмассы; резина	Изнашивание, заедание, усталостные разрушения поверхности трения	Обеспечение условий жидкостного трения, увеличение жесткости опоры, высокая точность изготовления и высокий класс чистоты обработки рабочей поверхности цапфы, нанесение на поверхности опор специальных покрытий для улучшения приработки

1	2	3	4	5
Подшипники качения	Качение шариков (или роликов) по наружному и внутреннему кольцам	Для изготовления тел качения и подшипниковых колец используются стали марок ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ, LLIX10, 65Г, 55СМА, 50ХН, XI8, 20Х2Н4А, 15НМ, 18ХГТ, 15Х, 10; для изготовления сепараторов используются малоуглеродистые и рафитизирующие стали, нержавеющей стали 0Х18Н9 и 1Х18Н9Т, магниевый чугун, бронзы, латуни, алюминиевые сплавы	Излом кольца, разрушение тел качения, изнашивание тел качения и рабочих поверхностей колец, усталостное выкрашивание (осповидный износ) рабочих поверхностей элементов подшипника, заедание деталей подшипника	Обеспечение податливости корпуса в нагруженной части подшипника
Гильза цилиндра поршневого двигателя внутреннего сгорания	Механические нагрузки от переменного давления газов, тепловое и коррозионное воздействие газов, трение о поршневые кольца и поршень, коррозионное действие охлаждающей жидкости	Высококачественные серые чугуны с перлитной основой, модифицированные чугуны, специальные чугуны, легированные марганцем, титаном, ванадием, хромом, никелем и молибденом, азотируемые хромомолибденоалюминиевые стали 35ХМЮА и 38ХМЮА	Изнашивание внутренней поверхности (зеркала), появление рисок, задиров, овальность в результате изнашивания при неравномерном давлении поршня, трещины, коррозия наружной поверхности гильз и кавитационное разрушение	Поверхностная (или объемная) закалка и отпуск; покрытие внутренней поверхности тонким слоем пористого хрома или азотирование; фосфатирование внутренней поверхности для улучшения прирабатываемости
-	-	-	-	Освинцовывание, оцинковывание или покрытие бакелитовым лаком наружной поверхности, омываемой водой (для предохранения от коррозии)

1	2	3	4	5
Диски борон и луцильников	Механические нагрузки от перемен- ного давления газов и инерционных сил воз- вратно-поступательного движения поршня, теп- ловое воздействие газов на днище, трение боко- вой поверхности о зер- кало гильзы	Серые чугуны марок СЧ 24, СЧ 28, СЧ, высокопрочный чу- гун ВЧ 45-06, литейные алю- миниевые сплавы АЛ1, АЛ2, АЛ 10В, АЛ30, АЛ 26, дефор- мируемые сплавы АК2, АК4, АК4-1, специальные чугуны и алюминиевые сплавы	Изнашивание ци- линдрической по- верхности изнаши- вание и пластиче- ская деформация кольцевых канавок, изнашивание отвер- стий в бобышках, прогар головки	Покрытие боковой поверхности легкоплавкими металлами (свин- цом или оловом), фосфатирование, травление кислотой, сульфидиро- вание, закалка с последующим старением поршней из алюми- ниевого сплава
Лапы культива- торов	Абразивное воздей- ствие и давление почвы	Сталь марок 65Г, 70Г или МСт6	Затупление режу- щей кромки лезвия из-за изнашивания	Закалка и отпуск лезвия, наплав- ка на лезвие твердого сплава
Лопасты рабо- чего колеса гид- ротурбины	Кавитационное и кор- розионное действие среды, изгиб, действие пульсирующего потока, вызывающего вибра- цию	Стали марок 25Х14НЛ, 20Х1 ЗИЛ; низколегированная сталь марки 20ГСЛ, облицованная ме- тодом приварки электро- заклепками листами из нержа- вующей стали марки Х18Н9Т	Кавитационное разрушение поверх- ности детали	Закалка поверхности при нагреве ТВЧ, борирование
Пальцы звеньев гусениц гусенич- ного трактора	Сухое трение при вы- соких давлениях и удар- ных нагрузках при нали- чии абразива и влаги	Стали марок 50, 50Г, 50Г2 или 27СГ	Изнашивание в ме- стах трения о проу- шины (или втулки звеньев гусениц)	Закалка поверхности при нагреве ТВЧ, борирование
Втулки звеньев гусениц гусенич- ного трактора	Сухое трение при вы- соких давлениях и удар- ных нагрузках при нали- чии абразива и влаги	Цементуемые стали марок 20Г или 20Х	Изнашивание в местах трения о палец	Цементация с последующей за- калкой и отпуском
Лемехи плугов	Давление пласта поч- вы, воздействие абра- зивной среды	Специальные лемешные ста- ли Л53, Л65 и М56	Затупление режу- щей кромки, носка, образование фаски с тыльной стороны лезвия из-за изна- шивания	Закалка с последующим отпус- ком лезвия, наплавка на лезвие твердого сплава (сормайта)

1	2	3	4	5
Отвалы плугов	Давление пласта почвы, воздействие абразивной среды	Сталь марки МСт2, трехслойная сталь, имеющая верхние слои из твердой стали марки 60, а внутренний слой из мягкой незакаливающейся стали МСт2	Поломка крыла и его изнашивание в месте схода пласта почвы	Цементация и последующая закалка с самоотпуском
Зубчатые колеса коробки передач трактора	Удары торцов зубьев при включении передачи, изгиб зубьев, контактное сжатие и сдвиг объемов металла, прилежащих к эвольвентным поверхностям	Цементуемые стали марок 18ХГТ и 30ХГТ; легированные стали марок 20ХНР, 20ХГНР и 20ХНЗА	Торцовый износ зубьев, поломки зубьев, изнашивание эвольвентных поверхностей зубьев	Изготовление шестерен с наиболее рациональной (бочкообразной) формой торцов зубьев; цементация или нитроцементация рабочих поверхностей зубьев с последующими: закалкой и отпуском
Коленчатый вал	Периодические нагрузки от сил давления газов и инерции движущихся масс, вызывающие переменные напряжения в элементах вала; трение шеек о заливку вкладышей подшипников	Отливки из высокопрочного или перлитного ковкого чугуна, стали марок Ст3. 35, 40, 45, 50. 35 Г, 45Г2, 50Г, 40Х, 40ХГМ, 40ГМ, 40ХНМ. Сталь марок 40ХН, 30ХМА, 18ХНВА, 18ХНМА, 20ХНЗА, 40ХЗМЮ, 25ХН4ВЛ, 38ХМЮА	Уменьшение диаметра, овальность и конусность шеек из-за изнашивания, прогиб или усталостный излом в результате несоосности или большого износа коренных подшипников	Поверхностная закалка, азотирование, полирование коренных и шатунных шеек для повышения износостойкости, накатка роликами или обдувка дробью галтелей (для увеличения выносливости)
Клапаны двигателя внутреннего сгорания	Динамические нагрузки от переменного давления газов и сил упругости пружины; омывание головок выпускных клапанов горячими газами, движущимися с большими скоростями	Для выпускных клапанов стали марок Х9С2, ХЮСМ, 40СХ10МА, 4Х9С2, 4Х10С2М, 40ХН, 50ХН, Х8С и др., для впускных клапанов стали марок 40, 45, 40Х, 45Х, 40ХН, 50ХН, 40ХНМА 4Х9С2 и др.	Изнашивание и пригорание фаски тарелки клапана, изнашивание стержня, деформации	Заполнение внутренней полости головки пустотелого выпускного клапана на 50–60 % металлическим натрием (для охлаждения клапана); наплавка фаски и головки выпускного клапана со стороны цилиндра твердым сплавом ВЗК или сормай- том (для повышения износостойкости и коррозионной стойкости); объемная закалка и отпуск

1	2	3	4	5
Поршневое кольцо двигателя внутреннего сгорания	Нагрев от соприкосновения с горячими газами; трение о внутреннюю поверхность гильзы при возвратно-поступательном движении	Серые чугуны марок СЧ 18, СЧ 21, СЧ 22, СЧ 28, специальные чугуны, легированные магнием, никелем, молибденом, вольфрамом, хромом, фосфором, титаном, медью и ванадием, хромированная сталь Х12М	Изнашивание по наружной цилиндрической и торцовой поверхностям, снижение упругости, пригорание	Пористое хромирование одного или двух верхних компрессионных колец; электролитическое лужение или фосфатирование нехромированных колец (для улучшения прирабатываемости и повышения коррозионной стойкости)
Лопатки газовых турбин	Растяжение, изгиб и кручение профильной части и хвостовика под действием центробежных сил и давления газового потока, переменное напряжение от вибрационных нагрузок, термические напряжения, коррозионное и эрозионное действие газовой среды	Сплавы на никелевой основе ХН77ТЮР и ХН70В	Разрушение по профильной части пера или елочному профилю хвостовика, вызванное действием статических и переменных напряжений от термической усталости	Полирование профиля пера лопатки (корыта, спинки, кромок и радиусов); обкатка роликом, наклепывание легкими ударами поверхностного слоя хвостовика; алитирование или эмалирование поверхностных слоев для защиты от коррозии
Зубья ковшей экскаваторов	Трение об абразивные частицы грунта, динамические нагрузки при ударах о грунт	Износостойкая сталь П13Л	Затупление режущей кромки в результате изнашивания	Закалка
Передняя стенка (козырек) ковша экскаватора	Трение об абразивные частицы грунта; динамические нагрузки при ударах о камни, глыбы мерзлого грунта и т. д.	Износостойкая сталь ПЗЛ или 30ГЛ	Затупление режущей кромки между зубьями и по краям в результате изнашивания	—

Армирование термопластов увеличивает их прочность, повышает в 3 – 4 раза величину модуля упругости, улучшает стабильность размеров и повышает теплостойкость. Распространение получили армированный нейлон, полиэтилен и др. В некоторых условиях армированный нейлон может обеспечить большую износостойкость, чем закаленная сталь.

Во многих случаях полиамиды следует применять в узлах трения в виде тонких покрытий, полученных газопламенным и вихревым напылением. В настоящее время разработан вибрационный способ нанесения покрытия. Этот способ имеет некоторые преимущества перед газопламенным и вихревым способами.

Синтетические полимерные материалы пригодны для работы в условиях контактных нагрузок. В линотипах (наборных машинах) применяют нейлоновые зубчатые колеса привода клавиатуры, которые по сравнению с чугунными зубчатыми колесами, отличаются бесшумностью работы, не требуют смазки и не обнаруживают заметного износа после длительной эксплуатации. Подшипники с пластмассовыми шариками или полностью изготовленные из пластика могут применяться при малой скорости вращения в случаях, когда необходимо обеспечить снижение веса изделия, коррозионную стойкость и сопротивление возможным ударам. Такие подшипники удовлетворительно работают при попадании пыли. В табл. 16 приведены рекомендации по выбору материалов для пар трения и обычных деталей, а также способы повышения их эксплуатационных свойств, некоторые из них уже рассматривались, а другие будут рассмотрены ниже.

1.1.6. Выбор и совершенствование профилей металлопроката

В последние годы достигнуты значительные успехи в разработке и освоении выпуска материалов, а также покрытий, частично или полностью заменяющих черные металлы. Тем не менее, в настоящее время и в ближайшие годы элементы узлов машин, изготовленные из черных металлов, по-прежнему будут определять как массу, так и долговечность машины.

Среди деталей машин, изготовленных из черных металлов, наиболее часто применяются детали, полученные прокаткой. Объясняется это тем, что прокатка позволяет с наименьшими удельными затратами производить изделия, которые либо полностью воспроизводят предусмотренное конструктором поперечное сечение детали, либо максимально приближаются к нему.

1.1.6.1. Влияние выбора профиля на металлоемкость изделий

Каждая из деталей, применяемых в сборочных единицах машин, должна соответствовать комплексу эксплуатационных требований, основными из которых являются хорошая сочленяемость с другими деталями сборочной единицы, возможность быстрой замены, надежность в работе, расчетная прочность. Как правило, конструктор в первую очередь обращает внимание именно на эти требования. Однако в современных условиях, когда остро ощущается необходимость экономии энергетических и природных ресурсов, наряду с эксплуатаци-

онными требованиями следует учитывать и требования эффективности конструирования. Под эффективностью в данном случае следует понимать экономичность конструирования, причем не в рамках эксплуатационных качеств в отрасли, а на общегосударственном уровне.

В соответствии с этим изменяются и требования к конструкции детали. Деталь при максимальной несущей способности должна обладать минимальной массой, изготавливаться из материалов невысокой стоимости, иметь длительный срок эксплуатации. Затраты всех видов ресурсов на изготовление детали (особенно энергетических) должны быть незначительны.

Главным в процессе конструирования является обеспечение несущей способности детали, т.е. сохранение прочности при приложении рабочей нагрузки. В зависимости от профиля поперечного сечения детали при одной и той же несущей способности она может иметь меньшую или большую массу. Специалисты в области надежности машин выполнили ряд расчетов для разнообразных форм поперечного сечения стержней, обладающих одинаковой несущей способностью, но различной массой метра погонной длины профиля в зависимости от конфигурации поперечного сечения. Установлено, что наибольшей жесткостью и моментом сопротивления изгибу обладают двутавровое и швеллерное сечения. Масса равнопрочных кругов, квадратов, прямоугольников 2,5 – 3,5 раза больше. Принцип рационализации конструкции деталей машин, работающих в условиях продольного и поперечного изгиба, состоит в выборе такого профиля, при котором обеспечивается заданная несущая способность и минимальная масса детали.

Использование принципа снижения массы за счет рационализации формы поперечного сечения детали ограничивается возможностями и экономичностью способа изготовления детали. Наступает момент, когда снижение конфигурации профиля поперечного сечения детали, при котором приходится переходить на большие массы, приводит к такому усложнению, когда необходимо выбрать менее экономичный способ изготовления. В этом случае прирост затрат на изготовление начинает превышать экономию от снижения массы детали.

Большинство экономичных деталей машин, используемых в промышленности, изготавливает черная металлургия в виде различного рода прокатных профилей (более 3,5 тысяч профилирумеров). Такие масштабы использования в машиностроении экономичных прокатных профилей обусловлены тем, что прокатное производство обладает более высокими технико-экономическими показателями по сравнению с другими способами обработки металлов: значительно ниже себестоимость продукции и затраты энергии. Кроме того, в процессе обработки повышаются механические свойства изделий, имеются значительные перспективы механизации и автоматизации процессов в связи с поточностью производства.

Возможности прокатных станов в части освоения выпуска экономичных профилей использованы не полностью. Конструкторы-разработчики сборочных единиц и деталей обычно ориентируются на традиционные технологии изготовления (литье, обработка металлов резанием, сварка). Для перехода на изготовление деталей путем прокатки часто приходится коренным образом рекон-

струировать сборочные единицы машин с целью приближения конфигурации профиля к форме, применяемой для технологии прокатного производства. Это часто связано с организационными и техническими трудностями. Помимо этого, сказывается и психологическая неподготовленность конструкторов, которые неохотно идут на изменение конструкций деталей. Однако преодоление указанных трудностей с целью внедрения проката для изготовления деталей машин способствует решению проблемы снижения металлоемкости изделий.

1.1.6.2. Горячекатаные сортовые профили

Профили массового потребления. Наиболее эффективно совершенствование профилей массового потребления, которые выпускаются в больших объемах. В этом случае даже незначительное снижение массы 1 м погонной длины позволяет обеспечить существенную экономию в государственных масштабах.

Из всех профилей наиболее широко используются двутавровые балки и швеллеры. Двутавровые балки общего назначения прокатываются в соответствии с ГОСТ 8239–89 на рельсобалочных и сортопрокатных станах. Высота балок по сортаменту изменяется от 100 до 600 мм, ширина полки – от 55 до 190 мм, толщина полки – от 7,2 до 17,8 мм, толщина соединительной стенки – от 4,5 до 11,1 мм. Причем, толщина полки и стенок нередко завышена по сравнению с требуемой в соответствии с условиями применения. Например, наименьшее значение толщины стенки, при котором обеспечивается коррозионностойкость и устойчивость, для балок от №10 до № 24 составляет 3 мм, а для балок № 60 – 7,1 мм. Эти величины гораздо ниже принятых в сортаменте. Ширина полки по сортаменту также завышена. Коэффициент формы, т.е. отношение ширины полки к ее толщине, колеблется по сортаменту от 4,4 до 3, а в лучших зарубежных сортаментах это отношение достигает 7,5.

Немаловажным условием рационализации двутавров является правильное распределение металла между отдельными элементами, выбранное на основе критерия рациональности профиля. В качестве примера рассмотрено условие рационального распределения металла для двутаврового сечения.

В последнее время общепринятым критерием рациональности профилей, работающих на поперечный изгиб, является удельный момент сопротивления

$$\omega = \frac{W^{3/2}}{F},$$

где W – момент сопротивления изгибу профиля;

F – площадь профиля.

Существенным недостатком действующего стандарта является наличие уклонов на внутренней поверхности полки. Это обстоятельство значительно снижает технологичность монтажа конструкций из этих балок, так как усложняет стыковку с листовыми связками и установку болтовых соединений на полках. Наличие уклонов ухудшает также рациональность распределения металла по элементам профиля.

Двутавровые балки производятся на линейных сортовых станах согласно сортаменту ГОСТ 8239–89. Этот сортамент имеет уклоны внутренних граней

полок 12 %. При переходе к производству двутавровых профилей с параллельными гранями появляется возможность снижения массы 1 м погонной длины профиля без уменьшения несущей способности на 1,5 – 2 % по сравнению с сортаментом, упрощается стыковка с другими элементами конструкции.

Проблемы дальнейшей рационализации двутавровых профилей частично решены в результате освоения прокатки двутавровых балок с параллельными полками в соответствии с ТУ 14–2–24–2010 на универсальном балочном стане Нижнетагильского металлургического комбината. Этот сортамент имеет несколько модификаций двутавров: нормальный ряд от № 20 до № 100, широкополочные двутавры от № 20 до № 100, имеющие ширину полок, приблизительно в 1,5 раза меньше, чем у балок нормального ряда, колонные двутавры от № 20 до № 40, отношение высоты балки к ширине полки которых около 1, и уширенные колонные двутавры от № 20 до № 26, у которых ширина полок больше высоты балки. Колонные двутавровые балки, в отличие от балок нормального ряда, предназначены преимущественно для работы в условиях продольного изгиба. В этом случае условием оптимального распределения металла по элементам профиля является приблизительно равенство моментов инерции профиля относительно обеих осей.

На крупносортом непрерывном стане Западно-Сибирского металлургического комбината также освоено производство еще одной разновидности экономичных двутавровых профилей в соответствии с ТУ 14–2–205–89 – тонкостенных двутавров с узкими параллельными полками. В сортамент входят двутавры от № 12 до № 30. В этих конструкциях двутавров практически достигнута минимально возможная в соответствии с условиями эксплуатации толщина стенки, а коэффициент формы колеблется от 4,6 до 3,5, что выше значений, предусмотренных ГОСТом 8239–89.

На различных металлургических предприятиях Украины производится также около двадцати разновидностей двутавровых профилей, которые применяются в ограниченных объемах для различных отраслей промышленности: для узлов автопогрузчиков в сельскохозяйственном машиностроении, для скребков конвейеров в угольной промышленности, в качестве несущих рычагов домкратов в автомобильной промышленности, в качестве заготовок для деталей электрических машин, профиля для подковных шипов, фасонной заготовки для кольцевых деталей машин. Таким образом, двутавровая конфигурация профиля может быть изготовлена в соответствии с определенными конструктивными требованиями для любой отрасли промышленности. Следует иметь в виду, что более массивная конструкция элементов профиля проще в прокатке, минимальный объем заказываемой партии фасонных профилей должен быть не ниже определенного предела в зависимости от массы 1 м погонной длины профиля:

Масса 1 м погонной длины, кг	Объем партии, тонн
0,5–3	250
3–7	300
7–15	500
15–27	800
27 и более	2 000

Швеллерные профили, подобно двутавровым профилям, работают преимущественно в условиях поперечного изгиба и широко используются как в строительстве, так и в других отраслях промышленности. Швеллеры нормального ряда прокатываются в соответствии с ГОСТ 8240–89 на сортопрокатных станах. Высота их колеблется от 50 до 400 мм, ширина полки – от 32 до 115 мм, толщина стенки и полки – соответственно от 4,4 до 8 мм и от 7 до 13,5 мм.

Сравнение швеллеров с двутаврами соответствующих размеров показало, что толщины элементов профиля находятся в тех же пределах. Объясняется это тем, что швеллеры производятся на таких же сортопрокатных станах.

Для швеллеров нормального ряда стандартом уже предусмотрена прокатка профилей с параллельными полками, т.е. без уклона внутренней грани. Это позволило повысить момент сопротивления сечения относительно несущей оси и улучшить технологичность профиля в процессе его сборки при сохранении тех же размеров. Такие швеллеры в широких масштабах производятся в настоящее время на ряде металлургических предприятий вместо швеллеров, имеющих полки с уклоном, что обеспечивает ежегодную экономию металла в пределах 2 – 2,5 %.

Кроме швеллеров нормального ряда на Западно-Сибирском металлургическом комбинате производятся тонкостенные швеллеры с параллельными полками от № 12 до № 30 в соответствии с ТУ 14–2–204–89. Эти швеллеры отличаются большой экономичностью распределения материала по элементам сечения и имеют толщины стенки и полки в 1,4 – 1,5 раза меньше толщин обычного сортамента.

Несколько повышенный момент сопротивления имеют экономичные швеллеры (ТУ 14–2–230–89), у которых сортаментный ряд, высота и ширина полки соответствуют швеллерам, предусмотренным ГОСТ 8240–89, но с уменьшенными значениями толщин стенки и полки. Еще одним видом экономичного профиля массового потребления являются ступенчатые угловые профили. Экономия металла в пределах от 2 до 8 % для различных профилеразмеров при неизменной несущей способности в условиях поперечного и продольного изгиба достигается в результате перераспределения металла в поперечном сечении к краям полок с образованием утолщения в виде ступеньки на полках.

Сложности освоения новой модификации профиля состояли в том, что при его использовании несколько усложнялась стыковка нового вида профиля с примыкающими деталями. Кроме того, применение этого профиля в конструкциях ферм не позволило экономить металл на элементах, работающих в условиях растяжения, а это сказывалось на общей экономичности конструкций. В настоящее время указанные трудности преодолены, и описанный профиль успешно используется как в строительной промышленности, так и в других отраслях промышленности. Ряд прокатных станов металлургических предприятий Украины полностью перешел на производство нового вида профиля.

В перспективе рационализация формы поперечного сечения широко используемых профилей будет основана на утончении элементов профилей, что существенно повысит удельный момент сопротивления изгибу. В связи с этим, проводятся экспериментальные исследования по прокатке и использованию ба-

лок и швеллеров с переменной толщиной стенки, которые позволяют получить экономию металла от 4 до 6 % при сохранении прочностных характеристик. Намечается переход на производство двутавровых балок с параллельными полками, что обеспечит снижение массы 1 м погонной длины на 1,5 – 2,0 %.

Специальные профили для машиностроительной промышленности.

В настоящее время изготавливается около четырехсот видов профилей для различных отраслей машиностроения. Освоение производства новых профилей взамен профилей общего назначения обеспечило экономию 15 – 30 % металла и снижение трудовых и эксплуатационных затрат у потребителя. Средняя экономия от применения 1 тонны фасонных горячекатаных профилей вместо профилей общего назначения составляет около 300 грн в результате снижения затрат и экономии 200 кг металла. Поэтому ниже рассмотрены характерные примеры использования горячекатаных профилей для машиностроения.

В практике машиностроения для изготовления листовых рессор транспортных машин широко применяется прокатная сталь прямоугольного сечения. Однако, поскольку сечение прямоугольной формы не является оптимальным ни в отношении распределения напряжений по ширине профиля, ни в отношении использования различной сопротивляемости металла напряжениям растяжения и сжатия, были предложены рессорные профили с иной формой поперечного сечения.

Так, на Горьковском автомобильном заводе успешно применяют прокат, имеющий профиль с параболическими кромками. Применение рессор из проката такого профиля на легковых автомобилях «Волга М–31» вместо рессор из проката прямоугольного профиля обеспечило свыше 10 % экономии стали и более высокую долговечность рессор.

Профили проката широко используются в автомобильной промышленности в качестве деталей конструкции автомобильного колеса. Более 50 % всего металла, затрачиваемого на изготовление колес, поставляется в виде специальных фасонных горячекатаных профилей. В основном это профили автоободов различной конфигурации для разных типов автомобилей и бортовые кольца для удержания шины на ободе. В настоящее время металлургические предприятия освоили производство облегченных автомобильных ободов. Использование этих автоободов взамен использовавшихся ранее позволило сэкономить 10 кг металла на одну машину.

В последние годы освоена прокатка дверных и кузовных петель для различных типов автомобилей. Эти детали ранее производились путем штамповки на молотах. Использование фасонного проката исключает операцию штамповки. Необходимо лишь разрезать прокат на детали, зачистить заусенцы и обработать отверстия. Экономия металла при внедрении новой технологии изготовления петель составляет 40 – 45 % за счет исключения расхода металла на облой, клещевину и угар.

В сельскохозяйственном машиностроении применяются фасонные профили для бичей и подбичников – рабочих органов барабана молотилки самоходных комбайнов, а также специальный профиль для крепления пальцев жатки, что обеспечивает существенную экономию металла. Так, в результате при-

менения специального профиля для жаток расход снизился на 10 кг на одну жатку. Для производства противорежущих пластин и ножей режущего барабана силосоуборочных комбайнов также применяют прокатные профили. Расход металла при использовании такого профиля вместо профиля общего назначения сокращается на 7,5 %. Наиболее характерными фасонными профилями, применяемыми в угольном и горном машиностроении, являются профили для боковины рештаков скребковых конвейеров различных модификаций. Применение этих профилей позволило сократить расход металла на 30 %, повысить срок эксплуатации в 2 раза и уменьшить трудоемкость изготовления.

В вагоностроении для грузовых вагонов также используется ряд фасонных профилей – облегченные вагонные швеллеры, а также зетовые профили. Применение облегченных профилей взамен ранее применявшихся позволяет сэкономить на каждом вагоне 200 – 250 кг металла.

Судостроительная промышленность в последние годы использует экономичные симметричные профили проката, в которых сочетаются полосы и шары. Замена традиционно использовавшихся профилей новыми профилями позволяет получать экономию 15 % металла и снизить трудоемкость изготовления судов, так как сокращается объем операций правки, гибки, сварки и резки.

Крупным достижением явилось освоение производства прокатного профиля заготовок направляющих лопаток паровых турбин. Лопатки паровых турбин изготавливаются путем механической обработки из прямоугольных заготовок. Коэффициент использования металла в этом случае составляет 0,2. Для механической обработки необходимо большое количество станочного оборудования, оснастки и инструмента. При фрезеровании удаляется наиболее качественный поверхностный слой металла. Можно изготавливать лопатки так же горячей штамповкой. В этом случае коэффициент использования металла не выше 0,25, так как значительны потери металла на облой и угар.

При горячей прокатке заготовки для лопатки и последующей окончательной холодной прокатке коэффициент использования металла достигает 0,6, а трудоемкость изготовления снижается с 0,34 при изготовлении методом механической обработки до 0,094.

Количество осваиваемых прокатными станами специальных фасонных профилей для нужд машиностроения из года в год возрастает. Основным ограничением использования этого высокоэффективного вида металлопродукции является относительно крупная масса монтажной партии для прокатки на современных высокопроизводительных прокатных станах. Интенсивное освоение новых экономичных видов проката связано со строительством специализированных станков для производства малотоннажных партий проката. Особенностью этих станков является возможность прокатки небольшими партиями широкого сортамента профилей, различных по форме и размерам сечения.

1.1.6.3. Периодические профили проката

Характерной особенностью периодических профилей является то, что они имеют изменяющиеся по длине полосы размеры и форму поперечного сечения.

Это позволяет существенно снизить расход металла при дальнейшей обработке и снизить металлоемкость готовых изделий.

Различают две разновидности готовых профилей: профили продольной и поперечно-винтовой прокатки. Основным различием этих видов проката является то, что путем поперечно-винтовой прокатки можно получать только тела вращения, а путем продольной прокатки – тела различной формы. Наибольшее распространение в настоящее время получила продольная периодическая прокатка профилей.

Применение периодического проката вместо профилей постоянного сечения облегчает последующую обработку давлением на молотах и прессах, а также механическую обработку, так как форма сечения периодического проката близка к профилю готового изделия. При этом наблюдается существенная экономия металла.

Основная масса профилей продольной прокатки используется в качестве заготовок для производства осей автомобилей и прицепов, коленчатых валов автомобилей. Оси автомобилей и прицепов раньше штамповали из квадратной заготовки. Для этого квадрат 65×65 мм разрезали на отдельные заготовки, нагревали один из концов заготовки и штамповали на молоте. Затем весь технологический цикл повторялся для другого конца заготовки, после чего заусенцы отрезали.

В настоящее время прокатка заготовок таких осей освоена на среднесортном стане 550. Фасонные заготовки в виде штанг, длина которых кратна длине оси, поступают на автозавод. Здесь их разрезают на отдельные заготовки, нагревают сразу оба конца и штампуют. Количество ударов при штамповке сократилось в 3 раза. Экономия металла при этом составляет 15 %, а снижение трудоемкости изготовления деталей составляет 20 – 50 % в зависимости от типа осей.

Периодический профиль для прокатки автомобильных осей имеет двусторонний период, что требует установки на прокатном стане чистовой клетки специальной конструкции, позволяющей синхронизировать положение верхнего и нижнего валков в процессе прокатки для обеспечения совпадения периодов на верхней и нижней поверхностях проката.

Гораздо проще обеспечить производство профилей с односторонним периодом. В этом случае прокатка ведется без каких-либо конструктивных изменений на стане. Периодичность сечения достигается в последней клетки, при этом один из валков выполняется в соответствии с профилем периода. Этим методом прокатывается периодический профиль для лемехов почвообрабатывающих машин. С применением такой заготовки для лемехов значительно снизилась трудоемкость изготовления, стабилизировались размеры и форма заготовки, что крайне важно для выполнения всех последующих операций на автоматических линиях.

При использовании в качестве заготовки непериодического профиля для получения лемеха производилось 7 кузнечнопрессовых операций с нагревом. Использование в качестве заготовки периодического профиля позволяет сократить число операций до двух без нагрева.

1.1.6.4. Гнутые профили проката

Гнутые профили относятся к экономичным видам металлопродукции, которые изготавливают методом последовательного формоизменения листов, полос и ленты в валках профилегибочных станков. Эти профили могут иметь разнообразную конфигурацию поперечного сечения, могут быть замкнутой и полузамкнутой формы, с продольными или поперечными ребрами жесткости. Они могут быть сварными, иметь элементы двойной толщины, на них могут наноситься покрытия различных видов. Гнутые профили могут изготавливаться гладкими, с насечкой или перфорацией.

Применение гнутых профилей в различных отраслях промышленности обеспечивает ряд преимуществ в определенных случаях по сравнению с использованием горячекатаных профилей. В большинстве случаев гнутые профили имеют одинаковую толщину всех элементов поперечного сечения, что облегчает операции сборки и монтажа конструкций. Гнутые профили хорошо сгибаются, легко свариваются с другими элементами конструкции. Расходные коэффициенты при изготовлении гнутых профилей очень низкие (1,002 – 1,005). Так как профилирование производится в холодном состоянии, то в процессе его осуществления появляется наклеп, что способствует повышению прочностных характеристик металла на 10 – 15 %.

Гнутыми профилями полузакрытого и закрытого типов в изделии заменяют составные конструкции, получаемые из нескольких профилей путем клепки, сварки или применением резьбовых соединений. Это существенно облегчает операции сборки и монтажа, обеспечивает экономию металла. При их использовании появляется возможность получения профилей с наиболее выгодным распределением металла по поперечному сечению и с минимальными толщинами элементов, т.е. уменьшения расхода металла без уменьшения прочности.

Возможности рационализации поперечного сечения и обеспечения минимальных толщин элементов при производстве горячекатаных профилей ограничены технологическими возможностями и оборудованием сортовых станков горячей прокатки. Гнутые профили производятся в холодном состоянии, поэтому оборудование, необходимое для профилирования, менее сложное, легкое и проще в обслуживании по сравнению со станками горячей прокатки. Профилегибочные станы могут использоваться не только для массового производства на металлургических предприятиях, но и на заводах различных отраслей машиностроения. Линия по производству гнутых профилей, установленная на машиностроительном заводе, быстро окупается, внедрение ее снижает стоимость готовой продукции, даже если линия работает на относительно малых партиях с перерывами.

Гнутые профили широко применяются для отделочных и декоративных элементов в машиностроении, так как они имеют более высокое качество поверхности и более привлекательный внешний вид по сравнению с горячекатаными профилями. Малое число дефектов на поверхности гнутых профилей обуславливает их высокую коррозионную стойкость.

По конструктивному назначению гнутые профили можно разделить на несущие, силовые, ограждающие и декоративные малонагруженные элементы.

Несущие, силовые элементы изготавливают толщиной 2 – 8 мм при ширине исходной заготовки 600 – 1 200 мм. Из них производят рамы автомобилей, прицепы сельскохозяйственных машин, обвязки и стойки бортов автомобилей, каркасы железнодорожных вагонов, стойки, связи и раскосы строительных ферм. Поперечное сечение при этом может иметь форму уголков, швеллеров, зетовых или замкнутых профилей.

К ограждающим элементам относятся покрытия и стеновые панели зданий, настилы пола и обшивки бортов кузова автомобилей или прицепов, наружные и внутренние переборки и обшивки палубных надстроек судов, обшивка и крыши железнодорожных вагонов. Они представляют собой, в основном, гофрированные или волнистые листы и профили с периодически повторяющимися гофрами полукруглой и трапециевидной формы. Высота гофров может быть до 100 мм, толщина заготовки – до 5 мм, а ширина – до 1 500 мм. Часто применяют оцинкованные или покрытые пластиком заготовки.

Малонагруженные декоративные детали из гнутых профилей применяют для наружной и внутренней отделки автомобилей, трамваев, троллейбусов, мебели, зданий, для защитных планок. Наиболее крупным потребителем гнутых профилей является автомобильная промышленность. Например, при изготовлении легкового автомобиля «Волга М–34» используется 30 гнутых профилей. В их число входят детали сидений, окантовка окон и дверей, стойки каркаса сидения, обоймы уплотнителя поворотного стекла, сточный желоб крыши, направляющие подлокотника и другие детали наружной и внутренней отделки.

Значительную экономию обеспечивает использование гнутых профилей взамен деревянных кузовов грузовых автомобилей и прицепов. Так, при изготовлении бортов кузова автомобиля МАЗ–500 из гофрированных листов достигнута экономия 500 тыс. грн в год.

В тракторостроении гнутые профили применяются в конструкции рам и кабин колесных, а также гусеничных тракторов. В сельскохозяйственном машиностроении они применяются в прицепных и самоходных комбайнах, косилках, культиваторах, сеялках, плугах, зерноочистительных машинах, тракторных прицепах и в других механизмах и машинах.

Эффективно используются гнутые профили в дорожно-строительных и коммунальных машинах, подъемно-транспортном оборудовании и горнорудном машиностроении. Так, применение в конструкции стрелы башенного крана КБ–100 специального швеллера вместо обычного швеллера позволило снизить массу стрелы на 20 % и получить экономию 260 грн на 1 тонну профиля. В конструкциях угольных конвейеров использование гнутых профилей вместо обычных профилей обеспечивает экономию 25 % металла. При изготовлении отвальных листов бульдозеров применение гнутых профилей вместо обычных профилей обеспечивает экономию 10 % металла.

Разнообразный сортамент гнутых профилей применяется в оборудовании для легкого, торгового и пищевого машиностроения. Гнутые уголки и швеллеры применяют в печах для отжига стеклоизделий, в электроплитах, прядильных

и крутильных машинах. Так, при изготовлении холодильника «Минск» применяется 11 видов гнутых профилей, причем на заводе установлен профилегибочный агрегат для получения специального профиля обечайки, имеющего сложную форму поперечного сечения с элементами двойной толщины.

Гнутые профили производятся на роликогибочных станах. Тяжелые, средние и легкие роликогибочные станы работают как на металлургических, так и на машиностроительных предприятиях. Заготовки для них изготавливаются на листопрокатных станах.

Профилегибочные агрегаты различаются по толщине и ширине деформируемых полос. На станах легкого типа с диаметром валков 100 – 120 мм производится профилирование полос толщиной до 1 мм, а наиболее мощные станы тяжелого типа с диаметром валков 500 – 700 мм профилируют полосы до 10 мм толщиной и шириной до 1 500 мм.

Значительное снижение металлоемкости обеспечивает применение перфорированных профилей, т.е. таких профилей, в которых различными способами пробивают отверстия необходимых форм и размеров, регламентированных условиями работы профиля. Они должны обеспечивать минимальный вес 1 м погонной длины профиля при максимальной несущей способности. Кроме того, отверстия на элементах профиля облегчают стыковку этих профилей с аналогичными элементами или с любыми другими при помощи болтовых соединений. Эти профили в практике получили название профилей для быстрой сборки. На их основе можно собирать модули комплексных элементов для изготовления практически любых возможных комбинаций металлоконструкций в строительстве, а также для изготовления складского, транспортного и производственного оборудования.

Профилированные гнутые профили могут изготавливаться методом профилирования на профилегибочных агрегатах или методом штамповки. В случае производства методом профилирования в линии профилегибочных станов устанавливаются быстроходные прессы для пробивки отверстий в листовой заготовке, которая затем профилируется. Может также производиться перфорация готовых изделий.

Агрегат для перфорирования исходной заготовки включает разматыватель, правильную машину, перфорационный пресс и наматыватель с петлевиком. На готовых профилях отверстия выполняются при помощи сверлильных головок, работающих по заданной программе. В любом случае агрегат для выполнения отверстий на профилегибочных станах устанавливается в технологической линии. При производстве штампованных перфорированных профилей пробивка отверстий и гибка заготовок в штампах выполняются на различном оборудовании, не связанном в единую технологическую линию.

1.1.6.5. Собственные гнутые профили

В предыдущих разделах рассмотрены виды экономичных профилей проката, которые в значительных объемах применяются в различных отраслях промышленности. Эти профили, как правило, производятся на прокатных станах

металлургических предприятий, имеющих высокую производительность, поэтому переход с одного вида профиля на другой вызывает высокие потери производства.

Между тем, имеется ряд деталей машин, потребляемых различными отраслями машиностроения, которые могут быть изготовлены таким прогрессивным малоотходным способом, как прокатка. Однако на металлургических предприятиях этот способ применения не получил в связи с относительно малыми объемами годового производства. Поэтому чрезвычайно перспективно осуществлять производство деталей такого типа непосредственно на машиностроительных заводах.

Инициатором этого направления является ВНИИметмаш, специалисты которого считают целесообразным создание на машиностроительных заводах (в кузнечно-прессовых цехах) участков или цехов, в которых устанавливают специальные станы для получения малотоннажных партий проката.

К этим станам следует отнести специальные станы для производства шаровых заготовок и колец подшипников для подшипниковых заводов, полых велосипедных втулок для заводов-производителей велосипедов, ступенчатых осей и валов, резьбовых деталей и зубчатых колес. Насколько это эффективно, можно увидеть на примере горячей прокатки зубчатых колес на Конотопском механическом заводе на специальном стане, где изготовлено 1,5 млн. колес с производительностью в 15 раз выше, чем это можно сделать на зуборезных станках.

1.1.7. Выбор рациональных допусков

Для повышения качества изделия, снижения его материалоемкости и себестоимости, особенно в точном машиностроении, большое значение имеет выбор рациональных допусков. Большие допуски кроме ухудшения в ряде случаев качества машины, приводят к повышению ее материалоемкости, а малые допуски усложняют технологический процесс, увеличивают материалоемкость оснастки и повышают вероятность выхода размеров за пределы допусков.

Допуск на выходной параметр изделия определяется:

$$T = \sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{da_i} \right) \cdot Ta_i,$$

где $\frac{df}{da_i}$ – коэффициент влияния;

Ta_i – допуски на функциональные параметры.

На основе приведенной зависимости можно анализировать влияние каждого из функциональных параметров изделия на выходную характеристику машины, рассчитывать допуски на функциональные параметры деталей и узлов. Из зависимости следует, что с увеличением числа функциональных параметров снижается точность выходного параметра изделия, так как увеличивается сумма погрешностей.

Одна из важнейших задач снижения материалоемкости машины при одновременном повышении ее качества состоит в эффективном распределении заданного допуска выходного параметра между функциональными параметрами в соответствии с приведенной зависимостью. При установлении допусков, например на размеры элементов машины, следует исходить из комплекса технико-экономических вопросов, учитывающих материалоемкость детали, способности ее формообразования, наличие оснастки и др. Поэтому целесообразно перераспределить допуски так, чтобы получить минимально возможную материалоемкость крупногабаритных деталей.

Взаимосвязь габаритных размеров детали, например, с технологией изготовления обусловлена следующим. Шероховатость поверхности детали зависит от способа обработки и не уменьшается пропорционально уменьшению размеров детали. Следовательно, по мере уменьшения габаритных размеров детали относительная погрешность ее размеров увеличивается. В связи с этим, при проектировании точных механизмов приходится учитывать трудносовместимые факторы: с одной стороны, при высоких требованиях к точности выходных характеристик изделия должны быть точными функциональные параметры его деталей и сборочных единиц, с другой стороны, относительная точность изготовления этих параметров понижается при уменьшении размеров и усложнении технологических процессов. В более общем случае учитывают, что на выходные характеристики изделия влияют не только отклонения функциональных параметров, но и различные внешние факторы: температура, давление, вибрации и др.

В связи с этим в точном машиностроении получили большое распространение специфические приемы конструирования и технологические приемы, позволяющие создавать машины из деталей и элементов, изготовленных по экономически целесообразным величинам допусков. К рациональным приемам конструирования относятся, например, устранение пассивных связей, введение в конструкцию сменных компенсаторов, применение регулировочных устройств и др.

Рассмотрим пример схемы установки вала на две и три опоры. В первом случае подшипники могут быть установлены с более широкими допусками по соосности, чем во втором, когда третий подшипник представляет собой пассивную связь. По этой же причине более целесообразно применять самоустанавливающиеся шарикоподшипники с большими допусками на отклонение от соосности отверстий под их установку.

В ряде случаев применение статически неопределимых систем полностью исключает взаимозаменяемость. Например, конструкция конической опоры должна обеспечить одновременный контакт по конической направляющей поверхности и по опорной кольцевой поверхности. Контакт по конической поверхности должен обеспечить точность вращения вокруг вертикальной оси. Чтобы вращение было легким и плавным, большая часть массы подвижной системы должна передаваться на деталь через кольцевую поверхность. Тогда коническую поверхность передается небольшая нагрузка и обеспечивает легкость вращения подвижной системы и малый износ трущихся поверхностей.

Одновременный контакт по обеим поверхностям достигается при сборке индивидуальной подгонкой, что является трудоемким процессом и не всегда приводит к желаемым результатам. Исходя из этого, износ трущихся поверхностей увеличивается, что снижает надежность изделия и повышает его эксплуатационную материалоемкость. С помощью регулировочных устройств можно исключить или уменьшить зависимость выходных характеристик изделия от точности изготовления его деталей, а также сборочных единиц и таким образом уменьшить материалоемкость.

В измерительные устройства ряда механизмов входит рычажно-чувствительная передача. Требуемая чувствительность таких механизмов достигается не за счет высокой точности выполнения малого плеча рычажной передачи, являющегося основным функциональным размером передачи, а регулированием его величины.

Регулировочные устройства могут быть использованы также для компенсации погрешностей изготовления деталей, частичного их износа, влияния внешних факторов. Они позволяют повысить надежность изделий и снизить их материалоемкость.

Вопросы для самопроверки к пп. 1.1

1. Какие направления экономии ресурсов имеют место в машиностроении?
2. Как можно снизить расход материалов на изделие?
3. Какие материалы – металлы имеют минимальную коррозию.
4. В чем состоит привлекательность использования легких сплавов в деталях машины?
5. За счет чего достигается экономия при использовании профилей металлопроката?
6. Как отходы материалов на производстве можно превратить в доходы?
7. Как связана надежность машины с расходом материалов?

1.2. Технологические направления экономии ресурсов

Цель – на этапе подготовки технологической документации и разработки маршрутно-операционных карт показать и обосновать на основе технологичности конструкции направления уменьшения отходов и потерь, стабилизации технологических процессов и управления надежностью работы машины в процессе ее изготовления.

1.2.1. Обеспечение технологичности конструкции деталей

Заготовки деталей машин могут быть изготовлены из различных материалов, различными методами и способами, каждый из которых включает свои специфические технологические требования к конструктивным формам и размерам деталей.

Конструктивная форма детали должна обеспечить требуемую несущую способность при одновременном соблюдении минимальной материалоемкости, трудоемкости, себестоимости и высокой эксплуатационной надежности. Этому способствует соблюдение технологичности конструкции изделия.

Согласно ГОСТ 14.201–89 «Единая система технологической подготовки производства. Общие правила обеспечения технологичности конструкции изделия», комплекс работ по снижению материалоемкости изделия включает: применение рациональных сортаментов и марок материалов; рациональные способы получения заготовок, методов и режимов упрочнения деталей; разработку и применение прогрессивных конструкторских решений, позволяющих повысить ресурс изделия и использовать малоотходные и безотходные технологические процессы; разработку рациональной компоновки изделия, обеспечивающей сокращение расхода металла при монтаже вне предприятия–изготовителя; внедрение научно обоснованных запасов прочности металлоконструкций, типовых методов расчета и испытаний изделия.

Такая комплексная задача может быть решена только при конструировании с учетом требований прогрессивной технологии изготовления и условий эксплуатации машины. Зная требования и возможности технологических процессов, конструктор в большинстве случаев может изменить форму детали без ущерба для ее эксплуатационных характеристик.

Критерием оценки решения конструктора могут служить экономические факторы, поскольку снижение материалоемкости деталей в результате выбора рациональной формы заготовок имеет ограничение. Наступает предел, когда проявляется противоречие двух экономических факторов. Чрезмерное снижение массы приводит к такому усложнению конфигурации детали, при котором приходится переходить на менее экономичный способ ее изготовления. В этом случае затраты на изготовление детали превышают экономию от снижения ее массы.

Для выбора наиболее экономичного варианта необходимо рассчитать себестоимость каждого из них. Вариант технологического процесса, характеризующийся наименьшей себестоимостью детали или сборочной единицы при обеспечении заданных технических требований, считается наиболее экономичным.

Кроме того, конструктивные формы деталей должны обеспечивать стабильный технологический процесс с постоянством форм и размеров деталей в пределах принятых допусков. Это особо важно при серийном и массовом производстве.

Преимущества того или иного способа изготовления заготовок деталей следует оценивать и по исключению возможности таких отклонений в форме и размерах, которые на последующих стадиях формо- и размерообразования могут создавать трудности в достижении требуемой точности детали в соответствии с чертежом.

Общими требованиями, характеризующими технологичность конструкций всех типовых деталей машин и влияющими на их материалоемкость и трудоемкость, являются: возможная простота конструкции; наличие поверхностей, удобных для базирования и закрепления при установке на станках на всех опе-

рациях; возможность сокращения числа установок при обработке; возможность использования рациональных методов получения заготовок, типовых технологических процессов и групповой обработки; отсутствие сложных разъемов и внутренних полостей для заготовок, получаемых ковкой, сложных контурных обрабатываемых поверхностей, большой разностенности и незамкнутых контуров, вызывающих деформацию при термообработке; отсутствие мест резких изменений формы, острых краев, буртиков, являющихся концентраторами напряжений, а также отсутствие специфических требований для массового и крупносерийного производства; обрабатываемость резанием; рациональность выбора материала; учет вида термообработки; доступность всех поверхностей деталей для обработки на станках и непосредственного измерения, а также доступность термически обрабатываемых поверхностей для ТВЧ; унификация размеров с целью сокращения номенклатуры инструмента и возможного исключения специальных видов инструмента; обеспечение достаточной для применения высокопроизводительных методов механической обработки жесткости; наличие канавок для выхода инструмента; технологическая увязка точности размеров, величины шероховатости, точности взаимного расположения поверхностей, их соответствие возможностям базирования деталей при обработке на станках и геометрической точности станков.

Кроме названных выше требований, в зависимости от вида деталей к ним предъявляются дополнительные требования. Для корпусных деталей предъявляются следующие дополнительные требования: возможность сквозной обработки плоскостей и отверстий, а также многошпиндельной обработки отверстий в соответствии с расстояниями между осями отверстий; отсутствие глухих отверстий и торцов, подрезаемых с внутренних сторон, и внутренних резьб большого диаметра.

К валам предъявляются такие дополнительные требования: возможность обработки поверхностей проходными резцами; убывание диаметральных размеров шеек к концам вала либо к одной его стороне; предусмотрение шпоночных канавок по возможности открытыми, а при нескольких на одном валу – одинаковыми по ширине и в одной плоскости; отсутствие резких перепадов диаметров в местах обработки шпоночных пазов, глубоких отверстий малого диаметра, особенно эксцентричных; обеспечение отношения длины к диаметру не более 10 для валов с точностью размеров по 6 – 7-му квалитетам и 15 – для валов 8-го квалитета и более; замена наружных резьб на концах валов внутренними резьбами.

Для дисков введены следующие дополнительные требования: простота формы наружного контура и центрального отверстия, одностороннее расположение ступиц; отсутствие длинных ступиц у протягиваемых отверстий, соосных отверстий, обрабатываемых с разных сторон; возможность многорезцового точения.

Дополнительные требования для цилиндров сводятся к следующему: возможность сквозной обработки наружных и внутренних поверхностей; отсутствие глухих отверстий и торцов, подрезаемых с внутренних сторон, отверстий, расположенных не под прямым углом к осям цилиндров, большой разно-

стенности поверхностей; предусмотрение такой толщины стенок цилиндра, при которой обеспечивается достаточная для применения высокопроизводительных методов обработки жесткость; обеспечение отношения длины цилиндра к его диаметрам не более 10.

К рычагам предъявляются следующие дополнительные требования: наличие поверхностей, удобных для базирования; отсутствие сложных контурных обрабатываемых поверхностей мест резких изменений формы и резких перепадов размеров поверхностей, глухих и эксцентричных отверстий, особенно малых диаметров, колен и отверстий, располагаемых не под прямыми углами; возможность многоинструментальной обработки.

Для зубчатых колес приняты следующие дополнительные требования: отсутствие ступиц или их одностороннее расположение; точность базирующих поверхностей для зубообработки; соответствие угла наклона зубьев венцов с внутренними зубьями или закрытых венцов параметрам унифицированных инструментов и станков, соответствие количества зубчатых венцов на многовенцовых колесах и их взаимного расположения параметрам унифицированных инструментов и станков, а размеров канавок для выхода зуборезного инструмента у закрытых зубчатых колес – величине модуля; предусмотрение твердости материала (исходного или после термообработки) для зубчатых колес с обрабатываемыми отверстиями, точными резьбами, отверстиями в венцах, эвольвентными отверстиями не более HRC 36 – 40; исключение зубчатых венцов, точность которых может быть обеспечена только зубошлифованием.

Если бы в заготовительных цехах можно было получить детали заданных размеров, конфигурации, точности и шероховатости поверхности, то отпала бы необходимость в последующей их механической обработке. Это позволило бы значительно снизить материалоемкость изделий при изготовлении, так как формообразование с помощью резания не обеспечивает экономного расходования металла и получения изделий высокого качества. В связи с этим конструкции деталей и сборочных единиц должны предусматривать возможность применения современных технологических процессов изготовления заготовок, таких как обработка металла давлением, точная отливка, применение сварки. Каждый метод получения заготовок и готовых деталей имеет определенную область эффективного применения, причем границы ее меняются в зависимости от конкретных условий технологических процессов, формы и материала деталей, масштаба выпуска продукции, организации производства и других факторов.

Одно из ведущих мест в технологии машиностроения занимают методы обработки металла давлением. К ним относят, например, получение периодических профилей проката различной формы, точная штамповка, накатка зубьев зубчатых колес, шлицев и резьбы, горячее и холодное выдавливание, радиальная и ротационная ковка и др.

Опыт показывает, что замена проката неизменного сечения периодическим, получаемым методом поперечно-винтовой прокатки, позволяет снижать материалоемкость деталей на 10 – 20 %, устанавливать малые припуски на механическую обработку, а в ряде случаев и исключать ее. С применением про-

катки, например вместо фрезерования, материалоемкость изделия уменьшается на 50 – 70 %. При использовании объемной штамповки коэффициент использования стали повышается до 0,95 – 0,98. В ряде случаев полностью отпадает необходимость в последующей механической обработке. Применение горячей штамповки вместо, напримерковки, позволяет снизить материалоемкость деталей на 20 – 30 %.

Методом штамповки можно изготавливать такие детали машин, как шестерни, шпиндели, шатуны, клапаны, распределительные валы и другие, которые несут большие механические нагрузки. Во время штамповки в металле ликвидируются внутренние дефекты, обеспечивается однородность его структуры, в результате чего повышается прочность деталей изделия и достигается высокая эксплуатационная надежность.

В процессе холодной объемной штамповки можно получить окончательные размеры и форму сложных деталей, поэтому последующая механическая обработка сводится к минимуму или исключается. Этот способ формообразования устраняет потери металла на угар и отходы в окалину, имеющие место при нагреве металла, обеспечивает получение более точных размеров деталей и гладкой поверхности изделия. Если при изготовлении фасонных деталей обработка резанием заменяется холодной штамповкой, то материалоемкость этих деталей снижается на 50 – 70 %. В результате холодного деформирования стали происходит упрочнение поверхностного слоя, благодаря чему вместо высоколегированных сталей можно использовать углеродистые.

Холодная высадка применяется для изготовления крепежных изделий и многих нестандартных деталей (пальцы, ролики, подшипники, эксцентриковые кулачки, храповики, втулки, шестерни, червяки и др.). Например, при изготовлении болта из шестигранного прутка резанием из-за потерь в стружку расход металла в 25 раз больший, чем при изготовлении его на холодновысадочном и накатном автоматах.

Холодное выдавливание позволяет повысить коэффициент использования металла до 0,85 по сравнению с традиционными методами, при использовании которых величина этого коэффициента составляет в среднем 0,33.

Холодное прессование – прогрессивный, а иногда и единственно возможный метод получения профилей различных форм поперечных сечений и больших длин. Этим методом можно формировать зубья цилиндрических шестерен путем продавливания через матрицу, конфигурация калибрующего очка которой повторяет профиль готового зубчатого колеса.

Ступенчатые валы небольшого диаметра также можно получать путем выдавливания за несколько переходов. При изготовлении ступенчатых валов этим способом в массовом и крупносерийном производстве отходы металла в стружку при механической обработке сокращаются примерно на 40 %, а в некоторых случаях изделие вовсе не требует механической обработки. В результате улучшения структуры металла и его упрочнения предел прочности повышается на 28 %, а твердость металла – на 35 %.

Холодная накатка резьб, шлицев и зубьев шестерен вместо обработки резанием обеспечивает экономию металла в пределах 15 – 30 % в зависимости от

размеров. Формообразование зубьев пластическим деформированием из заготовок с их предварительным подогревом токами высокой частоты применяется для получения зубчатых колес большого диаметра, и крупного модуля. Благодаря расположению волокон металла по профилю зуба, стойкость накатанных колес выше стойкости нарезных (для колес из легированной стали – на 20 %, из углеродистой стали – на 27 %). При этом методе расход металла сокращается на 15 – 25 %, а долговечность деталей увеличивается в 1,5 – 2 раза. В результате повышения твердости зубьев и точности их изготовления допускаемые нагрузки на передачи, сделанные по прогрессивной технологии, при тех же размерах зубчатых колес могут быть увеличены на 80 % по сравнению с зубчатыми передачами, изготовленными на зуборезных и фрезерных станках. Следовательно, при одинаковой величине нагрузки на передачу масса зубчатых колес может быть сокращена в 1,8 раза.

Эффективным методом формообразования зубчатых профилей является также радиальное прессование. Долговечность деталей, изготовленных этим методом, в 1,5 раза выше, чем фрезерованных деталей. При этом экономится от 15 до 20 % металла по сравнению с зубонарезанием.

Холодная и горячая обработка заготовок из стали на ротационно-ковочных машинах – наиболее совершенный, высокопроизводительный и экономичный технологический процесс кузнечно-штамповочного производства. Этими методами изготавливают шаровые шарниры, соединительные муфты, полуоси, ступенчатые валы и другие детали. Метод ротационного обжатия позволяет одновременно заменить токарную обработку и шлифование. Экономия металла при этом методе составляет 50 %. На ковочных машинах путем обжатия полых цилиндрических заготовок делают овальные, квадратные и шестигранные отверстия, прямые и эвольвентные шлицы, зубья шестерен и спиральные профили.

Метод холодной листовой штамповки обеспечивает необходимую жесткость и прочность деталей при их малой массе в результате профилирования, отбортовки кромок, введения ребер. Рациональный выбор наружного контура штампуемой детали – это основа безотходной и малоотходной штамповки. Вследствие упрощения формы вырубаемых заготовок при рациональном раскрое металла технологические потери при штамповке минимальны. Коэффициент использования листового проката при штамповке составляет 90 – 95 %.

К прогрессивным методам относят также литье, прежде всего точное литье в оболочковые формы, в формы, изготовленные из быстротвердеющих смесей, по выплавляемым моделям, под давлением, центробежное, а также литье в кокиль или кокильное литье. Последнее применяется для фасонных отливок в металлических формах из чугуна, стали и цветных сплавов. Преимуществами кокильного литья являются: высокая точность, малая шероховатость поверхности и высокие механические свойства отливок, в результате снижаются припуски на их механическую обработку, уменьшается материалоемкость изделий.

Еще более прогрессивно литье в кокиль с термоизоляционной облицовкой. Получаемые при этом заготовки почти не нуждаются в механической обработке. Литьем в кокиль можно изготавливать крупногабаритные отливки, например корпусные детали редукторов, электродвигателей и т.п.

Центробежный способ литья применяют для получения заготовок или деталей, имеющих форму тел вращения. Основное его преимущество – высокая производительность и высокие механические свойства отливок.

Одним из наиболее прогрессивных способов формообразования заготовок является литье под давлением. По точности и производительности этот способ превосходит все современные способы литья. Кроме того, отливки, полученные этим способом, имеют самую малую шероховатость поверхности по сравнению с шероховатостью поверхности отливок, полученных другими способами. Литьем под давлением изготавливают тонкостенные отливки толщиной от 1 до 5 мм, массой от нескольких граммов до 100 кг и более из алюминиевых, цинковых, магниевых и других сплавов. В отливках можно получить отверстия диаметром более 1,5 мм, наружную и внутреннюю резьбу. Обработка отлитых этим способом заготовок сводится к чистовому фрезерованию, развертке и некоторым другим чистовым операциям. Экономия металла при использовании литья под давлением вместо традиционных способов литья составляет примерно 30 %.

Литье по выплавляемым моделям также обеспечивает сокращение отходов при последующей механической обработке заготовок, так как форма и размеры заготовки и детали мало отличаются. Для снижения стоимости производства точных отливок из стали в ряде случаев вместо литья по выплавляемым моделям применяют менее затратный способ – литье в оболочковые формы. При этом способе увеличивается выход годного литья в результате снижения брака в 1,5 – 2 раза по сравнению с литьем в песчаные формы, масса отливок снижается на 15 %, припуски на механическую обработку сокращаются примерно наполовину, трудоемкость уменьшается в 4 – 5 раз.

Оптимально выбранная при проектировании толщина стенок литых деталей в соответствии с их размерами, конфигурацией, массой и характером производства является важнейшим условием повышения выхода годных отливок, а, следовательно, и снижения материалоемкости продукции.

Для повышения жесткости некоторых элементов литых деталей вводят ребра жесткости, для снижения массы которых иногда предусматривают специальные отверстия. Введение ребер жесткости – не только конструктивное средство повышения прочности и жесткости детали, но и технологическое. Наличие ребер жесткости способствует улучшению условий заполнения полостей формы жидким металлом, частичному устранению неравномерности распределения температуры различных по толщине элементов отливки во время ее охлаждения, снижению массы отливок. Это показывает влияние выбора технологии изготовления деталей на их конструкцию с целью снижения материалоемкости.

Снижение материалоемкости и трудоемкости изделий обеспечивается при изготовлении сварных и, особенно, комбинированных конструкций деталей и сборочных единиц машин. Экономия металла при переходе от стальной отливки к сварной конструкции достигает 40 %. В то же время трудоемкость изготовления сварных конструкций в ряде случаев бывает выше, чем трудоемкость изготовления литых, поэтому применение сварки не всегда выгоднее, чем использование литья. Поскольку, как было указано ранее, современные способы литья также позволяют снизить материалоемкость деталей, целесообразно

ность применения литых или сварных конструкций в каждом конкретном случае должна быть технически и экономически обоснована.

Важное значение для решения проблемы экономии металлов в последние годы имеет порошковая металлургия. Изготовление деталей методами порошковой металлургии характеризуется техническими и экономическими преимуществами по сравнению с обычной технологией обработки металлов. На каждой тонне деталей, изготовленных методом порошковой металлургии, экономится 1,5 – 2,0 т стали. Трудоемкость их изготовления ниже трудоемкости деталей, изготовленных другими способами (технологии производства деталей из порошковых материалов рассмотрены ниже).

При конструировании деталей машин учитывают также возможность применения упрочняющей технологии, к основным методам которой относятся: термическая, химико-термическая, термомеханическая обработка, поверхностное пластическое деформирование, нанесение электротермических, химических, неметаллических покрытий и другие специальные виды обработки. Применение, например термообработки, позволяет получить в среднем 20 – 50 % экономии металла. Термическое упрочнение сталей СтЗсп, СтЗпс, ЗГпс повышает их механические характеристики до уровня низколегированных сталей марок 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1. Низколегированные стали после термического упрочнения обладают свойствами никельсодержащих сталей. Это приводит к экономии затрат при производстве и эксплуатации машин.

1.2.2. Сокращение производственных потерь и отходов

Самое большое количество отходов образуется в заготовительных производствах. Потери и отходы при изготовлении отливок из чугуна составляют приблизительно 50 % от массы заливки, в т.ч. безвозвратные потери от 3,5 до 5 % (угар металла – 1,5 – 2 %, потери металла в отходах отработанной смеси – 2 – 3 %). При поковке и штамповке потери имеют место при нагреве, на облой и заусеницы, концевые отходы, окалину и др. При механической обработке 65 – 75 % отходов – это стружка.

Применение прогрессивных методов формообразования позволяет уменьшить объем последующей механической обработки, а в ряде случаев и исключить ее, в результате чего сокращаются непроизводительные затраты металла в заготовительном производстве. Получение точных кузнечно-прессовых заготовок при обработке металлов давлением с использованием прогрессивных методов вместо традиционных методов позволяет получить следующую экономию металла (%):

Штамповка в разъемных матрицах	35
Скоростная штамповка	40
Горячее выдавливание	20
Радиальная ковка	15
Холодное выдавливание	20
Чеканка и калибровка	3
Точные методы разделки металла на заготовки	9

Область применения указанных способов обработки металла давлением приведена ниже.

Важной технологической операцией в формообразовании заготовок является резка металла на заготовки. Отходы при этом разнообразны: опилки при резке на дисковых или ленточных пилах, потери от некратности резки на ножницах. Такие потери составляют 10 – 12 % от общей массы металла.

Применение эффективных методов разделки исходного материала на заготовки является основным резервом экономии металла при резке. Наиболее экономичной является резка механической и ручной ножовками, однако эти способы малопроизводительны и не могут быть применены в крупносерийном и массовом производстве. Для разделки крупных профилей целесообразно получение мерных заготовок холодной ломкой на специальных кривошипных или универсальных гидравлических прессах. При холодной ломке нет отходов, однако этот способ не обеспечивает перпендикулярности плоскости среза к оси, стабильности размера и массы заготовок.

Резку на ножницах применяют преимущественно для заготовок небольшого и среднего диаметра. Этот способ резки почти не дает отходов, но получаемая заготовка имеет деформированные края и неравномерную твердость. В связи с этим заготовки из высокоуглеродистых и легированных сталей приходится дополнительно чеканить, калибровать или отжигать.

Одним из прогрессивных методов разделки профильного проката является резка на пресс–ножницах с предварительным местным индукционным подогревом металла. Опыт применения этого метода взамен разделки без подогрева показывает, что в зависимости от диаметра проката на заготовке в среднем экономится от 70 до 6 000 г металла. Трудоемкость получения 1 тонны заготовок по новой технологии снижается на 60 %.

Весьма перспективными являются методы резки сдвигом в закрытых штампах, с приложением циклических нагрузок и другие. Эффективной мерой экономии металла является также использование получаемых при резке концевых отходов для ремонтно-эксплуатационных нужд, вовлечение их в производство, а также рациональный раскрой металла с целью сокращения отходов при резке из-за некратности числа заготовок размеру проката.

При резке листовых заготовок очень эффективно применение газоплазменной резки или гидрорезания. Эти методы обеспечивают получение малой шероховатости поверхности детали, что позволяет в ряде случаев исключить чистовую обработку.

Важным резервом экономии металла в заготовительном производстве является снижение его потерь на угар и отходы в окалину, которые при однократном нагреве заготовок в пламенных печах составляют 1 – 4 % массы заготовки. При электроконтактном нагреве потери уменьшаются до 0,3 % массы нагреваемой части заготовки, а при нагреве токами высокой частоты – от 0,5 до 1 %. При повторном нагреве заготовок потери металла увеличиваются на 1 – 1,5 % по сравнению с потерями при однократном нагреве.

Потери металла на угар и окалину зависят от конструкции печи и атмосферы в ней, от отношения площади металла к его объему и от других факто-

ров. Перспективным является нагрев металла в защитной или нейтральной атмосфере, предохраняющей металл от окисления и образования окалины. При этом улучшаются физико-химические свойства стали, что увеличивает срок службы деталей, на 10 – 15 % повышается производительность труда. В результате сокращения потерь металла на угар и снижения припусков на механическую обработку экономится около 8 % металла от массы нагреваемой заготовки.

Для предупреждения образования окалины применяют также электрический нагрев заготовок (контактный, индукционный, сопротивлением и другие способы). Наиболее прогрессивным способом нагрева заготовок является индукционный способ. Стоимость нагрева тонны поковок индукционным способом на 18 % ниже по сравнению со стоимостью нагрева в пламенных печах, отходы металла на 14 % ниже, а производительность труда на 30 – 40 % выше.

Объем технологических отходов в виде стружки при последующей механической обработке поковок и штамповок в значительной мере зависит от величин допуска и припуска заготовок. Организация производства заготовок для деталей с минимальными допусками и припусками на обработку или вовсе не требующего дальнейшей механической обработки является одним из путей снижения материалоемкости продукции машиностроения.

Важным звеном заготовительной базы в машиностроении является литейное производство. Через литейные цехи проходит более половины всех черных и цветных металлов.

Экономия металла в литейном производстве достигается, в основном, получением литых заготовок, приближающихся по форме и размерам к готовым деталям. С этой целью применяют точное литье, позволяющее получать литые детали с минимальными припусками на механическую обработку, с более жесткими допусками и гладкой поверхностью. Поэтому в дальнейшей механической обработке часто нет необходимости.

Применение прогрессивных методов литья вместо традиционных позволяет получить следующую экономию металла на 1 тонну деталей, кг:

Литье в кокиль	25
Центробежное литье	30
Литье под давлением	200
Литье по выплавляемым моделям	150
Литье в оболочковые формы	100
Литье из высокопрочного чугуна	80
Машинное формование	30

Применение самотвердеющих смесей для изготовления стержней при производстве 1 т деталей обеспечивает экономию 20 кг металла, а для изготовления форм – 40 кг.

К потерям металла относят также скрап (мелкие частицы жидкого металла, разбрызгиваемые во время его выпуска из вагранок, электропечей, транспортировки и разливки формы и изложницы) и часть металла, остающуюся на дне ковша. Такие потери составляют около 2 % годного литья. Недоливы металла в форму приводят к браку отливок. Этот вид потерь металла составляет 0,3 – 2 % годного литья. В литниковых системах и изложницах остается 1 %

металла от массы годных отливок. Унос металла со шлаком в общем балансе потерь равен 1 – 2 %. Потери стали на угар достигают 1 – 3 % выхода годного литья. Потери указанных видов могут быть значительно уменьшены путем улучшения качества шихтовых материалов, соблюдения режима и сокращения длительности плавки.

1.2.3. Обеспечение устойчивости и стабильности технологических процессов

Выше рассмотрены пути снижения материалоемкости машин в результате применения прогрессивных методов технологии производства. Однако применение таких методов в условиях нестабильности технологических процессов не может обеспечить получение требуемой точности изготовления деталей, а значит, и постоянства их массы. При выполнении технологических операций точность размеров реальной детали и плотность ее материала зависят от многих технологических факторов, поэтому масса реальной детали всегда отличается от расчетной величины.

В табл. 17 систематизированы основные факторы точности деталей, обрабатываемых на металлорежущих станках. В процессе изготовления детали они вызывают производственные погрешности формы, размеров, расположения поверхностей и их шероховатость, а, следовательно, объема и массы детали.

Многие детали машин имеют форму тел вращения (валы, втулки и др.). Для таких деталей изменение массы определяется погрешностью диаметра и его абсолютным значением. Так, при наличии погрешностей диаметра бесступенчатого вала, не выходящих за пределы допусков 14-го качества, погрешность массы для диаметра 10 мм составит около 8 %, а при диаметре 500 мм – около 1 %. При погрешностях в пределах допусков 12-го качества точности, для тех же значений диаметра вала погрешность массы будет составлять соответственно около 5 и 0,3 %, для 11-го качества точности – соответственно около 2 и 0,15 %. Таким образом, с уменьшением диаметра вала погрешность массы резко возрастает. Для втулок, наоборот, с увеличением диаметра погрешность массы возрастает. При наличии погрешностей диаметра в пределах 14-го качества точности погрешность массы для диаметра 400 мм равна 15 %, а для диаметра 200 мм – 10 %.

Из этих примеров следует, что погрешности размеров деталей могут вызывать существенное изменение их массы. При наличии плюсовой погрешности размеров масса деталей возрастает по сравнению с номинальной, вследствие чего увеличивается материалоемкость машины.

Погрешность формы детали – также одна из причин колебания ее объема и массы. Однако, не все погрешности формы детали вызывают изменение объема. Так, коробление детали под действием внутренних напряжений не сопровождается изменением объема. Примером влияния погрешности формы на объем и массу детали может быть зависимость массы и объема бесступенчатого вала, обрабатываемого на токарном станке, от погрешности диаметра по длине детали вследствие причин, указанных в табл. 17.

Факторы точности изготовления деталей

Объект, вызывающий появление погрешностей	Причины погрешностей обрабатываемых заготовок	Погрешности			
		формы	размеров	расположения поверхностей	шероховатости поверхностей
1	2	3	4	5	6
Механическая обработка					
Станок	Износ станка	+	+	+	+
	Пониженная виброустойчивость станка	-	-	-	+
	Погрешность наладки	+	+	+	-
	Температурные деформации станка в процессе работы	-	+	-	-
Приспособление	Погрешность базирования деталей	+	+	+	-
	Погрешность установки деталей	+	+	+	-
	Износ приспособления	+	+	+	-
	Недостаточная жесткость приспособления	+	+	+	+
	Неправильный выбор места приложения и способа осуществления зажимного усилия по отношению к детали	+	+	-	-
	Погрешность установки приспособления на станке относительно режущего инструмента	+	+	+	-
	Неуравновешенность приспособления (для вращающихся приспособлений)	-	-	-	+
Режущий инструмент	Недостаточная точность изготовления и заточки размеров и формы	+	+	+	-
	Размерный износ режущего лезвия	+	+	+	-
	Погрешности установки на станке	+	+	+	-
	Недостаточная жесткость инструмента	+	+	-	-
	Температурные деформации инструмента	+	+	-	-
	Повышенная шероховатость поверхности	-	-	-	+

1	2	3	4	5	6
Деталь (заготовка)	Непрерывный выбор формы, размеров и массы детали	+	+	+	+
	Жесткость детали	+	+	+	+
	Неоднородность материала	+	+	–	–
	Неправильный выбор величины и неравномерность припуска на обработку	+	+	+	–
	Температурные деформации детали в процессе обработки	+	+	–	–
	Внутреннее напряжение в материале	–	+	+	–
	Неуравновешенность детали	+	+	–	+
Режим реза- ния	Неправильный выбор величины подачи и ее непостоянство	+	+	–	–
	Неправильный выбор глубины резания и ее непостоянство	+	+	–	–
	Неправильный выбор скорости резания и ее непостоянство	–	–	–	+
	Неправильный выбор числа подходов	+	+	–	–
	Отсутствие смазывающе-охлаждающей жидкости, когда она необходима	–	–	–	+
Измеритель- ные приборы и инстру- менты	Погрешности изготовления	+	+	+	+
	Износ	+	+	+	+
	Температурные деформации	+	+	+	–
	Недостаточная жесткость	+	+	+	–
Горячая штамповка поковок					
Кузнечно- прессовое оборудование	Износ	+	+	+	–
	Упругие деформации сбор. единиц и деталей при действии сил штамповки	+	+	+	–
	Температурные деформации	+	+	+	–
	Погрешность наладки	+	+	+	–
Штампы	Погрешности изготовления и сборки	+	+	+	+
	Износ	+	+	+	+
	Шероховатость рабочих поверхностей	–	–	–	+
	Осадка полости штампа	+	+	+	+
	Упругие деформации в процессе охлаждения	+	+	+	–
	Температурные деформации	+	+	+	–
	Погрешности установки и выверки штампов	+	+	+	–
Изделие	Неправильный выбор формы, размеров и массы	+	+	+	–
	Температурные деформации при охлаждении	+	+	+	–
	Упругие деформации после штамповки	+	+	+	–
	Окисление поверхности	–	+	–	+

1	2	3	4	5	6
Исходный металл	Неоднородность металла	+	+	+	-
	Непостоянство объема исходной заготовки	+	+	+	-
	Несоответствие формы и размеров исходной заготовки форме и размерам штамповки	+	+	+	-
	Окисление	-	+	+	+
Режим штамповки	Повышенное число кузнечных операций	+	+	+	+
	Нерациональный температурный интервал	-	+	-	+
	Несоответствие требуемому усилию штамповки	+	+	-	-
	Неправильный выбор числа ударов молота (пресса)	+	+	-	+
	Неправильный выбор вида смазывающей жидкости	-	-	-	+
	Нестабильность процесса во времени	-	+	-	-
Нагрев и нагревательное устройство	Неправильный выбор метода нагрева	-	+	-	+
	Неправильный выбор продолжительности и скорости нагрева	-	+	-	+
	Неправильный выбор среды, в которой производится нагрев	-	+	-	+
	Неправильный выбор температуры нагрева	+	+	-	-
Установка для очистки поковок	Истирание поковок при очистке в галтовочных барабанах	+	+	+	+
	Вмятины на поверхности поковки после дробеметных операций	-	+	-	+
	Потери металла в процессе травления поковки	+	+	-	+
Измерительные приборы и инструменты	Погрешности изготовления	+	+	+	+
	Износ	+	+	+	+
	Температурные деформации	+	+	+	-
	Недостаточная жесткость	+	+	+	-
Литье					
Модель	Погрешности размеров и формы модели	+	+	+	-
	Износ модели, коробление	+	+	+	-
	Недостаточная точность пригонки и сборки модели	+	+	+	-
	Повышенная шероховатость поверхности модели	-	-	-	+
Стержневой ящик	Погрешности формы и размеров	+	+	+	-
	Износ, коробление	+	+	+	-
	Недостаточная точность сборки	+	+	+	+
	Повышенная шероховатость поверхности	-	-	-	+

1	2	3	4	5	6
Формовочный станок	Погрешности изготовления и сборки	+	+	+	–
	Погрешности установки модели в станке	+	+	+	–
	Погрешности установки опоки на станке	+	+	+	–
	Износ станка	+	+	+	–
Опоки	Погрешности установки на станке	+	+	+	–
	Смещение опок относительно друг друга	+	+	+	–
	Неплотное прилегание опок	+	+	+	–
Изделие	Неправильный выбор формы, размеров и массы	+	+	+	–
	Неправильный выбор материала изделия	+	+	+	–
Форма	Неправильный выбор способа уплотнения формовочной смеси	+	+	+	–
	Недостаточная плотность набивки формовочной смеси	+	+	+	+
	Деформация формы при извлечении модели	+	+	+	–
	Изменение формы при сушке	+	+	+	–
	Низкое качество окраски и напыления формы	–	–	–	+
	Изменение размеров и формы при заливке металла	+	+	+	+
Стержень	Неправильный выбор способа изготовления	+	+	+	+
	Изменение формы при сушке	+	+	+	–
	Погрешность установки при сборке формы	–	+	+	–
	Изменение размеров и формы при заливке металла	+	+	+	+
Материал стержня	Неправильный выбор состава и физико-механических свойств	+	+	+	+
Технология и режим изготовления отливки	Неправильный выбор способа заливки металла в форму	–	–	–	–
	Неправильный выбор температуры заливаемого металла	+	+	+	+
	Неправильный выбор температуры формы	+	+	+	+
	Неправильный выбор скорости заполнения формы	–	–	–	+
	Неправильный выбор времени охлаждения отливки в форме	+	+	+	–
	Неправильный выбор степени влажности формы	+	+	+	+
	Низкое качество литниковой системы	–	–	–	–
	Неправильный выбор расположения прибылей	–	–	–	–
Измерительные приборы и инструменты	Погрешности изготовления	+	+	+	+
	Износ	+	+	+	+
	Температурные деформации	+	+	+	–
	Недостаточная жесткость	+	+	+	–

Примечания: + есть связь; – нет связи

Погрешности формы вала по длине получаются в виде конусности, бочкообразности, седлообразности, в поперечном сечении – в виде овальности, огранки. Такие погрешности формы обуславливают колебания объема детали и массы, при этом различают погрешность формы двух видов: погрешность, не выходящую за пределы поля допуска, и погрешность, выходящую за пределы допуска в несопряженных местах детали, например, погрешность, обусловленную местными увеличениями диаметра вала, толщины стенок отливок и т.п. У деталей, полученных горячей штамповкой, погрешности формы могут иметь место вследствие различной степени заполнения металлом полости штампа, неравномерного износа штампа, перекоса штампа и других причин (см. табл. 17). У литых деталей погрешности формы обусловлены местными погрешностями модели, а, следовательно, и формы, в которую заливают металл, неоднородностью формовочного состава и другими причинами.

Расчеты показывают, что изменение массы деталей, вызванное изменением их формы, может достигать существенной величины. Так, при эллиптичности в пределах 14-го качества точности для диаметров вала 20 – 500 мм изменения массы составляют 3 – 0,3 %. При эллиптичности в пределах 12-го качества точности для тех же диаметров – 1,5 – 0,15, в пределах 11-го качества – 0,8 – 0,07.

На изменение объема и массы деталей оказывают влияние также погрешности расположения поверхностей. Здесь следует отметить, что не все погрешности положения вызывают изменение массы. Так, отклонение от соосности (эксцентриситет) двух цилиндрических поверхностей не влияет на массу детали, а параллельность или перпендикулярность двух плоских поверхностей призматической детали или торцовое биение цилиндрической детали вызывает изменение массы и отклонение ее от расчетного значения.

В практике машиностроения встречаются два вида погрешностей расположения поверхностей деталей: погрешности, превышающие величину допуска или являющиеся частью этих допусков, не связанные с размерами при сопряжении детали, и погрешности, не зависящие от допусков размеров.

Изменение массы из-за погрешности расположения поверхностей детали может быть определено расчетом. Если погрешностей расположения несколько, изменение массы равно алгебраической сумме ее изменений, подсчитанных по каждому виду погрешностей. Знак определяется в зависимости от того, уменьшает или увеличивает погрешность расчетную массу детали, определенную по ее номинальным размерам.

Шероховатость поверхности – также одна из производственных погрешностей, влияющих на объем и массу реальной детали. Влияние это сказывается в уменьшении расчетного объема детали за счет впадин на обработанной поверхности, так как размеры детали при измерении определяют по вершинам неровностей. При этом учитывают так называемую поперечную шероховатость, так как продольная шероховатость в направлении скорости резания значительно меньше поперечной. Анализ расчетных и экспериментальных данных показывает, что при обработке детали резцом величина изменения ее массы зависит только от величины подачи при резании и от диаметра детали. Относительное

уменьшение массы детали составляет, например, при диаметрах детали 10 и 200 мм и различной высоте шероховатости соответственно 0,2 мкм – 8 % и 0,01 мкм – 0,4 %. Чем меньше диаметр детали и больше величина шероховатости, тем больше относительное уменьшение массы.

Аналогично шероховатость торцовых поверхностей вала влияет на его массу в зависимости от длины вала. Это особенно сказывается при длине вала менее 200 мм.

Стабильность элементов режима резания и факторов, влияющих на микрогеометрию поверхности при обработке, способствует стабильности массы детали. Это особо важно в случаях, когда изделия должны изготавливаться с жестким допуском по массе, а также немаловажно и с точки зрения снижения материалоемкости деталей.

У отливок высота неровностей поверхности зависит в большей степени от качества формовочных материалов. Установлено, что у стальных отливок действительная высота неровностей составляет от 100 до 300 мкм при различной зернистости формовочных песков. У чугунных отливок высота неровностей составляет от 30 до 250 мкм. При этом изменение массы деталей колеблется в пределах от 0,3 до 4,5 %.

Масса детали при постоянном объеме определяется плотностью металла, которая зависит от многих, в том числе и технологических факторов.

Плотность стали у кованных, штампованных деталей и деталей из проката зависит от химического состава стали, микроструктуры, определяемой видом и режимом термической обработки, а также от степени пластической деформации. Если сталь не содержит большого количества легирующих элементов, то плотность ее в зависимости от наличия углерода и от микроструктуры может колебаться в пределах 7,7 – 7,9 г/см³. С увеличением содержания углерода плотность стали уменьшается. Плотность стали уменьшают также алюминий, хром, марганец, а вольфрам, медь, кобальт и никель увеличивают ее. При увеличении степени пластической деформации плотность металла уменьшается.

Плотность металла отливок зависит от большого числа факторов, основными из которых являются следующие: материал отливки, его химический состав, структура металла отливки, конструкция и размеры отливки, толщина стенок, место отбора образца при определении плотности (верх, низ, середина отливки), а также материал, жесткость, степень влажности формы, температура ее при заливке, свойства формовочной смеси, наличие, величина и расположение прибылей. Кроме того, на плотность металла отливок влияют особенности технологии изготовления отливки, в частности температура металла, заливаемого в форму, скорость заполнения формы металлом, время охлаждения отливки в ней, температура отливки при извлечении из формы, способ заливки металла в форму, механическое воздействие на форму в процессе ее заполнения (вибрации), гидростатическое давление металла при заполнении формы (центробежное литье, литье под давлением).

Плотность чугуна зависит главным образом от его состава, степени графитизации, условий первичной кристаллизации. Почти все элементы, встречающиеся в чугуне, особенно элементы с малой плотностью (углерод, кремний,

алюминий), уменьшают его плотность, а элементы, тормозящие графитизацию, увеличивают плотность чугуна. По этим причинам разные типы и марки чугунов имеют плотность от 5,6 до 7,75 г/см³.

Газовая и усадочная пористости оказывают большое влияние на величину плотности. При пластической деформации чугуна, когда устраняется пористость, плотность увеличивается на 3 – 4 %. Степень пористости зависит от состава чугуна, характера кристаллизации и таких технологических факторов, как условия питания формы, толщина отливки, температура заливки, газопроницаемость формы и др.

Из технологических факторов наибольшее значение имеют: жесткость формы, наличие прибылей и гидростатический напор, под которым происходит затвердевание металла. Плотность чугуна в верхних частях крупных отливок может быть на 5 % меньше, чем в нижних частях, а в центре – на 10 % меньше, чем на периферии.

С увеличением толщины отливок плотность чугуна снижается вследствие увеличения пористости и укрупнения графита. Например, увеличение толщины отливки с 20 до 70 мм ведет к снижению ее плотности на 3 %. Понижение температуры перегрева и заливки чугуна также приводит к уменьшению его плотности. Повышение скорости заполнения формы приводит к уменьшению плотности металла, так как при этом увеличиваются размеры кристаллов. С увеличением жесткости формы уменьшается усадочная пористость и увеличивается плотность отливки.

Плотность стали в стальных отливках из-за неоднородности состава и пористости также может быть различной. Неоднородность состава металла и пористость зависят от технологических факторов, процессов кристаллизации металла, условий изготовления отливки.

На плотность отливки оказывает существенное влияние вибрация формы. Например, плотность чугуна, залитого в формы с вибрацией, возрастает на 3 %, а стали – более чем на 5 %. Плотность отливок, полученных центробежным способом, выше плотности отливок, полученных в песчаных формах.

Из проведенного выше анализа следует, что на массу детали в процессе ее изготовления оказывает влияние большое количество факторов. Учет и использование действия этих факторов позволяет снизить материалоемкость деталей и изделия в целом.

Важное значение при изготовлении изделий с заданной массой имеет устойчивость и стабильность технологических процессов, под которыми понимают свойство технологических процессов сохранять во времени точность изделия по массе и постоянство распределения массы во времени. С этой целью используют методы, обеспечивающие изготовление деталей с заданным допуском для массы.

В табл. 18 перечислены основные методы изготовления отливок, горячештампованных поковок и деталей, подвергаемых механической обработке на металлорежущих станках, с заданной точностью по массе.

Эффективным способом уменьшения погрешности массы деталей является повышение качества точности их изготовления. Так, для деталей, обраба-

тываемых на металлорежущих станках, например при обтачивании вала диаметром 50 мм по 14-му качеству точности, наибольшая погрешность массы составляет около 3 %. При обтачивании по 12-му качеству точности – примерно 1,6 %, по 11-му качеству точности – около 1 %. Точность по массе при переходе с 14-го качества на 12-й и с 12-го качества на 11-й возрастает в 2 раза. Однако, как известно, повышение точности приводит к повышению себестоимости обработки. Поэтому переход на обработку по более высокому качеству точности должен быть экономически обоснован.

Погрешности формы при обработке фасонных поверхностей могут быть снижены при обеспечении постоянства формы фасонного режущего инструмента, формы копиров или при стабильности специальной настройки станка, а также при повышении жесткости технологической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь».

Таблица 18

Методы, обеспечивающие изготовление деталей
с заданными отклонениями по массе

Метод	Способ формообразования деталей		
	Механическая обработка на металлорежущих станках	Литье	Горячая объемная штамповка
1	2	3	4
Повышение качества точности изготовления детали	+	+	+
Переход на другой технологический способ изготовления детали, обеспечивающий более высокую точность	+	+	+
Соблюдение технологической дисциплины, обеспечивающей стабильность технологии изготовления и технологических режимов	+	+	+
Подгонка по массе	+	+	+
Контроль за износом штампов по массе поковок и ограничение износа штампов	–	–	+
Расчет и контроль штампов по массе поковок (штамповок) перед пуском в работу	–	–	+
Расчет и корректировка размеров литейной оснастки, исключаящие повышение массы отливок	–	+	–
Контроль литейной оснастки по массе отливок перед пуском в работу и в процессе работы	–	+	–

Примечания: + есть связь; – нет связи.

Известно, что не все размеры детали при обработке на металлорежущих станках выполняются с высокой точностью и не все поверхности – с малой шероховатостью. Высокая точность и низкая шероховатость достигаются в процессе обработки только ответственных поверхностей, а часть поверхностей во-

обще не обрабатывается. В результате этого, как правило, превышение массы составляет от 1 до 20 % .

Размеры, форма, объем и масса горячештампованных деталей зависят от размеров и формы полости штампа, которые вследствие износа постепенно изменяются. По мере увеличения износа штампа масса поковок увеличивается, что приводит к перерасходу металла и увеличению неоднородности по массе поковок. Износ штампа приводит к повышению материалоемкости на 5 – 15 %.

Форма, размеры и масса отливок зависят от формы и размеров литейной оснастки (моделей, стержневых ящиков, кокилей и др.). Опыт показывает, что наружные размеры отливок имеют отклонения в сторону увеличения, а внутренние – в сторону уменьшения. Это приводит к увеличению объема и массы отливок. Для использования этого резерва экономии металла корректируют размеры литейной оснастки, уменьшая наружные и увеличивая внутренние размеры в пределах 0,5 – 2 %. Модели, стержневые ящики или пресс-формы, использование которых ведет к повышению массы отливки, должны быть исправлены или изъяты.

В ряде случаев для получения деталей заданной массы применяют такую технологическую операцию, как устранение излишней массы или подгонка по массе. Операция состоит в снятии лишнего металла с поверхности, изменение размера которой не нарушает прочности и других свойств детали. Удаление лишнего металла производится точением, фрезерованием, строганием, сверлением или другим способом обработки. Подгонка по массе применяется только для тяжеловесных деталей. Экономическая целесообразность подгонки по массе обусловлена следующим условием. Если производственные затраты на снятие лишнего металла деталей меньше суммы затрат, связанных с изготовлением и эксплуатацией машины, отнесенных к единице ее массы, то удалять излишнюю массу целесообразно и необходимо.

Для устранения излишней массы сборочных единиц и машин кроме подгонки по массе деталей, применяют также подбор деталей с предварительной сортировкой их по массе, используют технологические компенсаторы или применяют другие приемы.

В последнее время в массовом производстве широко используются роботы и манипуляторы. Они характеризуются высокой эффективностью использования, способствуют уменьшению материалоемкости продукции вследствие снижения технологических потерь на некоторых видах операций и потерь от брака, что, в свою очередь, обеспечивается исключением субъективизма при выполнении операций. В частности, в случае применения роботов и манипуляторов строго соблюдаются нормы расхода материалов и режимы технологических процессов. Так, в процессе использования робота при окраске сложных поверхностей экономится красящий материал за счет более равномерного его нанесения, на сварочных операциях экономятся сварочные материалы (сварочная проволока, электроды, флюс).

При обслуживании манипулятором операций штамповки увеличивается срок службы штампов в результате исключения случайностей, более точной установки заготовок в требуемое место в заданном положении. Исключается

проявление индивидуальных особенностей оператора (утомляемости, ослабления внимания, небрежности и др.), ведущих к увеличению брака.

1.2.4. Экономия металла в инструментальном производстве

В современном машиностроении применяется широкая номенклатура инструментов, затраты на изготовление которых составляют до 8 % стоимости выпускаемой продукции. Более 75 % необходимой инструментальной оснастки, как правило, изготавливают мелкими сериями непосредственно на машиностроительных заводах. Пути и методы экономии материалов при производстве и эксплуатации инструментов многообразны, но все они сводятся к уменьшению металлоемкости инструмента и оснастки, повышению их надежности в работе, к снижению расходов в производстве и эксплуатации. С этой целью, например, инструмент изготавливают сборным. Из быстрорежущей стали изготавливают только режущую часть, а для крепежной части используют обычную конструкционную сталь 45 или близкую ей по составу.

В последнее время широко используется упрочнение поверхностного слоя режущего инструмента путем диффузионного насыщения определенными элементами (азотирование, борирование, фосфатирование, сульфидирование и др.). Эффективны также методы покрытия режущего инструмента твердыми сплавами (электроискровой, электроразрядный). Разработан прогрессивный способ изотермической закалки быстрорежущей стали, позволяющий получить инструмент с повышенной пластичностью и прочностью.

Уменьшение металлоемкости обеспечивается в случае применения инструмента, изготовленного методом литья, так как его износоустойчивость выше, чем при изготовлении из ковanej стали. Поскольку форма литой заготовки почти идентична форме готового инструмента, а отходы в виде литников и забракованных отливок возвращаются для повторного использования, потери и отходы стали при литье не превышают 15 %, тогда как при массовом производстве инструмента из проката они составляют более 40 %. Себестоимость литого инструмента примерно в 2 раза ниже себестоимости инструмента, изготовленного методом фрезерования.

Важное значение в снижении расхода металла имеет применение унифицированной технологической оснастки, поскольку в этом случае обеспечиваются высокий уровень повторного использования такой технологической оснастки и возможность быстрой ее переналадки при смене обрабатываемых деталей или сборочных единиц.

Практика свидетельствует, что применение оснастки и инструмента, изношенных сверх допустимых пределов, влечет за собой большие погрешности геометрических размеров готовых деталей и узлов. Это приводит к повышению выпуска бракованных изделий, что увеличивает материалоемкость продукции. Кроме того, погрешности в сторону увеличения геометрических размеров деталей повышают массу деталей, а значит, и их материалоемкость. Следовательно, кажущаяся экономия материала за счет использования изношенного инструмента фактически приводит к росту материалоемкости продукции.

1.2.5. Повышение надежности машин при их производстве

Организация производства изделия, применяемые технологические процессы и методы контроля оказывают решающее значение на показатели его надежности. Все компоненты технологического процесса (метод обработки, применяемое оборудование, последовательность операций, режимы обработки и др.) определяют показатели качества изделия (точность и шероховатость поверхностей, механические свойства и др.). Известно, что аналогичные детали, изготовленные различными методами, имеют разный предел усталости, даже если для них был применен один и тот же материал с одинаковыми прочностными характеристиками.

Показатели качества изделия, сформированные в процессе производства, определяют такие его эксплуатационные свойства, как, например, износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость, теплостойкость.

Влияние технологического процесса на показатели надежности изделия – это сложный и многоэтапный процесс, до настоящего времени еще не полностью изученный. В ряде случаев надежность изделий снижается из-за нестабильности и несовершенства технологии. Современные технологические процессы изготовления изделий, начиная от обработки заготовок и кончая финишными операциями, сопровождаются, как правило, значительными силовыми и температурными воздействиями, которые вызывают изменение свойств изделий, появление в них остаточных напряжений, дефектов типа трещин, раковин, зазубрин, искажение структуры материала. Например, при шлифовании имеется опасность появления прижогов – местных изменений структуры поверхностного слоя металла, как следствие мгновенного воздействия высоких температур, возникающих в зоне резания. В месте прижога происходят отпуск металла или закалка с отпуском, изменение микротвердости и возникновение остаточных напряжений. Температура, влияющая на образование прижогов, в свою очередь, зависит от режимов (например, от величины подачи) и условий шлифования (охлаждение, твердость круга). Кроме того, следует учитывать, что на поверхности готовой детали остаются лишь те прижоги, глубина которых больше припуска на шлифование. Таким образом, всегда можно создать такие условия проведения технологического процесса, при которых отклонения характеристик изделия будут находиться в допустимых пределах, т.е. возникновение дефектов будет исключено.

Параметры технологических процессов оказывают влияние на износостойкость поверхностей, усталостную прочность, и коррозионную стойкость деталей и изделий в целом. Как показано выше, износостойкость зависит от состава, структуры и механических характеристик материалов, на которые влияют виды технологической обработки. Кроме того, износостойкость определяется геометрическими и физико-химическими параметрами поверхностного слоя, которые формируются во время выполнения технологического процесса. Отклонения формы деталей увеличивают период макроприработки, а шероховатость поверхности влияет на период микроприработки. В процессе приработки устанавливается оптимальная шероховатость поверхности, соответствующая

конкретным условиям работы сопряжения. Повышение стабильности технологического процесса и контроль, исключающий изготовление изделий с параметрами, не соответствующими заданным, обеспечивают выпуск надежных изделий.

На усталостную прочность деталей влияют механические свойства материала, состояние его поверхностных слоев и наличие дефектов. Например, при механической обработке в поверхностном слое детали возникают растягивающие остаточные напряжения, которые снижают предел выносливости. В случае применения технологических процессов, создающих сжимающие усилия, прочностные характеристики деталей улучшаются. Это влияние следует обязательно учитывать в случае изготовления деталей, работающих при знакопеременных нагрузках и высоких температурах.

Известно, что параметры шероховатости обработанной поверхности оказывают существенное влияние на сопротивление усталости. В общем случае предел усталости повышается при снижении шероховатости поверхности. Кроме того, на этот показатель влияет направление следов обработки. При его совпадении с направлением действия возникающего напряжения предел усталости выше. Финишная обработка поверхности, которая определяет конфигурацию микроскопических рисок и механические свойства поверхностного слоя, существенно влияет на предел выносливости даже при одинаковой шероховатости поверхности.

Как отмечалось выше, для защиты металлов от коррозии широко применяют различные виды покрытий – электролитические, химические, полимерные. Коррозионная стойкость этих покрытий, находящихся под воздействием агрессивных сред, зависит не только от вида покрытия, но и от режима их нанесения, условий, в которых осуществляется технологический процесс, а также от возможности регулировать и контролировать протекание этого процесса. Коррозионная стойкость покрытий определяется их однородностью по составу, стабильностью по толщине, сплошностью, что определяется условиями выполнения технологического процесса.

Полимерные покрытия часто выполняют многослойными. В этом случае стойкость покрытия существенно зависит от режимов обработки.

Интенсивные коррозионные разрушения характерны для конструкций, работающих в жидких средах, вызывающих электрохимическую коррозию. Особенно опасный вид разрушений – коррозионное растрескивание – возникает при одновременном действии коррозионной среды и статических или повторно-статических нагрузок. При этом свойства металла, определяющие его восприимчивость к коррозионному воздействию среды, непосредственно связаны с параметрами технологического процесса.

В ходе выполнения технологических операций при изготовлении изделия может значительно снизиться начальная термодинамическая и электрохимическая устойчивость металла, например, из-за появления неоднородности его структуры, изменения физических и других свойств.

Одной из основных особенностей технологического процесса является взаимодействие его качественных и количественных показателей. При осу-

ществлении любого технологического процесса обычно стремятся обеспечить и требуемый уровень качества, и высокую производительность процесса. Однако нередко повышение производительности может привести к снижению качества и, наоборот, более высокое качество может быть получено в результате снижения производительности. В каждом конкретном случае выбирают наиболее оптимальное сочетание этих показателей и обеспечивают надежность технологического процесса как по качественным, так и по количественным показателям. Надежность технологического процесса связана с надежностью осуществления отдельных операций, особенно финишных, которая, в свою очередь, зависит от технологической надежности оборудования, организации методов контроля, уровня развития данного технологического процесса.

Технологическую надежность оборудования характеризуют его геометрическая точность, жесткость, виброустойчивость и другие параметры, которые определяют точность обработки, качество поверхности и физические характеристики материала обрабатываемой детали. Хотя показатели качества изготавливаемых изделий зависят не только от оборудования, но и от технологической оснастки, инструмента, квалификации рабочего и других причин, технологические возможности оборудования имеют определяющее значение. Поэтому применение прогрессивного оборудования, а также сохранение его параметров в процессе работы – необходимое условие надежности осуществления технологического процесса. Одним из основных методов обеспечения надежности технологического процесса является контроль качества и надежности продукции в процессе ее изготовления. Контроль должен охватывать все стадии производства и испытаний изделий.

1.3. Направления снижения материалоемкости машин на этапе изготовления

Цель – описать, обосновать и доказать целесообразность выбора прогрессивных методов получения заготовок, методов упрочнения деталей машин или изготовления этих деталей нетрадиционными методами путем формообразования их из порошков или пластмасс.

Как уже отмечалось в начале раздела 1, расход материалов на изготовление машины определяется зависимостью:

$$M_{\text{м.произв.}} = \sum_{i=1}^n M_{\text{деталей}} + M_{\text{тех.отх.}} + M_{\text{потерь}},$$

где $\sum_{i=1}^n M_{\text{деталей}}$ – расход материалов на изготовление n деталей машины;

$M_{\text{тех.отх.}}$ – расход материалов на технологические отходы;

$M_{\text{потерь}}$ – расход материалов из-за потерь в ходе производства (брак при изготовлении, потери при транспортировании и хранении и т.д.).

Отходы и потери могут быть технологическими (стружка, угар металла при плавке и нагреве, технологический брак), а также организационными (по-

тери при транспортировании, складировании и хранении). Этапами изготовления деталей машин, где могут появиться отходы и потери материалов, являются следующие: заготовительный; механическая обработка со снятием стружки; термическая или химико-термическая обработка.

Наибольшее количество отходов и потерь имеет место при производстве заготовок, а от рациональности выбора метода получения заготовки во многом зависит и объем стружки, снимаемый при последующей механической обработке. Так, лишь за счет выбора рационального способа получения заготовок можно достичь значительной экономии, например, замена проката постоянного сечения периодическим (так называемый метод поперечно-винтовой прокатки) позволяет снизить материалоемкость до 20 %, а иногда вообще исключить механическую обработку. Использование проката поперечно-винтового вместо проката постоянного сечения с фрезерованием профиля изделия обеспечивает экономию до 50 – 70 %.

Потери и отходы при изготовлении чугунных отливок составляют до 50 % от массы заливаемого металла, в т.ч. безвозвратные потери от 3,5 до 5 %, угар металла 1,5 – 2 %, потери металла в отходах отработанной смеси 2 – 3 %.

При штамповке и ковке отходы образуются при нагреве, на заусенцах, в облое и концевых отходах. При механической обработке 65 – 75 % отходов образуется в виде стружки. Основной резерв экономии металла в заготовительном производстве – сокращение отходов металла при формообразовании литых и штампованных заготовок.

Прогрессивные формообразующие методы позволяют уменьшить объем последующей механической обработки, а иногда и исключить ее вообще.

Рассмотрим некоторые пути уменьшения слагаемых в зависимости для определения расхода материалов на изготовление машины $M_{м.произв.}$.

1. Использование рациональных способов получения заготовок, методов и режимов упрочнения деталей.
2. Применение рациональных сортментов и марок материалов.
3. Повышение в оптимальных пределах точности изготовления деталей.
4. Разработка и применение прогрессивных конструкторских решений, на основе использования малоотходной и безотходной технологии изготовления.
5. Вовлечение в производство отходов материалов.

Приведенные выше цифры отходов и потерь материалов при производстве заготовок требуют обратить внимание на первый путь уменьшения расхода материалов на изготовление машины $M_{м.произв.}$. Поэтому в следующем подразделе рассмотрены основные методы получения заготовок литьем и штамповкой и резервы экономии.

1.3.1. Способы производства заготовок

Способов производства заготовок в машиностроении несколько: литье,ковка, штамповка и порезка проката на части. Одним из основных способов производства заготовок является **литье**. Характеристика различных способов литья по данным М. А. Калинина приведена в табл. 19.

Сравнительная характеристика различных способов литья
при серийном производстве

Способ литья	Вес отливки, кг, не более	Точность, квалитет		Шероховатость поверхности R_a , мкм (ГОСТ 2789–89)		Припуск на механическую обработку на сторону, мм	Объем последующей механической обработки в % от общей трудоемкости изготовления	Относительная себестоимость 1 тонны отливок	Количество отливок в наименьшей партии при обычном процессе, шт.
		Сталь и чугун	Алюминиевые сплавы	Сталь и чугун	Алюминиевые сплавы				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
В песчаные формы при ручной формовке	100	14 – 18	14 – 16	80 – 20	8 – 20	3 – 7	50 – 80	1,0	1
В песчаные формы при машинной формовке	100	12 – 16	12 – 14	80 – 10	80 – 10	2,5 – 4	50 – 80	1,0	20 – 30
В металлическую форму (в кокиль)	100	14 – 16	12 – 14	80 – 40	80 – 10	1 – 3	40 – 60	–	50 – 500
Центробежное литье	100	14 – 16	12 – 14	80 – 40	80 – 10	1 – 2	25 – 40	–	25 – 100
В облочные формы	10	14 – 16	12 – 14	80 – 10	40 – 5	1 – 2	25 – 40	2 – 2,5	500 – 5 000
По выплавляемой модели	1	12 – 14*	–	40 – 5*	–	0,3 – 1	10 – 20	7 – 10	более 100
Штамповка деталей из жидкого металла	10	12 – 16	14 – 16	80 – 10	80 – 10	0,5 – 1	–	–	300 – 500
Под давлением	1	12 – 14*	12 – 16	20 – 5*	20 – 5**	0,1 – 0,5	5 – 10	15 – 25	1 000 – 2 000

* Для сплавов

** При применении цинковых сплавов шероховатость поверхности достигает $R_a = 5 \dots 1,25$ мкм.

Литье в песчаные формы является универсальным методом как в отношении применяемых литейных материалов, так и в отношении веса и габаритных размеров деталей. В песчаные формы нецелесообразно отливать очень мелкие детали сложных конструкций. При литье в песчаные формы самой трудоемкой операцией является изготовление формы. Повышение производительности труда при формовке достигается механизацией процесса и правильным выбором рода формы (из какого сырья, подсушенная или сухая). Так, набивка 1 м³ формовочной смеси вручную занимает 1,5 – 2 часа. Применение пневматической трамбовки сокращает это время до 1 часа, а пескометом – до 6 мин. Встряхивающие машины ускоряют набивку по сравнению с ручной в 15 раз, а прессовые – в 20 раз. Трудоемкость формовки на поточной линии на 20 % ниже, чем при обычной пескометной формовке, и на 60 % ниже, чем при ручной.

Процесс изготовления отливок в песчаные формы хотя и механизирован, но еще недостаточно автоматизирован. В ЦНИИТМАШе создана новая прогрессивная технология литейного производства, заключающаяся в том, что в песчаные смеси вводят химические добавки, под действием которых смеси переходят в «жидко-подвижное» состояние. Это позволяет вместо набивки и уплотнения смеси, как выполнялось по традиционной технологии, осуществлять заливку жидкой смеси в стержневые ящики или на модели. Такая технология повышает производительность труда, снижает трудоемкость изготовления стержней и форм в 3 – 5 раз, исключает ручной труд и позволяет полностью механизировать, а при необходимости автоматизировать изготовление стержней и форм независимо от их размеров, формы и номенклатуры.

Литье в оболочковые формы целесообразно применять главным образом для получения ответственных фасонных отливок. Для снижения расхода дорогостоящей смолы применяют двухслойные формы, в которых из смеси с большим содержанием смолы изготавливают только внутреннюю оболочку с толщиной стенки 1,5 – 2 мм. Оболочковые химические твердеющие формы (толщина стенки формы 10 – 20 мм) позволяют использовать дешевые материалы: песок, жидкое стекло и углекислоту. Стекланные оболочковые формы позволяют получить точные отливки с малой шероховатостью поверхности из латуни, углеродистых и нержавеющей сталей, из алюминиевых, кобальтовых и хромистых сплавов. Выход годного литья увеличивается в 1,5 – 2 раза (в сравнении с литьем в песчаные формы) из-за снижения брака, масса отливок на 15 % меньше, припуски – в 2 раза ниже, трудоемкость уменьшается в 4 – 5 раз.

Литье в металлическую форму (кокиль) экономически целесообразно при величине партии не менее 300 – 500 шт. для крупных отливок. Количество деталей в партии при серийном производстве может быть снижено путем уменьшения затрат на изготовление формы, унификацию и нормализацию деталей форм, уменьшение числа стержней. В случае применения форм с литыми рабочими поверхностями (производится только механическая обработка поверхностей сопряжения) с невысокой точностью и грубой шероховатостью отливки серийность для мелких отливок может быть снижена до 100 – 200 шт.

Литье по выплавляемым моделям является экономически целесообразным при получении литых деталей очень сложной формы из любых сплавов.

Применение этого способа позволяет во многих случаях заменять сборочные единицы нескольких деталей одной цельнолитой деталью.

Литье по растворяемым моделям (изготавливаемым из легкоплавких и растворимых в воде солей, например, калийной или натриевой селитры) может быть широко использовано в серийном производстве с применением групповой отливки деталей. Модели легко удаляются из формы растворением в воде; модельный состав не является дефицитным.

Литье под давлением применяется в основном для производства фасонных отливок из цветных сплавов. При использовании форм-блоков со сменными вкладышами способ можно считать целесообразным при производстве 100 – 500 отливок. Использование групповых форм-блоков с вкладышами из красной меди обеспечивает рентабельность получения отливок при партии всего в 100 – 200 деталей.

При получении небольших партий отливок пресс-формы целесообразно изготавливать из алюминия способом штамповки жидкого металла по эталону деталей, что в 8 – 10 раз сокращает трудоемкость изготовления пресс-формы по сравнению с механической обработкой и последующей ручной доводкой.

Литье под давлением по точности и производительности превосходит все современные способы литья. У отливок формируется самая малая шероховатость поверхности. Толщина стенок у этих отливок из алюминиевых, цинковых и магниевых сплавов может быть 1 – 5 мм, а масса от нескольких грамм до 100 кг. В процессе литья можно получать отверстия диаметром 1,5 мм и выше, наружные и внутренние резьбы. Обычно после литья под давлением ведется только чистовая механическая обработка. Экономия металла в сравнении с другими способами литья достигает до 30 %, а затраты могут быть минимальны (табл. 20).

Таблица 20

Стоимость отливок, полученных литьем под давлением

Размер серии, шт.	Затраты на алюминиевую деталь, марки ФРГ	Затраты на стальную деталь, марки ФРГ
500	20,0	17,0
1 000	10,0	10,0
5 000	3,0	5,0

Центробежное литье получило распространение при изготовлении литых заготовок, имеющих форму тел вращения. Способ применяется также при отливке фасонных заготовок, не являющихся телами вращения. Этот способ становится целесообразным и при мелкосерийном производстве в случае применения сменных изложниц.

При конструировании отливок (с учетом оптимальной долговечности) следует обратить внимание на некоторые вопросы, относящиеся к технологичности конструкции литых заготовок. Необходимо установить, какую роль играет отливка в машине, и на основании этого решить, не целесообразнее ли изготовить деталь из прессованного порошка; соединить несколько деталей (не обязательно литых) в одну отливку, что имеет большое значение при массовом и

крупносерийном производстве. Определяя форму и размеры отливки, необходимо стремиться получить компактную заготовку без значительных выступающих частей, которые могут задерживать усадку во время остывания. Следует избегать соединения в одну отливку крупных деталей простой формы с массивными стенками и мелких деталей повышенной точности.

Соединение в одну отливку мелких деталей повышенной точности может быть прогрессивно, если изготовление комбинированных отливок производить способами литья под давлением и по выплавляемым моделям.

При конструировании крупных отливок необходимо также принимать во внимание технологические возможности цехов: литейных (производительность и размер плавильных печей, сушил и т.д.), механических (размеры металлообрабатывающих станков), а также условия монтажа и транспортирования (грузоподъемность кранов, размеры железнодорожных вагонов и т.д.). При конструировании стальных отливок следует учитывать возможность изготовления деталей комбинированным способом (путем сварки в одно целое нескольких отливок и частей из труб, листового или фасонного проката).

Основным способом производства заготовок из сталей является **ковка** и **штамповка**. Поковки могут быть получены ковкой в подкладных штампах, штамповкой в закрепленных штампах и специальными методами. Значительная экономия металла при изготовлении некоторых деталей достигается при применении совмещенной штамповки и использовании отходов. Если от детали не требуется мелкозернистая структура, а механические свойства удовлетворяют требованиям независимо от температуры окончания штамповки, то заканчивать штамповку следует при повышенной температуре. Для деталей, например, из углеродистой стали эти требования позволяют повысить производительность труда на 10 – 15 %, сократить машинное время на 25 – 30 %, повысить стойкость штампов и облегчить заполнение ручья.

Точность деталей, выполняемых объемной холодной штамповкой, может быть получена в пределах 8 – 12-го качества, а шероховатость поверхности – до $R_a = 1,25$ мкм. Точность листовой штамповки в совмещенном штампе от $\pm 0,02$ до $\pm 0,08$ мм, в последовательном – от $\pm 0,1$ до $\pm 0,3$ мм и отдельном – от $\pm 0,3$ до $\pm 0,5$ мм. При листовой штамповке эффективно использовать групповые штампы (целесообразны при партии деталей 70 – 80 шт.).

Ковка на ротационно-ковочной машине сводится к периодическому обжатию и вытягиванию по уступам предварительно нагретой или холодной прутковой или трубной заготовки при помощи последовательных и быстрых ударов несколькими (двумя – четырьмя) бойками. Ковка может быть как горячей, так и холодной. При холодной обработке точность колеблется от $\pm 0,02$ до $\pm 0,2$ мм, а шероховатость поверхности соответствует $R_a = 1,25$ мкм; при горячей обработке точность составляет от $\pm 0,05$ до $\pm 0,3$ мм и шероховатость поверхности – в пределах $R_a = 80 \dots 40$ мкм.

Процесс горячей штамповки сводится к нагреву заготовки для придания металлу необходимой пластичности и последующему деформированию его. В результате нагрева резко снижаются прочностные характеристики и возрастают характеристики пластичности металла, подлежащего деформированию. Про-

цесс горячей штамповки осложняется тем, что деформируемая заготовка, соприкасаясь с массой холодного металла штампа, остывает и теряет пластичность. Поэтому процесс пластического деформирования должен осуществляться в возможно более короткий промежуток времени. Для этого принимается ряд технологических и конструктивных мер. Стенки штамповок должны иметь по возможности большую толщину, сопряжения стенок должны быть плавными, следует избегать резких изменений направлений течения металла при заполнении ручьев штампа.

Форма детали, предназначенной для штамповки, должна допускать возможность разделения ее по максимальному сечению на две желательные равные части. Это сечение при проектировании штампа обычно принимают за плоскость разреза. Соблюдение этого технологического требования при проектировании детали упрощает конструкцию штампов. Формы всех этих элементов проектируемой детали должны быть увязаны с наиболее выгодной линией разреза. Таким образом, для получения технологичной штампуемой детали надо обеспечить условие, чтобы ее конструкция способствовала облегчению течения металла по ручьям штампа. В этом случае не будет возникать больших препятствий к перемещению металла в пластичном состоянии и резких нарушений теплового равновесия.

Как показывают эксперименты, когда металл в процессе деформирования заполняет углубления, образуются естественные радиусы. Эти естественные радиусы для стальных заготовок находятся в пределах $r = 8 \dots 10$ мм. При заполнении металла в штампе с радиусами $r = 8 \dots 10$ мм необходимое давление не зависит от этого радиуса, но резко возрастает с его уменьшением.

Из теории пластического деформирования известно, что давление при осадке зависит от соотношения диаметра поперечного сечения B заготовки (или ширины) к ее высоте при осадке H . С увеличением этого отношения резко возрастает необходимое давление. Анализ физико-механических процессов, сопровождающих пластическое деформирование металлов при горячей штамповке, позволяет сформулировать основные требования, которые должны быть учтены при конструировании штампуемых деталей. Для сокращения механической обработки максимально возможное количество поверхностей штампованных деталей должно предусматриваться (при их конструировании) без последующей механической обработки. Допуски на изготовление штамповок из черных металлов на различных видах кузнечно-прессового оборудования устанавливаются ГОСТом 7505–89. Припуски и допуски на поковки общего назначения, изготавливаемые свободной ковкой на молотах из углеродистой и легированной стали при единичном и мелкосерийном производстве регламентированы ГОСТом 7829–89, а на поковки весом до 35 т, изготавливаемые свободной ковкой на прессах – ГОСТом 7062–89. Как показывает практика, в конструкциях машин часто предусматривают излишнюю точность и шероховатость поверхности, что требует применения механической обработки, которая значительно усложняет и удорожает изготовление машины.

В конструкциях штамповок следует избегать резких переходов по поперечным сечениям. Желательно, чтобы плоскости поперечных сечений по длине

штамповки изменялись не более чем в отношении 1:3. При большем перепаде необходимо обязательно предусматривать плавные переходы. Несоблюдение этого требования затрудняет течение металла по ручьям штампа или требует введения припусков под последующую механическую обработку. Это не только усложняет изготовление детали, но и приводит к перерезанию волокон при механической обработке, что снижает долговечность детали. На внутренних и внешних углах и кромках штамповки следует предусматривать достаточные радиусы или галтели. В конструкциях штамповок нежелательно иметь тонкие полки, особенно расположенные в плоскости, параллельной плоскости разъема. При штамповке таких деталей требуется очень большая деформирующая сила либо большое число ударов молота, что приводит к быстрому износу штампов и удлинению процесса штамповки. Желательно, чтобы конструкция детали предусматривала плоскость разъема, проходящую по плоской, а не ломаной или криволинейной поверхности. В плоскости разъема должны лежать два наибольших габаритных размера штампуемой детали.

Технические требования на поковки общего назначения диаметром (толщиной) до 800 мм из конструкционной углеродистой, низколегированной и легированной стали, получаемые свободной ковкой и горячей штамповкой, регламентированы ГОСТом 8479–89.

Подводя итоги анализа методов обработки металлов давлением (ОМД), следует отметить, что рациональный выбор одного из них может обеспечить существенную экономию металла (табл. 21).

Таблица 21

Экономия металла при ОМД

Метод ОМД	Экономия, %
Штамповка в разъемных матрицах	35
Скоростная штамповка	40
Горячее выдавливание	20
Радиальная ковка	15
Холодное выдавливание	20
Чеканка и калибровка	3
Точная разделка металла для получения заготовок	9

Заготовки можно получать непосредственно из проката или стальных профилей. Сортовой прокат – круглый, квадратный, шестигранный, прямоугольный, листовой и трубный – целесообразно применять для изготовления гладких и ступенчатых валов с небольшой разницей диаметров, крепежных изделий, деталей типа рычагов, тяг, втулок и т.п. Профильный прокат целесообразно применять для изготовления балок, кронштейнов, полок и т.д.

Фасонный прокат позволяет сократить объем обработки на 30 – 40 %, сэкономить металл и снизить трудоемкость изготовления деталей на 20 – 30 %.

Периодический продольный и поперечно–винтовой прокат целесообразно применять для изготовления заготовок в виде многоступенчатых валов, полых профилированных трубчатых заготовок, шаров.

Изготовление профиля зубьев зубчатых колес методами холодного и горячего накатывания по сравнению с изготовлением резанием позволяет повысить выносливости зуба до 20 % путем ориентации волокон материала; сэкономить до 20 % металла и снизить затраты на изготовление зубчатых колес на 20 – 25 %. Для повышения надежности необходимо использовать также прогрессивный метод точной объемной горячей штамповки зубчатых колес с одновременным формообразованием зубьев на обычном кузнечно-прессовом оборудовании. Это позволяет снизить общие затраты на изготовление конических зубчатых колес на 10 – 12 %, а цилиндрических – на 30 – 32 %.

Изменение основных свойств металлов при формообразовании заготовок давлением. На основании исследований установлено, что с увеличением степени обжата прочность и твердость увеличиваются, а пластичность и ударная вязкость уменьшаются. При степени обжата 80 – 90 % предел прочности достигает максимума. При обжати тонкой стальной проволоки на 90 – 95 % можно увеличить предел прочности до 2 500 – 4 000 Н/см². Пластическое деформирование влияет не только на статические, но и на усталостные свойства металла. Как показали исследования Н.И. Черняка, растяжение при малом относительном удлинении снижает предел выносливости. Для стали 45 это снижение происходит в интервале относительного удлинения от 0 до 2,0 %; для стали 40Х – до 8,0 %. Дальнейшее увеличение степени пластической деформации приводит к росту предела выносливости указанных сталей примерно до уровня, соответствующего недеформированному состоянию стали.

Известно, что реальные металлы являются структурно неоднородными, а пластическая деформация увеличивает неоднородность. Это вызывает повышение свободной энергии металла и приводит к его неустойчивому состоянию, в результате чего в металле возникают такие процессы, которые стремятся перевести его в состояние с наименьшим запасом энергии. К этим процессам относят: диффузионный процесс, характеризующийся выравниванием химического состава; снятие упругих искажений в кристаллической решетке, называемое возвратом; рекристаллизацию и др.

В связи с протеканием этих процессов, металл становится более однородным как в структурном отношении, так и по химическому составу. В некоторых металлах (таких как олово, свинец и т.д.) эти процессы происходят при нормальной температуре. В таких металлах, как железо и сталь, – они происходят только при нагреве, причем процесс возврата протекает при сравнительно невысоких температурах. Наиболее устойчивой является структура рекристаллизованного металла.

Абсолютная минимальная температура рекристаллизации T_p для всех металлов определяется по известной формуле А.А. Бочвара: $T_p = 0,4 \cdot T_{пл}$ (где $T_{пл}$ – абсолютная температура плавления). Как видно, температура начала рекристаллизации деформированного металла непостоянна и зависит от степени предварительной деформации. Металл с малой степенью деформации рекристаллизуется при более высоких температурах, чем металл с большой степенью деформации.

При минимальной температуре рекристаллизации, которая называется *порогом рекристаллизации*, происходит наиболее резкое изменение механических свойств деформированного металла. При этом прочность резко снижается, а пластичность увеличивается. Изменение механических характеристик зависит не только от температуры нагрева, но и от продолжительности выдержки. Наиболее существенные изменения механических свойств металла происходят в начальный период рекристаллизационного отжига. Дальнейшее увеличение времени выдержки не оказывает влияния на изменение механических характеристик. Характерно также то, что в результате рекристаллизационного отжига металла с относительно малой степенью деформации величина зерна получается больше, чем у металла с большей степенью деформации. Степень деформации, обеспечивающая в результате рекристаллизации наибольший размер зерна, называется *критической степенью деформации*. Крупнозернистая структура обладает неравномерными и низкими механическими свойствами, поэтому в производстве необходимо избегать формообразования штамповок при критической степени деформации.

Подробные исследования влияния критической степени деформации на механические свойства и величину зерна пластически деформированной стали и рекристаллизационного отжига при температуре 500 °С показывают, что для нее критической степенью деформации является предварительное обжатие до 10 – 20 %. Нагрев деформированного металла не только сказывается на изменении статических характеристик металла, но и заметно влияет на изменение предела выносливости. Это имеет большое значение применительно к тем деталям, которые в процессе изготовления или в условиях эксплуатации подвергаются кратковременному воздействию повышенной температуры.

Влияние рекристаллизационного отжига на предел выносливости упрочненной обкаткой детали из стали 25 изучалось профессором И. В. Кудрявцевым. Обкаткой роликами на образцах создавался поверхностный наклеп на глубину более 1 мм, испытание на выносливость производилось при изгибе с вращением. Результаты этих испытаний показали, что с ростом температуры рекристаллизационного отжига до 300 °С происходит повышение предела выносливости. Отжиг при температуре 600 °С снижает предел выносливости на 20 % по отношению к пределу выносливости стали, отожженной при температуре 300 °С. Приведенные данные о влиянии пластической деформации на свойства стали свидетельствуют о больших возможностях изменения эксплуатационных свойств деталей при разных способах и режимах формообразования заготовок.

Последовательность выбора способа формообразования заготовки. Располагая чертежом детали с техническими условиями и зная годовую программу производства, устанавливают, какой технологический метод (например, литье) и способ при данном методе (например, литье под давлением) наиболее подходят для формообразования заготовки. Одновременно необходимо проверить возможность рациональной комбинации различных методов применительно к условиям производства с учетом эксплуатационных и технологических процессов (табл. 22 – табл. 24). Затем разрабатывают варианты технологических процессов изготовления и выбирают оборудование для их производства.

Сравнительная характеристика конструктивных особенностей
и эксплуатационных свойств деталей, изготовленных из литых, сварных и кованных заготовок

Тип заготовки	Отливка	Сварная деталь	Поковка
1	2	3	4
Материал	Чугун, сталь, нежелезные сплавы, литье в песчаные и металлические формы, литье под давлением, центробежное, точное литье	Листовое железо, трубы, стальные прутки и профильная низкоуглеродистая сталь	Заготовки из углеродистой стали, из легких и медных сплавов
Габаритные размеры изделия	Ограничивается производительностью плавильных печей, мощностью грузоподъемных средств и размерами литейных машин	Ограничивается мощностью грузоподъемных средств; при монтаже на месте размер детали может быть почти неограниченным	Ограничивается размерами имеющихся молотов и прессов (на молотах – до 1 000 кг, на прессах – до 30 кг)
Механические свойства	Более низкие, чем у поковок из аналогичного материала, чугун имеет небольшое удлинение, небольшой модуль упругости	Около 80 % прочности свариваемого материала (при растяжении)	Более высокие, чем у отливок и сварных деталей
Наименьшая толщина стенок	При литье в песчаные формы более 3 мм (для стали более 5 мм), в металлические формы более 3 – 4 мм, при литье под давлением в пределах 0,8 – 6,0 мм ² (толщина 0,8 мм может быть получена только для стенок протяженностью 20 – 25 мм)	Можно применять	Относительно большая толщина стенок, зависящая от пластических свойств металла. Получение тонких стенок затруднительно из-за быстрого остывания металла
Чувствительность к разнице в толщине стенок	Большая	Относительно небольшая	Относительно небольшая
Возможность получения длинных балок и плит с большой поверхностью	Затруднительно, особенно при тонких стенках	Просто	При свободной ковке очень просто; при штамповке ограничивается размерами штампа
Возможность получения сложных ребристых узлов	Относительно просто	Трудоемко	Затруднительно или невозможно; повышает стоимость штампов; нельзя получить высокие и наклонные ребра и стенки, не симметричные углубления

1	2	3	4
Точность размеров	При ручной формовке небольшая (особенно при формовке по шаблону); при машинной формовке и при литье в металлические формы довольно высокая; для литья под давлением точность очень высокая (0,05 – 0,2 мм). Литейные уклоны в среднем 0,5 – 1,5°	При работе с приспособлениями довольно высокая; опасность искривления больших деталей	При свободной ковке небольшая; при штамповке на молотах отклонения от 0,5 до 4 мм, на прессах – от 0,5 до 1,5 мм (от величины изделия), при калибровке – от 0,1 до 0,2 мм. Уклоны в среднем 3 – 5°
Шероховатость поверхности	При литье в песчаные формы шероховатость поверхности R_a от 80 до 5 мкм; при литье в металлические формы – $R_a=20-5$; литье под давлением обеспечивает шероховатость поверхности в пределах $R_a=5-1,25$ мкм	Поверхность чистая, места сварки $R_a=80-20$ мкм	При свободной ковке – $R_a=80-20$ мкм. При калибровке – $R_a=40-10$ мкм. При штамповке – $R_a=40-10$ мкм
Вес деталей (не подвергавшихся обработке) при одинаковой прочности	Вес отливок из низкопрочного чугуна больше, чем сварных деталей; вес отливок из высококачественного чугуна и из стали такой же, как вес сварной детали или больше	Вес сварных деталей обычно меньше, чем вес отливок и поковок	Вес необработанной поковки обычно больше, чем сварной детали или отливки
Стоимость готового изделия	При одинаковом весе и для серийного производства стоимость обычно меньше, чем стоимость серийных деталей и поковок	Для единичного производства стоимость меньше стоимости отливок; для серийного – стоимость > стоимости отливок	Больше, чем стоимость сварных деталей и отливок
Стоимость приспособления	Не очень высокая при формовке по деревянным моделям; довольно высокая при формовке с помощью металлических модельных плит, а также при литье в металлические формы и под давлением	Для единичного и мелкосерийного производства очень низкая	Низкая – при свободной ковке, высокая – при штамповке
Трудоемкость	Не очень высокая при формовке по деревянным моделям; довольно высокая при формовке с помощью метал. модельных плит и литье в метал. формы и под давлением	Более высокая, чем для отливок или кованых деталей в штампах	Высокая – при свободной ковке, небольшая – при штамповке
Производительность	При ручной формовке небольшая; при машинной формовке больше; при литье под давлением очень высокая	В общем незначительная, может быть увеличена применением сварных автоматов	При свободной ковке – незначительная, при прессовании и штамповке – высокая

Сравнительная характеристика конструктивных особенностей и эксплуатационных свойств деталей, изготовленных из отлитых под давлением и штампованных заготовок

Тип заготовок	Отливка, полученная под давлением	Листовая штамповка
1	2	3
Материал	Выбор ограничивается небольшим числом сплавов цинка, алюминия, магния, меди, свинца, олова	Выбор больший, чем для литья под давлением (разные листовые материалы – сталь, алюминий, латунь)
Величина изделия	Ограничение – из алюминиевых сплавов изготавливают отливки весом 35 кг, а из цинковых – до 90 кг, с наибольшими размерами до 2 000 мм	Ограничена только размерами штампа и размерами листов; размер изделия может быть увеличен путем сварки штампованных деталей
Механические свойства	Более низкие, чем у штампованных деталей, возможна пористость в отливках	Штампованные детали при одной и той же прочности обычно легче по весу
Разновидность	Допустима, но нежелательна; разновидность для литья под давлением допустима в небольшой степени, т.к. затруднения с равномерным заполнением полости формы	В пределах одной детали очень ограничена
Возможность изготовления деталей сложной конфигурации	Возможно получение за одну операцию сложной детали, имеющей боковые ребра, выступы, щели и отверстия, а также вкладыши из других сплавов	Большие трудности при получении сложных деталей: часто возникает необходимость в разделении деталей на несколько частей, соединяемых с помощью сварки, пайки и клепки
Точность размеров	Высокая, что обычно позволяет устранять механическую обработку	В целом меньше, чем у литых деталей; соединенные части детали могут пружинить
Шероховатость поверхности	Обычно $R_a=5 - 1,25$ мкм	Очень хорошая: $R_a=10 - 1$ мкм. Иногда на полированной поверхности видны следы складок, возникающих при горячей обработке
Стоимость изделия	Обычно более высокая, чем стоимость деталей, штампованных из углеродистой стали	Для массового производства стоимость обычно меньше, чем стоимость литья под давлением
Отходы	Отходы значительны при литье под давлением (большой литниковый остаток) и невелики при мех. обработке отливок, залитых под давлением	Иногда большие
Производительность	Высокая производительность современных машин для литья под давлением, особенно при механизации вспомогательных работ, может значительно превосходить производительность штамповочных молотов	Весьма высокая, иногда в результате автоматизации

Сравнительная характеристика конструктивных особенностей
и эксплуатационных свойств деталей из пластмасс и отлитых под давлением

Тип заготовки 1	Детали, отлитые под давлением 2	Детали из пластмасс 3
Материал	Сплавы цинка, алюминия, магния, меди, олова и свинца	Различные виды пластмасс: феноловые, мочевиные, акриловые, виниловые, полиамидные, полиэтиленовые, силиконовые
Плотность	От 1,8 (магний) до 11,6 (свинец)	От 1,05 (акриловые) до 2,09 (феноловые с минеральным наполнителем)
Механические свойства	Более высокие, чем у пластмасс обычного качества	У пластмасс обычного качества ниже, чем у деталей после литья под давлением; благодаря меньшей плотности детали из пластмасс значительно легче (при одинаковой прочности), чем отливки под давлением
Физические свойства: теплопроводность, жаропрочность	Сплавы цинка до 120 °С, сплавы алюминия до 320 °С, сплавы меди до 500 °С	Начало размягчения термопластических масс при 60 °С; деформация и изменение окраски феноловых масс при 110 °С, мочевиновых при 75 °С; некоторые феноловые массы выдерживают постоянную температуру до 200 °С; наиболее жаропрочные силиконовые массы
Электропроводность	Проводники	Диэлектрики
Коррозионная стойкость	Меньше, чем у пластмасс	Больше, чем у литья под давлением
Прозрачность	Непрозрачные	Непрозрачные, полупрозрачные и прозрачные
Внешний вид	В большинстве случаев требует дополнительной отделки – окраска и блеск хуже, чем у деталей из пластмасс	Не требует дополнительной отделки; возможно получение красивой и прозрачной поверхности
Разностенность	Допустима (хотя и нежелательна) довольно большая; наибольшая толщина – около 0,7 мм	Допустима (хотя и нежелательна) довольно большая; при очень тонких возможны искривления

1	2	3
Возможность получения сложной	Большая, чем при использовании пластмасс	Значительная; однако выполнение полостей более трудное, чем при литье под давлением
Точность размеров	Обычно более высокая, чем у деталей из пластмасс	Меньшая, чем при литье под давлением; обычно отклонения колеблются в пределах $\pm 0,5\%$ от установленного размера
Неизменяемость размеров во времени	Значительно большая, чем у деталей из пластмасс, однако в деталях из сплавов цинка со временем происходят незначительные изменения размеров	Меньшая, чем при литье под давлением; некоторые пластмассы со временем значительно изменяют свои размеры
Шероховатость поверхности	$R_a = 5 - 1,25$ мкм	Обычно очень хорошая: прессованные – $R_a = 0,63 - 0,1$ мкм. Стеклотекстолит R_a до 2,5 мкм
Стоимость материала	Меньшая, чем стоимость пластмасс	Высокая
Стоимость готового изделия (после отделки)	Обычно ниже, чем у пластмасс; иногда более высокая, когда изделие требует специальной отделки	Обычно более низкая, чем для литья под давлением; необходимо принимать в расчет стоимость ухода за приспособлением
Стоимость приспособлений	Обычно более высокая, чем для пластмасс	Обычно более низкая, чем для литья под давлением; необходимо принимать в расчет стоимость ухода за приспособлением
Количество отходов	Малое	Большее, чем при литье под давлением
Производительность	Высокая	Значительно меньшая, чем при литье под давлением

Общая трудоемкость T_{om} изготовления детали по всему процессу определяется комплексно:

$$T_{om} = T_3 + \sum_{i=1}^n T_{m.i},$$

где T_3 – трудоемкость изготовления заготовки;

$\sum_{i=1}^n T_{m.i}$ – трудоемкость механической обработки заготовки;

n – число операций механической обработки.

Зависимость времени изготовления от количества изготовления деталей можно выразить формулой:

$$t_N = t_1 \cdot N^x,$$

где t_1 – время изготовления одной детали при установленном количестве продукции;

t_N – время изготовления одной детали при количестве продукции в N раз большем;

x – показатель степени, зависящий от технологического процесса. Для операций механической обработки $x \approx 1/3$.

Рабочее время (а, следовательно, затраты рабочей силы и административные расходы) также уменьшается. Причем, если сохраняется геометрическое сходство отливок и применяется тот же технологический процесс, то отношение времени T , необходимого для изготовления отливки весом G , к времени t , необходимому для изготовления отливки весом g , может быть приближенно выражено уравнением:

$$\frac{T}{t} = \left(\frac{G}{g} \right)^x,$$

где $x = \frac{2}{3}, \dots, \frac{3}{4}$.

Данное уравнение может быть применено и для механической обработки, тогда $x = 2/3$. Необходимым условием применения этого уравнения является «технологическое» сходство отливок, т.е. обе отливки должны быть изготовлены с помощью одинаковых технологических процессов, а отношение веса G/g не должно быть очень большим.

При технико-экономическом анализе выбранного способа изготовления заготовки следует учитывать эксплуатационные свойства детали с учетом требований оптимальной надежности. Из деталей–отливок можно изготовить сложные сборочные единицы, имеющие выступы и тонкие высокие ребра, установленные под разными углами, кривые, сложные и пересекающиеся поверхности, несимметричные углубления и т.д. Необходимо также учитывать, что штампованные детали требуют применения довольно значительных уклонов для облегчения выемки поковок из штампа, больших радиусов закругления,

относительно большой толщины стенок, отверстий с правильными геометрическими формами (цилиндр, конус и т.д.). При этом отверстия малого диаметра обычно не выполняются.

По сравнению с литьем под давлением штамповка имеет следующие преимущества: свобода выбора материала, высокая производительность, большая прочность материала и возможность получения изделий больших размеров. Однако штампованным деталям трудно придать столь сложную форму, какую могут иметь детали, отлитые под давлением. Поэтому в случае применения небольших, но сложных и точных деталей обычно выбирают литье заготовки.

Подводя итоги, необходимо отметить, что штамповать можно любые детали, однако наиболее значительный эффект может быть достигнут при получении зубчатых колес, валов, шпинделей, шатунов, клапанов, распредвалов и других деталей, несущих большие механические нагрузки. В процессе штамповки в металле ликвидируются внутренние дефекты, обеспечивается однородность его структуры, что приводит к повышению прочности деталей и повышению эксплуатационной надежности.

При холодной штамповке устраняются потери металла на угар, отходы в окалину в процессе нагрева. При этом можно получить более точные размеры деталей с более качественной поверхностью.

Если изготавливать фасонные детали холодной штамповкой, а не резанием, то материалоемкость снижается на 50 – 70 %. Кроме этого, при холодном деформировании упрочняется поверхностный слой, а это создает предпосылки для применения более дешевых сталей.

Холодная высадка применяется для изготовления крепежа и мелких деталей (пальцы, ролики, подшипники, эксцентрики, кулачки, храповики, втулки, зубчатые колеса, червяки и др.). Шестигранный болт, полученный холодной высадкой и накатыванием зубьев, требует в 25 раз меньше металла, чем полученный резанием.

Холодное выдавливание может обеспечить коэффициент использования металла $K_{им} = 0,85$, а при резании – $K_{им} = 0,33$.

Холодная накатка резьб, шлицев и зубьев шестерен вместо резания обеспечивает экономию 15 – 30 % (в зависимости от диаметра резьбы). Формообразование зубьев пластическим деформированием из заготовок с предварительным их нагревом на установках ТВЧ применяют для крупногабаритных колес с крупными модулями. Благодаря расположению волокон металла по профилю зуба стойкость накатанных колес выше стойкости нарезных колес: из легированной стали – на 20 %, из углеродистой стали – на 27 %, расход металла сокращается на 15 – 25 %, а долговечность возрастает в 1,5 – 2 раза. За счет повышения точности изготовления таких колес и твердости зубьев нагрузочная способность их может быть повышена на 80 % по сравнению с традиционными методами. Следовательно, при одинаковой величине нагрузки на передачу, их масса условно может быть уменьшена приблизительно в 1,8 раза.

Зубчатые профили можно получать и радиальным прессованием. Долговечность таких колес выше в 1,5 раза, чем фрезерованных, а экономия металла составляет 15 – 20 %.

Холодное прессование – прогрессивный метод формообразования.

Один из них – **редуцирование** – продавливание через матрицу – пример эффективного метода получения сложного профиля, например зубчатого венца. Можно получать ступенчатые валы небольшого диаметра за несколько переходов. В крупносерийном производстве отходы металла уменьшается на 40 %, а иногда и вообще нет необходимости вводить механическую обработку. Предел прочности стали повышается на 28 %, а твердость стали повышается на 35 %.

Ротационная ковка – наиболее совершенный метод обработки металлов давлением (ОМД). С его применением изготавливают шаровые шарниры, полуоси, полумуфты, ступенчатые валы и другие детали. Иногда такая ковка позволяет заменить токарную обработку и шлифование (экономия металла составляет до 50 %).

Ковка путем обжатия полых цилиндрических заготовок позволяет получить овальные, квадратные, шестигранные отверстия, прямые и эвольвентные шлицы, зубья и другие профили.

Выше уже неоднократно упоминалось о таком методе как **сварка**, который находит широчайшее применение как ресурсосберегающий метод, особенно в соединении с литьем или штамповкой. Это так называемые литосварные и штампосварные заготовки, у которых материалоемкость на 40 % ниже «чистых» литья или штамповок, однако, трудоемкость сварки выше.

В табл. 25 приведены основные характеристики методов сварки.

Таблица 25

Характеристика основных способов сварки

№ п/п	Способ сварки	Материал свариваемой конструкции	Рекомендованная толщина (площадь варки), мм	Тип свариваемого (см ²) соединения
1	2	3	4	5
1	Электродуговой ручной металл электродом	Al, сплавы Al	≥ 1,5 – 2	Встык, внапуск, тавровые
2	Под флюсом автоматический	Сталь	> 2 – 2,5	–
3	Электродуговой угольным электродом	Низколегированная сталь, Al, Cu	≤ 4 ≤ 12	Встык с отбортовкой
4	Аргонодуговой	Нержавеющая сталь, Al и магниевые сплавы	≤ 4	Встык, тавровые, с отбортовкой
5	Аргонокислородный	Легированная сталь	≤ 8	–
6	Газовый	Сталь	≤ 8 ≤ 10	–
7	Газопрессовый	Сталь, Al, Cu, медные и специальные сплавы	≤ 25 000	Встык
8	Контактностыковый с оплавлением	Сталь	–	–
9	Контактностыковый с прижимом	Сталь, Al и сплавы	Прутки ≤ 10	–

10	Точечный	Сталь низкоуглеродистая легированная, сталь нержавеющая, <i>Al</i> , <i>Si</i> и их сплавы	≤ 12 ≤ 10 ≤ 6	Внапуск
11	Трением (ролик)	–	$\leq 2,5$	Внапуск, встык
12	Электрошлаковый	Сталь углеродистая и легированная	$\leq 1,5 - 2$ Детали круглые или трубы $\leq 30 - 40$	Встык
13	Конденсаторный	–	200 – 600 и выше	Внапуск
14	Ультразвуковой	Однор. и разнор.	0,03 – 0,06 0,05 – 0,6	–
15	Электроннолучевой в вакууме хим., акт. мет.	Металлы и сплавы	$\leq 10 - 15$	Встык

В настоящее время появились новые методы сварки с использованием плазмы, диффузионная, квантовая и другие виды сварки.

С применением ультразвука возможна сварка полимерных материалов, с помощью лазеров сваривать можно детали из любых материалов: металлов, неметаллов, органические объекты друг с другом и разнородные объекты и среды любых габаритов. Сварка лазером осуществляется в космосе (т.е. в вакууме), под водой и т.д.

В заключении следует отметить, что все методы получения заготовок формируют на их поверхностях или в теле дефекты, а это зачастую приводит к браку заготовок, который может достигать до 0,5 %. В настоящее время существуют технологии восстановления дефектных заготовок, имеющих поверхностные дефекты. Этот подход к экономии материалов будет рассмотрен в следующем подразделе.

1.3.2. Новые технологии и материалы для восстановления дефектных отливок

Известно, что литейное производство сопряжено с появлением целого ряда дефектов в изделиях – раковин, микропористости, микротрещин. Наличие их в одних случаях нарушает целостность поверхности (меняет ее внешний вид или не позволяет выполнять заданные функции), в других – приводит к проникновению сквозь дефектные участки жидкостей, с которыми взаимодействует отливка.

Существует достаточно большое количество способов устранения названных дефектов, однако имеется и ряд ограничений по их использованию. Среди этих ограничений можно назвать необходимость применения повышенных температур для отвердевания пропиточных составов или повышенного давления для их глубокого проникновения в дефектные участки. Кроме того, при заделке раковин на поверхности литья появляются участки, отличающиеся от фактуры основного материала.

Эти недостатки заставляют производителей литья искать другие методы восстановления литейных дефектов, включая разделку и последующее заплывление дефекта основным материалом. Однако и такой метод чреват различными негативными последствиями: появлением напряжений и микротрещин на поверхности изделия и т.д. Да и трудозатраты при этих технологиях слишком велики при не всегда очевидном положительном результате.

Для более «щадящего» и менее затратного решения задачи восстановления целостности и герметичности отливок применяют полимерные однокомпонентные составы, имеющие в своей основе разнообразные реактивы, в итоге позволяющие закупорить микропористость и тем самым устранить дефект. В частности, для этих целей применяются анаэробные составы, отвердевающие лишь в микротрещинах без доступа воздуха. Однако на поверхности изделия эти материалы не застывают и не могут по этой причине образовать единую герметизирующую систему – от затвердевшего слоя в микротрещине до твердого материала на поверхности дефектной детали. Кроме того, с помощью этих составов можно устранить лишь один вид дефектов – микропористость, а что касается раковин, то для их устранения полимерные однокомпонентные составы неэффективны.

В этой ситуации, когда проблема есть, а комплексного решения ее за счет применения традиционных технологических методов нет, на помощь приходят новые полимерные материалы. Они позволяют решать большинство проблем, связанных с дефектами литья, с целью комплексного восстановления и дальнейшего успешного применения отливок.

1.3.2.1. Полимерный материал «дихтол» и технология его применения

Рассмотрим закономерности возможного дефекта литейной отливки, имеющего выход на поверхность изделия либо в виде микротрещины, либо в виде раковины. Условно его можно разбить на три зоны: первая, которая характеризуется размерами от 0 до 0,1 мм; вторая – от 0,1 до 0,5 мм; третья – от 0,5 мм и более. Для устранения дефектов литья величиной до 0,1 мм применяются специальные пропиточные материалы видов «дихтол–стандарт» (термостойкость до 90 °С) или «дихтол–WF» (термостойкость до 200 °С). Благодаря наличию в них специальной «ползучей» добавки они проникают во все микротрещины, и уже спустя короткое время (табл. 26) деталь может быть нагружена давлением величиной до 90 атм. При этом не требуется проведения никаких специальных мер, которые необходимы при других способах пропитки.

Весь процесс восстановления происходит при комнатной температуре и без избыточного давления. Материал наносится на дефектное место либо при помощи аэрозоля, либо путем промазывания кисточкой. Наилучшим вариантом является окунание всей детали или дефектного участка в пропитывающую среду – «дихтол», которой наполнена какая-либо емкость. Качество и надежность, обеспечиваемые предлагаемой технологией, можно проиллюстрировать следующим примером: восстановленная материалом «дихтол–стандарт» емкость из алюминия с микротрещинами, развившимися в результате некачественной

сварки, наблюдалась в течение 11 лет, и герметичность шва за эти годы ни разу не была нарушена.

Таблица 26

Характеристики материалов пропиток

Параметры	Вид «дихтола»				
	Стандарт	Макро	WF	WF–макро	HTR
	Предельные размеры дефектов, мм				
	до 0,1	0,1 – 0,5	до 0,1	0,1 – 0,5	до 0,1
1	2	3	4	5	6
Максимальная стойкость к давлению, атм.	340	290	340	290	340
Термостойкость, °С: длительная	-40/+120	-40/+120	-40/+200	-40/+200	-40/+500
кратковременная	-40/+400	-40/+300	-40/+450	-40/+350	-40/+550
Способ применения: погружение	+	+	+	+	+
намазывание	+	+	+	+	+
аэрозолем	+	-	+	-	-
Время погружения при толщине стенки, мин: до 5 мм	4	6	4	6	10
от 5 до 10 мм	8	10	8	10	15
от 10 до 15 мм	13	15	13	15	20
свыше 15 мм	30	40	30	40	30
Время высыхания при 20 °С, мин	1	1	1	1	1
Толщина пленки, мкм		10	4	10	4
Время отвердевания частичное/полное, час: до 5 мм	4/24	6/24	4/24	6/24	1 ч (после погружения и обжига при 250 °С)/3 ч
от 5 до 10 мм	8/24	10/24	8/24	10/24	
от 10 до 15 мм	13/48	15/48	15/48	15/48	
свыше 15 мм	24/48	24/48	24/48	24/48	
Возможные процессы дальнейшей обработки поверхности: нитролаками	-	-	-	-	-
паками горячей сушки	+	+	+	+	+
ЦД/ЕР-лаками	+	+	+	+	+
грунтовками	+	+	+	+	+
прочими покрытиями	+	+	+	+	+

В случае появления на заготовке дефекта в виде трещины размером 0,1 – 0,5 мм ее устранение осуществляется с помощью материалов «дихтол–макро» (термостойкость до 90 °С) и «дихтол–WF» (термостойкость до 200 °С). Сроки их застывания, в зависимости от глубины трещины или толщины стенки изделия, указаны в табл. 25. Эти материалы способны не только герметизировать трещины, но и образуют на поверхности изделия защитное покрытие, исключая коррозионные процессы и другие явления, связанные с воздействием

окружающей среды. Благодаря подобному «двойному» положительному воздействию, «дихтол» нашел применение, в частности, на польских предприятиях, выпускающих сложные отливки для автомобильных двигателей. Все изделия проходят 100-процентную обработку этим материалом, тем самым решаются две задачи: главная – гарантированное исключение любых микропор и микротрещин на поверхности, вспомогательная – дополнительная защита от воздействия различных жидкостей: антифриза, горючего, масел и т.д.

Для восстановления герметичности деталей, которые работают при температуре до 500 – 550 °С, применяют еще одну модификацию пропиточного материала – «дихтол–НТР». Столь значительная термостойкость достигается за счет выдержки обработанной детали при температуре 200 °С до полного отвердевания полимерного материала. Сфера его применения, как и «дихтол–стандарт», ограничена диапазоном микротрещин от 0 до 0,1 мм.

1.3.2.2. Полимерный материал «пластикметалл» и его разновидности

К сожалению, описанные в пп. 1.3.2.1 материалы не позволяют бороться с самым главным и наиболее часто встречающимся дефектом литья – раковинами на поверхности изделия – либо вскрывшимся в процессе его механической обработки. Для решения проблемы устранения раковин разработан еще один материал – «пластикметалл», которым можно, как расплавленным металлом, залить полость раковины, после чего даже найти дефектное место не всегда удастся. Этот двухкомпонентный металлополимер после полимеризации имеет такой же внешний вид, как и основной металл.

Хорошее адгезионное соединение «пластикметалла» с основным материалом позволяет после отвердевания обрабатывать его на станке как одно целое с отливкой, а впоследствии нагружать теми же усилиями, что и саму деталь.

Создана широкая гамма «пластикметаллов», предназначенных для устранения дефектов в отливках из чугуна, стали, бронзы, алюминия, меди, латуни, легированных сталей, керамики и т.д. В зависимости от требуемых условий применения «пластикметалла» его свойства можно менять путем использования различных отвердителей: «стандартного» (термостойкость до 100 °С, время отвердевания 1 час), «быстрого» (термостойкость до 100 °С, время отвердевания 15 мин), «термостойкого WF» (термостойкость до 200 °С, время отвердевания 1 час), «медленного» (термостойкость до 100 °С, время отвердевания 2 – 3 часа), пастообразного (термостойкость до 100 °С, время отвердевания 1 час). Показатели длительности затвердевания в этом перечне справедливы при температуре окружающей среды около 20 °С. Повышая температуру окружающей среды, этот процесс можно ускорить, а понижая – замедлить, вплоть до остановки реакции полимеризации.

Таким образом, применяя комплексный подход к решению задачи восстановления дефектных отливок, можно существенным образом улучшить ситуацию на литейных предприятиях за счет исключения операции повторного литья или снижения (по сравнению с традиционными методами) затрат при исправлении дефектов.

1.3.2.3. Технология лазерной стереолитографии (SLA)

Стереолитография – это технология ускоренного производства прототипов (моделей) изделий (как правило, сложной формы) путем послойной полимеризации жидкого фотополимера с помощью лазерного излучения. Она является наиболее точным и обеспечивающим высокое качество поверхностей способом быстрого моделирования.

Технология лазерной стереолитографии (SLA) была запатентована Чарльзом Халлом (США) в 1986 г. Подобные технологии разрабатывались в различных странах под различными названиями: Rapid Prototyping («быстрое прототипирование» или «оперативное макетирование»), Solid Freeform Fabrication («выращивание»), Laminate Synthesis («послойный синтез»), 3D Component Forming и др. Однако, независимо от названия и используемого механизма реализации, созданные с их помощью изделия представляют собой «уложенные» один на другой и скрепленные между собой слои постоянной или переменной (в направлении оси Z) толщины, образующие ступенчатую наружную поверхность.

Идеология **ускоренного формообразования изделия (модели, прототипа)** RP (Rapid Prototyping) базируется на компьютерном автоматизированном 3D–CAD–проектировании изделия, визуализации и оптимизации его конструкции исходя из требований дизайна и функциональных свойств. Затем происходит трансформация 3-координатной модели в совокупность двухмерных послойных моделей и воспроизведение этой совокупности, т.е. материализация как единого целого, как физического твердосплавного изделия или его прототипа.

В настоящее время развиваются два направления стереолитографии, которые отличаются способом инициирования полимеризации. Отличительной особенностью первого направления является использование сфокусированных пучков лазера, другого – широкоапертурных пучков. В частности, существующая ныне в Украине установка SLA 5000 использует первый метод.

Стереолитографические модели позволяют оперативно:

- оценивать конструкцию и внешний вид разрабатываемых изделий;
- проверять собираемость и работоспособность конструкции;
- проводить аэродинамические и гидравлические испытания;
- получать металлические детали и пресс–формы литьем по выжигаемым моделям (Quick Cast–технология);
- изготавливать оснастку для опытных образцов и малых серий изделий (с помощью эластичных силиконовых форм, форм из композитных материалов, а также с применением гальванопластики).

Для процесса характерны невысокие требования к мощности инициирующего излучения, экологическая чистота, возможность протекания при температуре, близкой к комнатной. К недостаткам его можно отнести относительно высокую стоимость фотомономеров; чувствительность установки к изменениям температуры и влажности помещения, а также к вибрациям. Все процессы стереолитографии начинаются с проектирования внешних и внутренних поверхностей изделия с точным указанием всех геометрических элементов в одной из сред 3D–проектирования: AutoCAD, 3D Компас, Pro–Engineer, 3D MAX и др.

Затем геометрическое воспроизведение изделия осуществляется послойно дисперсионным отверждением жидкого фотомономера с помощью UV лазера (фотополимеризация).

Луч лазера, управляемый компьютером, проходит по поверхности жидкого полимера, сканируя ее в соответствии с конфигурацией формируемого слоя. Там, где луч фокусируется на поверхности жидкого мономера, последний полимеризуется и отвердевает. После этого платформа установки опускается на величину шага, с которым проводились секущие плоскости теоретической модели. Луч сканирует конфигурацию второго сечения, потом третьего и т.д. Так последовательно послойным наращиванием происходит создание трехмерного твердотельного конструктивного элемента заданной геометрии. Толщина первого слоя составляет около 0,05 – 0,2 мм.

После завершения формирования последнего слоя платформа поднимается над поверхностью ванны с жидким фотополимером, выращенная деталь снимается, жидкий полимер удаляется, и деталь сушится в ультрафиолетовой камере. Этот метод рассмотрен в п.п. 4.3.8.

1.3.2.4. Способ избирательного лазерного спекания (SLS)

Переходить от файла САD не только к прототипам, но и непосредственно к долговечным и функциональным пластиковым и металлическим деталям или оснастке позволяет *селективное лазерное спекание порошковых материалов (SLS)*. При этом получение изделия происходит за значительно меньший промежуток времени, чем при традиционной механообработке. Попадая на тонкий слой порошка, лазерный луч спекает его частицы и формирует твердую массу в соответствии с геометрией детали. В качестве рабочих материалов используют: полиамид (нейлон Dura Form (PA или GF) со стеклянным наполнением, резиноподобный эластомер SOMOS–201, сплавы на основе нержавеющей стали.

Эластомерный материал предназначен для создания гибких функциональных деталей или демонстрационных моделей, что позволяет выполнять их тестирование перед изготовлением дорогостоящей оснастки. Он также может быть использован для производства небольших партий прокладок, шлангов и других водонепроницаемых деталей.

Из порошкового материала Laser Form ST–100 (нержавеющая сталь – 60 %, бронза – 40 %) можно изготавливать долговечные функциональные прототипы деталей, а также формообразующие элементы оснастки для термопластавтоматов со стойкостью не менее 100 000 циклов. Сплав Laser Form А–6 может подвергаться термообработке с обеспечением твердости HRC 39. Он предназначен для создания оснастки для литья под давлением или термоформовки со стойкостью не менее 1 млн. циклов.

Способ SLS был предложен Карлом Декартом (США) в 1986 г. В типовом комплексе, реализующем эту технологию, управляющие данные для лазера вводятся исходя из 3D–САD геометрии изделия. Порошок послойно при помощи сглаживающих роликов наносится на платформу носителя. Луч СО – лазера сканирует поверхность в соответствии с конфигурацией первого сечения и

инициирует локальное оплавление порошковой массы, а платформа носителя циклично двигается вниз.

К преимуществам способа можно отнести невысокую стоимость используемых материалов, их нетоксичность, возможность изготовления изделия по частям, а также одновременного изготовления нескольких изделий (в разных «горизонтах»), высокая прочность готовых изделий и возможность получения их («прямое выращивание») с заданными функциональными свойствами.

Область использования – авиация, автомобильная, электронная, электротехническая и др. отрасли промышленности, создание эталон–модели, создание функциональных изделий сложной формы единичных или малыми сериями.

Получение деталей или их моделей методами стереолитографии или спекания обеспечивает качество поверхности, приближающееся к полученной путем фрезерования и даже шлифования – до $R_z=4,2$ и $R_a=0,63$. Путем облагораживания модели покрытиями их износостойкость удается повысить в 3 – 5 раз.

Вопросы для самопроверки к пп. 1.3.2

1. Какой способ литья обеспечивает минимальную массу заготовки–отливки?
2. Назовите способ штамповки, при котором обеспечивается максимальная производительность.
3. Назовите марки сталей, для которых целесообразно назначать цементацию с закалкой?
4. Каким образом экономят ресурсы при изготовлении деталей машин из порошковых материалов?
5. Чем отличается технология изготовления деталей из порошка в сравнении с отливкой?
6. Чем отличается технология литья пластмасс от технологии литья металла?
7. Какая экономия Вас ожидает, если в автомобиле ряд деталей сделан из полимеров, а не металла?

1.3.3. Упрочнение термическими, химико-термическими и комбинированными (термодиффузионными) способами обработки

Методы упрочнения стальных деталей термическими методами (закалка, закалка с отпуском и др.) хорошо известны, широко освещены в литературе [4; 12] и поэтому в данной работе не рассматриваются, не умаляя их возможностей и диапазон применения.

Химико-термическая (термодиффузионная) обработка (ХТО) позволяет резко изменить качество поверхности стальных деталей машин. Как правило, при диффузии того или иного элемента из внешней среды в поверхностный слой детали и последующей термической обработке повышаются твердость и прочность поверхностного слоя, изменяется его химический состав и возникают остаточные напряжения сжатия. Поэтому рассмотрим некоторые способы ХТО.

Цементация. Цементацию применяют для упрочнения мелких и крупных зубчатых колес, кулачковых шайб, распределительных и других валов, пальцев поршней, тарелок клапана и др. Практически глубина диффузии углерода для различных деталей колеблется от 0,5 до 2,0 мм, а концентрация углерода в слое не превышает 1,2 %. Эффект упрочнения зависит от марки стали, глубины слоя и содержания углерода в цементованном слое, прочности, вязкости и твердости сердцевины, а также от величины сжимающих напряжений в поверхностном слое [11].

Для достижения максимальной эффективности упрочнения деталей, работающих в условиях статических и динамических нагрузок, рекомендуется содержание углерода в цементованном слое поддерживать в пределах 0,80 – 1,05 %. В случае применения сталей с 0,27 – 0,34 % C глубину цементованного слоя следует назначать в пределах 0,5 – 0,7 мм. Для цементуемых сталей, содержащих 0,17 – 0,24 % C, глубину цементованного слоя принимают от 1,0 до 1,25 мм. При этом следует иметь в виду, что сопротивление усталости деталей машин без концентраторов напряжений при малых глубинах слоя зависит от прочности сердцевины, при больших глубинах – от прочности поверхностного слоя. В этом случае повышение глубины упрочненного слоя оказывается полезным только до 10 – 20 % радиуса детали. При глубине слоя меньше этих значений сопротивление усталости повышается с увеличением прочности сердцевины. При наличии на поверхности деталей концентраторов напряжений сопротивление усталости повышается с увеличением остаточных напряжений сжатия, а глубина слоя должна быть очень малой (1 – 2 % радиуса детали). Главным фактором, вызывающим увеличение предела выносливости при химико-термических методах обработки деталей, являются остаточные напряжения, возникающие в материале детали в процессе упрочнения.

При поверхностной закалке ТВЧ главное влияние на повышение предела выносливости и долговечности оказывает изменение механических характеристик материала поверхностного слоя. В еще большей степени это относится к упрочнению наклепом.

Определить оптимальную относительную глубину упрочненного слоя гладких деталей h_{opt} можно на основе зависимости:

$$h_{opt} = \left(\frac{h}{R} \right) = 1 - \frac{\lambda \cdot \nu}{\eta},$$

где h – глубина упрочненного слоя;

R – радиус поперечного сечения;

λ – отношение модулей;

ν – коэффициент влияния качества подготовки поверхности;

η – отношение предела выносливости материалов поверхностного слоя и сердцевины.

Оптимальная относительная глубина упрочненного слоя определяет максимальное упрочнение. Поэтому, если на основании расчета по этой зависимости она окажется меньше либо равной нулю, то упрочнение поверхностного слоя может привести к снижению предела выносливости и долговечности дета-

ли. Может оказаться, что большая эффективность химико–термических методов упрочнения, выявленная на тщательно обработанных лабораторных образцах, не подтвердится на реальных деталях с грубообработанной поверхностью.

Химико–термические методы поверхностного упрочнения можно рекомендовать для повышения предела выносливости, долговечности деталей с тщательно обработанной поверхностью.

Азотирование. Насыщение поверхности детали азотом приводит к изменению структуры и создает в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия. В результате изменения химического состава, высокой твердости слоя и высоких остаточных напряжений в нем резко повышаются коррозионная стойкость, износостойкость и предел выносливости азотированных стальных деталей.

В практике азотирование применяется для получения высокой твердости, хорошего сопротивления износу, усталостным разрушениям и для повышения коррозионной стойкости деталей машин, работающих на воздухе, в воде и паровоздушной атмосфере. Для повышения твердости стали типа 38ХМЮА, содержащей алюминий, обычно применяется азотирование.

Азотирование для повышения твердости применяют там, где к деталям предъявляют особые требования в отношении износостойкости и предела выносливости, например, в производстве дизельной аппаратуры, измерительного инструмента, гильз цилиндров, зубчатых колес, коленчатых валов, шпинделей токарных станков и др.

Антикоррозионное азотирование рекомендуется применять для деталей, подвергаемых в условиях эксплуатации разрушениям от коррозии (одновременное воздействие коррозионно активной среды и переменных напряжений). К таким деталям относят различные пружины, насосные штанги, детали бурового оборудования и др.

При выборе режимов обработки следует иметь в виду, что с повышением количества азота в слое увеличиваются объемные изменения и остаточные напряжения, в связи с чем и возрастает предел выносливости азотированных деталей. Значительное увеличение глубины азотированного слоя связано с понижением остаточных напряжений сжатия в нем и может вызвать понижение предела выносливости.

Например, азотирование стали 18ХНВА обеспечивает повышение предела выносливости и долговечности деталей при шероховатости поверхности не более 2,5 мкм и для предела прочности материала сердцевины детали не выше 800 Н/мм². При большем значении предела прочности материала сердцевины детали и более грубой обработке поверхности такого утверждения сделать нельзя. В этом случае при азотировании возможно снижение предела выносливости и долговечности деталей. Сравнение различных методов упрочнения показывает преимущество поверхностной закалки. Данный метод применим для деталей, изготовленных из материалов повышенной прочности, и имеет меньшие ограничения в отношении шероховатости поверхности.

Влияние глубины азотированного слоя на предел выносливости азотированных деталей с концентраторами напряжений и без концентраторов напряжений подобно влиянию глубины цементованного слоя. Цементация, а особен-

но азотирование резко повышают предел выносливости стальных деталей с концентраторами напряжений, если упрочненный слой непрерывно проходит и по опасным зонам (галтели, отверстия, шпоночные пазы, места проходов отверстий и др.). Применение местного предохранения от азотирования или цементации или удаление упрочненного слоя в местах концентрации напряжений приведет к тому, что в результате химико–термической обработки упрочнения не будет.

Пластическая деформация после азотирования в зонах концентрации напряжений является недопустимой (даже если она не приводит к разрушению слоя), так как она уменьшает остаточные напряжения сжатия. Поэтому правку деталей после азотирования применять не следует. В целях повышения вязкости и прочности азотированного слоя, необходимых для получения хорошего сопротивления усталостным напряжениям, твердость слоя стальных деталей должна быть в пределах $HV\ 650 - 700$, а для повышения износостойкости (при отсутствии силовых нагрузок) $HV\ 900 - 1\ 100$.

В связи с широким применением высокопрочного чугуна представляет интерес использование азотирования для упрочнения деталей, отлитых из высокопрочного чугуна. Установлено что твердость азотированного слоя чугуна марки ВЧ60–2 может быть получена в пределах $HV\ 650 - 1\ 150$, а предел выносливости азотированных образцов диаметром 50 мм повышается по сравнению с неазотированными на 60 – 90 %. Упрочнение азотированием нержавеющей сталей типа 25Х18Н8В2 резко повышает износостойкость при температурах до 600 °С, при этом коэффициент трения снижается с 0,7 до 0,1.

Цианирование. Этим методом наиболее часто упрочняют детали из среднеуглеродистых сталей, а также режущий инструмент из быстрорежущей стали. Вид цианирования и температурный режим, а также состав ванн выбирают в зависимости от требуемой глубины и твердости слоя и материала детали. Глубина слоя для деталей, работающих в условиях переменных нагрузок, не должна превышать 5 – 10 % величины радиуса деталей, а твердость должна находиться в пределах $HV\ 700 - 800$. Повышение глубины слоя сверх указанных пределов может привести к отрицательным результатам.

Процесс низкотемпературного цианирования получил применение для упрочнения инструмента после окончательной обработки и закалки. Стойкость цианированных режущих инструментов, изготовленных из быстрорежущих и углеродистых сталей (фрезы, метчики, сверла, зенкеры), увеличивается на 100 – 200 %. Глубина цианированного слоя для режущего инструмента обычно находится в пределах 0,01 – 0,06 мм, а твердость слоя $HRC\ 69 - 72$. С увеличением твердости растет хрупкость слоя, поэтому процесс цианирования не для всех инструментов дает одинаковый эффект упрочнения. Нецелесообразно цианировать инструменты небольших размеров (сверла диаметром до 8 мм, метчики с шагом резьбы до 1,5 мм).

Цементация или цианирование стали с последующей закалкой вызывает значительное повышение предела выносливости деталей. Для цементованных и цианированных образцов из мягкой углеродистой стали характерными являются результаты усталостных испытаний, проведенных в ЦННИТМАШе.

Исследования проводили на консольных цилиндрических образцах диаметром 10 мм, которые испытывали на переменный изгиб при вращении. Аналогичное повышение сопротивления усталости в результате цементации имеют и детали из специальных легированных сталей.

Для цементуемых и цианированных стальных деталей характерно наличие остаточных напряжений, вызванных структурными превращениями и объемными изменениями при закалке. В цементованных слоях образуются более или менее значительные сжимающие остаточные напряжения, распространяющиеся на глубину, превышающую зону закалки и переходную зону. При этом роль остаточных напряжений тем больше, чем больше концентрация напряжений в деталях. Однако максимум остаточных сжимающих напряжений в цементованных или цианированных деталях располагается не у самой поверхности, а на некоторой глубине. У самой поверхности таких деталей наблюдается уменьшение сжимающих напряжений, а в ряде случаев они даже переходят в растягивающие напряжения.

Диффузионное насыщение металлами. Для насыщения поверхности деталей металлами с целью увеличения их срока службы в настоящее время наиболее широкое применение нашли такие процессы, как алитированное и диффузионное хромирование. В отдельных случаях насыщение поверхности деталей производят также ниобием, молибденом, вольфрамом и ванадием или производят комплексное насыщение, например хромом и алюминием.

Эффективность применения насыщения стали карбидообразующими элементами объясняется тем, что получающийся в этом случае диффузионный слой состоит из карбидов этих элементов, отличающихся высокой твердостью, износостойкостью и эрозионной стойкостью. С другой стороны, насыщение поверхности сплавов на нежелезной основе (на основе никеля, молибдена, ниобия) алюминием и хромом сообщает им высокие жаростойкость, предел выносливости и способность к сопротивлению термическим ударам. Особенно эффективным является применение диффузионного хромирования и комплексного насыщения поверхности жаропрочных никелевых сплавов хромом и алюминием (*хромоалитирование*).

Насыщение хромом позволяет значительно увеличить коррозионную стойкость железа и стали в азотной и уксусной кислотах, в среде перекиси водорода и в растворе хлористого натрия. Насыщение вольфрамом и молибденом сообщает коррозионную стойкость железу и стали в серной кислоте, насыщение марганцем увеличивает стойкость в среде перекиси водорода и хлористого натрия, а насыщение ниобием и ванадием способствует повышению коррозионной стойкости стали в серной кислоте.

Повышение сопротивления усталости цементованных и цианированных деталей дробеструйной обработкой. Практика и лабораторные опыты показывают, что в результате поверхностной пластической деформации удается весьма существенно повысить сопротивление усталости деталей, подвергнутых предварительно химико–термической обработке.

Е. Т. Котиковой проведены испытания на предел выносливости цементованных крупномодульных ведущих зубчатых колес тягового двигателя тепло-

воза (модуль 10 мм). Цементация зубчатых колес, изготовленных из стали 18ХГТ, производилась в твердом карбюризаторе при температуре 910 °С с последующим высоким отпуском при температуре 650 °С. После цементации зубчатые колеса подвергали закалке с охлаждением в масле и отпуску при температуре 150 °С. В поверхностных слоях цементованных зубьев был выявлен троосто-мартенсит. Часть зубчатых колес после цементации и закалки подвергали поверхностному наклепу на дробеструйной установке ДУ–1 по режиму: частота вращения ротора 2 900 об./мин, время обработки 2 мин, диаметр стальной дроби 0,6 мм.

Испытания зубьев зубчатых колес при знакопостоянном изгибе осуществляли на гидравлическом пульсаторе с частотой 460 циклов в минуту на базе 10^6 циклов. Результаты испытаний зубьев, подвергнутых цементации и цементации с последующим дробеструйным наклепом, показали пределы выносливости соответственно 260 и 420 Н/мм², т.е. произошло повышение выносливости на 62 %.

Положительный эффект от поверхностного наклепа цианированных зубчатых колес коробок передач легковых автомобилей ГАЗ отмечает Д. А. Свешников. Зубчатые колеса из стали 40Х по существующей на заводе технологии подвергали цианированию на глубину около 0,2 мм с твердостью у поверхности *HRC* 48 – 56. В процессе эксплуатации наблюдались случаи усталостного разрушения зубьев на коробках передач автомобилей повышенной мощности. Проведенными на заводе исследованиями было установлено, что наклеп дробью почти в 2 раза повышает предел выносливости цианированных зубьев при пульсирующем изгибе. Наклеп дробью зубчатых колес не вызвал потери их статической прочности, не ухудшил шумовых качеств коробки передач, не изменил сопротивления контактному выкрашиванию и не вызвал существенных изменений их размеров.

Внедрение дробеструйной обработки позволило унифицировать детали и применить зубчатые колеса на легковых автомобилях повышенной мощности, обеспечив при этом надежность их в эксплуатации. Двукратное повышение долговечности вследствие дробеструйного наклепа цементованных зубчатых колес (модуль 2,75) наблюдалось у мотоцикла ИЖ. Зубчатые колеса мотоцикла в серийном производстве изготавливают из стали 12ХН4А и имеют после цементации и закалки с отпуском твердость *HRC* 60 – 52. Обработку зубчатых колес производят на дробеструйной установке типа ДУ–1 стальной дробью диаметром 0,9 – 1,0 мм в течение 10 – 14 мин.

Двукратное повышение срока службы зубчатых колес после дробеструйного наклепа было установлено при испытании зубьев на переменный изгиб по знакопостоянному циклу с коэффициентом асимметрии 0,5 при максимальном изгибающем напряжении 530 Н/мм². Положительное влияние цементации с последующим поверхностным наклепом отмечено и в ряде других исследований.

Пластическое деформирование цементованного и закаленного слоя с целью дополнительного повышения предела выносливости и поверхностной твердости может быть осуществлено и путем обкатывания деталей роликами или шариками.

Практическое применение обкатки роликами для упрочнения цементованных деталей затрудняется в связи с тяжелыми условиями, в которых работают обкатывающие ролики. Это вынуждает применять ролики из твердых сплавов или с наплавками, а при использовании стальных роликов приходится часто заменять их в связи с интенсивным износом.

Во многих случаях ответственные детали после цементации и термической обработки подвергаются шлифованию. Шлифование может вызвать в тонких поверхностных слоях детали значительные остаточные растягивающие напряжения. Применение после шлифования обкатки роликами цементованных образцов резко улучшает распределение остаточных напряжений и повышает предел выносливости.

На основании проведенных исследований и практического опыта можно заключить, что в результате химико–термической обработки (цементации или цианирования) предел выносливости деталей значительно повышается. Это особенно характерно для деталей с концентраторами напряжений.

Наибольшее практическое применение поверхностный наклеп получил для цементованных зубчатых колес, где в результате этой операции несущая способность повысилась в 2 раза, а долговечность – в несколько раз.

Для поверхностного пластического деформирования цементованных деталей могут быть использованы методы дробеструйного наклепа и обкатка роликами. Особенно эффективен метод поверхностного наклепа цементованных или цианированных деталей, предел выносливости которых понижен в связи с последующим шлифованием.

1.3.3.1. Совмещение упрочнения наклепом с гидрополированием

Значительное повышение эксплуатационных свойств может быть достигнуто при совмещении упрочнения наклепом дробью и гидрополированием. Влияние обработки гидрополированием на износостойкость стали изучалось на роликовых образцах диаметром 45 мм и высотой 10 мм из улучшенной стали 45, ОХЗМ, ОХНЗМФА и 30ХГСА. Часть образцов была подвергнута механическому полированию, а остальные – гидрополированию (в обоих случаях создавалась одинаковая шероховатость поверхности), после чего все образцы испытывали на износ на машине МИ. Предварительное шлифование всех образцов выполняли при одинаковом режиме со строгим контролем качества получаемой поверхности.

Изнашивание образцов изучали при трении скольжения и трении качения с 10 процентным скольжением, со смазкой и без смазки. Нагрузку на образцы изменяли от 500 до 1500 Н, что создавало напряжение в поверхностном слое 390 – 680 Н/мм². В качестве характеристики износа были приняты: абсолютный весовой износ (за 8 часов испытания при 200 об./мин), смятие (изменение диаметра) образца, изменение микроструктуры и первоначальной шероховатости поверхности трения и изменение коэффициента трения.

Как показали испытания, при обработке поверхности трения методом гидрополирования износостойкость повышается на 25 – 30 % по сравнению с

механическим полированием, причем величина износа зависит от фактической шероховатости поверхности. С увеличением шероховатости износ увеличивается, хотя коэффициент трения в диапазоне R_a от 20 до 1,25 мкм существенно не меняется. Оптимальная микрогеометрия поверхности (при которой износ минимален) устанавливается в зависимости от условий нагружения и изнашивания и физико-механических свойств материала, главным образом его поверхностного слоя.

Чтобы определить влияние наклепа, изучали износостойкость образцов из стали ОХНЗМ, поверхность трения которых была наклепана дробью на различную глубину, а также образцов, поверхность трения которых после наклепа дробью была подвергнута механическому полированию и гидрополированию. Экспериментами было установлено, что с увеличением глубины наклепа износостойкость растет до определенного предела, а затем снижается. Износостойкость образцов, поверхность трения которых была наклепана на глубину 0,35 мм (время обдувки 1 мин), была такой же, как образцов, обработанных резанием (точением или грубым шлифованием).

При наклепе образцов на глубину 0,2 мм (время обдувки 30 с) в условиях данного опыта (трение с 10-процентным скольжением, поверхность трения смазана) износостойкость стали ОХНЗМ повышалась на 50 – 100 % в зависимости от величины нагрузки. С увеличением нагрузки глубину предварительного наклепа следует уменьшать, так как поверхность получает наклеп в процессе испытания в результате действия нагрузки и «перенаклеп» приведет к усилению изнашивания.

Влияние гидрополирования на коррозионную стойкость стали изучалось в сравнении с влиянием обдувки дробью и механического полирования на образцах размером 80×50×55 мм из стали 1Х13. Предшествующая механическая обработка образцов заключалась в шлифовании или фрезеровании. После обработки дробью была достигнута шероховатость поверхности $R_a = 10$ мкм, после механического полирования и гидрополирования – $R_a = 2,5$ мкм. Кроме того, испытанию были подвергнуты образцы, поверхность которых после обработки дробью была доведена до $R_a = 0,63$ мкм гидрополированием и механическим полированием. Все образцы были изготовлены из стали одной плавки, подвергнутой после прокатки нормализации. Испытания проводили в течение 45 суток в трех средах: в парах соляной кислоты, в морской воде и в парах воды.

Коррозионная стойкость в зависимости от метода обработки поверхности определялась изменением веса образцов, временем до появления первого коррозионного центра, характером распределения продуктов коррозии по поверхности, глубиной очагов поражения.

Повышенную коррозионную стойкость образцов, подвергнутых гидрополированию в морской воде и парах воды, следует объяснять более равномерной шероховатостью поверхности, что уменьшает местную коррозию в результате действия газов и электролита, а также равномерной интенсивностью поверхностного слоя. Влияние этих факторов объясняется, главным образом, изменением электродного потенциала поверхности и уменьшением количеств гальванических микроэлементов на гидрополированной поверхности.

Дробеструйная обработка резко снижает коррозионную стойкость стали. Обработка поверхности гидрополированием после обработки дробью повышает коррозионную стойкость стали в морской воде и парах воды в 3,5 раза, а обработка механическим полированием – в 2,5 раза. При этом коррозионная стойкость стали, обработанной дробью с последующим гидрополированием, оказалась ниже, чем стойкость такой же стали, подвергнутой последующему механическому полированию. Это объясняется тем, что на гидрополированной поверхности остаются следы жидкости, содержащей нитрат натрия. В этом случае под действием паров соляной кислоты образуются окислы азота, усиливающие коррозию. В более активной среде (в парах соляной кислоты) коррозионная стойкость образцов из стали 1Х13 меньше зависит от способа обработки.

Характер распределения продуктов коррозии зависит от метода обработки поверхности, состав коррозионной среды на него не влияет. На поверхности, обработанной гидрополированием, продукты коррозии распределяются более равномерно, чем на поверхности, полированной механически. Равномерное распределение продуктов коррозии на обработанной поверхности благоприятно сказывается на прочности деталей, работающих под напряжением и при вибрации, так как при этом уменьшается возможность разрушения деталей от «коррозионных трещин», являющихся концентраторами напряжений.

Влияние обработки гидрополированием на предел выносливости стали изучалось на обычных образцах диаметром 14 мм с концентратором напряжений в виде кругового надреза глубиной 1 мм. Все образцы изготовляли на токарном станке из стали 1Х13 одной плавки после нормализации ($HB\ 200$) при одинаковых режимах. Затем поверхность участка образца с надрезом обрабатывали гидрополированием (до $R_a=0,63$ мкм) или механическим полированием, или дробью (до $R_a=1,25$ мкм), или дробью с последующим гидрополированием (до $R_a=5$ мкм). В зависимости от метода обработки поверхностный слой образцов имел различную глубину наклепа: после обработки дробью – 0,3 мм; дробью с абразивом – 0,2 мм; гидрополированием (зерно 14А100) – 0,15 мм; после грубого шлифования – 0,75 мм.

Затем семь образцов из каждой серии испытывали на машине У–12 при базе 107 циклов с построением кривых предела выносливости. Как показали результаты испытаний, предел выносливости образцов, обработанных гидрополированием, по сравнению с прочностью образцов, обработанных механическим полированием, повысился на 15 %, обработанных дробью – на 23 %, а дробью с последующим гидрополированием – на 36 %. Повышение предела выносливости образцов, обработанных гидрополированием, объясняется тем, что мелкие равномерно распределенные углубления на полученной таким способом поверхности не являются резкими концентраторами напряжений.

1.3.3.2. Упрочнение конструкционных сталей термомеханической обработкой

В последние годы разработаны и начинают внедряться в практику машиностроения новые способы упрочнения. Сущность одного из них заключается в проведении деформации переохлажденного аустенита с последующим осу-

ществлением закалки и низкого отпуска. Это приводит к увеличению предела прочности хромоникелевой стали (4,5 % Ni, 1,5 % Cr и 0,35 % C) с 2 090 Н/мм² после обычной термической обработки до 2 800 Н/мм² при проведении обработки по рассматриваемому способу. Весьма важным являлось возрастание значений пластических свойств стали: относительного удлинения с 2 до 12 % и сужения с 5 до 42 %.

Особенностью второго способа является осуществление процесса закалки в электромагнитном поле. Средние значения предела прочности и предела текучести материалов при обработке этим способом возрастают примерно на 350 – 700 Н/мм²; одновременно увеличиваются пластические свойства материалов и снижается чувствительность к надрезу.

У металлов, находящихся в процессе закалки в электромагнитном поле, достигаются одинаковые значения пределов текучести и прочности σ_g . Например, сталь после стандартной термической обработки с $\sigma_m = 1\,600$ Н/мм², $\sigma_g = 1\,920$ Н/мм² и $\delta = 10 \dots 11$ % после закалки в электромагнитном поле имеет одинаковые значения $\sigma_m = \sigma_g = 2\,580$ Н/мм² и $\delta = 5 \dots 6$ %.

Результаты, полученные при обработке по второму способу, можно объяснить мелкозернистой однородной микроструктурой материала; при этом достигается равномерное распределение атомов в кристаллической решетке металла, что обеспечивает более полное использование ресурса прочности.

Последовательность технологических операций при упрочнении конструкционных сталей по третьему способу, названному низкотемпературной термомеханической обработкой (НТМО), близка к первому. Она заключается в аустенитизации при температуре 1 000 – 1 100 °С, переохладении аустенита и деформации с обжатием 75 – 95 % при температуре 400 – 600 °С, закалке на мартенсит и низком отпуске (100 – 200 °С). При такой высокой степени деформации происходит дробление зерен аустенита на очень мелкие (1,5 – 2 мкм).

Последующая закалка приводит к возникновению мелкокристаллического мартенсита; последнее может быть объяснено тем обстоятельством, что размеры кристаллов мартенсита не могут превышать размеров зерен аустенита. Аналогичная структура мелкодисперсного мартенсита возникает при проведении поверхностной закалки после скоростного нагрева стали ТВЧ. В этом случае время нагрева, обычно составляющее несколько секунд, является недостаточным для роста зарождающихся зерен аустенита, что и является, по видимому, основной причиной образования кристаллов мартенсита весьма малых размеров, характерными особенностями которого является более высокая износостойкость, а также ряд других ценных качеств.

Проведенные исследования позволили установить, что имеется некоторая критическая степень деформации, необходимая для повышения механических свойств стали.

Существенным недостатком упрочнения способом НТМО является необходимость изготовления деталей в их почти окончательных форме и размерах, так как повышение прочности и твердости стали крайне усложняет последующую механическую обработку, почти полностью исключая резание. Кроме того, при нагреве изготовленных таким способом деталей в процессе эксплуата-

ции выше температуры низкого отпуска (100 – 200 °С) неизбежны снижение упрочнения или даже полная потеря приобретенных в результате такой обработки свойств. Практически повышенные прочностные свойства сохраняются только при комнатной и низкой температуре.

В настоящее время применяют детали, подвергаемые при эксплуатации нагреву до высокой температуры (от нескольких сотен до тысячи градусов и более). В зависимости от назначения и требуемой долговечности механизмов и аппаратуры, в которых имеются работающие в нагретом виде детали, к применяемым для их изготовления материалам предъявляются различные требования. Например, материалы для энергетического оборудования (котлов высоких параметров, трубопровода, подвергающихся нагреву частей турбин), предназначенного для длительной работы в течение 100 000 часов, должны обладать особенно высокой стабильностью и обеспечивать надежное сохранение размеров деталей. При этом в отдельных случаях допускаемые напряжения не должны вызывать релаксации и приводить за время эксплуатации к деформации более чем на тысячные доли процента.

Когда допускается более высокая деформация деталей, возникающая при ползучести материала и составляющая 0,5 – 1 % за время срока службы, прикладываемые напряжения могут быть установлены значительно большими. Наконец, для деталей, деформация которых за время работы может составлять около 5 – 10 %, при тех же температурных режимах допускаемые напряжения могут быть резко повышены; они обычно определяются испытаниями на длительную прочность.

Во всех рассмотренных примерах прочность деталей, работающих в условиях высокотемпературного нагрева, обуславливается преимущественно прочностью границ зерен.

Новым направлением в области повышения прочности аустенитных сталей и сплавов, предназначенных для работы при нагреве до высокой температуры (900 °С), является *способ высокотемпературной термомеханической обработки* (ВТМО), сущность которого заключается в совмещении пластической деформации на 25 – 35 % (проводимой после гомогенизации твердого раствора, осуществляемой при температуре около 1 200 °С, и последующего подстуживания до температуры 1 100 – 1 000 °С) с немедленным охлаждением, позволяющим предотвратить развитие рекристаллизации, а также зафиксировать особое структурное состояние, возникающее в результате деформации. После завершения указанных операций производят старение. Важной особенностью данного способа является повышение длительной прочности аустенитных сталей и сплавов при условии работы их при нагреве до температуры, не превышающей температуры рекристаллизации.

Эффект упрочнения с применением способа ВТМО ряда аустенитных сталей сохранялся до температуры 900 – 950 °С.

Особенностью ВТМО является возникновение в процессе высокотемпературной пластической деформации характерной зубчатости границ зерен с амплитудой и периодом отдельных зубцов около 5 – 10 мкм. При этом происходит дробление зерен на фрагменты, и уменьшаются размеры блоков.

При неправильном режиме ВТМО, когда развитие процесса рекристаллизации не удается остановить, на границах зерен вместо зубцов наблюдается возникновение зародышей новых зерен. При этом устраняется эффект повышения длительной прочности. Время до разрушения после ВТМО при правильном режиме может возрастать в несколько раз. Например, упрочнение хромоникельмарганцевистой аустенитной стали при температуре 900 °С и деформации до напряжения 140 Н/мм² приводит к увеличению времени до разрушения в 4 – 5 раз по сравнению с характеристиками длительной прочности после обычной стандартной термической обработки (заковки с последующим старением).

Наиболее распространенной обработкой металлов давлением является штамповка. Проведение ВТМО при штамповке осложняется вследствие трудности подбора оптимальных скоростей движения элементов штампа, температуры нагрева и степени деформации заготовки (так как возникающее в процессе обжатия дополнительное выделение тепла способствует развитию рекристаллизации), а также необходимости осуществлять быстрое охлаждение с помощью спрейера после завершения обработки давлением.

Весьма перспективным способом деформирования при проведении ВТМО является экструзия (выдавливание). Обрабатываемую заготовку помещают в матрицу, откуда она выдавливается через отверстие требуемой формы под давлением, создаваемым пуансоном. Выдавленная деталь интенсивно охлаждается.

Глубина слоя, в пределах которого удается получить развитие специфической микроструктуры, характерной для ВТМО, составляет 4 – 7 мм. Для относительно тонких изделий (с толщиной сечения порядка 10 – 15 мм) ВТМО протекает во всем объеме. Но в заготовках больших размеров аккумулированное в толще тепло, скорость отвода которого лимитируется, прежде всего, теплопроводностью обрабатываемого материала, способствует развитию рекристаллизации. При этом в толще изделия свойства материала будут иные, чем в поверхностном, периферийном слое, упрочненном ВТМО. Это обстоятельство следует учитывать при практическом использовании упрочнения ВТМО.

Так как процессы разрушения развиваются, как правило, с поверхности и начинаются в наиболее нагруженных участках, то выполнение локального упрочнения ВТМО может решить проблему значительного повышения прочности. Кроме указанных выше способов упрочнения, в практике машиностроения для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и других эксплуатационных свойств широко используются наплавка, металлизация распылением, гальванические и неметаллические покрытия.

1.3.3.3. Упрочнение деталей машин наплавкой

Наплавка применяется для упрочнения вновь изготавливаемых деталей машин и является одним из наиболее гибких методов восстановления и увеличения срока службы изношенных деталей машин. В практике машиностроения наряду с ручной газовой и электродуговой наплавкой широкое применение получают механизированные способы наплавки.

Наиболее широко газовая наплавка применяется для наплавки твердым сплавом и различными тугоплавкими соединениями инструмента и деталей, рабочие поверхности которых должны иметь большую твердость и высокую износостойкость. Такой способ наплавки наиболее распространен, так как с помощью его можно получать наплавленные слои толщиной от 0,5 мм и более. Для наплавки твердым сплавом рекомендуются углеродистые стали и особенно сталь УЗА. Можно производить наплавку на легированные инструментальные стали 5ХНМ, 3ХВА, 4ХВС и др. Лучше наплавляются низколегированные конструкционные стали 40ХН, 40Х и т.п. Такая наплавка применяется также при ремонте и упрочнении новых деталей строительных и дорожных машин, где требуется высокая износостойкость.

Ручная электродуговая наплавка используется при изготовлении новых деталей и в ремонтной практике. Типы и марки электродов для электродуговой наплавки поверхностных слоев деталей из сталей и сплавов регламентированы ГОСТом 10051–89. При выборе способа наплавки следует иметь в виду, что ручная наплавка в большинстве случаев повышает износостойкость при одновременном снижении предела выносливости до 25 % у деталей, изготовленных из нормализованной стали 45, и до 35 % у деталей, изготовленных из стали 45 и закаленных ТВЧ.

Механизированная наплавка под слоем флюса. Получение износостойких слоев на поверхностях деталей достигается различными способами. Способы легирования наплавленного под флюсом металла можно разделить на четыре группы. Легирование наплавленного слоя по первой группе достигается применением легированной проволоки при обычном флюсе (ГОСТ 10543–89). По второй группе легирование осуществляется применением специальной проволоки, внутри которой находятся легирующие элементы в виде порошка. Легирование по третьей группе выполняется путем применения специального флюса, содержащего легирующие элементы при наплавке обычной проволокой или лентой. В четвертой группе легирование достигается укладкой на поверхность легированного присадочного прутка, посыпанием порошка, намазыванием паст и др. Наплавка производится обычным электродом под слоем флюса. Значительное применение механизированная наплавка получила для упрочнения деталей металлургического оборудования, особенно прокатных валков станов. Износостойкость наплавленных сталью 3Х2В8 валков по сравнению с закаленными (валки изготовлены из стали 60ХТ) повышается в 3 – 4 раза. Износостойкость наплавленного металла валков под флюсом КС–320 составляет 180 – 200 % стойкости основного металла валков из стали 55Х.

В практике изготовления и ремонта деталей транспортных и сельскохозяйственных машин, металлорежущих станков и других машин во многих случаях путем наплавки, правильного осуществления процесса и последующей термической обработки удается повысить эксплуатационные свойства деталей в 2 – 5 раз и более.

Эксплуатационные испытания показывают, что стойкость опорных катков транспортных машин, наплавленных проволокой 30ХГСА под флюсом АН–348–А (ГОСТ 9087–89), в 5 раз больше, чем наплавленных электродом с

меловой обмазкой. Поверхностная закалка позволяет увеличить стойкость наплавленного металла еще в 2 раза.

Электрошлаковая наплавка. Высоколегированный наплавленный слой получают главным образом в результате применения присадочного металла (проволоки сплошного сечения, отливок, порошковой и электродной проволоки). Для высоколегированных сплавов наиболее пригоден флюс АН-22, для углеродистых и легированных сплавов – флюсы АН-8 (ГОСТ 9087–89) и молотый плавиковый шпат.

Электрошлаковую наплавку целесообразно использовать, когда необходимо наплавлять большое количество металла на большие партии изделий. Наиболее часто наплавляются детали с плоскими, коническими и цилиндрическими поверхностями.

Виброконтатная наплавка. Рассмотренные выше способы наплавки связаны с прогревом значительной части объема наплаваемых деталей, что приводит к деформации изготовленных деталей и другим нежелательным изменениям. Вибродуговой наплавкой можно наращивать на рабочие поверхности деталей машин слои толщиной 0,3 – 3,0 мм при наплавке в один слой практически без прогрева детали.

Широкое применение получили головки, сконструированные Л. М. Балабановым. Эти головки предназначены для наплавки на изношенные и вновь изготовленные детали слоя металла толщиной 0,5 – 2,5 мм, твердостью *НВ* 160 до *HRC* 50. В головке предусмотрена отдельная подача жидкости на деталь и конец рычага вибратора, чтобы избежать налипания брызг расплавленного металла и создать наиболее выгодные условия для охлаждения детали.

Этот способ наплавки имеет существенный недостаток, который заключается в неоднородности структуры и твердости наплавленного слоя. Неоднородность структуры приводит к образованию значительных внутренних напряжений, микротрещин, снижению предела выносливости и износостойкости. Улучшение эксплуатационных свойств наплавленного виброконтатным способом слоя может быть достигнуто применением современных процессов чистой обработки рабочих поверхностей деталей.

Процесс вибродуговой наплавки слоя постепенно внедряют в практику при ремонте и изготовлении различных деталей машин. На ряде заводов вибродуговую наплавку успешно применяют при ремонте автомобилей, станочного, кузнечно-прессового, литейного, подъемно-транспортного и другого оборудования.

Кроме рассмотренных способов наплавки в практике применяются и другие способы, например наплавка с нагревом ТВЧ главным образом порошковых твердых сплавов на рабочие органы почвообрабатывающих машин (лемеха плугов, культиваторов). Износостойкость лемеха и других деталей путем упрочнения наплавкой и нагревом ТВЧ может быть повышена в 10 – 15 раз.

Наплавка металлических поверхностей различными легированными сталями, твердыми сплавами и тугоплавкими материалами во многих случаях значительно повышает срок службы деталей машин, подвергаемых трению при нормальной и высокой температуре и ударных нагрузках. Так, например, бори-

рование сталей наплавкой с помощью электродов, содержащих в обмазке 80 % бориды хрома, 10 % графита, 8 % слюдяной муки и 2 % поташа, в 2 раза повышает износостойкость. Для наплавки деталей, подверженных абразивному износу, используется смесь, содержащая 50 % боридов хрома и 50 % железного порошка. Износостойкость слоя, полученного наплавкой такой смеси, выше износостойкости стали Ст3 в 10 – 12 раз, а слоя, наплавленного хромомарганцевой смесью, в 3 раза.

1.3.3.4. Упрочнение напылением на рабочие поверхности деталей материалов с высокими эксплуатационными свойствами

Напыление металла наиболее часто осуществляется с помощью газовой металлизации или электрометаллизации. Физико-механические свойства покрытия можно регулировать путем использования различных распыляемых металлов и режимов обработки.

При назначении способа металлизации необходимо учитывать преимущества и недостатки металлизации. К преимуществам следует отнести возможность наращивания на шейки валов машин, станин станков и других деталей слоев материала толщиной до 15 мм и более с требуемыми по условиям эксплуатации физико-механическими свойствами.

Высокая износостойкость металлизированного слоя при наличии смазки достигается вследствие возможности получения повышенной твердости слоя путем применения соответствующего состава напыляемого материала и выбора режимов обработки. Способ металлизации позволяет наносить слои из материалов со специальными свойствами, в результате чего не только увеличивается износостойкость, но и повышаются другие эксплуатационные свойства, например жаростойкость и коррозионная стойкость. Свойства металла заготовки вследствие незначительного нагрева его в процессе напыления не изменяются. К преимуществам следует также отнести сравнительную простоту и малую стоимость процесса.

К основным недостаткам способа металлизации относятся хрупкость нанесенного слоя и не всегда достаточная прочность сцепления с металлом заготовки, снижение механической прочности и особенно предела выносливости деталей в результате уменьшения размеров при подготовке поверхности и нарушения целостности рабочей поверхности деталей. Чтобы избежать трещин в напыленном слое и добиться лучшего сцепления его с основным металлом, надо стремиться снизить остаточные напряжения в слое. Недостатком процесса является также трудность последующей механической обработки металлизированного слоя.

Металлизированные детали имеют большую износостойкость при работе со смазкой, а продолжительность их работы (например, металлизированных валов) в 2 – 3 раза превосходит срок службы цементованных и закаленных деталей. После прекращения подачи смазки продолжительность работы до момента заедания у металлизированных слоев толщиной 5 мм в 10 – 14 раз больше продолжительности работы закаленных поверхностей многих автотракторных и других

деталей. Металлизацию напылением можно рекомендовать для нанесения антифрикционных покрытий, оловянистых баббитов и бронз, а также коррозионно-стойких и жаростойких покрытий.

Наряду с газовой металлизацией и электрометаллизацией в промышленности применяют плазменное напыление материалов со специальными свойствами на металлы, керамику, пластмассы, стекло, дерево и т.п. По технологическим возможностям этот способ превосходит применяемые способы нанесения покрытий. В этом случае расплавление и распыление тугоплавких материалов осуществляется с помощью высокотемпературной плазменной струи. При плазменном напылении в качестве материала покрытий используются окись алюминия, вольфрам, молибден, ниобий, интерметаллоиды, силициды, всевозможные карбиды, бориды и др. В соответствии со свойствами наносимых покрытий обеспечиваются требуемая жаропрочность, сопротивление окислению, износоустойчивость при высоких температурах и в различных средах.

Плазменное напыление покрытий имеет ряд преимуществ по сравнению с защитными покрытиями других видов: сверхвысокие температуры плазменного напыления позволяют расплавлять и наносить различные материалы с высокой температурой их плавления; поток плазмообразующего газа, не содержащего кислорода, позволяет напылять материалы без их разложения, не допуская окисления поверхности обрабатываемого изделия; поток плазмы позволяет получать сплавы различных материалов, в том числе тугоплавких, теплостойких, и наносить многослойные покрытия; высокая скорость потока газа позволяет увеличить плотность покрытия до 98 % и достичь прочного сцепления с основным металлом заготовки; покрываемая поверхность заготовки нагревается до температуры не выше 200 °С, что исключает коробление деталей и позволяет наносить материал на дерево, пластмассы и т.п.; энергетические характеристики потока плазмы легко регулировать в зависимости от требований технологии, что неосуществимо при газопламенном методе напыления.

Наиболее часто плазменное напыление используется для нанесения тугоплавких соединений. В этом и других случаях материал покрытия должен обеспечивать защиту от разрушения и окисления основного материала заготовки, хорошую прочность и сцепление с основным материалом, минимальную диффузию атомов основного материала и покрытия, ограниченную летучесть основного материала и стойкость при циклической термической нагрузке.

1.3.3.5. Упрочнение нанесением на рабочие поверхности деталей электролитическим способом материалов с высокими эксплуатационными свойствами

Для упрочнения деталей машин наиболее часто применяется хромирование, отслаивание, покрытие твердым никелем, борирование и наращивание тонких слоев сплавов. Электролитические покрытия оказывают существенное влияние на предел выносливости, износостойкость, коррозионную стойкость и другие эксплуатационные свойства деталей, машин и конструкций.

Хромирование. Хромирование может быть декоративное, антикоррозионное и износостойкое. Если хромирование применяют для защиты от коррозии, то стальные заготовки подвергают многослойному покрытию, например, слоем меди толщиной 0,03 – 0,04 мм, слоем никеля толщиной 0,015 – 0,20 мм и слоем хрома толщиной 0,001 – 0,0015 мм. Подслои также необходимы, если детали работают на износ в коррозионных средах.

При износостойком хромировании слой толщиной до 0,1 – 1,0 мм наносят непосредственно на стальную поверхность. Для восстановления номинальных размеров машин в процессе ремонта и упрочнения при изготовлении новых деталей применяют главным образом износостойкое хромирование. Хромовые покрытия снижают коэффициент трения сопряженных пар, что уменьшает теплообразование при трении. В результате износостойкость хромированных деталей возрастает в 5 – 10 раз и более. При тщательной подготовке поверхности прочность сцепления хрома со сталью, чугуном, никелем, медью и латуной при испытании на сдвиг достигает 300 Н/мм². Однако следует иметь в виду, что стали с высоким содержанием вольфрама и кобальта, а также высокоуглеродистые стали и высококремнистые чугуны нельзя покрывать хромом. Также трудно получить хорошее сцепление хрома с поверхностью деталей, испытывающих значительные внутренние напряжения, например, в результате неправильно проведенной закалки.

Прочность электролитического хрома резко снижается при увеличении толщины слоя покрытия. Увеличение толщины слоя от 0,1 до 0,5 мм снижает предел прочности в 2 – 3 раза. Механические свойства электролитического хрома ограничивают применение его для больших удельных нагрузок, как правило они не должны превышать 250 Н/мм². Предел выносливости стали после хромирования снижается на 15 – 20 % и тем больше, чем больше толщина слоя хрома. Для восстановления и в некоторых случаях для повышения предела выносливости поверхности деталей перед покрытием подвергают наклепу дробью или обкатке роликом.

При назначении хромирования в качестве способа упрочнения необходимо учитывать нецелесообразность увеличения толщины хрома свыше 0,5 мм, так как допустимая величина износа деталей, предназначенных к упрочнению хромированием, находится в пределах 0,05 – 0,50 мм.

Гальваническое хромирование начали применять для упрочнения таких деталей, как зубчатые колеса. В ЦНИИТМАШе для замены цветных металлов было осуществлено хромирование червячных цилиндрических валов из стали 45. Наибольшая эффективность упрочнения достигается при «пористом» хrome, особенно с крупной сеткой каналов. Это объясняется тем, что поры и каналы улучшают смазываемость рабочей поверхности червяка, вследствие чего повышается контактная выносливость пары.

Значительный интерес представляет хромирование деталей, работающих в условиях кавитационного разрушения. Сопrotивляемость электролитических осадков хрома кавитационному разрушению зависит от их твердости и типа. Твердость осадков, измеренная прибором ПМТ–3 при нагрузке на индикатор 50 Г, практически постоянна для слоя хрома толщиной свыше 20 мкм, а при

нагрузке 100 Г – для слоя толщиной свыше 45 мкм, что объясняется влиянием сравнительно низкой твердости хромируемого металла. В области блестящих покрытий при температуре электролита 45 – 55 °С твердость осадков изменяется незначительно. С увеличением блеска твердость повышается. Твердость молочных покрытий, получаемых при температуре выше 55 °С, понижается вследствие изменения структурной модификации хрома и укрупнения зерна.

Для исследования сопротивляемости кавитационному разрушению образцы хромировали в электролите состава 200 – 250 г/л CrO_3 и 1,8 – 2,0 г/л H_2SO_4 по двум режимам: температура электролита 45 – 47 °С, плотность тока 30 А/дм², средняя твердость осадков *НВ* 1 090; температура электролита 66 – 68 °С, плотность тока 50 А/дм², твердость осадков *НВ* 658.

Кавитационную стойкость осадков хрома определяли на магнитоотрицательном вибраторе при амплитуде колебаний 60 мкм, частоте 83 кГц. Образец помещали в торец никелевой трубки и погружали в сосуд с водой на глубину 3 мм. Температура воды составляла 25 °С. Испытание продолжалось в течение 3 часов (образцы взвешивали каждый час для определения потерь в весе). Установлено, что молочные хромовые осадки обладают лучшей сопротивляемостью кавитации, чем блестящие. У блестящих, более твердых и хрупких осадков, очаги разрушения крупнее, у молочных – мельче. Это объясняется меньшей пористостью и более низкими внутренними напряжениями молочного хрома. При небольших толщинах хрома (порядка 20 мкм) потери в весе за второй и третий часы резко увеличиваются вследствие изнашивания основного металла, особенно в случае блестящих осадков. Молочный хром притирается лучше, чем блестящий, что важно при изготовлении таких деталей, как клапаны гидропрессов.

Стойкость молочного хромового осадка кавитационному разрушению не зависит от стойкости основного материала детали. Кавитационное разрушение молочного хрома в 13 раз меньше, чем стали 45. В этом отношении он не уступает высоко-хромистым сталям 2Х13, Х9С2, а также сталям У8, ХВГ, обработанным на высокую твердость.

Отпуск молочного хрома при температуре 550 °С с выдержкой 2 часа и последующим охлаждением на воздухе значительно снижает кавитационную стойкость.

Исследования показали, что электролитическое хромирование можно применять для увеличения долговечности деталей, работающих в условиях кавитационного разрушения, например, стенок элементов уплотнений, работающих с вибрацией в соприкосновении с жидкостью; зубьев колес, подверженных кавитационному разрушению; клапанных деталей гидравлических прессов и др. Толщину слоя хрома следует назначать, исходя из условий работы детали: чем жестче кавитационные условия и чем дольше надо защищать деталь от разрушения, тем больший слой хрома требуется. Слои тоньше 50 мкм наносить не рекомендуется. Для клапанных деталей гидропрессов слой должен быть толщиной 150 – 250 мкм.

Для повышения износостойкости деталей применяют также плотные покрытия, наносимые по накатке. Срок службы их в 1,5 – 2 раза больше, чем по-

ристых покрытий, а расход хрома на 30 – 50 % меньше расхода при канальчатом хромировании.

Долгое время применение гальванического хромирования, особенно в массовом производстве, ограничивалось вследствие низкой скорости наращивания хрома в стационарных ваннах и отсутствия автоматизированного оборудования.

В настоящее время освоено более производительное хромирование на токе переменной полярности, в саморегулирующихся электролитах, струйное и проточное хромирование. Проводятся работы по комплексной автоматизации и механизации процессов хромирования.

Осталивание. При осталивании из растворов солей железа (хлористого железа или железного купороса) на рабочие поверхности деталей машин электролитически наращивают железные покрытия большой твердости, приближающиеся к твердости стали, поэтому процесс называют осталиванием.

В зависимости от состава электролита и режимов осталивания покрытия получают мягкие с твердостью до *HB* 200 и твердые с твердостью, соответствующей углеродистой закаленной стали (*HB* 250 – 600). Прочность сцепления покрытий со сталью, медью и чугуном достигает $15\,000\text{ Н/см}^2$, вследствие чего детали надежно работают при больших нагрузках. Покрытия не отслаиваются даже при пластических деформациях.

При разработке технологии осталивания следует иметь в виду, что один из основных показателей качества покрытия – прочность сцепления слоя с основным металлом – сильно зависит от подготовки поверхности под осталивание. Так, травление ее в соляной кислоте (вместо анодной обработки) позволяет получить прочность сцепления покрытия деталей из стали 20 порядка $6\,700\text{ – }7\,500\text{ Н/см}^2$. При анодном травлении в растворах серной кислоты прочность сцепления зависит от концентрации серной кислоты и времени травления. При концентрации кислоты выше 30 % и времени травления больше 2 минут прочность сцепления слоя с основным металлом снижается.

На прочность сцепления влияют: способ механической обработки и шероховатость исходной поверхности. Максимальная прочность сцепления для незакаленных сталей, чугунов и цветных металлов может быть достигнута при грубой шероховатости поверхности, полученной точением, а для закаленных сталей – после шлифования.

Прочность сцепления зависит также от свойств основного металла, его химического состава и термической обработки. При увеличении содержания углерода в стали от 0,2 до 0,5 % прочность понижается в среднем на 36 %; у закаленных и отпущенных сталей она на 25 – 35 % ниже, чем у термически необработанных.

Мягкими покрытиями можно наращивать детали с высокой поверхностной твердостью и наружные поверхности бронзовых втулок при ослаблении посадок в отверстиях; их можно использовать для повышения прочности сцепления баббита с чугунными вкладышами, изготовления биметаллических электродов и т.д. ПАО «Харьковский тракторный завод» производил серийные тракторы с поршневыми кольцами, покрытыми слоем электролитического же-

леза по пористому хрому. Покрытие наносят в электролите с содержанием 40 г/л сернокислого железа (закисного) и 200 г/л хлористого натрия при температуре 85 – 90 °С и плотности тока 2 А/дм². Толщина осажденного слоя составляет 10 – 12 мкм. После оксидирования в ванне (650 – 700 г/л едкого натра, 200 г/л нитрата натрия и 150 г/л нитрита натрия) при температуре 127 – 146 °С и выдержке в течение 10 мин слой получается мелкопористый, кольца хорошо прирабатываются, а долговечность колец и гильз повышается.

Твердые покрытия применяют при ремонте для наращивания изношенных поверхностей трения стальных и чугунных деталей (шеек, валов, гнезд подшипников, корпусов и др.) до номинальных размеров. При внедрении процесса проточного осталивания (вне ванны) можно наращивать слои толщиной 0,8 – 1,0 мм на внутренние поверхности деталей. Если твердость покрытия недостаточна, рекомендуется подвергать детали последующей цементации или хромированию. Себестоимость покрытия 1 см² рабочей поверхности при осталивании в 2 – 3 раза меньше, чем при хромировании.

Предел выносливости деталей, упрочненных осталиванием, снижается на 10 – 25 % в зависимости от способа подготовки поверхности перед покрытием; на 10 – 70 % в зависимости от твердости нарощенного слоя и на 20 – 25 % в зависимости от термической обработки после покрытия.

Изменение напряженного состояния покрываемой поверхности путем закалки с нагревом ТВЧ до покрытия, а также наклепа до покрытия и после покрытия почти полностью восстанавливает предел выносливости исходного материала заготовки детали.

При анодной обработке в ванне осталивания электролитически осажденного железа в слое покрытия образуются поры, подобные порам электролитического хрома. Смачиваемость маслами такого слоя в 5 раз больше, чем смачиваемость пористого хрома, в 12 раз больше смачиваемости чугуна, в 18 раз больше смачиваемости гладкого электролитического железа. Пористые осадки электролитического железа обладают высокими антифрикционными свойствами, устойчивостью против схватывания, надежностью работы пары трения. При трении со смазкой износостойкость электролитического железа не находится в прямой пропорциональности с твердостью при всех значениях последней. В зависимости от условий изнашивания пар трения следует получать покрытия с оптимальной твердостью. Так, например, при трении электролитического железа по чугуну при давлении 750 Н/см² и скорости взаимного перемещения 1,0 м/с оптимальное значение микротвердости составляет Н 400 – 450. При тех же условиях трения, но в паре с баббитом, величина оптимальной твердости повышается до Н 450 – 500. По мере увеличения микротвердости электролитического железа (Н 200 – 600) наблюдаются следующие стадии износа при указанных условиях трения: в диапазоне микротвердости Н 200 – 300 – интенсивный износ вследствие схватывания металла; при оптимальном значении микротвердости – окислительный износ; при твердостях выше оптимальных значений – хрупкое скалывание покрытий. В сопоставляемых условиях износостойкость электролитического железа при оптимальном значении микротвердости приближается к износостойкости закаленной стали 45.

Износостойкость электролитического сплава железо–никель в 1,5 – 2 раза превосходит износостойкость твердого электролитического железа.

Основным способом механической обработки осталенных цилиндров поверхностей является шлифование. Чтобы не допустить снижения микротвердости поверхностного слоя и получить шероховатость поверхности $R_a=1,25$ мкм, рекомендуется при шлифовании электролитического железа с микротвердостью 500 ед. применять круги 24А40СМ2К5. Глубина шлифования 0,06 – 0,10 мм/дв. ход, окружная скорость круга 25 – 40 м/с. Смазочно-охлаждающая жидкость должна подаваться в количестве не менее 10 л/мин и не должна вызывать коррозии покрытия.

Твердое никелирование. Никелевые покрытия имеют меньшую твердость, чем хромовые покрытия, сравнительно легко обрабатываются, имеют большую вязкость при толщине слоя до 2 мм. Коэффициент линейного расширения никеля близок к коэффициенту линейного расширения стали, а у хрома он в несколько раз выше. При твердом никелировании требуются источники постоянного тока в 3 – 4 раза меньшей мощности, чем при хромировании.

Электролиты твердого никелирования применяются различных составов. Приборостроительные заводы для получения высокотвердых блестящих покрытий используют электролит следующего состава: 140 г/л сернокислого никеля и 300 г/л щавелевокислого аммония, кислотность электролита составляет $pH=7,5 \dots 8$ при плотности тока 10 А/дм² и температуре 75 – 80 °С. Скорость осаждения никеля в таком электролите 50 – 60 мкм/ч, а получаемые осадки имеют микротвердость Н 550 – 650.

Для повышения твердости и улучшения сцепляемости с основным металлом детали, покрытые твердым никелем, желательно в течение часа подвергать термической обработке в муфельных печах при температуре 300 – 500 °С. Это на 200 – 250 ед. увеличивает микротвердость Н покрытия и повышает коррозионную стойкость деталей.

Коррозионная стойкость фосфористоникелевых покрытий в атмосферных условиях и пресной воде выше, чем у хромовых и обычных никелевых покрытий. Прочность сцепления их с мало- и среднеуглеродистыми сталями равен 12 000 – 14 000 Н/см², а с легированными сталями – 7 000 – 9 000 Н/см². Коэффициент трения стали по чугуна на 30 % ниже, чем у хрома, а по бронзе несколько выше. При сухом трении износостойкость покрытия в 2,5 – 3 раза выше, чем у закаленной стали 45, и на 10 – 20 % ниже, чем у хрома. Покрытия из фосфористого никеля меньше снижают предел выносливости, чем хромовые и обычные никелевые покрытия. Изнашивание сопряженных деталей из различных металлов при работе по фосфористоникелевым покрытиям в 4 – 5 раз меньше, чем при работе по стали, и на 20 – 40 % меньше, чем при работе по хрому. Твердое никелирование можно применять для упрочнения и восстановления коленчатых валов, шпинделей металлорежущих станков, поршневых пальцев, гильз цилиндров, поршней гидравлических машин, направляющих втулок и т.п., а также при ремонте неподвижных посадок и деталей приборов. При восстановлении шпинделей металлорежущих станков, шеек коленчатых валов, гильз цилиндров осаждается слой твердого никеля 0,75 – 1,25 мм.

Борирование. Электролитическое борирование заключается в том, что в результате электролиза расплавленной буры создается элементарный бор, который в момент выделения диффундирует в металл, образуя на его поверхности бориды железа, а при наличии углерода – карбиды бора. Плотность тока при электролитическом борировании 0,20 – 0,25 А/дм². Температура электролита регулируется при помощи реле и контактного терморегулятора. Установка работает на постоянном токе.

К основным технологическим факторам, влияющим на физико-механические и эксплуатационные свойства слоя бора, относятся температура электролита, время выдержки и химический состав материала обрабатываемых заготовок.

На низколегированных сталях при температуре до 950 °С можно получить слой толщиной около 0,3 мм. При дальнейшем повышении температуры толщина слоя увеличивается мало, но значительно возрастает его хрупкость. С увеличением времени выдержки (до 6 – 7 ч) толщина слоя возрастает по параболическому закону. Микротвердость слоя составляет 2 000 – 2 500 ед. Наибольшую твердость имеет борированная поверхность деталей из сталей 55С2Л и 30ХГСА, несколько меньшую – из сталей 12ХН2А и 12ХН3А, еще меньшую – из сталей 40Х и 35.

При любых температурах (прочие условия одинаковые) максимальная толщина борированного слоя получается на деталях из стали 30ХГСА, затем она последовательно уменьшается на деталях, изготовленных соответственно из сталей 50С2А, 12ХН3А, 12ХН2А, 35 и 40Х. Рекомендуется детали из указанных сталей борировать при температуре 950 °С и выдержке в течение 6 часов. При этих условиях получается слой наилучшего качества и достигается высокая износостойкость борированных деталей. Из указанных выше сталей, подвергнутых сравнительным испытаниям, после борирования наиболее износостойкой оказалась сталь 12ХН2А, а затем стали 12ХН3А и 40Х. С целью повышения предела выносливости борированной стали рекомендуется упрочнять ее обкаткой роликами. Свойства слоя бора не изменяются при нагреве до температуры 950 °С. Этот слой имеет повышенные кислотостойкость и жаростойкость при нагреве до температуры 300 °С. Высокая твердость слоя бора увеличивает износостойкость поверхности детали. Поэтому борированием упрочняют детали машин, работающие в тяжелых условиях: при наличии абразивной среды и ударных нагрузках, например втулки буровых насосов.

Как показал опыт завода «Борец», борирование рабочей поверхности втулок позволяет увеличить их износостойкость в 4 раза по сравнению с втулками, закаленными ТВЧ.

В практике используется процесс борирования рабочих поверхностей деталей на глубину 0,2 – 0,4 мм в расплаве буры при температуре 900 – 950 °С и плотности тока 0,15 А/дм². Получаемый слой обладает высокой твердостью (1 600 – 2 000 ед.). Установка для борирования состоит из тигельной печи Ц–35, источников постоянного тока для электролиза расплавленной буры и катодной защиты тигля. Тигли отливают из сталей Х24Н12СЛ и Х23Н13. Анодом служит графитовый электрод, катодом – борлируемая деталь. Влияние борирования на

износостойкость (потерю веса в граммах) деталей тракторных гусениц при лабораторных испытаниях с сухим кварцевым песком, при продолжительности испытания в течение 2 – 4 часов таково: износ борированных пальцев в среднем снизился в 7 раз.

Оксидирование и фосфатирование. Все металлы на воздухе покрыты окисной пленкой, которая защищает их от действия окружающей среды, но толщина этих пленок мала. Для получения окисных пленок значительной толщины применяют специальную химическую, термическую или электрохимическую обработку поверхности металла. Наиболее широко применяются глубокое оксидирование и эматалирование.

Глубокое оксидирование – это процесс получения оксидных пленок толщиной более 30 мкм с высокой микротвердостью (400 – 450 ед.) и хорошими электроизоляционными свойствами. Этот процесс применяется для повышения износостойкости зубчатых колес, деталей двигателей, текстильных машин и других деталей из алюминия и его сплавов с содержанием не более 4,5 % *Si* и не более 7 % *Al*. Износостойкость перечисленных деталей после оксидирования при работе со смазкой повышается в 5 – 10 раз.

Для глубокого оксидирования используют электролит, содержащий 180 – 200 г/л химически чистой или аккумуляторной серной кислоты, не больше 30 г/л алюминия и 0,5 г/л меди. При упрочнении сплавов АМг, АМЦ, АЛ2, АЛ4 анодная плотность тока поддерживается в пределах 2,5 – 5 А/дм², а температура электролита – в пределах 5 – 10 °С. Начальное напряжение обычно составляет 20 – 24 В. При обработке вторичных сплавов температуру электролита рекомендуется снижать до –10 °С. Для оксидирования можно использовать как постоянный, так и переменный ток. Лучшие результаты достигаются при наложении переменного тока на постоянный ток.

Процесс глубокого оксидирования имеет технологические трудности, вызываемые нарушением режима охлаждения, отклонением состава электролита от нормы, недостаточной подготовкой поверхности, наличием на деталях острых углов и граней. Размеры деталей при оксидировании увеличиваются приблизительно на половину толщины оксидного слоя.

Для повышения стойкости против коррозии детали после оксидирования и тщательной промывки в воде подвергают специальной обработке для уплотнения оксидной пленки, чтобы закрыть доступ окружающей среды к металлу через поры пленки. Для этого детали погружают в расплавленный парафин или воск, покрывают их олифой, лаками, наполняют поры хроматами и др.

Эматалирование заключается в электролитическом нанесении непрозрачных пленок толщиной 10 – 12 мкм, микротвердостью 600 – 700 ед., имеющих красивый декоративный вид, а при использовании щавелевокислых электролитов – высокие износостойкость и диэлектрические свойства. Пленки могут быть блестящими, матовыми, окрашенными. По внешнему виду они напоминают фарфор, пластмассу, мрамор, эмаль. Эматалевый слой устойчив в органических растворителях, минеральных и животных маслах, органических кислотах; не трескается при ударных и сжимающих нагрузках; выдерживает нагрев до температуры 300 °С. Эти качества пленки используют для защиты от корро-

зии и отделки медицинских аппаратов, приборов, мебели, а также для повышения износостойкости деталей машин из алюминиевых сплавов, в которых содержание легирующих добавок не должно превышать 2 % *Cu*, 1 % *Re*, 1 % *Ni*.

Для уплотнения эматалевой пленки детали после обработки кипятят в дистиллированной воде.

В результате фосфатирования на поверхности деталей из углеродистых и низкоуглеродистых сталей, чугуна и некоторых цветных металлов (алюминия, магния, цинка, кадмия) образуются пленки нерастворимых солей марганца и цинка толщиной 2 – 15 мкм. При этом размеры детали увеличиваются на значительно меньшую величину, чем толщина фосфатной пленки, так как обрабатываемый металл частично растворяется. Фосфатный слой устойчив на воздухе, в керосине, толуоле, смазочных маслах и легко разрушается в щелочах и кислотах. Фосфатные пленки прочно удерживают масла, лаки, краски и обладают хорошей адгезионной способностью. Они имеют невысокую механическую прочность и плохо сопротивляются истиранию. Фосфатные пленки жаростойки при температуре 500 – 600 °С. Расплавленный металл не смачивает пленок.

1.3.3.6. Упрочнение нанесением на рабочие поверхности деталей химическим способом материалов с высокими эксплуатационными свойствами

В промышленности применяются различные химические способы нанесения никелевых, хромовых, кобальтовых, никель–кобальтовых и других покрытий. Процесс химического нанесения покрытий состоит из следующих операций: подготовки заготовок к покрытию, нанесения покрытия на рабочие поверхности деталей, термической обработки и механической обработки. Готовят заготовки к химическому покрытию так же, как и к гальваническому.

После термической обработки покрытий при температуре 350 – 450 °С прочность их сцепления с основным металлом детали, твердость и износостойкость возрастают в 1,5 раза и более. Прочность сцепления покрытия с основным металлом высокая; например со сталью 10 – выше 300 Н/мм². Прочность сцепления слоя, наносимого химическим путем, с углеродистыми сталями выше, чем с легированными сталями или с быстрорежущими сталями.

Скорость осаждения металла зависит от температуры ванны. Так, с повышением температуры никелевой ванны от 50 до 90 °С скорость осаждения никеля возрастает примерно в 7 раз.

Для химического способа нанесения покрытий используют несложное оборудование. Установка для химического никелирования состоит из бака с раствором, ванны, теплообменников, баков с хлористым никелем, гипофосфатом и едким натром, насосов, регулятора, соленоидного клапана, фильтра и электрода. Никель осаждается при температуре 80 – 90 °С.

Химическое хромирование возможно только по слою никеля толщиной более 1 мкм. Для нормальной работы в ванну через каждый час добавляют до 3 г/л гипофосфата и до 3 г/л уксусной кислоты и едкого натра. Катализаторами служат пластинки из железа, алюминия или других металлов, которые контак-

тируют с обрабатываемыми заготовками. С целью придания слою хрома более высокой твердости заготовки нагревают до температуры 600 – 800 °С, а затем механически обрабатывают (обычно полируют).

Предел выносливости деталей, покрытых никелем и прошедших отпуск при температуре 400 °С, снижается на 30 – 45 %, а износостойкость их повышается в 2 – 3 раза. Химическое упрочнение никелем применяется для деталей топливной аппаратуры, силуминовых корпусов гидравлических насосов, золотников и поршней гидравлических агрегатов из дуралюмина Д1. Химическое никелирование рекомендуется использовать для защиты изделий, работающих в условиях среднего и повышенного коррозионного воздействия, вместо многослойных гальванических покрытия никель–хром и медь–никель–хром. Химический способ применяют при покрытии никелем керамики, пластмассы и других диэлектриков для создания металлической проводящей поверхности, а также для деталей из алюминия и его сплавов, титана и керамики, чтобы получить возможность паять их мягкими припоями.

На ряде предприятий химическое никелирование позволило заменить дорогие высоколегированные стали (типа Х17Н2), работающие при температуре до 600 °С, менее легированными сталями.

Термически обработанные никелевые покрытия вследствие их большой твердости, хорошей прирабатываемости, имеет высокую износостойкость, возможность нанесения на различные детали сложного профиля и поэтому должны найти широкое применение в машиностроении для повышения надежности машин. Химическое хромирование применяется для упрочнения деталей машин и инструмента. На его основе целесообразно упрочнять режущие инструменты, предназначенные для работы с малыми стружками и повышенными скоростями резания, а также измерительные инструменты сложного профиля. Такие инструменты перед хромированием обезжиривают и декапируют в 50-процентном растворе соляной кислоты. Резцы, хромированные химическим способом и затем нитроцементованные, не уступают по своему качеству алмазным расточным резцам.

Химическое упрочнение особенно экономично для деталей сложных форм, так как стоимость этого способа не зависит от формы деталей.

1.3.3.7. Упрочнение нанесением эмалевых покрытий на рабочие поверхности деталей

Эмалирование в основном применяется для стальных и чугунных изделий бытового назначения, в химической и пищевой промышленности, для электроосветительной аппаратуры и др.

В зависимости от состава эмалей и способа покрытия эмалевому слою могут быть приданы: высокая кислотощелочностойкость, жаростойкость и др.

Проведенные в Институте комплексной механизации шахт Донбасса исследования износостойкости эмалевых покрытий показали целесообразность эмалирования различных деталей машин для повышения их долговечности и надежности работы.

Из деталей проходческих насосов наибольшему изнашиванию подвержены рабочие колеса. Срок их службы при работе насосов не превышает 500 – 600 часов. Колеса же, эмалированные сухим способом пудровой эмалью № 51 – 52 по грунтовой эмали № 1 – 2 слоями 1,5 мм, служат в 3 раза дольше. Лопастей двухступенчатого высоконапорного осевого вентилятора, изготовленные из листовой стали 30, после покрытия эмалью № 401 по грунтовой эмали № 27 (слой толщиной 0,7 – 1,5 мм) служат на 3 000 часов дольше, чем до покрытия.

В настоящее время ведутся работы с целью повышения качества и надежности эмалевых покрытий, механизации и автоматизации процессов эмалирования. Например, в лаборатории Научно-исследовательского института санитарной техники изучали возможность применения электрического поля коронного разряда для распыления и осаждения стекловидных эмалей. Для эмалирования чугунных деталей эмалевыми пудрами применяли распылитель, включающий воронку–сопло с натянутой на расстоянии 500 мм от нее никелевой проволокой, служащей коронирующей системой «трубопровод–электрод», высоковольтный фарфоровый изолятор и центральный провод–электрод.

Тонкодисперсная эмаль (пудра под давлением 10 – 15 Н/см²) подается в трубопровод, находящийся под высоким потенциалом. Коронный разряд возникает вследствие большой разности потенциалов между воронкой и заземленной эмалируемой поверхностью. Таким образом, заряженные частицы, двигаясь к заготовке, создают слои коронирующих точек, увеличивая тем самым напряженность электрического поля у поверхности заготовки. Ионы, испускаемые коронирующими точками, сообщают дополнительный заряд частицам, осевшим на заготовку, что способствует увеличению силы адгезии и созданию плотного слоя покрытия.

Стальные детали эмалируют грунтами и покровными эмалями, размолотыми в шаровых или вибрационных мельницах до таких размеров, чтобы на сите, имеющем 6 400 отверстий на 1 см², оставалось не более 2 % материала.

Для получения высококачественного покрытия следует применять состав из 56 – 58 г грунта плотностью 1,65 – 1,68 г/см³ и 58 – 60 г покровной эмали плотностью 1,63 – 1,67 г/см³.

Электроэмалирование и электроглазурование рекомендуется применять в машиностроении для нанесения силикатных (эмали А–19, А–20, А–31) жаростойких покрытий на детали, работающие при высоких температурах.

Покрытие эмалью крупногабаритных деталей ограничивается размерами печей для обжига. Печи для эмалирования цистерны объемом 20 – 100 м³ представляют собой сложные сооружения, кроме того, управлять обжигом и равномерно прогревать все части сложных деталей в таких печах довольно трудно. Поэтому в подобных случаях покрытие эмалью производят в электромагнитном поле на станках–автоматах. Нанесенную на поверхность металла эмаль расплавляют, прогревая тонкий слой металла в электромагнитном поле высокой, а иногда и промышленной частоты. После остывания эмаль образует прочную пленку. Сплошное эмалевое покрытие можно получить на поверхностях любой величины, так как покрывать можно последовательно участок за участком, а не всю деталь сразу, как при обжиге в печах. К тому же этот способ эмалирования

экономичнее, так как коэффициент полезного действия индукционных установок выше, чем печных, а время процесса значительно меньше.

Эмалирование в электромагнитном поле можно осуществлять при неподвижном или подвижном индукторе. В первом случае рабочее движение сообщается заготовке, а во втором заготовка неподвижна, а движется вдоль нее индуктор.

Эмалевые покрытия, изготавливаемые, в основном, из дешевых материалов, составляют не более 6 % веса защищаемых деталей и придают им коррозионную стойкость в агрессивных средах, а также высокую теплостойкость при температуре 150 – 760 °С. Специальные жаростойкие керамические покрытия, состоящие из эмалевых стекол и огнеупорных окислов, выдерживают эксплуатацию в течение 1 000 часов при температуре до 1 100 °С. Морозостойкость стальных эмалированных деталей достигает –70 °С, а чугунных –30 °С. Такие покрытия на деталях из углеродистой стали выдерживают повторяющуюся смену температур от +540 °С до –50 °С, а на деталях из нержавеющей сталей от +980 °С до –50 °С.

1.3.4. Изготовление деталей из спеченных материалов (порошковая металлургия)

Развитие всех отраслей промышленности, а также задача повышения надежности и качества выпускаемых изделий потребовали создания новых конструкционных материалов. Методы порошковой металлургии позволяют получать материалы и детали, характеризующиеся высокой жаропрочностью, износостойкостью, стабильными магнитными и различными свойствами, которые нельзя получить, применяя другие методы изготовления. Возможность получения псевдосплавов из таких металлов, как медь–вольфрам, серебро–вольфрам и др., обладающих высокой электропроводностью и высокой стойкостью против электроэрозионного износа, делает их незаменимыми для изготовления электродных деталей. Порошковая металлургия обеспечивает существенный прирост экономии материалов (и это при том, что вся эта технология базируется на эффективном использовании отходов производства). Так, на каждой тонне деталей, полученных по этой технологии, экономится 1,5 – 2 тонны стали при более низкой трудоемкости.

При порошковой металлургии исходное сырье в виде порошка прессуется или формируется в заготовку или готовую деталь заданных размеров и подвергается термообработке – спеканию. Этот метод обеспечивает такую точность поверхностей и их шероховатость, которые позволяют чаще всего исключить механическую обработку или свести ее к минимуму. Технология порошковой металлургии позволяет повысить производительность в 10 раз, довести отходы производства до 1 – 5 %, а часто делать детали прямо из отходов, например дробленой стружки. Изготовление 10 000 тонн изделий из железного порошка высвобождает 1 000 станков и около 2 000 рабочих, экономит до 20 000 тонн стального проката или при минимальной стоимости 1 тонны проката в 4 500 грн эта экономия может составить более 90 млн. грн. Порошковая метал-

лургия позволяет получить материалы с уникальными свойствами: жаропрочные, коррозионно-стойкие, повышенных функциональных свойств и т.д. или композиты из разнородных по физико-химическим свойствам материалов.

Выбор типа конструкционного материала зависит от физико-механических и эксплуатационных свойств, на которые влияет технологический процесс получения самих конструкционных материалов и деталей из них. Процесс изготовления деталей из этих материалов характеризуется высоким коэффициентом использования материала (0,85 – 0,95), малой трудоемкостью, высокой механизацией и автоматизацией. Конечно, можно эти материалы изготавливать, как и все – из исходного сырья, но главная фишка в этой технологии производства порошков и деталей из них в том, что отходы механической обработки (стружка), штамповки или порезки проката можно использовать при производстве порошков и получить значительный эффект.

1.3.4.1. Методы получения и технологические свойства порошков

Порошковая металлургия – отрасль технологии, занимающаяся производством металлических порошков и деталей из них. Из металлического порошка или смеси порошков прессуют заготовки, которые подвергают термической обработке спеканием. Промышленность выпускает различные металлические порошки: железный, медный, никелевый, хромовый, кобальтовый, вольфрамовый, молибденовый, титановый и др. Методы получения порошков условно разделяют на механические и физико-химические (табл. 27).

Распространено получение металлических порошков методами механического измельчения. Размол в различных мельницах применяют не только как самостоятельный метод получения порошков, но и как дополнительную операцию в производстве, основанную на физико-химических методах. Механические методы измельчения наиболее эффективны при получении порошков из отходов производства – стружки, обрезков, скрапа и т.п. Размол получают порошки из легированных сплавов строго заданного химического состава и из хрупких материалов, таких, как кремний, бериллий и т.д.

При применении механических методов исходный продукт измельчается без изменения химического состава. К недостаткам механических методов следует отнести высокую стоимость порошков, так как в нее входит стоимость изготовления исходных литых металлов и сплавов, и относительно низкую производительность, за исключением метода распыления. К физико-химическим методам относят такие технологические процессы, в которых получение порошка связано с изменением химического состава исходного сырья или его состояния в результате химического или физического (но не механического) воздействия на исходный продукт. Физико-химические методы получения порошков более универсальны, чем механические. Возможность использования дешевого сырья (отходы производства в виде окалина, окислов и т.д.) делает многие физико-химические методы экономичными. Порошки тугоплавких металлов, а также порошки сплавов и соединений на их основе могут быть получены только физико-химическими методами.

Характеристика основных методов получения порошков

Метод получения	Сущность метода	Материал порошка	Особенности получаемых порошков
1	2	3	4
Физико-химические методы			
Восстановление окалины	Воздействие на окалину водородом, конверторным, природным газом или твердым углеродом при температуре 900 – 1 000 °С	Железо	Дешевизна, высокая чистота продукта, порошок имеет зерна осколочной формы
Восстановление окислов	Воздействие на окислы водородом, углеродом или гидридами	Никель, кобальт, титан, вольфрам, молибден и др.	Порошок имеет высокую чистоту, зерна – осколочную форму
Карбонильный	Термическая диссоциация карбониллов при температуре 200 – 800 °С	Железо, никель, кобальт и др.	Очень высокая чистота металла, зерна сферической формы
Электролиз	Осаждение металлического порошка из водного раствора соли с помощью постоянного электрического тока	Медь, железо, кобальт, хром, некоторые другие тугоплавкие металлы	Высокая степень чистоты, форма частиц преимущественно дендритная
Механические методы			
Размол в шаровых, вибрационных, молотковых и вихревых мельницах	Механическое измельчение исходного продукта	Для любых материалов	Сохраняется почти полностью химический состав исходного продукта, частицы имеют преимущественно неправильную форму
Распыление	Распыление жидкого металла газом или водой	Любые материалы с температурой плавления не выше 1 700 – 1 750 °С	Форма частиц преимущественно сферическая

В практике порошковой металлургии четкой границы между двумя указанными методами нет. Примером тому может быть применение механического размола спекшейся губки, получающейся при восстановлении окислов, или применение отжига порошков, полученных распылением или вихревым размолем, для снятия остаточных напряжений, обезуглероживания и восстановления окислов. Поведение металлических порошков при прессовании и спекании зависит от свойств порошков, которые, в свою очередь, определяются методами их получения. Металлические порошки характеризуются химическим свойством, а также физическими и технологическими свойствами. Химический состав порошков определяется содержанием основного металла или компонента и примесей. Физические свойства порошков определяются следующими характеристиками: размером и формой частиц, микротвердостью, плотностью, состоя-

нием кристаллической решетки. Технологические свойства характеризуются насыпной плотностью (массой), текучестью, прессуемостью и спекаемостью порошка. Эти характеристики являются функцией совокупности всех других свойств порошков.

Насыпная плотность (масса) – масса единицы объема свободно насыпанного порошка. Стабильность насыпной массы обеспечивает постоянную усадку при спекании. Масса зависит главным образом от формы и размеров частиц.

Текучесть – способность порошка заполнять форму. Текучесть ухудшается с уменьшением размеров частиц порошка и повышением влажности. Оценкой текучести является количество порошка, вытекаемое за 1 секунду через отверстие диаметром 1,5 – 4 мм. Текучесть порошка имеет большое значение, особенно при автоматическом прессовании, когда производительность пресса зависит от скорости заполнения формы. Низкая текучесть способствует также получению неоднородных по плотности деталей.

Прессуемость – способность порошка уплотняться под действием внешней нагрузки и прочность сцепления частиц после прессования. Прессуемость порошка зависит от пластичности материала частиц, их размеров и формы и повышается с введением в его состав поверхностно-активных веществ.

Под спекаемостью понимают прочность сцепления частиц в результате термической обработки прессованных заготовок.

1.3.4.2. Формообразование и обработка заготовок

Методами порошковой металлургии получают различные конструкционные материалы со специальными физико–механическими и эксплуатационными свойствами и детали из них (табл. 28). Магнитные материалы в основном можно разделить на магнитомягкие и магнитотвердые. В отдельную группу выделены материалы специального назначения, имеющие сравнительно узкие области применения.

Магнитомягкими материалами являются технически чистое железо, электротехнические стали, пермоллои, магнитомягкие ферриты, магнитодиэлектрики. Основные магнитотвердые материалы – сплавы на основе железа, никеля, алюминия, кобальта; магнитотвердые ферриты; пластически деформируемые магнитотвердые сплавы.

Магнитные материалы изготавливают из *Fe*-, *Ni*-, *Al* сплавов, а также из деформируемых сплавов *Cu*-, *Ni-Fe*; *Fe*-, *Co-Mo* и т.д. Для уменьшения пористости этих материалов следует вводить легирующие присадки, подбирать давление при прессовании и условия спекания, а также применять двукратное прессование и спекание. Пористость материалов обычно не превышает 3 – 5 %.

Ферриты получают различными способами. Наиболее простым и распространенным способом является способ окислов, при котором в качестве исходных материалов используют окислы соответствующих металлов (железа, цинка, кобальта, магния и др.). При производстве ферритов особое внимание уделяют процессу подготовки шихты: проверяют химический состав исходных компонентов и строго выдерживают расчет составляющих шихты.

Классификация спеченных материалов

Группа материалов	Вид изделий	Состав материала
Электро-механические	Магниты	Порошки из чистого железа, сплавов, окислов и т.д.
	Электроконтакты	Смесь тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена и др.) с медью или серебром
	Элетрощетки	Композиции графита с медью или серебром
Пористые	Фильтры	Порошки из бронзы, железа, титана, никрома нержавеющей стали и т.д. Материалы изготавливают из порошков с частицами преимущественно сферической формы, с пористостью до 50 %
	«Потеющие» изделия	Материалы с пористостью до 30 – 40 % из нержавеющей стали, никрома и др.
Фрикционные и антифрикционные	Подшипники скольжения	Композиции на основе медного или железного порошка с пористостью до 10 – 35 %, пропитанные графитом, маслом или пластмассой
	Тормозные накладки	Композиции на основе железного или медного порошка с различными легирующими добавками (свинец, никель и др.) и неметаллическими компонентами (асбест, кварц, графит и т.д.)
Инструментальные	Пластинки из твердых сплавов	Порошки из карбидов тугоплавких металлов (вольфрама, титана, тантала). В качестве связующего используют кобальт
	Пластинки из сверхтвердых материалов	Основой является зерна алмаза, эльбора, гексаниа, связующим – более мягкие металлы
	Минералокерамические пластинки	Основой является окись алюминия с незначительным количеством примесей
Компактные конструкционные	Различные детали машин и приборов	Порошки из различных легированных и углеродистых сталей, цветных металлов и их сплавов с пористостью не более 1,0 – 2,0 %
Термостойкие	Жаропрочные детали различных изделий	Композиции на основе карбидов, боридов, нитридов, нитридов тугоплавких металлов с чистыми тугоплавкими металлами
	Тугоплавкие детали различных изделий	Композиции на основе вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, их карбидов и других тугоплавких металлов и сплавов
Специальные	Детали вакуумной аппаратуры	Композиции на основе железа и тугоплавких металлов
	Полупроводники	Композиции на основе германия, бора ...

Магнитодиэлектрики представляют собой композиции магнитных и изоляционных материалов. В качестве изоляционных материалов применяют фенольные смолы, силикаты и т.д. Электроконтактные материалы изготавливают из смеси порошков тугоплавких металлов с медью и серебром. Тугоплавкие ме-

таллы (вольфрам, молибден, карбид вольфрама и т.п.) являются основой и определяют механические свойства, а легкоплавкие металлы являются наполнителями и придают материалом высокую электропроводность. Высокие теплостойкость, стойкость против эрозионного износа и механическая прочность обеспечивают большой срок службы и надежность электрической аппаратуры с этими контактами.

Широко применяемые в промышленности электроугольные щетки делят на четыре основные группы: графитовые, угольнографитовые, металлографитовые и электрографитированные. Графитовые щетки изготавливают из натурального графита без применения или с применением связующих (каменноугольные и синтетические смолы) и используют главным образом в машинах постоянного тока небольшой или средней мощности. Угольнографитовые щетки изготавливают из графита с введением других углеродистых материалов (сажи, кокса) и связующих веществ. После прессования щетки подвергают спеканию при температуре 300 – 1 200 °С и омедняют в электролитической ванне. Щетки данного типа устанавливают в электрических машинах средней мощности и на машинах с толчкообразной нагрузкой. Металлографитовые щетки изготавливают из порошков графита и меди. В отдельных случаях добавляют свинец, олово, серебро. В щетках с большой допустимой плотностью тока меди содержится до 80 – 90 %. Металлографитовые щетки широко применяют в промышленности при изготовлении синхронных электродвигателей, генераторов постоянного тока и т.д. Электрографитированные щетки получают из порошков графита и других углеродистых материалов с введением связующих. После прессования и отжига (спекания) заготовки подвергают графитизации. Процесс графитизации протекает при температуре 2 500 – 2 600 °С; при этом углерод исходных материалов переходит в графит. Такие щетки применяют в электрических машинах средней и большой мощности.

Методы порошковой металлургии позволяют получать материалы со специальными физико–механическими и эксплуатационными свойствами (пористые, фрикционные, антифрикционные и т.д.). Получают их из порошков самых различных металлов и сплавов. Вследствие высокой плотности механические свойства материалов практически не снижаются, а отдельные эксплуатационные свойства значительно увеличиваются. Например, спеченный алюминиевый порошок (САП) содержит в своем составе до 15 % окиси алюминия, которая в виде тонкой пленки покрывает зерна алюминия и образует в спеченном теле непрерывный каркас. Такая структура придает материалу высокую теплостойкость. Этот материал может длительное время работать при температурах до 600 °С. Преимуществом САП по сравнению с обычным алюминием является также низкий коэффициент линейного расширения. Применяют САП для изготовления компрессорных лопаток, поршней, колец для газовых турбин и т.д.

Весьма перспективно применение компактных конструкционных материалов в условиях крупносерийного и массового производства деталей сложной конфигурации небольших габаритных размеров. Основным преимуществом порошковых материалов является возможность использования в качестве сырья отходов производства (стружки, обрезков, окалины и т.д.) и значительное сни-

жение трудоемкости изготовления деталей, так как в большинстве случаев отпадает необходимость в обработке резанием.

1.3.4.3. Приготовление смеси и формообразование заготовок

Процесс приготовления смеси включает предварительный отжиг, сортировку порошка по размерам частиц и смешивание. Предварительный отжиг порошка способствует восстановлению окислов и снимает наклеп, возникающий при механическом измельчении исходного материала. Отжигу подвергают обычно порошки, полученные механическим измельчением, электролизом и разложением карбониллов. Отжиг проводят при температуре, составляющей 0,5 – 0,6 температуры плавления в защитной или восстановительной атмосфере.

Порошки с размерами частиц 50 мкм и больше разделяют по группам рассеиванием на ситах, а с более мелкими частицами – воздушной сепарацией. В металлические порошки вводят технологические присадки различного назначения: пластификаторы (парафин, стеарин, олеиновую кислоту и др.), облегчающие процесс прессования и получения заготовок высокого качества; легкоплавкие присадки, улучшающие процесс спекания; различные летучие вещества для получения деталей с заданной пористостью. Подготовленные порошки смешивают в шаровых, барабанных и других смешивающих устройствах.

Заготовки из металлических порошков формуют прессованием (холодным, горячим, гидростатическим) и прокаткой.

При *холодном прессовании* в пресс-форму засыпают определенное количество подготовленного порошка и прессуют пуансоном. В процессе прессования увеличивается контакт между частицами, уменьшается пористость, деформируются или разрушаются отдельные частицы. Прочность получаемой заготовки обеспечивается силами механического сцепления частиц порошка, электростатическими силами притяжения и трения. С увеличением давления прессования прочность заготовки возрастает. Давление распределяется неравномерно по высоте прессуемой заготовки из-за влияния сил трения порошка о стенки пресс-формы, вследствие чего заготовки получают с различной прочностью и пористостью по высоте. В зависимости от габаритных размеров и сложности прессуемых заготовок применяют одно- и двухстороннее прессование.

Односторонним прессованием получают заготовки простой формы с отношением высоты к диаметру меньше единицы и заготовки типа втулок с отношением наружного диаметра к толщине стенки меньше трех. Двухстороннее прессование применяют для формообразования заготовок сложной формы. После заполнения пресс-формы порошком к верхнему пуансону прикладывают усилие для предварительного прессования. Затем усилие прессования снимают и удаляют подкладку. В дальнейшем в процессе прессования участвуют оба пуансона. В этом случае требуемое давление для получения равномерной плотности снижается на 30 – 40 %. Давление прессования зависит от требуемой плотности, формы прессуемой заготовки, вида прессуемого порошка и других факторов. Использование вибрационного прессования позволяет в десятки раз уменьшить потребное давление.

В процессе прессования частицы порошка подвергаются упругим и пластическим деформациям, в результате чего в заготовке накапливаются значительные напряжения. После извлечения из пресс-формы заготовки размеры ее увеличиваются в результате упругого последствия. Режимы прессования, величина упругого последствия приведены в справочной литературе.

При **горячем прессовании** технологически совмещаются процессы формообразования и спекания заготовки. Температура горячего прессования составляет обычно 0,6 – 0,8 температуры плавления порошка. Благодаря нагреву процесс уплотнения протекает гораздо интенсивнее, чем при обычном прессовании. Это позволяет значительно уменьшить необходимое давление прессования. Методом горячего прессования можно получать материалы, характеризующиеся высокой прочностью, плотностью и однородностью структуры. Этот метод применяют для таких плохо прессуемых и плохо спекаемых композиций, как тугоплавкие металлоподобные соединения (карбиды, бориды, силициды и т.д.). Материалом для изготовления пресс-форм является, как правило, графит. Низкая производительность, малая стойкость пресс-форм (10 – 12 прессовок), необходимость проведения процесса в среде защитных газов – все это ограничивает применение горячего прессования и обуславливает его использование в тех случаях, когда другие методы порошковой металлургии не имеют успеха.

Гидростатическое прессование применяют для получения металлокерамических заготовок, к которым не предъявляют высоких требований по точности. Сущность процесса заключается в том, что порошок, заключенный в эластичную оболочку, подвергают равномерному и всестороннему обжатию в специальных герметизированных камерах. Отсутствие внешнего трения способствует получению заготовок равномерной плотности и снижению потребного давления. В качестве рабочей жидкости используют масло, воду, глицерин и др. Гидростатическим прессованием получают самые разнообразные по форме и размерам заготовки. К недостаткам данного метода следует отнести низкую точность получаемых заготовок.

Перспективными являются методы **газостатического прессования**, при которых в качестве рабочей среды, создающей давление прессования, используют газ, нагретый до температуры спекания порошков. В этом случае процессы формообразования и спекания заготовок технологически совмещаются.

Способом **выдавливания** изготавливают прутки, трубки и профили различного сечения. Сущность процесса получения заготовок заключается в выдавливании порошка через комбинированное отверстие пресс-формы. В порошок добавляют пластификатор массой до 10 – 12 % от массы порошка, улучшающий процесс соединения частиц и уменьшающий трение порошка о стенки пресс-формы. Профиль детали зависит от формы калиброванного отверстия пресс-формы. Полые профили получают с применением раскатателя. В качестве оборудования используют механические и гидравлические прессы.

Прокатка является одним из наиболее производительных и перспективных способов переработки порошковых материалов. Порошок непрерывно поступает из бункера в зазор между валками. При вращении валков происходит обжатие и вытяжка порошка в ленту или полосу определенной толщины. Про-

цесс прокатки может быть совмещен со спеканием и окончательной обработкой получаемых заготовок. В этом случае лента проходит через печь для спекания, а затем снова подвергается прокатке для получения листов заданных размеров. Ленты, идущие на приготовление фильтров и антифрикционных деталей, большей частью не подвергают дополнительной прокатке. Число обжатию, необходимое для получения беспористой ленты, зависит от пластичности композиции и режимов проката. Технологически получают ленты из различных материалов (пористых, фрикционных, твердосплавных). Применяя бункеры с перегородкой, изготавливают ленты из разных материалов (двухслойные). Прокаткой получают ленты толщиной 0,02 – 3,0 мм и шириной до 300 мм. Применение валков определенной формы позволяет получать прутки различного профиля, в том числе и проволоку диаметром от 0,25 мм до нескольких миллиметров.

1.3.4.4. Спекание и окончательная обработка заготовок

Спекание проводят для повышения физико–механических свойств заготовок, полученных прессованием или прокаткой. В спрессованных заготовках доля металлического контакта очень мала и спекание сопровождается ростом контактов между отдельными частицами порошка. Это является следствием протекания в спекаемом теле при нагреве следующих явлений: восстановления окислов, диффузии, рекристаллизации и др. Протекание этих явлений зависит от температуры и времени спекания, среды, в которой осуществляется спекание, и других факторов. В результате спекания изменяются размеры, чаще всего наблюдается усадка. Температура спекания составляет 0,6 – 0,9 температуры плавления порошка однокомпонентной системы или она может быть ниже температуры плавления основного материала для порошков, в состав которых входит несколько компонентов. Процесс спекания рекомендуют проводить в три этапа: I – нагрев до температуры 150 – 200 °С (удаление влаги); II – нагрев до 0,5 температуры спекания (снятие упругих напряжений и активное сцепление частиц); III – окончательный нагрев до температуры спекания. Время выдержки после достижения температуры спекания по всему сечению составляет 30 – 90 мин. Увеличение времени и температуры спекания до определенных значений приводит к увеличению прочности и плотности в результате активизации процесса образования контактных поверхностей. Превышение указанных технологических параметров может привести к снижению прочности вследствие роста зерен кристаллизации.

Распространенным технологическим приемом является проведение спекания в условиях, когда легкоплавкий компонент, входящий в шихту, образует при спекании жидкую фазу. Это в большинстве случаев активизирует усадку и обеспечивает получение деталей с малой или даже нулевой пористостью и высокими физико–механическими свойствами. Например, для этого применяют пропитку тугоплавких материалов серебром или медью при производстве электроконтактных деталей.

Основным требованием к атмосфере спекания является обеспечение безокислительных условий нагрева заготовок. Помимо этого, взаимодействие с

атмосферой не должно приводить к образованию соединений, ухудшающих свойства спеченных материалов. В большинстве случаев спекание проводят в восстановительной атмосфере, способствующей удалению окислов, или в вакууме. Для спекания используют электрические печи сопротивления или печи с индукционным нагревом. После спекания заготовки в некоторых случаях подвергают дополнительной обработке для повышения физико-механических свойств, получения окончательных размеров и формы, нанесения декоративных покрытий и защиты поверхности деталей от коррозии.

Для повышения физико-механических свойств спеченных заготовок применяют повторное прессование и спекание, пропитку смазками антифрикционных деталей, термическую и химико-термическую обработку. Применение повторного прессования и спекания позволяет получать детали с более высокой плотностью. Промежуточные отжиги, снимая наклеп в зернах заготовки, позволяют осуществлять дальнейшее уплотнение при относительно небольшом давлении. В производственных условиях, как правило, ограничиваются двукратным прессованием (в «черновых» и «чистовых» пресс-формах) и спеканием.

Спеченные материалы можно подвергать ковке, прокатке, штамповке при повышенных температурах. Горячей механической обработке подвергают, как правило, материалы из тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена и др.) для получения проволоки, листов, лент и т.п. Обработка давлением позволяет снизить пористость материалов и повысить их пластичность. Например, у спеченных брусков вольфрама с исходной пористостью 38 – 40 % послековки пористость снижается до 2 – 5 %, и заготовка приобретает пластичность, необходимую для протяжки через фильеры или прокатки.

Перед протяжкой для снятия внутренних напряжений, заготовки из вольфрама подвергают промежуточному отжигу при температурах выше 1 200 °С. После протяжки заготовки из вольфрама в проволоку диаметром 0,05 мм пористость его снижается до 1 %. Пропитку заготовок обычно выполняют погружением их в масляную ванну с температурой 70 – 140 °С. Длительность пропитки колеблется от 15 мин до 2 часов, а степень заполнения пор при этом составляет 90 – 95 %. Большая плотность заполнения пор маслом достигается при вакуумной пропитке.

Основными видами термической обработки являются отжиг и закалка. Отжиг используют для повышения технологических свойств при производстве деталей из тугоплавких металлов. Отжиг снижает прочностные характеристики и в несколько раз повышает пластичность материала, что облегчает дальнейшую обработку давлением (ковку, протяжку, прокатку и т.д.). Наличие пор в материалах делает их чувствительными к окислению при нагреве и к коррозии при попадании закалочной жидкости в поры при закалке. В качестве охлаждающих сред необходимо выбирать жидкости, не представляющие опасности с точки зрения коррозии в процессе хранения и эксплуатации закаленных деталей. В некоторых случаях детали из железного порошка подвергают науглероживанию методами химико-термической обработки – нагревом в ящиках с карбюризатором или в газовой науглероживающей атмосфере. Процесс насыщения углеродом протекает значительно быстрее вследствие проникновения газов

внутри пористого тела. Для повышения износостойкости деталей в определенных случаях применяют операцию сульфидирования.

Для придания спеченным заготовкам необходимых размеров и формы применяют калибрование, протягивание, штамповку и обработку резанием. Калибрование позволяет получать детали высокой точности. Операцию калибрования производят в специальных пресс-формах или приспособлениях. Перед калиброванием заготовки должны иметь размеры на 0,5 – 1,0 % больше (меньше для внутренних поверхностей) окончательных. Большая степень деформации при калибровании может значительно повлиять на физико-механические свойства, повышая прочность и снижая пластичность деталей, поэтому в некоторых случаях после калибрования следует применять дополнительное спекание или отжиг.

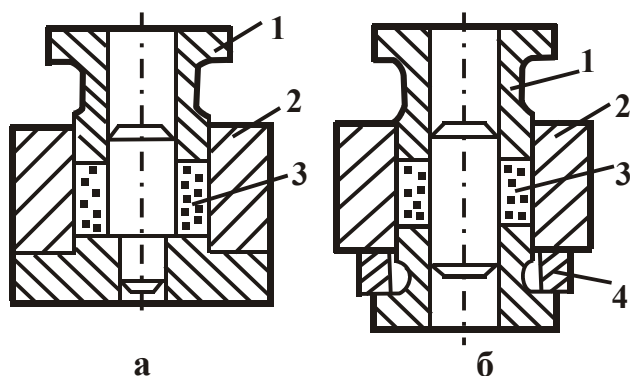


Рис. 4. Схемы холодного прессования: а – одностороннего; б – двухстороннего

(положение III). После этого центральный стержень продвигается вниз, и его калибрующая часть проходит через подшипник (положение IV). Этим осуществляется калибрование внутреннего и наружного диаметров. Для обеспечения калибрования по высоте нижний 5 и верхний 1 пуансоны продолжают движение навстречу друг другу до заданного передела (положение V). Затем нижний пуансон отводится вниз, а центральный стержень вверх, и верхний пуансон

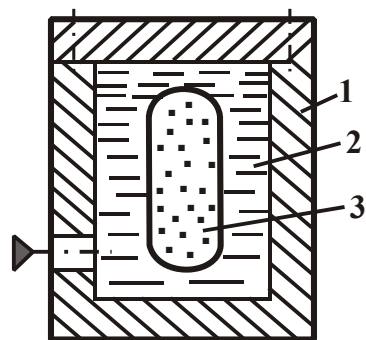


Рис. 5. Схема гидростатического прессования

1 при дальнейшем своем ходе проталкивает подшипник из матрицы вниз (положение VI), после этого цикл повторяется. Такое последовательное расчленение деформаций на ряд операций позволяет снизить усилие калибрования в 2 – 3 раза по сравнению с усилием калибрования при одновременном проведении деформации. Предварительная пропитка заготовок маслом значительно облегчает процесс калибрования.

Рассмотрим схему последовательных операций калибрования подшипников скольжения на автоматическом прессе (рис. 4 – рис. 7). Специальный захват устанавливает подшипник 3 над отверстием калибрующей матрицы 4 (положение I). Затем направляющая часть центрального стержня 2 входит во внутреннюю полость подшипника (положение II) и верхний пуансон 1 вдавливает подшипник в матрицу 4 (положение III). После этого центральный стержень продвигается вниз, и его калибрующая часть проходит через подшипник (положение IV). Этим осуществляется калибрование внутреннего и наружного диаметров. Для обеспечения калибрования по высоте нижний 5 и верхний 1 пуансоны продолжают движение навстречу друг другу до заданного передела (положение V). Затем нижний пуансон отводится вниз, а центральный стержень вверх, и верхний пуансон

1 при дальнейшем своем ходе проталкивает подшипник из матрицы вниз (положение VI), после этого цикл повторяется. Такое последовательное расчленение деформаций на ряд операций позволяет снизить усилие калибрования в 2 – 3 раза по сравнению с усилием калибрования при одновременном проведении деформации. Предварительная пропитка заготовок маслом значительно облегчает процесс калибрования.

Обработку резанием (точение, сверление, фрезерование, нарезание резьбы и т.д.) применяют в тех случаях, когда прессованием нельзя получить детали заданных размеров и формы. Обработка заготовок из спеченных материалов пористостью менее 5 % ничем существенно не отличается от обработки обычных беспористых материалов. С повышением пористости материала характер процесса стружкообразования

изменяется. Стружка дробится на отдельные элементы, появляются ударные нагрузки, снижается стойкость режущего инструмента.

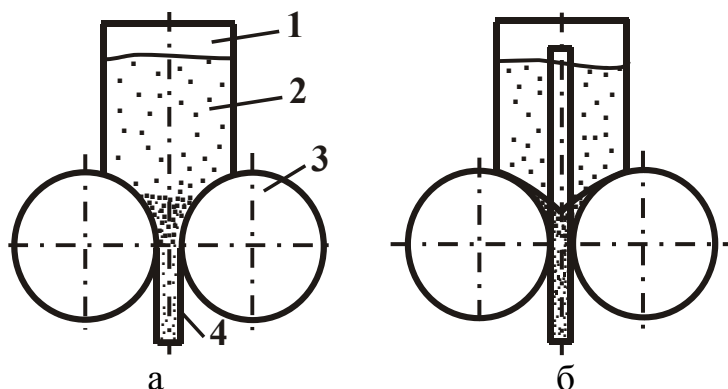


Рис. 6. Схема прокатки порошков

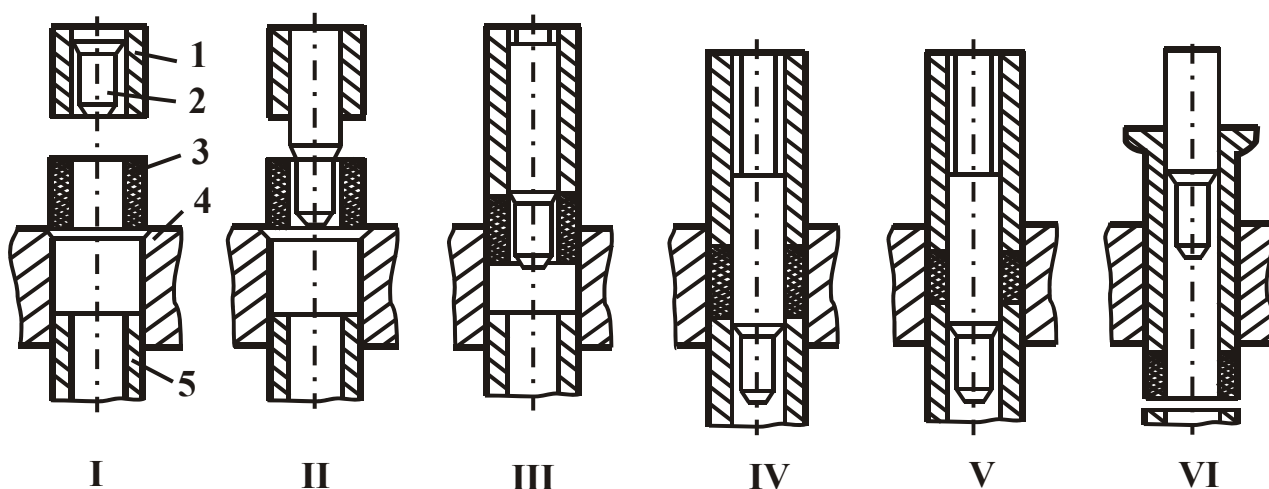


Рис. 7. Схема калибровки подшипников скольжения

Основной особенностью механической обработки заготовок из пористых материалов является необходимость применения острозаточенного режущего инструмента, больших скоростей резания и малых подач. Не рекомендуют применять обычные охлаждающие жидкости, которые, впитываясь в поры, вызывают коррозию. Пропитка маслом пористых заготовок перед обработкой также нежелательна, так как в процессе резания масло вытекает из пор и, нагреваясь, дымит. Нарезание резьбы рекомендуется производить твердосплавным инструментом. Для улучшения качества резьбы задний угол следует увеличивать примерно в 2 раза.

При обработке заготовок из пористых антикоррозионных материалов следует обращать внимание на состояние поверхностного слоя. Для предотвращения возможности закрывания пор необходимо использовать хорошо заточенный и доведенный режущий инструмент. Допустимый износ инструмента по задней поверхности должен быть уменьшен в 1,5 – 2 раза. Не допускается шлифование абразивными материалами во избежание попадания абразивных частиц в поры. Для обработки заготовок из тугоплавких и жаропрочных материалов применимы электрофизические и электрохимические методы обработки аналогичных литых заготовок из тех же материалов.

Защита спеченных деталей от коррозии и создание декоративных покрытий может быть реализована в результате применения химико-термической обработки, нанесения различных покрытий электрохимическими способами, оксидированием, фосфатированием и т.д.

1.3.4.5. Технологические требования, предъявляемые к конструкциям деталей из порошковых материалов

Технологический процесс изготовления деталей из порошковых материалов характеризуется особенностями, которые необходимо учитывать при проектировании этих деталей. При изготовлении деталей с высокими требованиями точности исполнительных размеров необходимо предусматривать припуск на их дальнейшую механическую обработку. Наружные и внутренние резьбы следует изготавливать обработкой резанием. В конструкциях деталей необходимо избегать выступов, пазов и отверстий, расположенных перпендикулярно оси прессования. Их следует заменять соответствующими элементами, расположенными в направлении прессования, или изготавливать обработкой резанием. Узкие и длинные пазы или выступы следует заменять аналогичными элементами, повышающими жесткость и прочность конструкций. Процесс прессования деталей сопровождается значительной усадкой, поэтому в их конструкциях нельзя допускать значительной разностенности, которая вызывает коробление и образование трещин. При незначительной разностенности в процессе прессования получают более равномерную плотность по высоте детали.

Длинные тонкостенные конструкции необходимо заменять на равнозначные по эксплуатационным показателям с учетом получения равномерной плотности прессуемой детали. Толщина стенок должна быть не менее 1 мм. Для свободного удаления заготовки пресс-форма должна иметь незначительную конусность. При проектировании конических поверхностей необходимо исходить из удобства извлечения заготовки, обратная конусность недопустима. Радиусы перехода сопрягающихся поверхностей должны быть не менее 0,2 мм.

1.3.4.6. Перспективы развития порошковой металлургии

Высокая стоимость пресс-форм делает рентабельным применение этой технологии при изготовлении не менее 500 крупных и сложных или 5 000 мелких деталей. Так, на моторном заводе ЯМЗ (г. Ярославль) дизельные вкладыши, изготовленные методом спекания, дают снижение трудоемкости на 30 %, себестоимости в 1,5 – 2 раза и расхода материала до 11 кг на изделие. Рост промышленного производства в целом по Украине, странам СНГ и в мире приводит также к росту производства и потребления продукции порошковой металлургии – собственно порошков (железо, медь, алюминий, никель, цинк, кобальт, олово, оксиды, карбиды и др.) и изделий из них – спеченных порошковых композиционных материалов для машиностроения, электро- и бытовой техники, спорта, медицины и других отраслей. Перспективность порошковой металлургии предопределяется тремя основными преимуществами:

- уменьшение затрат на обработку изделий, при этом необходимо учитывать затраты на помарочный сбор, хранение и транспортировку стружки;
- возможность получения изделий с регулируемой пористостью;
- создание градиентных и композиционных материалов, которые невозможно создать традиционными методами.

Перечисленные преимущества порошковой металлургии вместе с постоянным совершенствованием технологических процессов и оборудования предопределили ежегодный прирост (более 4 %) объемов производства продукции из металлических порошков за рубежом в последние десять лет. Объем продаж продукции порошковой металлургии составил (в млрд. долларов США):

1994 г.	1998 г.	2003 г.	2005 г.
3,8	4,9	6,0	7,0

В составе приведенных продаж 43 % обеспечивает Северная Америка, 22 % – Европа, 18 % – Япония и 15 % другие страны. Загрузка производственных мощностей в Европе составляет 90 %, а в Северной Америке около 70 %.

Объем производства металлических порошков около 1 млн. тонн (Северная Америка – 60 %, Европа – 20 %, Япония – 20 %). Отмечается более интенсивный рост производства легированных и высококачественных порошков и порошков композиционных материалов.

В 2004 г. произведено в мире 850 тыс. тонн изделий из металлических порошков. Потребление изделий из металлических порошков в Северной Америке приведено ниже:

- автомобили – 70 % (Европа – 80 %, Япония – 85 %);
- товары для поддержания здоровья;
- ручной инструмент – 16 %;
- товары для дома – 3,2 %;
- промышленные моторы, гидравлика – 3,2 %;
- бизнес–машины – 1,3 %;
- износостойкие детали – 1,3 %;
- все другие – 5,0 %.

Основным потребителем изделий из металлических порошков по-прежнему является автомобильная промышленность. Европейский автомобиль содержит в среднем 7,5 кг деталей из металлических порошков, а Североамериканский автомобиль содержит 16 кг деталей из порошков. Прирост веса порошковых деталей в автомобилях прогнозируется на уровне 3,7 % в год. Фирма «Хеганес» (Heganes AB, Швеция) прогнозирует рост веса порошковых деталей в Европейском автомобиле до 27 кг. Вместе с тем, необходимо учитывать, что другие области применения порошковых деталей могут расти быстрее, чем автомобильная промышленность. С другой стороны, разработка электромобилей может привести к обратному эффекту.

Увеличение использования деталей из металлических порошков сопровождается одновременным совершенствованием технологических процессов изготовления порошков и самих изделий. В настоящее время инжекционное формование с использованием соответствующих порошков и связок применяют:

- в Северной Америке 50 производителей;

- в Азии 50 производителей, в том числе 40 – в Японии;
- в Европе 20 производителей.

Объем производимой продукции составляет 450 тонн в год, из них 50 % нержавеющая сталь, 20 % твердые сплавы и 30 % керамика.

В результате совершенствования технологических процессов плотность изделия на основе железных порошков повысилась с $6,6 \text{ г/см}^3$ (1985 г.) до $7,4 \text{ г/см}^3$. Соответственно, требования к пределу прочности материалов на основе железа повысились с 220 Н/мм^2 до 360 Н/мм^2 (1985 г.). Дальнейшее повышение физико-механических свойств материалов будет достигаться в результате их легирования, термообработки и деформации после спекания. В России в 2005 году произведено 9,3 тыс. тонн порошков на основе железа, в том числе 5 тыс. тонн восстановленных (в основном на Слинском металлургическом заводе – ЗАО «СтаКС», Ростовская обл.), 4 тыс. тонн распыленных (отделение на «Север-Сталь – «ТяжМаш»», г. Череповец) и 300 тонн карбонильных. Закуплено за рубежом около 2,5 тыс. тонн порошков и порошковых смесей. Соответственно, производство изделий из железных порошков составило 8,5 тыс. тонн.

Объем производства электролитических медных порошков достиг 6 000 тыс. тонн (г. В. Пымша, Свердловской обл.), из которых около 60 % для экспорта. Созданы мощности для производства водораспыленных медных порошков до 1 500 тонн в год. Производство изделий из порошков на основе меди составляет около 1 500 тонн. Цинковый порошок производится в объеме 10 тыс. тонн в год, из которых 80 – 90 % потребляется предприятием-изготовителем.

Производство порошка вольфрама колеблется около 300 тонн в год, из которых 70 – 80 % используется для изготовления твердых сплавов.

Объем производства никелевых порошков колеблется от 2 000 до 2 500 тонн в год. В основном это карбонильный порошок, так как «Норильский никель» прекратил выпуск электролитического порошка, «Южуралникель» производит его мало и дорого. Мощности по производству порошков цветных металлов, как правило, загружены менее чем на 50 %.

В последнее время среди разнообразных способов формирования порошковых смесей проявляется все возрастающий интерес к методу теплого прессования, при котором удается достигнуть плотности образцов из порошков на основе железа $7,2 - 7,5 \text{ г/см}^3$ за одну операцию при давлении прессования 700 – 800 МПа. Процесс теплого прессования позволяет получить уровень плотности и механических свойств, сравнимый с образцами, полученным и обычным двойным прессованием и спеканием. Основными преимуществами данного процесса является использование пониженных давлений прессования и получения образцов с плотностью, близкой к теоретической.

Влияние температуры на пористость при прессовании порошковых смесей существенно и можно заметить, что при неудачном подборе смазки, которая вводится в порошок железа, реализуется обычное уплотнение, то есть его термическая активация зависит от подобранной смазки. Вообще смазки эффективно понижают трение между частичками порошка. Обычные смазки, такие как стеарат цинка и прочие вязкие смазки делают смесь клейкою. Таким образом, смазывающие вещества должны обеспечивать такую эффективность, что-

бы в условиях проведения операции не ухудшали текучесть предварительно нагретого порошка при заполнении формы. Исследование влияния температур на плотность образцов при теплом прессовании показало, что наиболее оптимальными следует считать температуры 150 °С и 450 °С. Температура 150 °С наиболее приемлема с технологической и энергетической точки зрения. После нагрева порошок прессовали под давлением 800 МПа.

В качестве смазки в состав исследуемых материалов вводили 0,6 % специального воска. Как видно из результатов, приведенных в табл. 29, независимо от состава основы, введение в состав шихты специального воска приводит к существенному повышению плотности прессовок при теплом прессовании.

Таблица 29

Изменение плотности образцов при разных режимах прессования с пластификатором

Основа	Состав пластификатора	Плотность, г/см ³			
		Холодное прессование		Теплое прессование	
		до спекания	после спекания	до спекания	после спекания
ПЖРВЗ.200.28 отожженный	0,6 % стеарата цинка	7,05	7,03	7,1	7,06
ПЖРВЗ.200.28 неотожженный	0,6 % специаль- ного воска	–	–	7,06	7,02
ПЖРВЗ.200.28 отожженный		–	–	7,12	7,04
ПК10Н4Д1,5М неотожженный		6,94	6,92	7,2	7,2
ПК10Н4Д1,5М отожженный		7	6,97	7,29	7,3
ASC 100.29		7	7,04	7,33	7,36
PASC60		6,91	7,05	7,18	7,3

Повышение плотности прессовок материала ПК10Н4Д1,5Г (аналог смеси Distaloy AE) составляет близко 0,3 г/см³ и достигает 7,3 г/см³ при давлении прессования 800 МПа. Уплотнение порошков, которое проводится с использованием разнообразных органических смазок, имеет основной общий недостаток, который заключается в том, что при их термическом удалении остаются поры. Использование в качестве смазки жидких металлов во многих аспектах является предпочтительным и устраняет недостаток, указанный выше.

В связи с этим возникает интерес использовать в качестве объекта теплового прессования композиционные (плакированные) железные порошки, представляющие собой железную основу и покрытие, состоящее из одного или нескольких элементов. Для этого были использованы плакированные железные порошки, полученные осаждением легкоплавких металлов из растворов солей, в частности, железный порошок покрывали оловом. Олово имеет низкую температуру плавления ($T_{пл}=232$ °С) и является наиболее подходящим элементом с точки зрения использования в процессе теплового прессования, так как легко теряет прочность при нагреве.

Результаты прессования железного порошка, плакированного оловом, и исходного с добавкой стеарата цинка в качестве традиционной смазки таковы: плотность при давлении прессования $P=200$ МПа составила $5,7$ г/см³, а при $P=800$ МПа – $7,3$ г/см³ для плакированных оловом порошков, а для порошков со стеаратом кальция эти значения плотности ниже на $0,2$ г/см³.

Полученные результаты показали, что плакирование железного порошка оловом позволяет повысить плотность прессовок на $0,1 - 0,2$ г/см³ при теплом прессовании. Это объясняется тем, что при низких давлениях пластичное олово обеспечивает более плотную укладку частичек, с повышением давления тонкие слои олова на частичках разрушаются, и проходит механическое сцепление.

Таким образом, повышение уплотняемости порошковых смесей на основе железного порошка при теплом прессовании реализуется при наличии в нем смазки, сохраняющей свою вязкость при температуре и давлении теплового прессования. Использование жидких легкоплавких металлов в качестве связки, которая не удаляется при нагревании, является перспективным. При этом введение легкоплавкого компонента в качестве покрытия на частицах порошка, является эффективным способом повышения плотности прессовки, а также равномерного распределения легирующего элемента по всему объему образца. Применение композиционных материалов (а они могут быть изготовлены и методами литья, прессования, склеивания и др.) является не менее эффективным решением экономии ресурсов, чем другие направления рассмотренные выше.

1.3.4.7. Плавные тугоплавкие соединения для инструментальных материалов

Перспективными материалами для ряда отраслей техники становятся тугоплавкие металлоподобные соединения. Среди них особое место занимают карбиды переходных металлов, которые применяются при создании материалов многоцелевого назначения методами порошковой металлургии. Особенно эффективно в качестве исходных материалов могут использоваться порошки плавных или псевдоплавных тугоплавких соединений. Одним из перспективных методов получения порошков плавных тугоплавких соединений является метод плавки в дуговой печи с помощью расходных электродов под давлением газа в рабочей камере. Оптимальные условия получения некоторых тугоплавких соединений и их сплавов приведены в табл. 30.

В случае получения карбидных фаз титана, циркония и ниобия в области их гомогенности условия плавления зависят от их состава.

Оптимальное давление газа в рабочей камере также зависит от состава карбидной фазы: для карбида титана составляет $7,0 - 8,0$ МПа, для карбида циркония $5,5 - 6,8$ МПа, для карбида ниобия $5,0 - 6,5$ МПа.

Высокая твердость плавных тугоплавких соединений, отсутствие у них пористости, монокристалльность зерен, относительно высокая тепло- и электропроводность определяют их эффективное использование при производстве композиционных, инструментальных, магнитно-абразивных материалов, твердых сплавов, а также в качестве свободных абразивов и шлифовальных кругов,

износостойких материалов вообще. Прогнозирование свойств таких материалов предусматривает установление механических, упругих, абразивных характеристик исходных материалов, их устойчивости к абразивному износу и другое.

Таблица 30

Оптимальные условия получения плавленных тугоплавких соединений

Соединение	Давление газа, МПа	Плотность тока, А/см ²	
		без подогрева	с подогревом
ТiК	6,0 – 7,0	250	120
ZrC	5,5 – 5,8	330	160
VC	5,0 – 5,5	330	200
NbC	5,0 – 6,5	340	200
TaC	6,5 – 7,0	400	320
C3C2	4,5 – 5,0	200	–
Mo2C	5,0 – 5,5	210	–
WC	8,0 – 9,0	220	220
TiC-TiB2	1,5 – 2,0	–	180 – 220
TiC-TiN	3,0 – 4,0	–	180 – 200

Абразивные свойства материалов являются интегральной характеристикой, зависящей от соотношения их твердости, пластичности и теплофизических характеристик. Для выявления путей регулирования свойств таких материалов необходимо исследовать характеристики исходных тугоплавких соединений различного химического и элементного состава, например, карбидов в области их гомогенности и сплавов (карбоборидов и карбонитридов).

Изучение микротвердости, миктродробности, прочности абразивных зерен карбидов титана, циркония и ниобия показало их зависимость от содержания углерода в пределах области их гомогенности.

Установлено, что микродробность абразивных частиц повышается с уменьшением их размера и увеличением нагрузки. Последнее связывают со структурой абразивных частиц и свойствами материала. Полученные в ходе исследования данные коррелируют с основными положениями теории микродробности материалов.

Установлена также зависимость микродробности карбидных фаз от содержания в них углерода. Так, с уменьшением количества связанного углерода микродробность карбидов уменьшается, что, по-видимому, обусловлено повышением их пластичности. Для карбидов металлов ванадиевой подгруппы зависимость микродробности от содержания углерода в карбидах имеет экстремальный характер. Для всех карбидов значения микродробности коррелируют со значениями микротвердости.

Прочность зерен для всех карбидов повышается с увеличением их размера и зависит от их состава, но ее величина зависит от вида карбида. Так, прочность зерен карбидных фаз циркония повышается с увеличением содержания в них углерода, а карбидных фаз титана – уменьшается. Прочность зерен карбидов зависит от положения карбидаобразующего металла в периодической системе элементов и максимальна для плавленного карбида вольфрама. Прочность

зерен плавленных карбоборидов и карбонитридов изменяется в зависимости от состава сплава и повышается с увеличением содержания в нем более пластичной составляющей. Для карбоборидов титана – это борид титана, а для карбонитридов – нитрид титана.

Зерна плавленных тугоплавких соединений в 2,5 – 5,0 раз прочнее зерен полученных традиционными методами порошковой металлургии, как это имеет место для плавленного карбида титана. Такая разница обусловлена отсутствием пористости в плавленных тугоплавких соединениях и их монокристалльностью.

Исследование прочности карбидных фаз циркония показало, что она растет с увеличением содержания углерода в карбиде. Подобным образом увеличивается микротвердость и микрохрупкость, что согласуется с представлениями о природе прочности шлифзерен, когда с увеличением микротвердости (при умеренной микрохрупкости) должна расти их прочность. Аналогичная зависимость имеет место и для карбидных фаз ниобия.

Зависимости прочности шлифзерен карбида титана и микротвердости от содержания в нем углерода различны. Для этих материалов следует допустить, что преобладающее влияние на величину прочности зерен оказывает микрохрупкость, которая в пределах составов карбидных фаз значительно выше у фаз с большим содержанием углерода (табл. 31).

Таблица 31

Прочность зерен порошков карбида титана,
полученных разными методами

Зернистость порошка	Метод получения карбида				
	Плавление под давлением газа	Псевдодавление	Печной синтез	Метод СВС	Алмаз АС15
	Прочность при сжатии, (Н/зерно)х1				
80/63	210	187	70	–	430
100/80	–	190	104	–	480
125/100	410	321	118	71	560
250/200	780	667	150	142	900
630/500	3400	1710	294	–	–
1000/800	7500	6908	–	–	–

Износостойкость единичных зерен плавленных тугоплавких соединений, которая особенно важна при создании абразивных (инструментальных) материалов, зависит от вида материала и его свойств. В данном случае важное значение приобретает степень взаимодействия абразивного материала с обрабатываемым материалом.

В различных исследованиях показано, что при обработке (шлифовании) титана имеет место его интенсивное взаимодействие с тугоплавкими соединениями. Так, в порядке уменьшения степени взаимодействия абразивных материалов с титаном некоторые тугоплавкие соединения в сравнении с традиционными абразивными материалами можно разместить в ряд: ЭВ→BN→B4C→AlB2→→NbC→ZrC→TiB2→TaC→ZrB2→W2B5→WC. В со-

ответствии с этим же порядком уменьшается величина износа микрорезцов из этих материалов. Исследование износа плавленных карбидов для титана марки ВТ1 показало, что максимальное изнашивание имеет место у карбида ванадия, минимальное – у карбидов тантала и вольфрама.

При этом износостойкость вольфрама превышает износостойкость сверхтвердых материалов, таких как синтетический алмаз марки АС32 и гексанит-Р.

Электроннографические и оптические исследования зоны взаимодействия показывают, что в основе механизма износа плавленных тугоплавких соединений при обработке ими титана лежит адгезионный износ. Например, при резании микрочерными плавленного карбида титана происходит его хрупкое разрушение со следами пластической деформации. С повышением характеристик пластичности ряда исследуемых материалов (как это имеет место в ряду $TiC \rightarrow ZrC \rightarrow NbC \rightarrow TaC \rightarrow WC$) доля хрупкого разрушения уменьшается. При резании плавленным карбидом вольфрама вообще отсутствует хрупкое разрушение, а износ проходит по механизму истирания за счет отслоения тонких пленок. Но влияние пластичности на износ микрорезцов не всегда однозначно. Подтверждением этого является влияние пластичности на процесс износа карбидных фаз переходных металлов в пределах области их гомогенности. Как известно, пластичность карбидов переходных металлов IVa и Va подгруппы изменяется в пределах области их гомогенности, увеличиваясь с уменьшением содержания углерода. Исследование износа плавленных карбидных фаз титана и циркония показало, что с уменьшением содержания в них карбидных фаз ниобия износ максимален для фаз NbC 0,80 ... 0,84. В этом случае, по-видимому, превалирующее влияние на величину износа оказывает адгезионное взаимодействие между абразивным и обрабатываемым материалом, а также невыполнение необходимо соотношения между их твердостью. Несмотря на это, подавляющее большинство исследованных карбидных фаз имеет меньший износ, чем такие традиционные абразивные материалы, как электрокарунд белый и карбид кремния зеленый.

Карбид вольфрама (WC) практически не имеет области гомогенности. Но при плавлении происходит изменение его фазового состава в результате того, что он разлагается на полукарбид вольфрама W_2C и углерод в соответствии с реакцией $WC = W_2C + C$. При этом полученный продукт состоит из смеси двух фаз ($WC + W_2C$), соотношение которых меняется в зависимости от давления газа в рабочей камере, которое обуславливает изменение износостойкости плавленного карбида вольфрама при различных условиях его получения. С увеличением в плавленном карбиде фазы WC увеличивается износостойкость и прочность зерен порошка.

Абразивная способность плавленных нитридных фаз переходных металлов ниже, чем карбидов. Это может быть обусловлено более низкой твердостью нитридов при соизмеримой с карбидами пластичностью. Наиболее интегральной характеристикой абразивных материалов является их абразивная способность, которая зависит от целого ряда их физико-механических характеристик (твердости, пластичности, микрохрупкости, прочности абразивных зерен на раздавливание), а также таких физических констант, как теплопроводность, мо-

дуги упругости и степень взаимодействия с обрабатываемым материалом. Так, абразивная способность плавяных тугоплавких соединений повышается с увеличением их модуля упругости.

Как было отмечено выше, тугоплавкие соединения, которые имеют области гомогенности, или сплавы тугоплавких соединений с различным содержанием составляющих наиболее интересны для изучения комплексного влияния свойств материала на его абразивную способность.

Исследования абразивной способности некоторых плавяных карбидов переходных металлов IVa и Va подгрупп в зависимости от содержания в них углерода в пределах области их гомогенности показывают, что для различных карбидов эти зависимости также различны. Так, абразивная способность карбидов фаз циркония растет с увеличением в них содержания углерода. В этом же направлении увеличивается микротвердость и прочность зерен. Высокие значения твердости и прочности абразивных зерен способствует высокой производительности при шлифовании, а умеренная хрупкость – частичному измельчению шлифзерен и получению благодаря этому высокого качества поверхности.

Абразивная способность карбида титана с изменением его состава в пределах области гомогенности в сторону увеличения содержания углерода практически не изменяется. Повышение микротвердости карбида титана наблюдается. Увеличение микротвердости должно способствовать увеличению абразивной способности. Очевидно, что влияние микротвердости на абразивную способность компенсируется влиянием прочности зерен, поэтому абразивная способность карбидных фаз титана с изменением их состава практически остается неизменной. Абразивная способность карбидных фаз ниобия коррелирует с другими абразивными свойствами.

Наиболее высокие значения абразивной способности плавяных карбидных фаз в пределах области гомогенности при изменении числа оборотов контролера показателя карбида состава TiC_{0-79} , ZrC_{0-96} и NbC_{0-82} . В сравнении с традиционными абразивами ЭБ и КЗ абразивная способность карбидов титана и ниобия выше или соизмерима с ними, а карбида циркония – ниже.

Абразивная способность сплавов карбоборидов титана увеличивается с увеличением в них содержания борида титана, что соответствует изменению других абразивных характеристик и свойств карбоборидов, а также их составляющих, в частности, пластичности диборида титана. Как было выявлено электрографическими исследованиями на изломах сплава с увеличением содержания диборида титана наблюдается больше террас, ступеней, двойников и других признаков пластичности карбоборида титана.

Абразивная способность карбонитридов ниже, чем у соответствующих карбидов, что может быть обусловлено, при прочих равных условиях, их меньшей микротвердостью.

При сравнении с образцами, полученными традиционными методами порошковой металлургии, установлено, что абразивная способность плавяных тугоплавких соединений в 4 – 6 раз выше, чем спеченных. Эта разница увеличивается с ростом твердости обрабатываемого материала и повышением нагрузок при шлифовании. Последнее можно связать с прочностными характери-

ками и топографией поверхности шлифзерен, а также их структурой, которая у плавленных карбидов более крупнозернистая.

Исследования обработки металлических поверхностей плавленными тугоплавкими соединениями в качестве свободных абразивов показывают, что при обработке сталей они по производительности превосходят шлифпорошки, полученные восстановлением–карбидизацией и соответствуют порошкам синтетического алмаза при одновременном уменьшении шероховатости поверхности. Это может быть обусловлено тем, что алмазные порошки шаржируют обрабатываемую поверхность, увеличивая ее шероховатость.

При шлифовании титана кругами из плавленных карбидов установлено, что в тонких приповерхностных слоях титана создаются меньшие напряжения и происходит более оптимальное распределение их по глубине, как в случае, например, шлифования кругами из плавленного карбида ниобия. Образование в приповерхностных слоях обрабатываемой детали остаточных напряжений способствует повышению ее циклической износостойкости.

Применение кругов из плавленных карбидов способствует также снижению мгновенных температур в зоне шлифования, что объясняется высокой прочностью зерен карбидов и более высокой их теплопроводностью по сравнению со спеченными карбидами, а также карборундом и карбидом кремния. Снижение температуры способствует сохранению низкой шероховатости обработанной поверхности и уменьшению количества прижогов и других негативных факторов.

Таким образом, плавленные тугоплавкие соединения отличаются высокой абразивной способностью, которая обусловлена высокими прочностными свойствами индивидуальных зерен, их монокристаллическостью и относительно высокой теплопроводностью. Регулируя состав абразивного материала при участии плавленных тугоплавких соединений, а также его структуру, по необходимости можно в широких границах изменять его абразивную способность.

Изучение физико–химических явлений, которые возникают во время абразивной обработки, позволяет установить перспективность использования тугоплавких соединений для шлифования кругами на их основе. Особенно они эффективны при обработке пластичных материалов, обеспечивают более высокое качество поверхности и увеличивают производительность.

Композиты на основе полимеров – пластмасс имеют увеличенную прочность, твердость, ряд эксплуатационных свойств, но вместе с этим малую плотность – 1,3 кг/см³, что существенно уменьшает массу машин и экономит расход энергии на ее эксплуатацию. Этот вопрос рассмотрен в следующем параграфе.

1.3.5. Изготовление деталей из пластмасс и резины

Неметаллические материалы – пластические массы (пластмассы), резину, стекло, керамику, древесину и др. применяют почти во всех отраслях промышленности. Пластмассы характеризуются малой плотностью и относительно высокой химической и коррозионной стойкостью, хорошими диэлектрическими свойствами. Благодаря своим свойствам пластмассы используют в машино-

строении и приборостроении как машиностроительные материалы. Их применение экономит большое количество дорогостоящих цветных материалов, повышает стойкость деталей, работающих на трение или в агрессивных средах, снижает массу деталей и уменьшает трудоемкость их изготовления.

Резина как конструкционный материал существенно отличается от металлов и других материалов. Она способна выдержать значительные деформации без разрушения. Высокая сопротивляемость изнашиванию, уплотняющая способность, газо- и водонепроницаемость, а также диэлектрические свойства делают резину одним из важнейших материалов для изготовления деталей.

1.3.5.1. Применение пластмасс в машиностроении

Все материалы, применявшиеся до последнего времени в промышленности в том или ином виде, встречаются в природе. Характерным для новых – синтетических материалов, появившихся за последние десятилетия, является то, что непосредственно в природе они не встречаются, а создаются искусственно, т.е. синтезируются. В результате получают материалы с исключительно разнообразными, заранее заданными свойствами. Номенклатура таких искусственных (синтетических) материалов быстро и непрерывно растет. Некоторые из них уже стали незаменимыми материалами в современной технике. В машиностроении особое значение приобрели пластические массы (пластмассы).

Пластмассами называют полимеры, размягчающиеся только при высоких температурах. В широком интервале температур они являются твердыми телами большой прочности и достаточной упругости. При низких температурах пластмассы становятся хрупкими. Рабочий интервал температур для них лежит между температурой возникновения хрупкости и температурой размягчения, т.е. колеблется в широких пределах, например для полиэтилена – от +80 °С до –50 °С. Пластмассы состоят, в основном, из двух компонентов – смолы (связующего) и наполнителя. В зависимости от поведения связующего при нагреве пластмассы разделяются на терморезактивные и термопластические.

К **терморезактивным пластмассам** относятся материалы, которые при нагревании и сжатии переходят в неплавкое и нерастворимое состояние, причем этот процесс необратим.

Термопластические пластмассы при нагреве плавятся (становятся пластическими), а при охлаждении затвердевают, причем этот процесс обратим: термопластические материалы могут быть повторно переработаны.

Важнейшим компонентом пластмасс является связующее вещество – смола, влияющая на все основные свойства материала: физико–механические, химические, диэлектрические и др.

Наполнители влияют на прессовочные свойства (текучесть, усадку), теплостойкость, режимы переработки материала в изделие (удельное давление, температура прессования) и на механическую прочность готовых изделий. В качестве наполнителей применяют органические (древесная мука, ткань, бумага, искусственные и растительные волокна и др.) и неорганические (асбест, тальк, каолин, слюда, стеклянное волокно и др.) вещества.

В пластмассы добавляются также пластификаторы для повышения пластичности изделия и облегчения вальцевания и прессования, а также красители для придания изделиям желаемого цвета.

По основным механическим свойствам и областям применения пластмассы разделяются на силовые и несиловые (декоративные, изоляционные и др.). Силовые пластмассы подразделяются, в свою очередь, на конструкционные, фрикционные и антифрикционные.

О все возрастающей роле пластмасс в промышленности свидетельствует исключительно высокий темп развития их производства. Мировое производство синтетических смол и пластмасс характеризуется следующими данными: с 1929 по 1975 гг. производство выросло с 85 000 тонн до 20 000 000 тонн, т.е. в 235 раз. Таких темпов развития не знали даже ведущие отрасли – черная и цветная металлургия. В то время как производство чугуна за 30 лет (в период 1929 – 1959 гг.) увеличилось в 1,5 раза, а алюминия в 12 раз, мировое производство пластических масс возросло в 66 раз. Ведущее положение в производстве синтетических смол и пластмасс занимает пока США, хотя их доля в мировом производстве уменьшилась. Это объясняется быстрым ростом производства в ряде стран, и в первую очередь в Японии, Англии, Франции, Италии, Германии, Китае.

Производство пластмасс в США выросло в период с 1950 по 1970 г.г. в 5 раз. Выплавка стали в США уменьшилась с 117 млн. тонн в 1955 г. до 98 млн. тонн в 1961 г., т.е. на 16,2 %, а выработка пластмасс за тот же период увеличилась на 76,5 %. Даже в кризисном 1961 году, когда все промышленное производство США увеличилось на 1 %, выпуск пластмасс возрос на 9,1 %. За последние 20 лет потребление пластмасс в США возросло в 10 раз, а за истекшие 10 лет утроилось.

Развитие производства пластмасс требует соответствующих мощностей для их переработки в изделия. Чтобы выпустить тысячу тонн пластмасс в год, нужен штат из восьми рабочих. Для переработки этой же тысячи тонн в изделия требуется 400 чел., т.е. в 50 раз больше.

Поскольку коэффициент расхода пластмасс на тонну изделий и полуфабрикатов близок к единице, переработку пластмасс выгоднее производить ближе к местам потребления, так как транспортировка материалов (более компактная масса) требует меньших затрат, чем транспортировка готовых изделий.

С появлением новых материалов необходимо установить области рационального применения. Решение этой технико-экономической задачи усложняется в данном случае следующими обстоятельствами:

1. Промышленный выпуск пластмасс насчитывает всего лишь шестьдесят лет, тогда как производство черных и цветных металлов, с которыми они иногда сопоставляются, развивалось и совершенствовалось на протяжении сотен лет. Удельные затраты, связанные с производством пластмасс, быстро снижаются по мере расширения масштабов выпуска этих материалов. Поэтому в проектных расчетах сравнение затрат на производство металлов и пластмасс следует выполнять с учетом перспективного развития производства пластмасс в ближайшие годы.

2. Металлы по способам производства, переработки, а также эксплуатационным свойствам коренным образом отличаются от пластических масс, поэтому сопоставление этих материалов не может ограничиваться лишь одной какой-либо стороной, например сравнением себестоимости деталей, изготовленных из этих материалов. Сравнение должно охватить все стороны: производство самих материалов, включая капитальные вложения в сопряженные области; переработку материалов в детали; поведение деталей в эксплуатации.

В общем виде экономический эффект от применения пластических масс выражается в следующем.

Удельные капитальные вложения, необходимые для создания мощностей по производству пластмасс, ниже, чем в отраслях, производящих заменяемые материалы. Считается, что применение 1 т пластмасс в тяжелой промышленности позволяет уменьшать капитальные вложения (с учетом сопряженных областей) на \$ 2 000.

Переработка пластических масс в изделия обычно требует меньших трудовых затрат, чем изготовление такой же продукции из металла, дерева и других традиционных материалов. При этом чем сложнее форма изделий, тем эффект выше. В среднем применение 1 т пластмасс в тяжелой промышленности дает сокращение трудоемкости на 330 часов.

Благодаря малому объемному весу (для различных видов пластмасс он колеблется от 0,9 – 2,3 г/см³ до 0,01 – 0,2 г/см³ для пенопластов и поропластов, т.е. пластмассы в 3 – 700 раз легче стали и в 1,5 – 270 раз легче алюминия), исключительно высокой химической стойкости, превосходящей все известные металлы (например, политетрафторэтилен не растворяется даже в кипящей «царской водке»), высоким антифрикционным свойствам, хорошим фрикционными качествами, диэлектрическим свойствам (некоторые виды специальных пластмасс являются лучшими диэлектриками современной техники, а в высокочастотных устройствах радиосвязи, телевидения, генераторах ТВЧ и других аппаратах они не могут быть заменены никакими другими видами диэлектриков) пластмассы во многих случаях незаменимы.

Следует подчеркнуть, что если совсем еще недавно пластические массы успешно заменяли в некоторых машинных узлах дефицитные цветные металлы, то сегодня области применения пластмасс в машиностроении стала значительно шире. Пластические массы являются самостоятельным конструкционным материалом с исключительно широкими возможностями. Некоторые конструкции деталей машин и приборов немислимы без изготовления их из пластмасс.

1.3.5.2. Классификация пластмасс

Пластическими массами (пластмассами) называют материалы, основу которых составляют природные или синтетические высокомолекулярные соединения. Высокомолекулярные соединения состоят из большого числа низкомолекулярных соединений (мономеров), связанных между собой силами главных валентных связей. Соединения, большие молекулы (макромолекулы) которых состоят из одинаковых структурных звеньев, называют полимерами. Макромо-

лекулы полимеров могут иметь линейную форму, разветвленную и пространственную (сшитую).

Линейные макромолекулы имеют форму цепей, в которых атомы соединены между собой ковалентными связями. Отдельные цепи связаны межмолекулярными силами, величина этих сил в значительной степени определяет свойства полимера. Наличие в цепях разветвлений приводит к ослаблению межмолекулярных сил и тем самым к понижению температуры размягчения полимера. Пространственные структуры получаются в результате химической связи (сшивки) отдельных цепей полимеров или в результате поликонденсации или полимеризации. Большое значение для свойств «сшитого» полимера имеет частота поперечных связей. Если эти связи располагаются сравнительно редко, то образуется полимер с сетчатой структурой. Полимеры с линейной структурой молекул хорошо растворяются, так как молекулы растворителя могут внедряться в промежутки между макромолекулами и ослаблять межмолекулярные силы. Полимеры с сетчатой структурой нерастворимы, они лишь набухают. При частом расположении связей полимер становится практически нерастворимым и неплавким.

Полимеры в зависимости от расположения и взаимосвязи макромолекул могут находиться в аморфном (с неупорядоченным расположением молекул) или кристаллическом (с упорядоченным расположением молекул) состояниях. При переходе полимеров из аморфного в кристаллическое состояние повышается их прочность и теплостойкость. Значительное влияние на полимерные материалы оказывает воздействие на них теплоты. В зависимости от поведения при повышенных температурах пластмассы подразделяют на термопластичные (термопласты) и термореактивные (реактопласты).

Термопласты при нагревании размягчаются и расплавляются, затем вновь затвердевают при охлаждении. Переход термопластов из одного физического состояния в другое может осуществляться неоднократно без изменения химического состава. Термопласты имеют линейную или разветвленную структуру молекул. Реактопласты при нагревании переходят в вязкотекучее состояние, но под действием тепла в результате химической реакции переходят в твердое, необратимое состояние. Отвердевшие реактопласты нельзя повторным нагревом вновь перевести в вязкотекучее состояние. В процессе полимеризации под действием указанных факторов линейная структура полимера превращается в пространственную. Отдельные виды термореактивных смол (эпоксидные, полиэфирные) относят к числу самотвердеющих при комнатной температуре: при введении отвердителя они переходят в твердое необратимое состояние. Поведение термопластов и реактопластов под действием теплоты оказывает решающее значение на технологический процесс переработки пластмасс в детали.

В зависимости от числа компонентов все пластмассы подразделяют на простые и композиционные.

Простые (полиэтилен, полистирол и т.д.) состоят из одного компонента – синтетической смолы, композиционные (фенопласты, аминопласты и др.) – из нескольких составляющих, каждая из которых выполняет определенную функциональную роль.

В композиционных пластмассах смола является связующим для других составляющих. Свойства связующего во многом обуславливают физико-механические и технологические свойства пластмассы. Содержание связующего в пластмассах достигает 30 – 70 %. Помимо связующих в состав композиционных пластмасс входят следующие составляющие:

1) наполнители различного происхождения для повышения механической прочности, теплостойкости, уменьшения усадки и снижения стоимости композиции; органические наполнители – древесная мука, хлопковые очесы, целлюлоза, хлопчатобумажная ткань, бумага, древесный шпон и др.; неорганические – графит, асбест, кварц, стекловолокно, стеклоткань и др.;

2) пластификаторы (дибутилфталат, касторовое масло), увеличивающие эластичность, текучесть, гибкость, и уменьшающие хрупкость пластмасс;

3) смазывающие вещества (стеарин, олеиновая кислота и др.), увеличивающие текучесть, уменьшающие трение между частицами композиций, устраняющие прилипание к пресс-формам;

4) катализаторы (известь, магнезия и др.), ускоряющие процесс отверждения пластмасс;

5) красители (сурик, нигрозин), придающие пластмассам нужный цвет.

При изготовлении газонаполненных пластмасс (поро- и пенопластов) в полимеры вводят газообразователи – вещества, которые разлагаются при нагревании с выделением газообразных продуктов.

1.3.5.3. Виды пластмасс

В зависимости от основного назначения пластмассы подразделяют на группы:

1. Конструкционные, обладающие достаточной механической прочностью и применяемые для нагруженных и малонагруженных конструкций:

– высокопрочные ($\sigma_g = 200 \text{ Н/мм}^2$);

– среднепрочные ($\sigma_g = 80 - 200 \text{ Н/мм}^2$);

– низкой прочности ($\sigma_g = 80 \text{ Н/мм}^2$);

– теплостойкие, разделенные на 3 группы температур: I – 120 – 150 °С; II – 150 – 200 °С; III – свыше 200 °С;

– декоративно-отделочные и облицовочные.

2. Электро- и радиотехнические:

– электроизоляционные;

– электропроводные;

– радиопрозрачные.

3. Звуко- и теплоизоляционные, обладающие звукоизолирующими свойствами и малой теплопроводностью.

4. Фрикционные и антифрикционные:

– фрикционные (обладают при сухом трении высокими фрикционными свойствами и малым износом);

– антифрикционные (имеют низкий коэффициент трения и весьма малый износ).

5. Антикоррозионностойкие и стойкие к агрессивным средам:

- антикоррозионностойкие, обладают повышенной стойкостью при действии корродирующих агентов: атмосферных осадков, кислот, щелочей и др.;
- химически стойкие к действию слабых или крепких кислот и щелочей, ароматических углеводородов, бензина, спиртов и других растворителей;
- прокладочные и уплотнительные, обладают стойкостью против действия воды, жидкого топлива, минеральных масел, кислот и щелочей;
- тропикоустойчивые, обладают хорошей сопротивляемостью действию теплого и влажного воздуха, ультрафиолетового облучения, грибковой плесени или содержат в своем составе фунгициды.

Большинство пластмасс обладают комплексом свойств, что позволяет их применять в нескольких областях и в различных сочетаниях (табл. 32, табл. 33).

К группе пластмасс низкой прочности относят полиэтилены, фторопласты и др. Из полиэтилена изготавливают трубы, детали для вентиляционных установок, гальванических ванн, центробежных насосов для кислот и щелочей и т.д.

Фторопласты (фторопласт–4, фторопласт–3, фторопласт–40) отличаются высокой химической стойкостью, тепло- и морозоустойчивостью и высокими диэлектрическими свойствами.

Детали, изготавливаемые из этих материалов, способны работать в агрессивных средах и при значительных колебаниях температуры.

Пластмассы средней прочности – это фенопласты, полистиролы, полиамиды и др. Фенопласты – терморезистивные пластические массы на основе фенолформальдегидных смол – широко применяют для изготовления электротехнических деталей (корпусные детали приборов, панелей, разъемников, выключателей и т.д.). Фенопласты характеризуются хорошими технологическими свойствами. Полистирол, характеризующийся высокими диэлектрическими свойствами, служит для изготовления деталей радио- и электроаппаратуры. Благодаря сочетанию высокой механической прочности, износостойкости, коррозионной и химической стойкости полиамиды являются одним из важнейших конструкционных материалов. Наибольшее промышленное применение имеют капрон, капролон, полиамидная смола–610 и др. Изготавливаемые из этих материалов зубчатые колеса, подшипники скольжения и другие детали работают более плавно, с меньшим шумом, имеют меньшую массу и дешевле в сравнении с аналогичными металлическими.

К высокопрочным пластмассам относят: стеклопластики, представляющие собой композиционный материал, состоящий из наполнителя (стеклянные ткани, сетки, ленты, волокна, нити и т.д.) и связующего (эпоксидные, фенолформальдегидные и кремний–органические смолы). Из стеклопластиков изготавливают корпусные детали автомобилей, лодок, самолетов и т.д.

В процессе изготовления этих деталей технологически совмещается формообразование деталей и получение самого конструкционного материала – стеклопластика. Для получения высоконагруженных конструкционных деталей небольших габаритных размеров применяют терморезистивные пресс-материалы марок АГ–4С, АГ–4В и др. Детали из этих материалов получают прессованием.

Физико-механические свойства пластмасс и их применение

№ п/п	Группа	Наименование	Удельная ударная вязкость, $\frac{кг \cdot см}{см^2}$	Предел прочности, $10 \cdot Н/см^2$			Относительное удлинение при разрыве, %	Теплостойкость (по Мартенсу), °С	Коэффициент линейного расширения, $\alpha \varphi \cdot 10^6 \text{ град.}^{-1}$	Способы переработки
				при растяжении	при сжатии	при изгибе				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Термопласты	Полиэтилен высокого давления (ПВД)	16	100 – 140	125	120 – 170	550 – 600	108 – 115	22 – 55	Литье под давлением, экструзия, выдувание, сварка
2		Полиэтилен низкого давления (ПВД)	Не ломается	200 – 230	250 – 600	200 – 800	200 – 250	120 – 128	1	Литье под давлением, экструзия
3		Полипропилен (ПП)	80 – 85	250	600	800	100 – 400	160	11	Литье под давлением, экструзия, сварка
4		Полипропилен стеклонаполненный	27 – 32	560	490	700	2	–	–	
5		Поливинилхлорид неориентированный (ПВХ)	100 – 150	300 – 500	525 – 600	1 000 – 1 100	25 – 400	170 – 190	—	
6		Винипласт А, Б	120 – 180	400 – 600	800 – 1 600	1 000 – 1 200	10 – 25	65	6 – 7	Экструзия, формование, штамповка, склеивание, сварка
7		Пенопласт	1,5 – 1,9	39 – 46	2,5 – 15	–	0,62 – 2	60	–	Склеивание, формование при нагреве

691	Термопласты	8	Фторопласт	100	225 – 250	120	140	300 – 350	250	25	Прессование, сварка, мехобраб.
		9	Полиметилметакрилат (оргстекло)	15	420 – 700	770 – 950	910 – 1 100	1 – 15	50 – 74	8 – 12	Компрессионное и литьевое прессование, экструзия
		10	Полистирол блочный (ПСС)	16 – 20	350 – 400	1 000	1 000	1,5	80	9 – 10	Литье, экструзия, выдувание
		11	Полистирол ударопрочный (УПМ)	50	–	–	550 – 650	–	75	–	
		12	Полистирол стеклонаполненный	10 – 24	740 – 1 050	980 – 1 190	1 050 – 1 330	0,75 – 1,3	75	–	
		13	Полиамид (ПА)	100 – 200	300 – 600	700 – 800	180 – 700	100 – 425	170	10 – 13	Литье под давлением
		14	Полиамид стеклонаполненный (30 %)	19 – 34	750 – 850	1 100	1 250 – 1 500	1 – 1,3	195 – 205	12 – 14	Литье под давлением, прессование
		15	Полиформальдегид (ПФМ)	75	600 – 700	1 300	800	20 – 40	120	4,5 – 8	
	16	Поликарбонат (ПК)	90	600 – 800	800 – 900	800	до 85	135 – 140	6	Литье под давлением	
	Реактопласты	17	Пресс-порошки	5 – 9	350 – 450	1 600	700	0,3 – 0,7	125	4,3 – 7	Компрессионное и литьевое прессование
		18	Влагостойкие пресс-порошки (фенолит)	4,5	280	1 500 – 1 700	550	–	125	1,9 – 2,6	
		19	Ударопрочные волокнистые (волокниты)	9 – 20	200 – 350	800 – 1 300	800	0,4	140 – 200	3 – 3,5	
		20	Жаростойкие	3,0	250 – 400	1000–1100	450 – 500	0,2 – 0,5	140	1,5 – 4	
		21	Тормозные	9 – 21	260	800 – 1 000	550 – 700	0,18	200	0,8 – 2,5	

22	Реактопласты	Антикоррозионные теплопроводные	2,75	180	1000	400	–	170	0,8	Компрессионное прессование, экструзия
23		Амилопласты	5 – 6	370	1 000	600 – 800	0,2 – 0,5	100	2,5 – 3,5	
24		Пресс-материал (ДСВ-2Р)	60	1 000	1 300	2 300	–	292	–	Компрессионное и литьевое прессование
25		Пресс-материал (АГ-4В и АГ-4НС)	30 – 300	9 000	1 000 – 4 000	1 200 – 6 000	–	280 – 320	7 – 10	
26		Пресс-материал кремний-органический	4,5–18	1 750	1 300	300 – 500	–	200 – 250	1 – 1,4	
27	Слоистые пластики	Текстолит	35	650 – 1 000	1 200 – 2 500	1 200 – 1 600	1	125	2 – 4	Штамповка, склеивание, механическая обработка
28		Асботекстолит	25 – 35	650 – 1 100	1 260 – 3 150	900 – 1 100	–	150 – 250	1,7 – 2,5	
29		Гетинакс-электротехнический	8 – 10	600 – 800	800–1 000	150 – 200	1	150	2 – 3,5	
30		Древесно-слоистые пластины	60 – 70	2 000 – 3 000	1 300 – 1 850	2 200 – 2 800	–	180	0,3 – 0,4	Склеивание, механическая обработка
31		Стеклотекстолит (СТ)	75 – 85	1 650– 3 000	–	–	0,5 – 1,0	170 – 225	1,6	

Электротехнические свойства пластмасс

№ п/п	Группа	Наименование	Удельное электрическое сопротивление		Тангенс угла потерь при частоте		Диэлектрическая проницаемость		Эл. прочность, кВ/мм	Пробойное напряжение, кВ/мин
			объемное, Ом·см	поверхностное, Ом	50 Гц	10 ⁶ Гц	50 Гц	10 ⁶ Гц		
1	Термопласты	Полиэтилен высокого давления	10 ¹⁷	–	–	0,0005	–	2,6	35	24 – 40
2		Тоже кабельный	10 ¹⁷	–	–	0,0002 – 0,0003	–	2,2 – 2,3	45 – 60	–
3		Полиэтилен низкого давления	10 ¹⁷	10 ¹⁴	–	0,0002 – 0,0005	–	2,1 – 2,4	45 – 60	30
4		Полипропилен	10 ¹⁷	10 ¹⁴	–	0,0002 – 0,0005	–	2,2	30 – 40	–
5		Винипласт	10 ¹⁴	10 ¹²	–	0,019	–	3,5	15	–
6		Фторопласт	10 ¹⁷	10 ¹⁷	0,0002	0,00025	1,9 – 2,2	2,0	–	25 – 27
7		Полистирол блочный	10 ¹⁵	10 ¹⁵	10 ⁻⁴	0,0003 – 0,0004	2,5	2,6	20	24 – 40
8	Реактопласты	Пресс-порошок	5·10 ¹²	10 ¹³	0,028	0,04 – 0,06	10,5	5 – 6	13,5	–
9		Тоже высокочастотные	10 ¹³	10 ¹⁴	–	0,015	–	5	18	–
10	Слоистые пластики	Текстолит	10 ¹⁰ – 10 ¹²	10 ¹⁰ – 10 ¹²	0,2 – 0,4	0,02 – 0,08	8	5,7	2 – 5	5 – 20
11		Гетинакс	10 ¹¹	10 ¹¹	0,045	0,045 – 0,08	8	6	20	–

В промышленности также широко применяют термопласты, армированные стекловолокном. Теплостойкость и механическая прочность этих материалов повышается в 3 – 4 раза при использовании в качестве наполнителей стеклянных волокон. Низкий коэффициент линейного расширения и незначительная усадка при формовании обеспечивают получение деталей высокой точности из армированных стекловолокном термопластов.

Основные технологические свойства пластмасс – текучесть, усадка, скорость отвердевания (реактопластов) и термостабильность (термопластов).

Текучесть – способность материала заполнять форму при определенных температуре и давлении. Она зависит от вида и содержания в материале смолы, наполнителя, пластификатора, смазки, а также от конструктивных особенностей пресс-формы. Для термопластичных (ненаполненных) материалов за показатель текучести принимают «индекс расплава» – количество материала, выдавливаемого через сопло экструзионного пластометра диаметром 2,095 мм при определенных температуре и давлении в единицу времени.

Под усадкой понимают абсолютное или относительное уменьшение размеров детали по сравнению с размером полости пресс-формы. В абсолютной величине усадки наибольшую долю составляет разница между коэффициентами линейного расширения материала пресс-формы и материала пластмассовой детали. Величина усадки зависит от физико-химических свойств связующей смолы, количества и природы наполнителя, содержания в нем влаги и летучих веществ, температурного режима переработки, других факторов. Усадку необходимо учитывать при проектировании пресс-форм.

Помимо технологической усадки пластмассовые детали характеризует также эксплуатационная усадка, связанная с релаксацией напряжений, процессом старения и т.д.

Продолжительность процесса перехода термореактивного материала из высокоэластичного или вязкотекучего состояния в состояние полной полимеризации определяет скорость отверждения. Скорость отверждения (полимеризации) зависит от свойств связующего (термореактивной смолы) и температуры переработки. Низкая скорость отверждения увеличивает время выдержки материала в пресс-форме под давлением и снижает производительность процесса. Повышенная скорость отверждения может вызвать преждевременную полимеризацию материала в пресс-форме, в результате чего отдельные участки формирующей полости не будут заполнены пресс-материалом, и деталь пойдет в брак.

Под термостабильностью понимают время, в течение которого термопласт выдерживает определенную температуру без разложения. Высокую термостабильность имеет полиэтилен, полипропилен, полистирол. Переработка их в детали сравнительно проста. Для материалов с низкой термостабильностью (полиформальдегид, поливинилхлорид и др.) необходимо предусматривать меры, предотвращающие возможность разложения их в процессе переработки; например, увеличение сечения литников, диаметра цилиндра и т.д.

В зависимости от физического состояния полимерных материалов, технологических свойств и других факторов все способы переработки пластмасс в детали наиболее целесообразно разбить на следующие основные группы:

- 1) переработка в вязкотекучем состоянии (прессованием, литьем под давлением, выдавливанием и др.);
- 2) переработка в высокоэластичном состоянии (пневмо- и вакуум-формовкой, штамповкой и др.);
- 3) получение деталей из жидких полимеров различными способами формообразования;
- 4) переработка в твердом состоянии разделительной штамповкой и обработкой резанием;
- 5) получение неразъемных соединений сваркой, склеиванием и др.;
- 6) различные способы переработки (спекание, напыление и др.).

Большинство пластмасс перерабатывают в детали в вязкотекучем состоянии способами прессования, литья, выдавливания.

1.3.5.4. Способы переработки пластмасс в детали в вязкотекучем состоянии

Прямое (компрессионное) прессование – один из основных способов переработки реактопластов в детали. В полость матрицы пресс-формы 3 (рис. 8,а) загружают предварительно таблетированный или порошкообразный материал 2. При замыкании пресс-формы под действием усилия пресса пуансон 1 создает давление на прессуемый материал (рис. 8,б). Под действием этого давления и теплоты от нагретой пресс-формы материал размягчается и заполняет формообразующую полость пресс-формы. После определенной выдержки пресс-форма раскрывается и с помощью выталкивателя 5 из нее извлекается готовая деталь 4 (рис. 8,в).

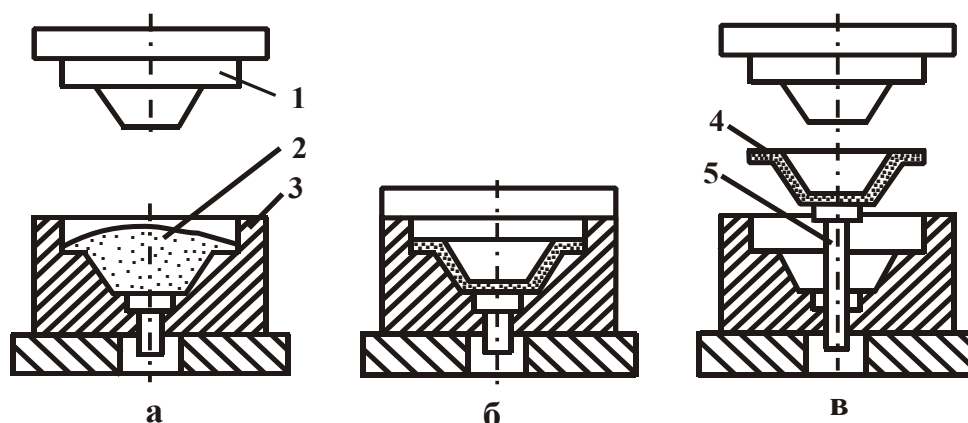


Рис. 8. Схема прямого прессования

Процесс полимеризации (отверждения) сопровождается выделением летучих составляющих полимеров и паров влаги. Для удаления газов в процессе прессования выполняют так называемую подпрессовку, заключающуюся в переключении гидропресса после определенной выдержки на обратный ход, в подъеме пуансона на 5 – 10 мм и выдержке его в таком положении в течение 2 – 3 с. После этого пресс-форма снова смыкается. При прессовании крупных толстостенных деталей из материалов с повышенной влажностью подпрессовку проводят дважды.

Температура и давление прессования зависят от вида перерабатываемого материала, формы и размеров изготавливаемой детали. Время выдержки под прессом определяют скорость отверждения и толщина прессуемой детали. Для большинства термореактивных материалов время выдержки выбирают из расчета 0,5 – 2,0 мин на 1 мм толщины стенки. Технологическое время может быть сокращено вследствие предварительного подогрева материала в специальных шкафах. Давление зависит от текучести пресс-материала, скорости отверждения, толщины прессуемых деталей и других факторов.

Нагрев пресс-форм осуществляют обычно электрическим нагревателем. Рабочую температуру в процессе прессования поддерживают постоянной с помощью автоматически действующих приборов. Для загрузки в полость пресс-формы определенного количества пресс-материала используют объемную дозировку или дозировку по массе. Применяют также поштучную дозировку (загружают определенное количество таблеток). Прессуют на гидравлических прессах. При выпуске большого числа деталей используют пресс, работающий по автоматическому циклу. Прямым прессованием получают детали средней сложности и небольших габаритных размеров из термореактивных материалов с порошкообразным и волокнистым наполнителями.

Литьевое прессование отличается от прямого тем, что прессуемый термореактивный материал загружают не в полость пресс-формы, а в специальную

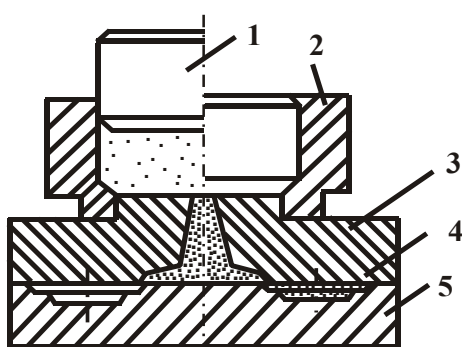


Рис. 9. Схемы литьевого прессования

загрузочную камеру 2 (рис. 9) Под действием теплоты от пресс-формы прессуемый материал превращается в вязкотекучее состояние и под давлением со стороны пуансона 1 выжимается из загрузочной камеры 2 в полости матрицы пресс-формы через специальное отверстие в литниковой плите 3. После отверждения пресс-форму разъединяют и готовые детали 4 извлекают из матрицы 5.

Литьевое прессование позволяет получать детали сложной формы, с глубокими отверстиями, в том числе резьбовыми. Возможна установка сложной и тонкой арматуры. В процессе перетекания через литниковое отверстие пресс-материал прогревается одинаково, что обеспечивает более равномерную структуру прессуемой детали. При литьевом прессовании отпадает необходимость в подпрессовках, т.к. образующиеся газы могут выходить в зазор между литниковой плитой и матрицей. Недостаток литьевого прессования – повышенный расход пресс-материала, т.к. в загрузочной камере и литниковых каналах остается часть необратимого пресс-материала, а также, пресс-формы для литьевого прессования сложнее по конструкции и дороже пресс-форм для прямого прессования. Для прессования деталей применяют одно- и многогнездные пресс-формы. Многогнездные пресс-формы применяют для получения деталей простой формы и небольших габаритных размеров.

Форма и размеры прессуемых деталей зависят от формообразующих деталей пресс-форм, к которым предъявляют высокие требования по точности и

качеству поверхности. Формообразующие детали пресс-форм изготавливают из высоколегированных или инструментальных сталей с последующей закалкой до высокой твердости. Для повышения износостойкости и улучшения внешнего вида прессуемых деталей формообразующие элементы пресс-форм полируют и хромируют.

Листы и плиты из терморезистивных материалов прессуют пакетами на прессах. Заготовки материала (из хлопчатобумажной ткани, стеклоткани и т.д.) пропитывают смолой и укладывают между горячими плитами прессов. Число уложенных слоев ткани определяет толщину листов и плит. Габаритные размеры прессуемых деталей ограничиваются мощностью гидравлического пресса.

Трубы, прутки круглого и фасонного сечения получают прессованием терморезистивного материала через калиброванное отверстие пресс-формы. Процесс прессования характеризуется низкой производительностью и сложностями технологического характера.

Литье под давлением является высокопроизводительным и эффективным технологическим способом массового производства деталей из термопластов. Перерабатываемый материал из загрузочного бункера 8 (рис. 10) подается дозатором 9 в рабочий цилиндр 6 с электронагревателем 4. При движении поршня 7 определенная доза материала поступает в зону обогрева, а уже расплавленный материал через сопло 3 и литниковый канал – в полость пресс-формы 1, в которой формируется изготавливаемая деталь 2. В рабочем (нагревательном) цилиндре на пути потока расплава установлен рассекатель 5, который заставляет расплав протекать тонким слоем у стенок цилиндра. Это ускоряет прогрев и обеспечивает более равномерную температуру расплава. При движении поршня в исходное положение с помощью дозатора 9 очередная порция материала попадает в рабочий цилиндр. Для предотвращения перегрева выше 50 – 70 °С в процессе литья пресс-форма охлаждается проточной водой. После затвердевания материала пресс-форма размыкается, и готовая деталь с помощью выталкивателей извлекается из нее.

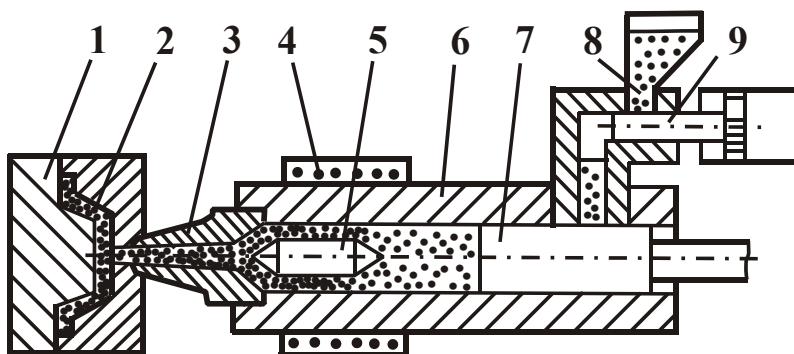


Рис. 10. Схема литья под давлением

Литьем под давлением получают детали сложной конфигурации с различными толщинами стенок, ребрами жесткости, с резьбами и т.д. Применяют литейные машины, позволяющие механизировать и автоматизировать процесс получения пластмассовых деталей. Производительность процесса литья в 20 – 40 раз выше производительности прессования, поэтому литье под давлением

является одним из основных способов переработки пластических масс в детали. Качество отливаемых деталей зависит от температур пресс-формы и расплава, давления прессования, продолжительности выдержки под давлением и т.д.

При безлитниковом литье под давлением применяют литники специальной конструкции с диаметром впрыска 0,8 – 1,5 мм и высотой канала 0,8 – 1,2 мм. В процессе выталкивания готовой детали происходит ее отрыв в месте «точечного» литника. В отдельных конструкциях пресс-форм после окончания литья литник автоматически отводится, и происходит отделение литниковой системы от готовой детали. Полная автоматизация безлитникового литья резко повышает производительность процесса получения деталей.

Литьем под давлением получают также детали из отдельных терморективных материалов (с хорошей вязкотекучестью).

Центробежное литье применяют для получения крупногабаритных и толстостенных деталей (кольца, шкивы, зубчатые колеса и т.п.). Центробежные силы плотно прижимают залитый в форму полимерный материал к внутренней поверхности формы. После затвердевания готовую деталь извлекают из формы и заливают новую порцию расплавленного материала.

Выдавливание (или экструзия) отличается от других способов переработки термопластов непрерывностью, высокой производительностью процесса и возможностью получения на одном и том же оборудовании большого многообразия деталей (рис. 11,а).

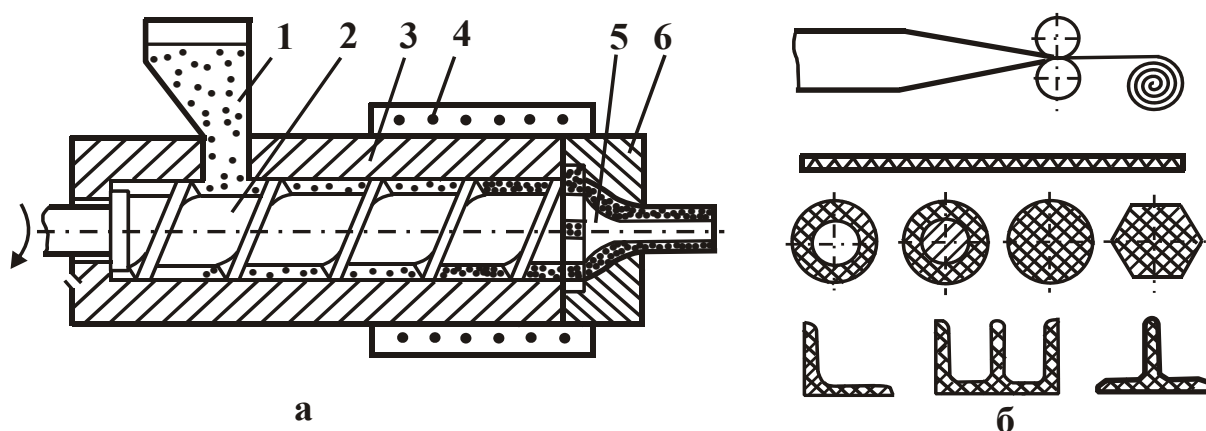


Рис. 11. Непрерывное выдавливание:
а – схема установки; б – профили получаемых деталей

Выдавливание осуществляют на специальных червячных машинах. Перерабатываемый термопластичный материал в виде порошка или гранул из бункера 1 (рис. 11,а) попадает в рабочий цилиндр 3, где захватывается вращающимся червяком 2. Червяк, имеющий нарезку с изменяющимся шагом и глубиной, продвигает материал, перемешивает и уплотняет его. В результате передачи теплоты от нагревательного элемента 4 и выделения теплоты при трении частиц материала друг о друга и о стенки цилиндра перерабатываемый материал переходит в вязкотекучее состояние и непрерывно выдавливается через калиброванное отверстие головки 6. Расплавленный материал проходит через радиальные канавки оправки 5. Оправку применяют для получения отверстия при выдавливании труб.

Непрерывным выдавливанием можно получить детали различного профиля (рис. 11,б). При получении пленок из термопластичных мягких материалов (полиэтилена, полипропилена и др.) используют метод раздува. Расплавленный материал продавливают через кольцевую щель насадкой головки и получают заготовку в виде трубы, которую сжатым воздухом раздувают до нужного диаметра. После охлаждения пленку подают на намоточное приспособление и сматывают в рулон. Способ раздува позволяет получить пленку толщиной до 40 мкм. Для получения листового материала используют щелевые головки шириной до 1 600 мм. Выходящее из щелевого отверстия полотно проходит через валки гладильного и тянущего устройства. Здесь же происходит предварительное охлаждение листа, окончательное охлаждение – на рольгангах. Готовую продукцию сматывают в рулоны или режут на листы определенных размеров с помощью специальных ножниц.

Для нанесения защитных покрытий из полимерных материалов через насадную головку пропускают проволоку или кабель. Размеры и профиль выдавливаемых деталей определяются конструкцией насадной головки и оправки. В зависимости от типа перерабатываемого термопласта и геометрической формы выдавливаемых профилей применяют машины с одним червяком или двумя. Червяки могут быть одно- или многозаходные, с постоянным шагом или переменным, с постоянной глубиной нарезки или изменяющейся. В машинах с частотой вращения червяка до 1 000 об./мин материал расплавляется только вследствие трения частиц порошка между собой, трения о стенки цилиндра и червяка. Детали ширпотреба (тара, емкости и т.д.) из термопластичных материалов изготавливают различными способами формования (раздув сжатым воздухом, ротационное литье, литье под низким давлением и т.д.).

1.3.5.5. Обработка резанием заготовок из пластмасс

В отдельных случаях экономически целесообразнее изготавливать пластмассовые детали обработкой резанием. В качестве заготовок в этом случае используют листы, трубы, прутки, профили различного сечения. Иногда возникает необходимость в дополнительной обработке заготовок, полученных литьем, прессованием и другими методами формообразования.

В зависимости от способа воздействия на заготовку, используемого оборудования и инструмента, применяют разделительную штамповку и обработку резанием.

Основными операциями разделительной штамповки при изготовлении деталей из листовых материалов являются: вырубка, пробивка, разрезка, резка и зачистка. Наибольшее практическое применение имеют операции вырубки, пробивки и разрезки. Операции разделительной штамповки выполняют с подогревом заготовки или без подогрева. На поверхности среза при штамповке возможно образование трещин и сколов. Для предотвращения этих дефектов применяют двухступенчатые пуансоны. С помощью пуансона меньшего диаметра получают предварительное отверстие. Основной (калибрующий) пуансон окончательно формообразует отверстие. В качестве оборудования используют ме-

ханические и гидравлические прессы. Обработку резанием применяют в качестве отделочной операции после предварительного формообразования или как самостоятельный способ изготовления деталей из поделочных материалов.

Характерной особенностью получения пластмассовых деталей прессованием, литьем и другими способами является значительное колебание усадки при затвердевании материала. Это снижает точность получаемых деталей. Для достижения заданной точности применяют дополнительную обработку резанием. Ее используют, кроме того, для удаления литниковых систем, заусенцев. Однако при механической обработке нарушается поверхностная смоляная пленка. Это приводит к снижению химической стойкости и повышению влагопоглощения пластмассовых деталей, поэтому обработку резанием следует применять только в необходимых случаях.

Особенности строения и физико–механические свойства пластмасс существенно влияют на технологию их обработки, конструкцию режущего инструмента и приспособлений. Пластмассы имеют более низкие механические характеристики по сравнению с металлом. Эту особенность можно было бы использовать для повышения скорости резания, однако низкая теплопроводность пластмасс приводит к концентрации теплоты, образующейся в зоне резания. В результате этого происходит интенсивный нагрев режущего инструмента, размягчение или оплавление термопластов, обугливание или прижог реактопластов в зоне резания. При обработке деталей из термопластов максимальная температура процесса не должна превышать 60 – 120 °С, деталей из реактопластов – 120 – 160 °С. Образующаяся теплота при обработке пластмасс отводится в основном через инструмент.

Стойкость режущего инструмента различна в зависимости от типа материала обрабатываемой заготовки. Незначительный износ можно наблюдать при обработке заготовок из термопластов без наполнителя.

При обработке заготовок из термореактивных материалов, особенно со стеклянными и другими подобными наполнителями, стойкость режущего инструмента значительно снижается.

Заготовки из термопластов (органического стекла, полистирола, фторопласта) можно обрабатывать режущими инструментами из углеродистых и быстрорежущих сталей. Материалы, оказывающие абразивное действие, обрабатывают инструментами, оснащенными твердым сплавом, алмазом, эльбором.

При обработке термореактивных материалов со слоистыми и волокнистыми наполнителями охлаждающие жидкости не применяют из-за возможности набухания поверхностей материалов. Процесс стружкообразования при обработке термореактивных пластмасс характеризуется меньшими силами резания по сравнению с силами резания при обработке заготовок из металлов.

Образующаяся при обработке термореактивных пластмасс пылевидная и элементная стружка плохо сходит с передней поверхности инструмента, поэтому канавки для отвода стружки делают более емкими и полируют во избежание ее прилипания. Геометрия режущего инструмента характеризуется большими передними и задними углами. Для обработки пластмассовых заготовок используют специальное или универсальное металлорежущее оборудование.

1.3.5.6. Технологические требования, предъявляемые к конструкциям деталей

При конструировании деталей из пластмасс необходимо учитывать особенности технологического процесса, физико–механические и технологические свойства перерабатываемых материалов. Следует всегда стремиться к упрощению конструкции детали как по технологическим, эксплуатационным, так и экономическим соображениям. Чем проще конструкция детали, тем дешевле оснастка, выше производительность труда, ниже себестоимость, выше качество и точность получаемых деталей. Габаритные размеры деталей определяют мощность оборудования (пресса, литьевой машины и т.д.). Оптимальной толщиной стенок считается 0,5 – 2,0 мм – для деталей из термопластов и 2 – 6 мм – из реактопластов. Процесс изготовления деталей сопровождается большой усадкой. В конструкциях не допускается значительная разностенность, которая вызывает коробление деталей и образование трещин. Величина разностенности не должна превышать 1:3. Минимальные радиусы сопряжений для деталей, полученных прессованием, составляют 1 – 2 и 0,5 – 1,0 мм для деталей, полученных литьем под давлением.

В пластмассовых деталях отверстия оформляют соответствующими стержнями в пресс–формах. Наличие стержней является основной причиной появления напряжений в деталях, т.к. они затрудняют свободную усадку материала. Отверстия лучше располагать не в сплошных массивах, а в специальных бобышках с тонкими стенками. Ребра увеличивают жесткость и прочность конструкций, позволяют уменьшить сечения отдельных элементов детали, снизить напряжения в местах сопряжения стенок различного сечения. Для малогабаритных деталей роль ребер жесткости выполняют выступы или впадины.

Правильная конструкция опорной поверхности повышает жесткость всей конструкции, особенно в случае крупных корпусных деталей. Для этого сплошные опорные поверхности необходимо заменять поверхностями с выступающими буртиками. Необходимо предусматривать технологические уклоны в конструкциях деталей для облегчения извлечения из пресс–формы деталей, получаемых прессованием и литьем под давлением. Детали с боковыми выступами следует конструировать так, чтобы обеспечить их свободный выем и не делать сложных разборных пресс–форм.

Литьем под давлением и прессованием можно получать в деталях резьбы, не требующие дальнейшей обработки. Минимально допустимый диаметр резьбы для деталей из термопластов и пресс-порошков равен 2,5 мм, для волокнистых материалов – 4 мм. Армирование значительно расширяет область применения пластмассовых деталей. Например, в электро- и радиопромышленности прессованием и литьем под давлением получают электрические разъемники, колодки, панели и т.д. Это позволяет резко (в 10 – 100 раз) сократить трудоемкость получения таких деталей по сравнению с трудоемкостью получения аналогичных конструкции, собранных из отдельных элементов.

Армирование позволяет также повысить точность и прочность пластмассовых деталей. Арматуру в виде винтов, гаек, штырей и т.д., закрепляют с по-

мощью кольцевых выточек, буртиков или канавок. Для предотвращения проворачивания на наружных поверхностях этих деталей делают рифления, насечку или плоские грани. Мелкую арматуру в виде пластин (клеммы электрических разъемников) закрепляют с помощью боковых вырезов или отверстий. Проволочную арматуру закрепляют, расплющивая или загибая второй конец. Конструкция пресс-формы должна надежно фиксировать арматуру и предотвращать возможность затекания материала в гнезда для установки арматуры.

Подводя итоги, следует отметить, что применение пластмасс обеспечивает очень высокий эффект, позволяет снизить расходы по изготовлению в 10 – 12 раз. В табл. 34 приведены сравнительные данные по некоторым деталям, изготовленным из пластмасс вместо металла.

Таблица 34

Сравнительные данные по некоторым деталям из металла и полимерных материалов

№ п/п	Наименование деталей	Было				Стало			
		Металл	Масса, кг	Норма вр. час	Расценка, грн	Металл	Масса, кг	Норма вр. час	Расценка, грн
1	Ручка	Чугун	0,37	1,4	31	п/м	0,07	0,39	11,4
2	Шкала	Сталь	0,3	3,1	60,3	п/м	0,05	1,05	20,5
3	Подшипник	Латунь	0,15	1,1	20,5	п/м	0,02	0,16	4,4

1.3.5.7 Изготовление резиновых технических деталей

Состав и свойства технических деталей. В производстве резиновых технических деталей основным видом сырья являются натуральные и синтетические каучуки. Натуральные каучуки не нашли широкого применения, так как сырьем для их получения является каучук, содержащий сок отдельных сортов растений. Сырьем для получения синтетических каучуков являются нефть, нефтепродукты, природный газ, древесина и т.д. Каучук в чистом виде в промышленности не применяют. Каучук превращают в резину вулканизацией. В качестве вулканизирующего вещества обычно используют серу. Количество серы определяет эластичность резиновых деталей. Например, мягкие резины содержат 1 – 3 % серы, твердые (эбонит) – до 30 % серы. Процесс вулканизации происходит под температурным воздействием (горячая вулканизация) или без температурного воздействия (холодная вулканизация).

Для улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств резиновых технических деталей и снижения расхода каучука в состав резиновых смесей вводят разные компоненты. Наполнители уменьшают расход каучука, улучшают эксплуатационные свойства деталей. Наполнители подразделяют на порошкообразные (сажу, окись цинка, тальк, мел и др.) и тканевые (хлопчатобумажные, шелковые и другие ткани). Иногда для повышения прочности деталей их армируют стальной проволокой или сеткой, стеклянной или капроновой тканью. Количество наполнителя зависит от вида выпускаемых деталей.

Мягчители (парафин, стеариновая кислота, канифоль и др.) служат для облегчения процесса смешивания резиновой смеси и обеспечения мягкости и морозоустойчивости. Для замедления процесса окисления в резиновые смеси добавляют противостарители (вазелин, ароматические амины и др.). Процесс вулканизации ускоряют введением в смесь окиси цинка, свинцового глета и др.

Красители (охра, пентасернистая сурьма, ультрамарин и др.) вводят в смесь в количестве до 10 % от массы каучука. Высокая эластичность, способность к большим обратимым деформациям, стойкость к действию активных химических веществ, малая водо- и газопроницаемость, диэлектрические и другие свойства резины обусловили ее применение во всех отраслях хозяйства.

В машиностроении применяют разнообразные резиновые технические детали: ремни – для передачи вращательного движения с одного вала на другой; шланги и напорные рукава – для передачи жидкостей и газов под давлением; сальники, манжеты, прокладочные кольца и уплотнители – для уплотнения подвижных и неподвижных соединений; муфты, амортизаторы – для гашения динамических нагрузок; транспортные лепты – для оснащения погрузочно-разгрузочных устройств и т.д.

1.3.5.8 Способы изготовления резиновых технических деталей

Технологический процесс изготовления резиновых технических деталей состоит из отдельных последовательных операций: приготовления резиновой смеси, формования и вулканизации.

Процесс подготовки резиновой смеси заключается в смешивании входящих в нее компонентов. Перед смешиванием каучук переводят в пластическое состояние многократным пропусканием его через специальные вальцы, предварительно подогретые до 40 – 50 °С.

Находясь в пластическом состоянии, каучук обладает способностью хорошо смешиваться с другими компонентами. Смешивание проводят в червячных или валковых смесителях. Необходимо иметь в виду, что первым из компонентов при приготовлении смеси вводят противостаритель, последним – вулканизатор или ускоритель вулканизации.

Резиновые технические детали в зависимости от предъявляемых к ним требований формуют каландрованием, непрерывным выдавливанием, прессованием, литьем под давлением, намоткой и т.д. Технологические процессы переработки сырой резины в детали подобны тем, которые были рассмотрены при формовании деталей из пластмасс.

Каландрование применяют для получения резиновых деталей в виде листов и прорезиненных лент, а также для соединения листов резины и прорезиненных лент (дублирование). Операцию выполняют на многовалковых машинах – каландрах. Валки каландров снабжают системой внутреннего обогрева или охлаждения, что позволяет регулировать температуру режима.

Листы резины, полученные прокаткой на каландрах, сматывают в рулоны и используют затем в качестве полуфабриката для других процессов формования резиновых деталей. Во избежание слипания резины в рулонах ее по-

сыпают тальком или мелом при выходе из каландра. При получении прорезиненной ткани в зазор между валками каландров одновременно пропускают пластифицированную сырую резину и ткань. Резиновая смесь поступает в зазор между верхними и нижними валками, обволакивает средний валок и попадает в зазор между средним и нижним валками, через который проходит в ткань.

Средний валок вращается с большей скоростью, чем нижний. Разница скоростей обеспечивает втирание резиновой смеси в ткань. Толщину резиновой пленки на ткани регулируют, изменяя зазор между валками каландра.

Многослойную прорезиненную ткань получают при пропускании определенного числа листов однослойной прорезиненной ткани через валки каландра. Полученную ткань наматывают на барабан и затем вулканизируют.

Непрерывное выдавливание используют для получения профилированных резиновых деталей (труб, прутков, профилей для остекления). Детали непрерывным выдавливанием изготавливают на машинах червячного типа. Таким же способом покрывают резиной металлическую проволоку.

Прессование является одним из основных способов получения фасонных деталей (манжет, уплотнительных колец, клиновых ремней и т.д.). Прессуют в металлических формах. Применяют горячее и холодное прессование.

При горячем прессовании резиновую смесь закладывают в горячую пресс-форму и прессуют на гидравлических прессах с обогреваемыми плитами. Температура прессования 140 – 155 °С. При прессовании одновременно происходят формообразование и вулканизация деталей. Высокопрочные детали (например, клиновые ремни) после формования подвергают дополнительной вулканизации в специальных приспособлениях – пакетах.

Холодным прессованием получают детали из эбонитовых смесей (корпуса аккумуляторных батарей, детали для химической промышленности и т.д.).

После прессования заготовки отправляют на вулканизацию. В состав эбонитовой смеси входят каучук и значительное количество серы (до 30 % от массы каучука). В качестве наполнителей применяют размерные отходы эбонитового производства.

Литьем под давлением получают детали сложной формы. Резиновая смесь поступает под давлением при температуре 80 – 120 °С через литниковое отверстие в литейную форму и там полимеризуется.

1.4. Экономия ресурсов на этапе эксплуатации

Цель – описать и объяснить связи процессов изготовления деталей машин и их эксплуатации и привести современные решения экономии ресурсов на этапе эксплуатации машин.

1.4.1. Повышение надежности при эксплуатации

Решения, которые реализуются для экономии материалов и энергии на этапе эксплуатации машины, весьма многообразны и зависят от многих факторов, но так или иначе они связаны с повышением надежности машин.

Этот путь позволяет сократить расход материалов на запчасти к машинам и на процесс ремонта. Потери на ремонт чрезвычайно велики. Так, за весь период эксплуатации затраты на ремонт и обслуживание автомобилей из-за их износа в 6 раз превышают стоимость автомашины, станков – в 8 раз. Затраты в промышленности на ремонт машин, приборов и оборудования ежегодно достигают до 11 – 12 % всей стоимости продукции машиностроения. На все виды ремонта парка оборудования ежегодно уходит до 25 % капитальных вложений страны.

В машиностроении и металлообработке расходуется более 15 % годовой потребности металла (в некоторых отраслях до 50 %), каждый пятый рабочий-ремонтник, а ремонтом занята примерно треть парка металлорежущих станков страны.

Надежность машин закладывается на этапе проектирования и зависит от конструкции узлов и деталей машин, применяемых материалов, методов защиты от вредных воздействий, системы смазки, ремонтпригодности и др. При изготовлении машины надежность зависит от качества изготовления деталей и сборок, качества поверхностей контактирующих и трущихся деталей (показателей шероховатости поверхности, наклепа и остаточных напряжений, методов контроля и испытания готовой продукции и др. (табл. 35).

В процессе эксплуатации машины надежность реализуется. Напомним, что надежность машины характеризуется такими показателями: безотказность или число отказов в единицу времени, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность.

Показатели безотказности и долговечности зависят от методов и условий эксплуатации машины, принятой системы ремонтов, методов технического обслуживания, режимов работы и других факторов.

Затраты (Z) и безотказность работы $P(t)$ имеют связь, показанную на рис. 12. С одной стороны повышение $P(t)$ связано с ростом затрат в сфере производства и эксплуатации (Z_1), а с другой стороны – с уменьшением затрат на ремонт и обслуживание, устранением потерь от простоев, уменьшением потребностей в запчастях (Z_2) и др.

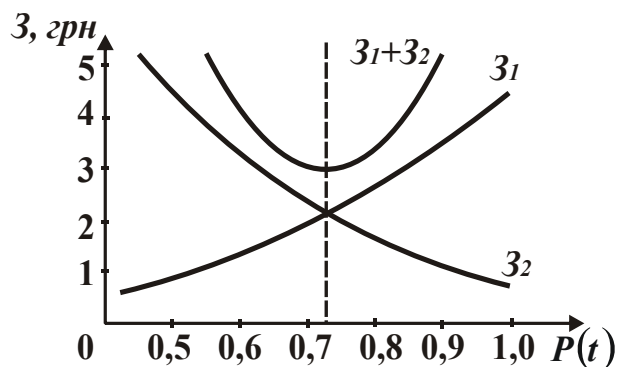


Рис. 12. Связь затрат в производстве и при эксплуатации Z_1 и при ремонте и обслуживании (Z_2) с безотказностью работы машины $P(t)$

Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с характеристиками качества их поверхностей
и поверхностных слоев

Эксплуатационные свойства	Геометрические характеристики поверхности																Физико-механические характеристики поверхностного слоя				
	Шероховатость											Волнистость				Макро-отклонения		Поверхностная микротвердость		Поверхностные остаточные напряжения	
	R_a	R_z	R_{max}	S_m	S	t_p	(R_p)	tR_p	(p)	(p')	Направление неровностей	W_c	W_{max}	W_p	S_{m_w}	H_{max}	H_p	$H_{p_{нов}}$	h_p	$a_{нов}$	h_a
Износостойкость																					
сухое трение	(+)	(+)	(+)	(+)	—	+	+	(+)	+	—	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	+	+	+	+	+
жидкое трение	+	(+)	(+)	+	(+)	+	+	(+)	+	(+)	+	+	+	+	+	(+)	+	+	(+)	+	(+)
граничное трение	+	(+)	(+)	+	(+)	+	+	(+)	+	(+)	+	+	(+)	+	(+)	+	—	—	—	—	—
избирательный перенос	(+)	(+)	(+)	(+)	—	(+)	+	(+)	+	(+)	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	+	—	—	—	—
Усталостная прочность	(+)	(+)	+	(+)	—	—	+	—	—	+	+	—	+	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	+	+
Контактная жесткость	(+)	(+)	(+)	(+)	—	+	+	+	+	—	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	+	+	—	(+)	—
Виброустойчивость	(+)	(+)	(+)	+	—	+	+	+	+	—	+	(+)	—	+	(+)	(+)	+	+	(+)	(+)	(+)
Коррозионная стойкость	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	(+)	(+)	—	(+)	—	+	(+)	(+)	(+)	—	(+)	+	+	+	+
Прочность сопряжений	(+)	(+)	—	(+)	—	+	+	(+)	+	—	+	(+)	—	+	(+)	(+)	+	+	—	(+)	—
Плотность соединений	+	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	(+)	—	—	+	+	(+)	+	(+)	(+)	+	—	—	—	—
Прочность сцепления покрытий	(+)	+	(+)	+	—	(+)	+	(+)	(+)	(+)	+	(+)	(+)	(+)	(+)	—	—	+	(+)	+	(+)
Обтекаемость газами и жидкостями	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	+	(+)	(+)	+	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	+	—	—	—	—
Теплоотражение	+	(+)	(+)	+	+	(+)	+	(+)	(+)	(+)	+	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	+	(+)	+	(+)

Примечание. + – характеристики, оказывающие основное влияние на данное эксплуатационное свойство; (+) – характеристики, оказывающие ограниченное влияние на данное эксплуатационное свойство; — – отсутствие влияния; (R_p) , (Q) и (Q') – параметры, не вошедшие в ГОСТ 2789–89 (шероховатость поверхности).

Чем больше заказ на безотказность $P(t)$, тем дороже будет стоимость ($P(t) > 0,75$). Отказы в машинах чаще всего происходят из-за износа. Это 60 – 85 % от общего числа выходов из строя. Причины – абразивный, усталостный, коррозионно-механический, адгезионный износ или комбинация видов износа. Надежность можно повысить (уменьшить материалоемкость) за счет:

- облегчения и упрощения конструкции, что приводит к работе узлов трения в других условиях;

- при одновременном повышении износостойкости деталей и сборочных единиц узлов трения;

- при применении эффективных смазок;

- при использовании более износостойких материалов, путем применения термической или химико-термической обработки, нанесения покрытий и др.

Надежность машин в процессе эксплуатации существенно зависит от условий и режимов работы. На надежность машин, которые функционируют вне заводских помещений, большое влияние оказывает окружающая среда (температура, влажность, запыленность и др.). Машины иногда воспринимают перегрузки, работают в условиях непосредственных циклов нагрузки, в ряде случаев обслуживаются операторами низкой квалификации.

При использовании машин бывают нарушения инструкции по их эксплуатации. Эти и другие причины нарушений условий и режимов работы машин, имеющие место при эксплуатации, приводят к возникновению отказов раньше установленного ресурсом машины срока. Поэтому соблюдение требований инструкции по монтажу и эксплуатации – одно из условий достижения надежности работы машины.

В процессе эксплуатации машин происходит износ ее деталей. Поэтому ни одна машина не может обойтись без ремонта и технического обслуживания, которые являются неотъемлемыми этапами процесса эксплуатации машины и должны обеспечивать в течение всего периода эксплуатации требуемый уровень безотказности при наименьших затратах времени и средств.

Процесс изнашивания деталей машин при эксплуатации делится на три периода: 1 – приработка, при которой темп изнашивания повышен в результате истирания начальных неровностей или вследствие перекоса поверхностей сопряженных деталей; 2 – установившийся износ, когда происходит естественное изменение форм и размеров деталей в процессе работы машины; 3 – катастрофический износ, характеризуемый резким нарастанием интенсивности износа ввиду недопустимых изменений в сопряженных деталях. В этот период происходит отказ.

Период эксплуатации до отказа (наработка на отказ) даже у однотипных деталей и узлов машин неодинаков в силу воздействия различных случайных факторов (попадания абразива, воды и т.д.). Процесс износа носит как бы веерный характер из-за рассеивания интенсивности изнашивания с течением времени. Если C – предельный допуск на износ, то наработка для одних и тех же деталей в различных условиях эксплуатации различна ($t_2 \gg t_1$). Такое рассеивание следует учитывать при установлении допусков на техническое обслуживание и ремонт машин.

На величину наработки, а, следовательно, и на периодичность ремонтов оказывает влияние и начальный размер детали, полученный при ее изготовлении. Если, например, деталь, будет изнашиваться не с середины номинального размера, а с верхнего или нижнего допуска, то картина достижения границы S резко изменится. Следовательно, при изготовлении деталей с минусовыми допусками не только снижается их материалоемкость в процессе производства, как показано в разделе 1,4, но и повышается долговечность, что приводит к снижению эксплуатационной материалоемкости. Зная ожидаемый характер развития износа деталей машины в процессе эксплуатации, можно установить рациональные сроки проведения ремонта машины.

Оптимальный вариант решения может быть найден при сопоставлении затрат на повышение надежности требуемой детали и проведение дополнительного профилактического ремонта. Оптимальный межремонтный период для машины должен обеспечить минимальное значение относительных ремонтных потерь вследствие выбора рационального соотношения между объемами работ при периодических ремонтах и межремонтном обслуживании.

Сокращение межремонтных периодов нецелесообразно не только с экономической точки зрения, но и по условию надежности машины. Преждевременная разборка сопряженных деталей приводит после сборки узла опять к приработке поверхностей, которая характеризуется интенсивным изнашиванием. Если разборка все же необходима (например, при техническом обслуживании), то детали предварительно размечают с тем, чтобы после разборки установить их точно на прежние места.

Обычно при эксплуатации машин используют запасные части, номенклатура которых отражает характер типичных повреждений в машине, а их количество – срок службы заменяемых деталей. Наличие запасных частей значительно сокращает время и стоимость ремонта. Их применение обеспечивает полное восстановление утраченной работоспособности машины, так как технология изготовления этих деталей такая же, как и технология изготовления деталей, установленных на машине.

1.4.2. Влияние способов формообразования деталей на качество их рабочих поверхностей

При выборе способов обеспечения, заданных условиями эксплуатации, точности изготовления деталей и качества их рабочих поверхностей, следует иметь в виду, что качество обработанной поверхности и точность деталей машин, в основном, характеризуются: геометрическими параметрами (макрогеометрией, волнистостью, шероховатостью, направлением штрихов обработки, точностью взаимного расположения элементарных поверхностей и др.); физико-механическими свойствами поверхностного слоя деталей (наклепом, остаточными напряжениями) и физико-химическими свойствами поверхностного слоя, которые определяются взаимодействием ненасыщенных силовых полей поверхностных атомов твердого тела с силовыми полями молекул внешней среды, находящихся в контакте с поверхностью твердого тела.

Эксплуатационные свойства деталей, обработанных резанием и другими методами, зависят от взаимодействия обрабатываемого материала и режущего элемента инструмента, физико-механических и физико-химических свойств обрабатываемых материалов, вибраций режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

Формирование геометрических характеристик рабочих поверхностей деталей. Сечение обработанной поверхности перпендикулярной плоскостью дает профиль микро- и макронеровностей в определенном направлении. Для каждого вида обработки микропрофиль имеет соответствующие высоту гребешков, глубину впадин, углы (радиус закругления) вершин гребешков и впадин, а также шаг – расстояние между гребешками. В зависимости от способа обработки получается определенная направленность в распределении и форме выступов (точение, фрезерование, строгание, шлифование и др.) или однородная структура поверхности по всем направлениям (электрополирование, гидрополирование и др.).

Влияние технологических факторов формирования геометрических характеристик поверхности и данных о характере распределения единичных неровностей на эксплуатационные свойства еще недостаточно учитывается, что затрудняет решение ряда задач, связанных с совершенствованием методов обработки поверхностей и повышением эксплуатационных свойств деталей.

ГОСТ 2789–89 предусматривает два параметра для оценки шероховатости поверхности: среднеарифметическое отклонение профиля R_a и высоту неровностей R_z . Однако он не регламентирует и не налагает каких-либо ограничений на форму неровностей, их шаг и регулярность микропрофиля. Такая оценка шероховатости не полностью характеризует геометрические и эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей.

Одной из задач повышения износостойкости является определение опорной площади микронеровностей при различных методах формообразования поверхностей деталей. Решение этой задачи связано с контактной жесткостью соединений, их износостойкостью, теплопроводностью, электропроводностью, точностью перемещения рабочих органов механизмов и др.

При контактировании поверхностей вследствие шероховатости и волнистости необходимо различать три площади касания: номинальную, обусловленную геометрическими размерами соприкасающихся тел; контурную, равную площади смятия упруго-деформированных волн, и фактическую, равную площади смятия микронеровностей.

Жесткость стыковых соединений существенно зависит от геометрии контактирующих поверхностей и от их механических свойств.

По данным И. В. Крагельского, Н. Б. Демкина, Э. В. Рыжова и других исследователей, при обычно применяемых нагрузках деформация выступов поверхности невелика. Поэтому, когда рассматриваемая шероховатая поверхность контактирует с твердой гладкой поверхностью, можно пренебречь увеличением поперечного сечения выступа и считать, что опорная кривая, построенная с учетом продольной и поперечной шероховатости, выражает зависимость между площадью фактического контакта и сближением поверхностей (равным дефор-

мации наиболее высоких выступов). В случае упругого контакта площадь сечения выступов при данном сближении приблизительно в 2 раза больше фактической площади касания. Наибольший практический интерес представляет та часть кривой опорной площади, которая расположена выше уровня поверхности, соответствующего 60 – 70 % максимальной высоты неровностей. На этом начальном участке сконцентрировано наибольшее число неровностей, что в значительной степени определяет фактическую площадь контакта при сближении сопряженных поверхностей деталей машин в процессе приработки и эксплуатации. Начальную часть кривой опорной поверхности при контактировании шероховатой поверхности с гладкой поверхностью обычно выражают степенной зависимостью:

$$\eta = B \cdot \varepsilon^V,$$

где η – отношение фактической площади F_f к контурной площади F_k ;

B – коэффициент;

$\varepsilon = a / R_z$ – отношение сближения a к максимальной высоте неровностей R_z (высота неровностей в этом случае и в последующих формулах условно принята равной величине R_z , определяемой в соответствии с ГОСТ 2789–89);

V – коэффициент, характеризующий опорную кривую.

Примерные значения коэффициентов V и B для различных видов обработки приведены в табл. 36.

Таблица 36

Значения коэффициентов V и B , характеризующих опорную кривую

Вид обработки	V	B	Вид обработки	V	B
Строгание	1,95 – 2,2	1,75 – 2,1	Круглое шлифование	1,8–2,0	0,6–2,0
Точение	1,6 – 2,1	1,0 – 2,0			
Растачивание	1,2 – 1,5	0,55 – 1,9	Внутренне шлифование	1,75–2,0	0,65–1,35
Развертывание	1,55 – 1,85	1,1 – 1,55			
Торцевое фрезерование	1,4 – 2,2	0,4 – 0,6	Хонингование	1,5–1,8	0,75–2,5
			Плоская доводка	1,15–1,6	2,4–4,5
Протягивание	1,7 – 1,75	0,6 – 1,0			

Из табл. 36 следует, что каждому виду обработки соответствуют свои значения коэффициентов V и B . Во всех случаях, когда проводится совместный учет шероховатости поверхности в продольном и поперечном направлениях, значения V превышают единицу. В пределах каждого вида обработки наблюдается вполне определенная закономерность: чем меньше шероховатость, тем меньше значение V и больше значение B .

При обработке резанием формы неровностей как в поперечном, так и в продольном сечениях представляют собой треугольники с различными размерами оснований, радиусами закругления вершин и углов профиля. С повышением качества поверхности для каждого метода обработки наблюдается уменьшение углов профиля и увеличение радиусов закругления. Таким образом, зная значения углов профиля, радиуса закругления профиля, а также высоту неров-

ностей, можно полнее оценить способность данной поверхности к увеличению опорной площади. Для более полной оценки геометрических свойств поверхности в отношении способности к увеличению опорной площади определяется опорная жесткость y_{on} , которая показывает, какому сближению обязано приращение на единицу относительной площади касания. С уменьшением величины опорной жесткости опорная площадь увеличивается.

Из аналитических зависимостей для определения относительной площади касания и относительного сближения при упругом, пластическом контакте и пластическом контакте с упрочнением следует, что характер влияния отдельных параметров (давление, радиус закругления вершин неровностей, модуль упругости материала, его твердость, коэффициент Пуассона и параметр B) на фактическую площадь контакта и сближение остается постоянным. Фактическая площадь контакта возрастает с увеличением давления, радиуса закругления вершин неровностей, контурной площади и параметра B , характеризующего опорную кривую. Фактическая площадь контакта убывает с увеличением твердости материала, модуля упругости, коэффициента Пуассона, максимальной высоты неровностей и параметра, характеризующего упрочнение материала. Влияние отдельных факторов на величину сближения, в основном, аналогично влиянию их на площадь касания. Отличие состоит в том, что сближение увеличивается с возрастанием высоты неровностей и убывает с увеличением параметра B .

Краткий анализ влияния технологических факторов на формирование геометрических свойств поверхности показывает, что для оценки этих свойств ГОСТ 2789–89 не дает достаточно полных характеристик геометрических свойств поверхности.

Разделение геометрических свойств обработанных поверхностей на макро- и микронеровности в ряде случаев весьма условно, а оценка шероховатости по средней высоте неровностей не позволяет правильно оценить эксплуатационные свойства деталей машин. Одной из важнейших задач научных исследований в области разработки и совершенствования методов формообразования рабочих поверхностей деталей машин является создание методов обработки, обеспечивающих высокую контактную жесткость соединений и других эксплуатационных свойств вследствие оптимальной геометрии поверхности и профиля отдельных неровностей.

Сущность процесса формирования поверхности может быть раскрыта в результате всестороннего микроскопического и профилографического исследования в сочетании с методами измерения шероховатости поверхности, микротвердости, остаточных напряжений и металлографического анализа. Ограничение исследований измерения высоты неровностей, образующихся при различных условиях обработки, с построением соответствующих графиков и составлением эмпирических соотношений между размерами неровностей и отдельными технологическими факторами приводит к частным зависимостям только в пределах проведенных экспериментов.

Такие исследования не определяют общих закономерностей процесса формирования поверхности. В связи с этим совершенствование методов фор-

мообразования поверхностных слоев и отработку оптимальных режимов изготовления деталей следует проводить с учетом эксплуатационных свойств поверхности.

В табл. 37 приведено влияние факторов обработки резанием на качество поверхности и эксплуатационные свойства, при этом в качестве основных выбраны такие факторы: скорость резания, подача, глубина резания, геометрия лезвийного инструмента (углы γ ; α ; φ ; φ' ; λ ; r).

В результате пластической деформации в поверхностном слое возникают остаточные напряжения, повышаются прочностные характеристики металла в наклепанном слое.

Механические и некоторые физические свойства упрочненного поверхностного слоя определяются взаимодействием двух одновременно протекающих процессов при пластической деформации: упрочнения и разупрочнения (отдыха).

Все технологические факторы, способствующие повышению температуры в зоне пластической деформации или увеличению продолжительности теплового воздействия, приводят к снижению упрочнения.

Факторы, уменьшающие продолжительность отдыха (увеличение скорости деформации) или снижающие температуру деформируемого металла (улучшение охлаждения, повышение теплопроводности металла, уменьшение трения), способствуют повышению степени упрочнения.

Наклеп поверхностного слоя наблюдается при всех видах обработки резанием. Повышение твердости поверхностного слоя после обтачивания зависит от твердости стали до обработки.

Для мягких сталей повышение твердости может составлять до 100 %, а для твердых сталей не превышает 25 %. При исследовании с помощью рентгеновских лучей микроструктуры металла, обработанного снятием стружки, обнаружено сильное искажение кристаллической решетки и раздробление кристаллитов металла. Последовательное удаление тонких слоев металла с обработанной поверхности травлением в кислоте и исследование микроструктуры металла с помощью рентгеновских лучей позволяет определить толщину наклепанного слоя.

Склонность металла к наклепу в процессе обработки снятием стружки зависит от его физико-механических свойств. Для каждого материала существует критическая скорость резания, после которой увеличения глубины и степени наклепа может не быть. В случае увеличения скорости резания за пределы зоны наростообразования степень и глубина наклепа уменьшаются. Зависимость степени наклепа ε от силы резания P_z на основании экспериментальных данных имеет вид:

$$\varepsilon = C_1 \cdot P_z^{0,082}.$$

Степень пластической деформации обработанной поверхности зависит от пластической деформации, вызываемой силой P_z . С увеличением P_z степень наклепа изменяется незначительно, так как 80 – 90 % ее затрачивается на деформацию срезаемого слоя.

Влияние технологических факторов обработки резанием на качество поверхности
и эксплуатационные свойства деталей машин

Наименование технологических факторов	Изменение геометрических характеристик поверхности детали	Изменение физико-механических свойств поверхностного слоя детали	Влияние технологических факторов на эксплуатационные свойства деталей
1	2	3	4
Скорость резания	Шероховатость обработанной поверхности повышается, когда обработка ведется на скоростях резания, способствующих наростообразованию. При обработке на высоких скоростях (150 – 300 м/мин) шероховатость обработанной поверхности снижается	По мере увеличения (до определенных пределов) скорости резания глубина наклепа возрастает. При высоких скоростях (200 – 600 м/мин) возникает явление разупрочнения, которое уменьшает глубину наклепа. При обработке легированных и высокопрочных сталей, имеющих низкие пластические свойства, остаточные напряжения сжатия образуются при скоростях резания 400 – 600 м/мин. При обработке конструкционных сталей 20 и 45 остаточные напряжения сжатия возникают при скоростях резания 500 – 800 м/мин и отрицательных передних углах	С увеличением скорости резания и уменьшения шероховатости до оптимальной износостойкости и коррозионная стойкость увеличивается. Предел выносливости повышается с увеличением степени и глубины наклепа и повышением остаточных напряжений сжатия
Подача резания	Шероховатость обработанной поверхности повышается при увеличении подачи	При увеличении подачи возрастают глубина наклепа и остаточные напряжения	С увеличением подачи износостойкость и коррозионная стойкость уменьшаются вследствие увеличения шероховатости до оптимальной. Усталостная прочность повышается
Глубина резания	При обработке пластичного металла на малых глубинах резания (0,1 – 0,2 мм) по слоям, наклепанным на предыдущей операции, шероховатость обработанной поверхности снижается	Не оказывает существенного влияния на глубину наклепа	Не оказывает существенного влияния

1	2	3	4
Передний угол	Увеличение деформации поверхностного слоя при неблагоприятном переднем угле приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности	Применение инструментов с отрицательными передними углами от 15 до 45° способствует образованию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия	При работе инструментами с отрицательными углами от 15 до 45° предел выносливости повышается
Задний угол	Увеличение зоны соприкосновения инструмента с обрабатываемой поверхностью детали приводит к повышению трения и увеличению шероховатости обработанной поверхности	При увеличении заднего угла в пределах 3 – 15° глубина наклепа уменьшается	На износостойкость не оказывает существенного влияния при углах в пределах 3 – 15°. Предел выносливости может незначительно снижаться
Главный угол в плане	Шероховатость обработанной поверхности возрастает при увеличении главного угла в плане от 30 до 60°	Уменьшением главного угла в плане от 90 до 45° вызывает уменьшение глубины наклепа	С уменьшением глубины наклепа и повышением шероховатости снижается предел выносливости
Вспомогательный угол в плане	При увеличении вспомогательного угла в плане шероховатости поверхности сильно возрастает при торцевом фрезеровании (при черновой обработке) и незначительно при отделочной	–	С уменьшением глубины наклепа и повышением шероховатости повышается предел выносливости.
Радиус закругления вершины резца	При увеличении радиуса закругления резца в пределах 0,5 – 4 мм шероховатость обработанной поверхности снижается	–	Износостойкость повышается в пределах оптимальной шероховатости, предел выносливости увеличивается
Радиус скругления (затупления) режущей кромки инструмента	При увеличении радиуса скругления (затупления) режущей кромки шероховатость поверхности увеличивается	Увеличение радиуса скругления режущей кромки способствует увеличению глубины наклепа и остаточных напряжений	С увеличением глубины наклепа и остаточных напряжений предел выносливости повышается

Зависимость между глубиной наклепа и степенью наклепа при обработке на различных режимах резания некоторых марок сталей такова. Степень наклепа у более мягких и пластичных сталей выше, чем у твердых. Обработка экспериментальных данных показала, что между глубиной и степенью наклепа существует следующая зависимость:

$$h = C_2 \cdot \varepsilon, \text{ мкм,}$$

где C_2 – постоянная величина, характеризующая свойства металла.

Подставив значение $\varepsilon = C_1 \cdot P_z^{0,082}$ в эту зависимость, получена зависимость для определения глубины наклепа от силы резания:

$$h = C_3 \cdot P_z^{0,246}.$$

Постоянные величины C_1 , C_2 , C_3 для различных материалов приведены в табл. 38.

Таблица 38

Значения постоянных величин C_1 , C_2 , C_3

Материал	C_1	C_2	C_3
X18H10T	1,26	29,6	59,2
40X	1,14	32,5	48,1
XH77TIOP	0,985	51	48,7
20X15H3MA	1,2	26,5	45,8

На основании проведенных исследований можно заключить, что все технологические факторы влияют на упрочнение и другие свойства поверхностных слоев деталей машин. Оценивать качество поверхности необходимо с учетом, главным образом, влияния доминирующих факторов. Ниже приведены некоторые количественные данные влияния технологических факторов на глубину и степень наклепа стали Ст3 при обработке проходными резцами с режущей кромкой из сплава T15K6.

Влияние скорости резания на глубину наклепа выражается уравнением неравнобокой гиперболы:

$$h = C_v \cdot V^{0,2}.$$

При $S = 0,08$ мм/об; $C_v = 692$, а при $S = 0,2$ мм/об; $C_v = 851$.

Зависимость степени наклепа ε от скорости резания V аналогична указанной, но возрастание степени наклепа ε происходит медленнее, чем глубины наклепа h .

Зависимость $h = f(S, t)$ можно записать как уравнение плоскости:

$$h = A \cdot S + B \cdot t + C.$$

Увеличение скорости резания V уменьшает степень влияния подачи S и глубины резания t на глубину наклепа h , а при больших скоростях резания $A = B \rightarrow 0$. Следовательно, влияние подачи и глубины резания будет незначительным, причем при любых скоростях резания подача оказывает большее влияние на глубину наклепа h , чем глубина резания ($A > B$). Установлено, что

степень наклепа ε не зависит от глубины резания t и незначительно (на 10 – 13 %) возрастает при увеличении подачи S .

Геометрия режущего инструмента также оказывает влияние на упрочнение поверхностного слоя. Влияние радиуса закругления режущей кромки и главного угла в плане на глубину наклепа h и микротвердость H_{no} поверхностного слоя при обработке стали Ст3 имеет место. Изменение переднего угла при его положительных значениях не оказывает существенного влияния на глубину и степень наклепа. Переход к отрицательным углам приводит к существенному повышению глубины наклепа и, кроме того, менее интенсивно повышается степень наклепа. Увеличение заднего угла α от 0 до 8° сопровождается интенсивным уменьшением глубины и степени наклепа. Восприимчивость металлов к наклепу зависит не только от химического состава и физико-механических свойств, но и в значительной степени от их микроструктуры.

Наиболее восприимчивой к наклепу является наименее напряженная структура перлита, полученная в результате отжига. Переход к более напряженным и мелкозернистым структурам (сорбитообразный перлит, полученный после нормализации, сорбит, троостит и мартенсит) вызывает понижение степени наклепа. В процессе обработки резанием в поверхностном слое происходят структурные изменения, глубина распространения которых, например, после шлифования может колебаться в пределах 0,02 – 0,2 мм.

Основными причинами возникновения остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей, обрабатываемых резанием, являются: пластическая деформация поверхностного слоя, связанная с увеличением удельного объема наклепанного поверхностного слоя металла; неравномерная пластическая деформация поверхностного слоя, связанная с вытягиванием верхних волокон и развитием в них остаточных напряжений сжатия, ориентированных в направлении резания; локализованный нагрев тонких поверхностных слоев с возникновением в них остаточных напряжений растяжения; фазовые превращения различных слоев металла, приводящие к образованию в них различных структур, обладающих различной плотностью и создающих в этих условиях остаточные напряжения различного знака и величины. Эпюра распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя имеет сложный характер, особенно у металлов.

В зависимости от физико–химических свойств и исходной структуры материала деталей, режимов резания, геометрии режущего инструмента на разной глубине поверхностного слоя возникают различные фазовые превращения и изменения физико–механических свойств поверхностного слоя, что приводит к возникновению в поверхностном слое значительных по величине остаточных напряжений различного знака.

На величину и распределение остаточных напряжений наибольшее влияние оказывают скорость резания, подача и величина переднего угла режущего инструмента. При увеличении подачи возрастает толщина снимаемого слоя, увеличивается степень пластической деформации поверхностного слоя, возрастают силы трения и количество тепла, выделяющегося в зоне резания, а, следовательно, растут величина и глубина распространения остаточных напряжений.

Наиболее существенно на величину и знак остаточных напряжений влияет передний угол резца. При точении образца из стали 45 со скоростью 150 м/мин переход от положительных к отрицательным передним углам, и увеличение отрицательных передних углов резца приводит к снижению величины остаточных напряжений растяжения. При точении образца из стали 45 со скоростью 750 м/мин при переходе к передним углам $\gamma = -30^\circ$ и $\gamma = -50^\circ$ в поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия, что объясняется интенсивным нагреванием поверхностного слоя и его закалкой. При точении образца из легированной, легко закаливающейся стали 18Х2Н4ВА, даже при скорости резания 150 м/мин отрицательные углы $\gamma = -30^\circ$ способствуют возникновению остаточных напряжений сжатия, а при скорости резания 750 м/мин при всех значениях отрицательных передних углов в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, и только при больших положительных передних углах – растягивающие. Изменение переднего угла влияет также на глубину залегания остаточных напряжений.

Увеличение радиуса закругления режущей кромки резца, а также затупление резца, влекущее за собой появление на задней поверхности площадки износа, увеличение трения в зоне резания и нагрев поверхностного слоя усиливают тепловые напряжения растяжения и ослабляют напряжения сжатия. При точении образцов из высоколегированных сталей, хорошо воспринимающих закалку, затупление резца и появление площадки износа на нем могут вызвать закалку тонкого поверхностного слоя и возникновение в нем остаточных напряжений сжатия.

Установлено, что при шлифовании в поверхностном слое также возникают высокие остаточные напряжения, а величина и знак их изменяются в зависимости от режимов шлифования. При шлифовании высокоуглеродистой стали в случае обычных условий шлифования возникают остаточные напряжения растяжения, а при скоростном шлифовании – напряжения растяжения или сжатия. Знак остаточных напряжений, в основном, зависит от степени влияния теплового фактора. На изменение теплового режима в зоне резания существенное влияние оказывают качество абразивного инструмента, а также изменение условия охлаждения. Под действием охлаждающей жидкости внешний тонкий слой металла претерпевает вторичную закалку, что приводит к возникновению остаточных напряжений сжатия в тонком поверхностном слое.

Изменение величины остаточных напряжений в зависимости от глубины шлифования отожженной или закаленной углеродистой стали подчиняется общей закономерности, установленной для различных углеродистых сталей: с увеличением глубины шлифования до 0,025 – 0,03 мм остаточные напряжения растут, а при дальнейшем росте глубины шлифования снижаются.

Увеличение скорости продольной подачи вызывает при обычном шлифовании рост растягивающих напряжений, а при скоростном шлифовании при высокой скорости вращения изделия увеличение скорости продольной подачи ведет к уменьшению растягивающих и к увеличению сжимающих напряжений.

При исследовании методом электронной дифракции на специальной установке поверхностного слоя образцов после шлифования, притирки и сверх-

доводки обнаружено, что в каждом из них имеется три зоны. Первая зона характеризует пленку адсорбированных газов из атмосферы. Такая пленка прочно удерживается на металле даже при очистке и обезжиривании. Толщина этого слоя 2 – 3 Å. Вторая зона имеет неодинаковое строение при различных видах обработки. В шлифованных деталях этот слой составляет толщину от 2 до 30 Å и состоит из частиц окислов, нитридов и обезуглероженных действием высоких температур частиц металла, относительно слабо соединенных между собой. При полировании этот слой толщиной около 30 Å состоит из частиц абразивов, окислов, пыли и пр.

Сверхдоводка уменьшает величину второй зоны до 10 – 15 Å. Эта зона также состоит из окислов и пыли, но без частиц абразивов. Третья зона при всех видах обработки состоит из деформированных зерен металла. Величина этого слоя при шлифовании около 50 000 Å или 5 мкм, при притирке и сверхдоводке — 15 000 Å или 1,5 мкм.

Особым видом чистовой обработки является хонингование. Хонингование обеспечивает получение деталей с шероховатостью $R_a = 0,63 - 1,25$ мкм в соответствии с ГОСТ 2789–89. На шероховатость поверхности после хонингования существенно влияет зернистость абразивных брусков. Припуск под хонингование в основном зависит от характера операции, предшествующей хонингованию, диаметра отверстия, материала детали и других факторов. Если хонингованию предшествует растачивание отверстия, следует оставлять припуск 0,05 – 0,08 мм; при предварительном развертывании 0,02 – 0,04 мм и при предварительном шлифовании 0,01 мм. Для повышения эффективности процесса операция хонингования выполняется в два перехода: предварительная – более грубым абразивом и окончательная – более мелким абразивом. Точность отверстия после хонингования 0,005 – 0,02 мм, а овальность и конусность могут быть доведены до 0,005 мм.

По сравнению с внутренним шлифованием хонингование формирует поверхность с меньшей шероховатостью и характеризуется большей производительностью, позволяет обрабатывать отверстия от 5 до 1 500 мм, создает меньшую глубину деформированного слоя. При шлифовании давление резания составляет 70 – 700 Н/см², а при хонинговании 35 – 140 Н/см², что приводит не только к уменьшению деформации поверхностного слоя, но и к понижению его температуры. Температура обрабатываемой поверхности при шлифовании достигает 320 – 430 °С, а при хонинговании 40 – 150 °С. К недостаткам процесса хонингования относится, главным образом, получение отверстия с раструбами или бочкообразной формы. В качестве доводочной операции для получения высокого качества шероховатости цилиндрических, фасонных и плоских поверхностей широко используется притирка. Притирка обеспечивает изготовление деталей с точностью до 1 мкм. При работе мягкими притирами в качестве абразивных материалов употребляют наждак, корунд, карборунд, карбид бора зернистостью 100 – 200. Для смазки применяют керосин, бензин, машинное масло. При работе твердыми притирами (закаленная сталь, хромированная сталь и особые сорта стекла) в качестве абразива применяют крокус,

венскую известь, окись хрома. Сталь и чугун притирают пастами с керосином, машинным маслом, газолином, легкие сплавы – с деревянным маслом.

Притирка представляет собой не только механический процесс резания, но и химический процесс.

В результате введения в притирочные пасты химически активных веществ (олеиновой кислоты, стеариновой кислоты и др.) на притираемой поверхности образуется пленка окислов металла, менее прочная, чем основной металл. Эта пленка легко удаляется абразивом с меньшей твердостью, чем основной металл. Процесс притирки производится как вручную, так и на специальных станках.

Обрабатываемые притиркой поверхности должны быть хорошо подготовлены, преимущественно шлифованием. Припуск для притирки составляет 0,005 – 0,017 мм. Глубина деформированного слоя в процессе притирки получается незначительная, так как процесс протекает при давлении 20 – 40 Н/см².

Процесс притирки широко применяется для обработки зубьев шестерен, различного контрольно-измерительного инструмента и, особенно, деталей точных приборов.

Кроме притирки в качестве доводочного процесса очень часто используется особый вид тонкого процесса – сверхдovодка (суперфиниш).

При сверхдovодке используют абразивные бруски зернистостью М14 – М7. Сравнение сверхдovодки с другими видами обработки приведено в табл. 39.

Значения средних высот гребешков на поверхностях деталей при различной предварительной обработке приведены в табл. 40.

Таблица 39

Сравнение сверхдovодки с другими видами обработки

	Высота гребешков, мкм	Шаг или расстояние между гребешками, мкм	Скорость резания, м/мин	Температура поверхности в °С	Давление абразивного инструмента, Н/см ²	Глубина изменения структуры, мм
Токарная обработка (чистовая)	12 – 125	0,12 – 1,5	15 – 150	300 – 550	–	0,25 – 0,5
Шлифование	0,9 – 5	0,002 – 0,05	900 – 2 400	300 – 400	450 – 500	0,012 – 0,075
Хонингование	0,15 – 1,25	0,002 – 0,05	120 – 300	40 – 150	220 – 900	0,0025 – 0,025
Притирка	0,08 – 0,25	0,002 – 0,02	6 – 30	18 – 20	5 – 15	0,00025 – 0,0025
Сверхдovодка	0,01 – 0,20	–	1 – 2,5	18 – 20	5 – 25	До 0,00025

Процесс сверхдovодки характеризуется небольшими давлениями абразива, малыми скоростями и глубиной резания, быстрыми колебательными движениями (с амплитудой 3 – 6 мм) брусков по обрабатываемой поверхности. В качестве смазывающей жидкости часто применяют керосин с индустриальным или турбинным маслом в отношении 10:1. Основное значение сверхдovодки заключается в получении требуемой шероховатости поверхности. Припуск на обработку сверхдovодкой составляет не более 5 мкм.

Средняя высота гребешков на поверхности деталей

Название детали	Предварительная обработка	Средняя высота гребешков, мм	
		до сверхдovодки	после сверхдovодки
Коленчатый вал	Тонкое шлифование	0,0019	0,00012
Тормозной барабан	Растачивание	0,0026	0,0002
Поршень	Шлифование	0,001	0,00015
Толкатель	Шлифование	0,0005	0,00005
Кулачок	Шлифование	0,0005	0,000075
Блок цилиндров	Развертывание	0,00065	0,00015
Блок клапана	Шлифование	0,00045	0,0001

Еще одним процессом чистовой обработки, предназначенным для получения высокого качества поверхности почти без изменения размеров детали, является процесс механического полирования. Полирование представляет собой комплекс физико-химических процессов. Механический процесс удаления неровностей с поверхности металла осуществляется путем перемещения мельчайших выступов (гребешков) от предшествующей обработки в углубленные места. Этому способствует тепло, которое возникает при взаимодействии быстровращающегося (окружная скорость 20 – 45 м/с) полировального круга с полируемым изделием и вследствие применения соответствующих паст.

Химический процесс происходит в результате воздействия полирующих паст, окружающей среды и ряда других факторов, под влиянием которых ускоряется растворение окислов на поверхности металлов и удаление металла.

Инструментом при полировании являются всевозможные мягкие из текстиля, войлока и т.п. круги, которые во время процесса смазываются специальными пастами. Очень часто в производстве полированием называют процесс обработки деталей тонким абразивом, нанесенным на полотно. Этот процесс по принципу действия отличается от полирования пастами, но позволяет получить малую шероховатость поверхности и блестящий вид поверхности, что дает основание отождествлять эти два вида обработки. Полирование как окончательная чистовая обработка применяется во всех тех случаях, что и сверхдovодка, а также для подготовки поверхностей деталей машин к гальванопокрытиям и после гальванопокрытий.

При шлифовании, доводке абразивными брусками, притирке и полировании трудно получить поверхности без прижогов, пониженной твердости тонкого поверхностного слоя, микротрещин и других дефектов. Поэтому в последние годы получают применение новые процессы обработки металлов, а также видоизмененные действующие процессы, такие как гидрополирование, электрополирование, химическое полирование, ультразвуковые, электроэрозионные, резание металлов с предварительным подогревом, обработка технической плазмой, электронным лучом, лазером и др. Кроме того, для повышения качества поверхности и возможности обработки твердых и вязких материалов существующие технологические процессы изменяются путем совмещения с другими процессами. Так, для повышения эффективности шлифования абразивному

кругу сообщают осциллирующее движение. При снижении амплитуды и повышении частоты осциллирования совершается переход к ультразвуковой обработке. Внедряется электролитическое шлифование, хонингование, зенкование и фрезерование. Внедрение перечисленных и других совмещенных методов обработки повышает производительность и качество поверхности.

Подтверждено влияние ультразвуковых колебаний на шероховатость поверхности. Для достижения одинаковой шероховатости поверхности при наложении ультразвуковых колебаний время обработки сокращается на 30 – 35 %.

При электролитическом шлифовании съём металла происходит в результате механического и частично вследствие электролитического процесса. При этом абразивный круг является катодом, а электрический ток проходит через электролит. На съём металла существенное влияние оказывает плотность электрического тока. Поэтому при электрохимическом шлифовании применяют круги на металлической связке, а абразивные зерна должны обеспечить зазор между обрабатываемой поверхностью и шлифовальным кругом. Производительность такого процесса очень высока. На шлифовальном станке с мощностью главного привода 7,5 кВт и подводом электрического тока 3 000 А производительность при обработке твёрдого сплава составляет 1 000 мм²/мин.

1.4.3. Влияние способов формообразования деталей на их эксплуатационные свойства

Существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин оказывают методы чистовой и отделочной обработки. В процессе чистовой обработки при любых способах формообразования рабочих поверхностей имеет место механическое удаление металла с обрабатываемой поверхности заготовки с одновременно протекающими физико-механическими и химическими процессами.

В настоящее время используются следующие основные методы чистовой и отделочной обработки: чистовое точение и растачивание, фрезерование и сверление, развёртывание, протягивание, шлифование, хонингование, механическое полирование, притирка, сверхдоводка, анодно-механическая доводка, ультразвуковая обработка, светолучевая обработка, гидрополирование (обработка жидкой абразивной струей).

Каждый из указанных методов обработки обеспечивает определённые показатели экономической точности и качества поверхности.

В соответствии с технологическими особенностями методы обработки со снятием стружки можно разбить на три группы:

1) методы, при которых взаимное расположение элементарных поверхностей определяется предшествующей обработкой и в процессе обработки размеры почти не изменяются (притирка, механическое полирование, гидрополирование и др.), а изменяется только качество поверхности;

2) методы, применяемые для повышения не только качества поверхности, но одновременно и точности (свободное развёртывание, протягивание, хонингование, химическая обработка, ультразвуковая обработка и др.);

3) методы, которые позволяют улучшить качество поверхности, точность размеров и точность взаимного расположения элементарных поверхностей (точение, строгание, фрезерование, шлифование и др.).

Для некоторых методов второй группы, таких как развертывание и т.д., характерным является самонаправление инструмента, причем базой служат обрабатываемая поверхность и направляющие ленточки зубьев разверток, бруски при хонинговании и пр.

В табл. 41 приведены данные о технологических и эксплуатационных возможностях некоторых способов обработки.

В зависимости от выбранного процесса чистовой и отделочной обработки формируется поверхность с различными служебными свойствами.

Одна из задач технологии машиностроения заключается в изыскании технологических процессов, которые обеспечивают изготовление деталей машин с наилучшими эксплуатационными свойствами.

В соответствии с техническими условиями на изготовление машин и уровнем техники производства каждая отрасль машиностроения в специальных руководящих материалах уточняет области применения различных технологических процессов для достижения определенной шероховатости поверхности в соответствии с ГОСТ 2789–89.

Влияние способов формообразования на износостойкость деталей. Длительность периода приработки детали зависит от первоначальной шероховатости поверхности, материала, давлений и других факторов. Однако это не означает, что при наименьшей шероховатости поверхности потребуются меньший период для приработки. В некоторых случаях при малой шероховатости поверхности, так же как и при высокой, износ даже увеличивается.

Для увеличения срока службы деталей машин следует сократить до возможно меньших пределов износ в период приработки, максимально увеличить период установившегося износа и предупредить наступление усиленного износа и разрушение рабочей поверхности. В ряде случаев поверхность с большей шероховатостью лучше удерживает смазку и уменьшает износ.

Некоторые исследователи придерживаются мнения, что наиболее гладкая поверхность после механической обработки является лучшей в отношении сокращения периода приработки и повышения качества поверхности после приработки.

Анализ проведенных исследований показывает, что отсутствие стабильности шероховатости поверхности для одних и тех же деталей соединения позволяет понимать оптимальную шероховатость поверхности как определенную область шероховатостей, при которой детали машин получают наименьший износ при заданных условиях работы.

На износостойкость оказывают влияние не только величина неровностей, но и их направление, способы формирования поверхностных слоев и их физико-механические свойства.

Наиболее износостойкой является поверхность с одинаковой микрогеометрией во всех направлениях. Такая поверхность в виде мелконаколотой сетки получается, например, после гидрополирования.

Технологические и эксплуатационные возможности
методов обработки резанием

Метод обработки	Вид поверхности, высота неровностей, мм	Эксплуатационные свойства наружного слоя	Экономически достижимая точность	Производительность, мм ² /с
1	2	3	4	5
Развертывание (машинное)	Матовая или блестящая, винтовые риски, высота гребешков 0,01 – 0,04	Быстро истирается, повреждена задирами	0,12 – 0,05 мм на средних диаметрах	95 – 300
Протягивание	Матовая или блестящая, продольные риски, высота гребешков 0,004 – 0,02	Быстро истирается, особенно при вращательном движении	0,12 – 0,02 мм на средних диаметрах	300 – 1 200
Шлифование	Блестящая со спиральными или продольными рисками, высота гребешков 0,006 – 0,02	Пористая, засоренная абразивной пылью, с разрушенной структурой	0,005 – 0,025 мм на средних диаметрах	60 – 330 наружное; 45 – 150 внутреннее
Хонингование	Блестящая или зеркальная со спиральными перекрещивающимися рисками, высота гребешков 0,008 – 0,001	Истирается, быстро теряет зеркальный блеск	6 – 7 квалитет точности	300 – 500
Тонкое точение	Блестящая или зеркальная с винтовыми рисками, высотой 0,004 – 0,001	Истирается, быстро теряет зеркальный блеск	7 – 8 квалитет точности	100 – 300
Доводка – притирка	Блестящая зеркальная с микроскопическими рисками высотой 0,002 – 0,003	Мало истирается	0,002 – 0,0005 мм	70 – 140
Сверхдоводка (суперфиниш)	То же, иногда темная	Мало истирается	0,002 – 0,0005 мм	50 – 500
Гидрополирование	Матовая, без направленных следов обработки, высота неровностей 0,002 – 0,009	Мало истирается	Сохраняется от предшествующей обработки	300 – 500

Продолжение табл. 41

1	2	3	4	5
Электромеханическое сглаживание	Изменяются структура и механические свойства обработанной поверхности, повышается твердость в 2 – 3 раза на глубине слоя 0,1 – 0,15 мм. Шероховатость поверхности достигает $R_a = 5$ мкм	–	Точность сохраняется от предшествующей обработки	100 – 600
Электроискровой	При грубых режимах микротрещин глубиной 0,2 – 0,5	–	–	100 – 600 мм ³ /мин
Электроискровой	При чистовых режимах микротрещин нет, шероховатость поверхности $R_a = 1,25 – 2,5$ мкм	–	–	0,1 – 0,001 мм ³ /мин
Электроимпульсный	При обработке твердого сплава величина шероховатости и измененного слоя металла колеблется от 0,057 до 0,220 при действии среднего тока от 5 до 50 А	–	–	150 мм ³ /мин
Электролитическое полирование	Шероховатость поверхности $R_a = 0,16 – 0,25$ мкм	Повышается коррозионная стойкость, длительная прочность и сопротивление усталости	В основном сохраняется от предшествующей обработки	–
Химическое и электрохимическое фрезерование	Поверхность не имеет рисков и шероховатостей	Повышается предел выносливости	–	0,5 – 1,0 мм ³ /мин
Ультразвуковая обработка	Шероховатость поверхности $R_a = 0,16 – 0,25$ мкм	–	12 – 14 квалитет точности	900 мм ³ /мин (по стеклу) 200 мм ³ /мин (по твердому сплаву)

Учитывая влияние многих факторов на износостойкость деталей и на сокращение производственных затрат, рекомендуется придавать деталям при изготовлении несколько большую шероховатость и твердость поверхности по сравнению с оптимальными значениями.

В этом случае незначительное удлинение периода приработки и возрастание начального износа по сравнению с оптимальной шероховатостью должно компенсироваться увеличением периода установившегося износа и сокращением производственных затрат.

На износостойкость оказывает влияние не только шероховатость поверхности, полученная при окончательной обработке, но и характер предварительной обработки, определяющий физическое состояние поверхностного слоя.

С увеличением шероховатости поверхности при предварительной обработке (например, до закалки) и одинаковой шероховатости поверхности после окончательной обработки износостойкость будет снижаться.

Для повышения износостойкости и других эксплуатационных свойств окончательная обработка должна по возможности уменьшать структурную неоднородность поверхностного слоя и создавать равномерные напряжения по всей поверхности.

В качестве примера такой обработки рассмотрим влияние на эксплуатационные свойства чистой обработки деталей способом гидрополирования.

Сущность гидрополирования заключается в том, что струя рабочей жидкости с находящимися в ней абразивами определенной зернистости с большой скоростью направляется на обрабатываемую поверхность. Качество поверхности, обрабатываемой гидрополированием, зависит от скорости и величины абразивных частиц, угла встречи их с обрабатываемой поверхностью и расстояния форсунки от нее. Ударное действие абразивных частиц вызывает хрупкое разрушение обрабатываемой поверхности, изменяет ее микрогеометрию и создает равномерный наклеп поверхностного слоя металла.

Съем тонких поверхностных слоев металла в процессе гидрополирования облегчается действием химически активных веществ, находящихся в рабочей жидкости. Механическое разрушение поверхности происходит в результате действия нормальных сил, возникающих в процессе удара абразивных зерен об обрабатываемую поверхность, и тангенциальных, возникающих в процессе качения абразивных частиц по поверхности.

Микрогеометрия поверхности, обработанной гидрополированием, имеет вид поверхности без направленных следов обработки, с мелкими равномерно распределенными по поверхности углублениями, без микротрещин.

Матовый вид поверхности, обработанной гидрополированием, объясняется отсутствием текстуры деформации поверхностных слоев металла в одном направлении, что является результатом сосредоточенного (нормального) действия абразивных частиц. Следовательно, качество получаемых тонких поверхностных слоев должно быть более высоким по сравнению с поверхностью, обработанной механическим полированием, притиркой и доводкой брусками.

Подводя итоги, в табл. 42 приведены технологические возможности методов механической упрочняющей обработки в формировании поверхности.

Классификация и технологические возможности методов упрочняющей поверхностной обработки деталей машин

Процессы и параметры поверхностного слоя, обуславливающие упрочнение	Методы упрочнения	Технологические возможности						
		Материал заготовки	Точность обработки	Шероховатость поверхности по ГОСТ 2789–89 R_a , мкм	Точность обработанной поверхности	Величина и знак изменения остаточных напряжений в поверхностном слое, Н/см ²	Толщина упрочненного или нанесенного слоя, мм	
							минимальная	максимальная
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Упрочнение пластическим деформированием поверхностного слоя (наклепом), повышение физико-механических свойств поверхностного слоя, изменение величины и знака остаточных напряжений в поверхностном слое, улучшение микрогеометрии обработанной поверхности	Обработка дробью	Чугун, сталь, сплавы из цветных металлов и на основе титана	Сохраняется от предыдущей обработки	40 – 1,25	Увеличивается на 20 – 40 %	Напряжения сжатия 400 – 800	0,4	1,0
	Дробеабразивная обработка			5–0,63	То же		0,2	0,6
	Центробежная обработка			Увеличивается вдвое	Увеличивается на 15 – 60%		0,3	0,7
	Накатывание роликами			1,25 – 0,08	Увеличивается на 20 – 50%	Напряжения сжатия 600 – 800	1,0	20,0
	Вибрационное накатывание			1,25 – 0,08			1,0	35,0
	Накатывание шариками			1,32 – 0,08			0,3	5,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1. Упрочнение пластическим деформированием поверхностного слоя (наклепом), повышение физико-механических свойств поверхностного слоя, изменение величины и знака остаточных напряжений в поверхностном слое, улучшение микрогеометрии обработанной поверхности	Поверхностное раскатывание	Чугун, сталь, сплавы из цветных металлов и на основе титана	IT6–IT8	1,25 – 0,08	Увеличивается на 20 – 50%	Напряжения сжатия 600 – 800	0,3	5,0	
	Упрочнение чеканкой		IT14–IT16	40 – 10			0,5	35,0	
	Упрочнение резанием		IT11–IT12	20 – 5	Увеличивается на 20 – 30 %	Напряжения сжатия 300 – 700	0,05	0,5	
	Виброударная обработка		Сохраняется от предыдущей обработки		10 – 1,25	Увеличивается на 20 – 40 %	Напряжения сжатия 300–600	0,1	0,7
	Гидровиброударная обработка				5 – 0,63	Увеличивается на 20 – 40 %	Напряжения сжатия 300–600	0,1	0,7
	Галтовка				0,63 – 0,16	Увеличивается на 10 – 15 %	Напряжения сжатия 100 – 200	0,05	0,1
	Гидрогалтовка				0,63 – 0,16	Увеличивается на 20 – 40 %	Напряжения сжатия 200 – 400	0,1	0,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2. Упрочнение пластическим деформированием поверхностного слоя (наклепом), повышение физико-механических свойств поверхностного слоя, изменение величины напряжений в поверхностном слое, улучшение микрогеометрии обработанной поверхности	Вибрационная галтовка	Чугун, сталь, сплавы из цветных металлов и на основе титана	Сохраняется от предыдущей обработки	0,16 – 0,04	Увеличивается на 10 – 15 %	Напряжения сжатия 100 – 150	0,05	0,2
	Ультразвуковая упрочняющая обработка			Увеличивается вдвое	Увеличивается на 50 – 90 %	Напряжения сжатия 800–1000	0,1	0,9
	Гидрополирование			0,63 – 0,08	Увеличивается на 20 – 30 %	Напряжения сжатия 300 – 700	0,01	0,20
	Алмазное сглаживание			0,63 – 0,08	Увеличивается на 30– 60 %	Напряжения сжатия 300 – 700	0,01	0,20

1.4.4. Способы повышения долговечности

Долговечность (Д) можно повысить разными способами:

- снижением числа поломок путем повышения прочности отдельных деталей или сборочных единиц;
- снижением интенсивности износа трущихся поверхностей деталей между собой в изделии.

Первый путь подробно исследован и опробован во многих конструкторских решениях, и он имеет право на выбор, но связан с равнопрочностью всех входящих в сборочную единицу или изделие деталей и комплектующих и, как правило, с повышением массы изделий или стоимости отдельных деталей, а часто и массы и стоимости.

Износ имеет место всегда в процессе эксплуатации той или иной детали и влияет на параметры ее геометрии, качества и др.

Виды износа могут быть такими:

- механический (абразивный; износ при трении скольжения или качения; контактный);
- химический (коррозионный);
- тепловой;
- кавитационно–эрозионный.

Наибольшее влияние на долговечность имеет механический износ, поэтому пути его уменьшения весьма интересны и эффективны. Абразивный износ, например, можно уменьшить путем повышения твердости трущихся поверхностей. Так, повышение твердости на 500 HV (20 HRC) повышает стойкость в 10 раз. Износ можно также снизить путем подбора материала пары трения, ее смазки, уменьшения контактных напряжений, изменения параметров качества поверхности или приемом «клин выбивают клином»: шаржированием (вибрационным или ультразвуковым) поверхностей пары трения алмазными зернами и перевода пары трения «металл–металл» в другую – «алмаз–алмаз» или «алмаз–металл» с иным коэффициентом трения.

Механический износ снижается при нанесении покрытий методами борирования, сульфидирования, цементации, хромирования, азотирования, плазменным или лазерным легированием поверхностей пары редкоземельными металлами, твердыми сплавами или просто разнородными материалами.

Нанесение вакуумно-дуговых композиционных покрытий на отечественных установках типа «Булат» давно уже стало эффективным способом повышения долговечности изделий, особенно металлорежущих инструментов и применяется в промышленности. Развитием этого метода является приложение ВЧ–напряжения к плазменной нагрузке, в результате чего плазма имеет высокую химическую активность, и это дает возможность нанести покрытие на различные изделия с невысокой температурой отпуска, а именно: на керамику, эмаль, стекло, пластмассы.

Модернизация установок «Булат» для использования ВЧ–напряжения не вызывает больших проблем у пользователей этих установок. Важным преимуществом метода является и то, что меняя режимы ВЧ–напряжения, можно пе-

ред нанесением покрытия эффективно очистить поверхность и произвести ее активацию для повышения адгезионной прочности покрытия.

Реальными режимами работы установок «Булат» для нанесения покрытий является: плотность плазмы – $10^{10} \dots 10^{11}$ см; температура 10 эВ; частота ВЧ-напряжения 100 ... 400 В.

Покрытия типа TiN ; AlN ; Al_2O_3 или $TiN + Ti - Al - N + Al_2O_3$ толщиной 2 ... 4 мкм, нанесенные на подложки из стали Р6М5 (HRC₃, 58 – 64), имеют различные свойства (табл. 43).

Таблица 43

Трение и износ поверхностей с различными покрытиями

Основная фаза	Толщина, мкм	R_a , мкм	Износ контртела X12M, мм ³ ·10 ³	Износ покрытия, мг	F_{cp}	$P_{кр}$, Н
TiN – вак.-дуг. осаждение	4,0	0,5	3,4	1,5	1,3	4 000
$TiN + TiAlN + Al_2O_3$ многослойное + ВЧ-напряжение	0,6 + 0,6 + 0,8 (1 слой)	0,3	3,1	0,2	0,07	9 000
$TiN + TiAlN + Al_2O_3$ многослойное + ВЧ-напряжение	0,6 + 0,6 + 0,8 (2 слоя)	0,3	2,8	0,3	0,07	9 000

Сопоставляя результаты исследований, приведенные в табл. 43, следует отметить, что многокомпозиционные покрытия обладают высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения F_{cp} и повышают долговечность ($P_{кр}$ больше чем в 2 раза по сравнению с традиционными покрытиями).

Широкое распространение получили также методы вакуумной ионно-плазменной обработки, среди которых особое место занимает метод КИБ (конденсация в вакууме с ионной бомбардировкой), позволяющий наносить на рабочие поверхности инструмента или деталей износостойкие покрытия из нитридов, карбидов и карбонитридов Ti , Mo , Zr , Gf , W и других металлов. Высокие механические свойства напыляемых соединений позволяют повысить износостойкость инструмента в среднем от 1,5 до 3 раз.

Метод КИБ следует рассматривать высокопроизводительным и экологически чистым методом, позволяющим решать широкий спектр задач в области повышения износостойкости инструмента. Однако имеется ряд факторов, сдерживающих расширение области эффективного использования данной технологии. К ним можно отнести проблемы, связанные с получением надежной адгезии напыляемого покрытия и материала основы; затруднения, вызываемые температурными параметрами процесса, что приводит к ограничению номенклатуры напыляемых инструментальных материалов, а также изменение линейных размеров инструмента после нанесения износостойкого покрытия. Данный метод отличается от традиционных независимостью процесса от констант

диффузии и взаимной растворимости, отсутствием проблем адгезии и низкой температурой процесса (порядка 100 °С).

Процессы, инициируемые ионным потоком в поверхностном слое, сопровождаются изменением химического состава поверхности, структурными изменениями, радиационными дефектами, что приводит к значительному изменению микротвердости, коррозионной стойкости, адгезионной активности, фрикционных характеристик, электротеплопроводности. Варьирование технологическими параметрами (ускоряющим напряжением, параметрами разряда источника ионов), позволяет направленно воздействовать на поверхность изделия, создавая требуемые характеристики поверхностного слоя – от получения тонких пленок на поверхности обрабатываемых изделий до внедрения ионов в приповерхностный слой.

Метод обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами ионно–плазменной модификации поверхности. Основное преимущество – создание неравновесных процессов. При такой обработке становится возможным формирование поверхностных сплавов, образование которых зависит от пределов растворимости и диффузионных констант. Следует отметить такие технологические возможности метода, как: увеличение растворимости в твердом состоянии; возможность быстрого изменения сплава; независимость от процессов, протекающих в объеме материала; протекание процесса при низких температурах; высокая производительность и контролируемость процесса; вакуумная чистота. Отсутствие проблемы адгезии и низкая температура процесса позволяет использовать его для улучшения физико–механических свойств всего спектра конструкционных материалов.

Анализ процессов и явлений, протекающих в подшипниковых узлах, позволил сделать предположение о целесообразности применения данного метода в целях подавления негативных трибологических явлений в зонах высоких знакопеременных нагрузок и повышенного износа.

Проведенные исследования в области улучшения эксплуатационных характеристик роликовых подшипников качения серии 7611 и 7510 методом обработки поверхности потоками ионов широкого спектра энергий показали высокую эффективность данного метода. Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик конструктивных элементов подшипника после имплантации проводился при постоянной нагрузке, равной 15 000 Н, частоте вращения $n = 1\,950 \text{ мин}^{-1}$ без смазки (в условиях сухого трения качения) при условии проведения контрольных замеров каждые 20 мин.

В табл. 44 представлены химические соединения, показавшие увеличение долговечности более чем в 2 раза.

Применение на деталях пар трения топливных агрегатов вакуумно-плазменных покрытий на основе тугоплавких соединений (TiN , Mo_2 , ZrN) невозможно, главным образом, из-за высокой изнашивающей способности покрытий. На основе изучения закономерностей изменения триботехнических характеристик параметров были сформулированы основные требования к вакуумно-плазменным покрытиям для узлов топливных агрегатов, которые следует считать принципиальными. Они заключаются в следующем:

- покрытие должно иметь толщину не более 3,0 мкм;
- покрытие целесообразно создавать композиционным и многослойным с чередующимися слоями твердого и мягкого материала.

Таблица 44

Химические соединения мишени для стали ШХ15

Материал	Химический состав пучка при износе			
	Абразивный износ		Коррозионный износ	
	Газ	Материал мишени	Газ	Материал мишени
ШХ15	<i>N</i>	<i>Ti</i> <i>Mo</i> <i>V</i> <i>TiB</i>	<i>Ar + N</i>	<i>Mo</i> <i>Cr</i> <i>TiB</i>

Для нанесения покрытий на детали пар трения топливных агрегатов целесообразно использовать такие технологические элементы, которые позволили бы наносить покрытия без капельной фазы при нагреве изделий не выше температуры их окончательной термообработки. Разработанный способ ввода ВЧ мощности в плазму вакуумно-дугового разряда позволяет получать высококачественные износостойкие защитные покрытия на поверхности различных материалов.

Использование ВЧ-энергии имеет целый ряд особенностей:

- присутствие в плазме ВЧ разряда существенно облегчает условия работы источника плазмы, стабилизирует его работу;
- введение в плазму определенного уровня ВЧ мощности уменьшает количество капель;
- ионизация легирующего газа с использованием ВЧ энергии увеличивает его поглощение металлом на порядок (средняя мощность 200 кВт в импульсе);
- использование переменного напряжения вместо постоянного (с амплитудной величиной, равной постоянному напряжению) дает возможность получать покрытия на диэлектрических полках.

На основании вышеизложенного, а также изучения поверхностного (адгезионного) взаимодействия рабочих поверхностей контактирующих материалов, были разработаны «конструкции» композиционных и многослойных покрытий. Согласно конфигурационной модели вещества (КМВ) показано, что для повышения таких свойств TiN , ZrN , как адгезионная инертность, эти соединения целесообразно легировать небольшим количеством металла, имеющего большой статистический вес атомов со стабильной конфигурацией (СВАСК) sp^3 - и d -конфигураций. Увеличение СВАСК d^5 -конфигураций соединения TiN , ZrN за счет легирования должно быть, с одной стороны, слабым, чтобы существенно не снизить роль sp^3 -конфигураций, а, с другой стороны, – достаточным и с увеличением температуры новые d -конфигурации могли бы компенсировать уменьшение СВАСК и стабильность конфигураций. Проведенные испытания композиционных покрытий показали, что существует некоторая оптимальная концентрация легирующего элемента, которая обеспечивает высокую износостойкость и низкую адгезионную инертность. Покрытия наносились на образцы

из стали 95X18 (HRC 59–62). Испытания на трение и износ проводили в среде авиационного топлива ТС–1 по схеме плоскость–цилиндр. Трение осуществляли при ступенчато–возрастающей нагрузке, при этом автоматически велась запись момента трения.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что для снижения адгезионной активности покрытий TiN , ZrN необходимо обеспечить увеличение СВАСК d^5 –конфигураций за счет легирования покрытий Ti , Zr d^5 –переходными металлами V–VI группы, обладающих более высокими, по сравнению с Ti , Zr главными квантовыми числами.

Методы поверхностно–пластичного деформирования сырых или закаленных деталей (обкатывание, выглаживание и др.) снижают как механический, так и химический износ.

Нанесение специальных маслоудерживающих рельефов или карманов, а также гидropескоструйная или гидроабразивная обработка увеличивают объем смазки в паре трения, исключают «сухое» трение и способствуют уменьшению износа.

Износ снижается при увеличении опорной поверхности пары трения и снижении контактных нагрузок.

В десятки раз можно уменьшить износ путем исключения «металлического» контакта в паре деталей, например, плавающие магнитные головки, гидростатические опоры (пленка масла равна 100 мкм) или гидродинамические опоры (пленка масла равна 10 ... 12 мкм).

Пределы повышения долговечности: транспортные машины – 10 ... 20 000 часов (5 – 8 лет); машины орудия – 50 ... 100 000 часов (15 – 25 лет). Долговечность тесно связана со сроком морального старения, и это особенно актуально сегодня, когда развитие современной техники идет просто фантастическими темпами. Можно создать такую машину, которая состарится морально, но будет долговечной, и в этом случае покупатель понесет большие убытки. Экономично оправданным принято считать такой предел, при котором затраты на ремонт машины $\mathcal{E}_{рем}$ примерно равны стоимости покупки новой C_m : $\mathcal{E}_{рем} \leq C_m$, т.е. выгодно купить новую машину, чем отремонтировать старую и при этом срок долговечности приближается к ресурсу работы машины.

Для ряда машин срок эксплуатации составляет 3 – 5 лет. Для многих машин повышение срока службы, а это и есть увеличение долговечности, равнозначно соответствующему увеличению их выпуска, при этом без затрат на материалы и другие производственные расходы. Так, большинство сельхозмашин в США используют в среднем 15 лет, в Италии – 15 ... 20 лет, Франции – 10 ... 15 лет и в Канаде – 15 лет при сроке морального износа – 5 лет.

В наших условиях срок службы аналогичных машин не превышает 5 ... 10 лет, особенно низкую долговечность имеют отечественные комбайны: менее 8 лет. Отсюда повышение долговечности сельхозмашин до срока морального износа, что вполне достижимо, позволит снизить потребность в выпуске новых машин на 30 – 50 % при сохранении численности парка и уменьшить затраты на запчасти и ремонт.

В сельском хозяйстве ежегодные затраты на ремонт и технический уход по дизельным тракторам составляют 35 %, по колесным тракторам – 27 % к их стоимости при покупке. Вес запчастей на трактор за 10 лет его работы по дизельному трактору в 1,1 – 1,9 раза больше его массы, по колесному трактору – на 80 %. Затраты на ремонт станков и других машин за срок службы в 8 – 12 раз превышают стоимость новых.

В строительстве, угольной, горнорудной и лесозаготовительной промышленности затраты на ремонт в среднем составляют в год до 25 % стоимости соответствующих машин.

Повышение надежности и физических сроков службы машин сокращает вынужденные простои на устранение неполадок и ремонт, уменьшает связанные с этим потери в выпуске продукции.

На стройках простои машин из-за ремонта составляют 46 – 54 % времени полезной работы.

Только из-за технических неисправностей простаивает 30 % тракторного парка. Из каждых 100 грузовых автомобилей работает лишь 60.

Автоматическая станочная линия без отказа может работать в среднем всего лишь 30 мин, максимум – 3 часа. Если даже на восстановление работоспособности линии уйдет только 10 мин (за это время нужно обнаружить отказавший элемент, добраться до него, произвести ремонт или его заменить), то и тогда будет потеряно 8 – 10 % продукции. Если повысить время безаварийной работы до 1 000 мин при том же времени ремонта, потери составят всего 1 %.

Коэффициент использования автомата, производящего сборку пяти деталей, при степени надежности качественного контроля их в 99 % не может быть больше 90,3 %. Это означает, что за каждые 10 циклов произойдет одна остановка автомата. При цикле сборки 20 шт./мин, автомат будет в среднем останавливаться 2 раза в минуту. Если продолжительность каждого из этих простоев будет 5 секунд, то в течение каждой минуты автомат будет работать только 50 секунд, что соответствует коэффициенту использования 83,3 %. Если при этом будут иметь место повреждения механизмов или инструментов или персоналу не удастся быстро найти и устранить причину неисправности, то коэффициент использования автомата будет еще более низким.

Повышение надежности машин, естественно, связано с некоторым повышением затрат на их изготовление. Поэтому важно сопоставить затраты на изготовление машины и эксплуатационные расходы за все время ее службы.

Для примера рассмотрим автомобиль. Общие затраты на его изготовление и последующие работы по техническому обслуживанию и ремонтам составляют (от суммы затрат):

На изготовление	13 %
На техническое обслуживание	25 %
На эксплуатационные ремонты	50 %
На капитальные ремонты	12 %

Как видно, затраты, связанные только с поддержанием автомобиля в работоспособном состоянии, и затраты, связанные с ремонтами на протяжении срока службы, превышают первоначальные затраты почти в 7 раз.

Износ трущихся поверхностей существенно зависит от высоты шероховатости R_z . Функция $U = f(R_z)$ имеет четко выраженную оптимальность: шероховатость должна быть не малой и не большой, а рациональной. Например, для автотракторостроения параметр R_a будет рациональным в пределах, показанных в табл. 46.

Таблица 46

Рациональная шероховатость поверхности деталей

Деталь	R_a , мкм	
	автомобиль	трактор
Коленвал	0,2	0,8
Поршень: юбка	1,6	1,6
отверстие под палец	0,8	1,6
канавка	0,8	3,2
Поршневой палец	0,16	0,4
Торцы поршневого пальца	0,8	1,6

Задача конструктора: назначить оптимальную величину $R_z(R_a)$, коэффициент трения f и характер следов с учетом долговечности D :

$$R_z = (0,1 - 0,15) \text{ ИТД (если } D > 50 \text{ мм)}$$

$$R_z = (0,15 - 0,2) \text{ ИТД (если } D = 18 - 50 \text{ мм)}$$

$$R_z = (0,2 - 0,15) \text{ ИТД (если } D < 18 \text{ мм)}$$

Чем выше точность, тем больший запас допуска может быть использован на износ. Однако такой подход связан с большими затратами.

Необходимо учитывать, что параметр шероховатости поверхности $R_z \cong 4R_a$.

В период начального износа в паре трения параметр шероховатости поверхности R_z может уменьшаться на 65 – 75 %.

С увеличением параметра R_z с 3,2 мкм до 75 мкм (детали из стали 3) предел выносливости снижается с 285 до 200 МПа, т.е. на 30 %. На рис. 13 показано уменьшение предела выносливости σ_{-1} в зависимости от параметра шероховатости поверхности R_z для стали 2Х13 при работе на изгиб.

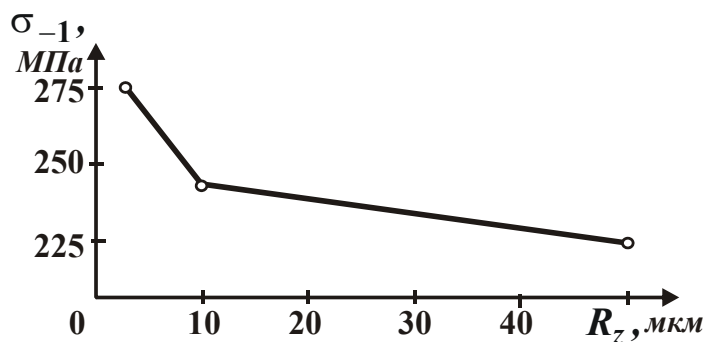


Рис. 13. Зависимость предела выносливости σ_{-1} от параметра шероховатости поверхности R_z

При обработке стали 2Х13 даже направление следов обработки (вдоль 1 или поперек 2) изменяет выносливость σ_{-1} (рис. 14).

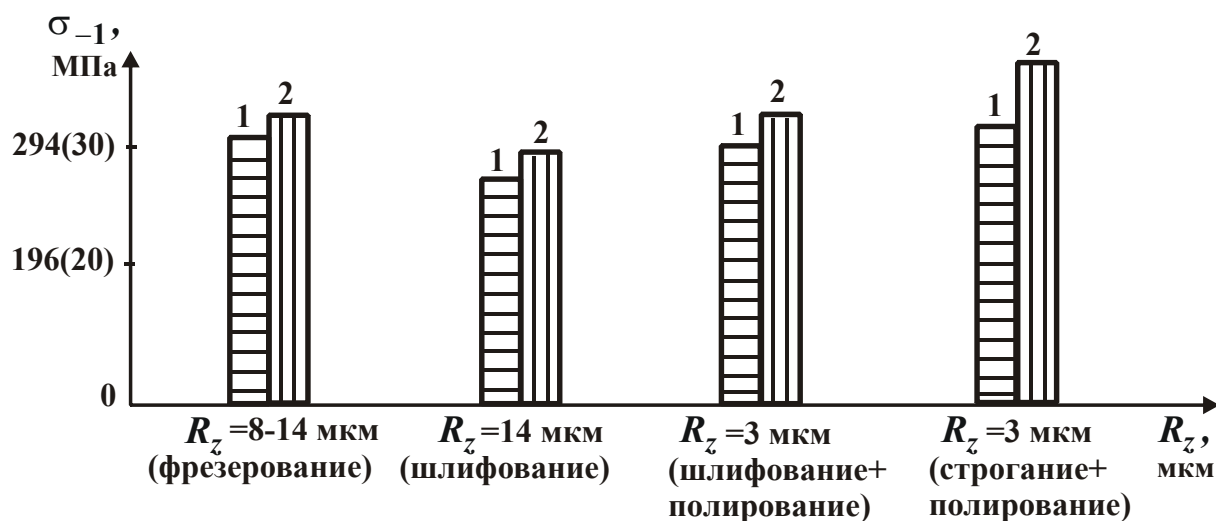


Рис. 14. Влияние следов обработки и высоты неровностей R_z на предел выносливости σ_{-1}

Продольное расположение рисок увеличивает на 10 – 15 % выносливость σ_{-1} при работе на изгиб. При уменьшении R_z выносливость σ_{-1} увеличивается при сглаженном рельефе неровностей (при полировании).

Теоретическими и экспериментальными исследованиями доказано, что предел выносливости деталей машин в значительной степени определяется шероховатостью их поверхностей и физико-механическим состоянием поверхностного слоя – наклепом, остаточными напряжениями и др. Выше был рассмотрен эффект повышения долговечности от нанесения покрытий на подножку, но можно нанести не покрытие, а «белый» слой на поверхность трения, т.е. создать из самого материала как бы покрытие на всей поверхности.

«Белый» слой – это структура с повышенной твердостью, не травящаяся в кислотах. Для стали 45 «белый» слой имеет твердость HRC 64 – 65; для стали У8А – HRC 66 – 67. Упрочненные слои имеют на 30 – 80; больше остаточного аустенита (его тем больше, чем больше углерода в стали). Режим обработки: $t = 0,1 \dots 0,4$ мм; $V_{дет} = 0,05 \dots 0,0083$ м/с; скорость термического режима на этапе нагрева – $0,5 \cdot 10^0$.

Поверхность трения имеет структуру мелкодисперсного мартенсита с увеличенным числом дислокаций, мелкое зерно – 10 балла, большие сжимающие напряжения (600 – 700 МПа), высокую твердость.

Детали из стали 45, У8А, У10А с «белым» слоем имеют соответственно в 1,7; 1,4; 1,3 раза большую износостойкость по сравнению с деталями, прошедшими обычную термообработку. Эти слои имеют в 1,3 раза большую контактную прочность, т.е. цикловая усталость возрастает. «Белые» слои имеют высокую однородность и мелкодисперсность структуры, когерентность связи между зернами и поэтому менее склонны к образованию гальванических пар. Эти слои имеют на 25 % меньше потери металла от коррозии, чем неупрочненные.

При нагреве до 100 °С твердость поверхности не изменяется, а при нагреве до 200 °С твердость снижается на 25 %.

Нанесение маслоудерживающего рельефа эффективно повышает долговечность. Хорошо удерживать смазку в паре трения могут специальные карманы, получаемые при механической обработке на фрезерных, токарных, шлифовальных, вибрационных и других станках.

В процессе эксплуатации в месте контакта при регулярном рельефе смазка не удерживается, и трение осуществляется «всухую». В поверхности с карманами масло находится под давлением P и при движении частей пары со скоростью $V_1 - V_2$ участвует в работе трения.

Наибольший эффект обеспечивают карманы закрытой формы с углом подъема лунки менее 1 ... 2°. Эта форма создает гидродинамический эффект в момент запуска и обеспечивает требуемую маслосъемность стыка в процессе работы.

Карманы можно получать виброобкатыванием шариковыми виброголовками или державками с алмазным наконечником. Виброголовка с различным приводом устанавливается в суппорт. Шарик прижимается к детали с $P = 200 \dots 400$ Н. В зависимости от шага и амплитуды осцилляции выбирают число двойных ходов головки и частоту вращения заготовки (табл. 47). Профиль канавки представлен на рис. 15.

Таблица 47

Размеры профиля канавки у различных деталей машин

Наименование детали	Диаметр детали, мм	Материал	P – шарика, мм	Профиль канавки	
				H_k , мкм	H_n , мкм
Крутильные кольца	58	Ст 45 HRC 30 – 32	1,9	10	6,0
Корпус суппорта токарного станка	30	СЧ 32	2,0	7,5	4,0
Направляющая втулка	40	X12 HRC 62 – 63	1,2	1,9	0,5
Калибр	35	У12А HRC 58 – 60	1,2	3,1	1,3

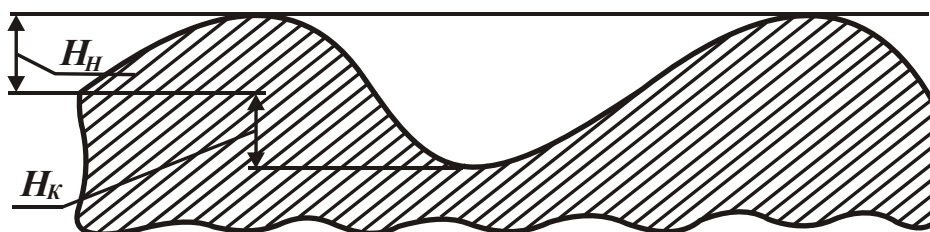


Рис. 15. Профиль масляного кармана, полученного виброобкатыванием

Во впадине микротвердость увеличивается на 15 – 18 %, а на вершине – на 30 %. Наплывы с повышенной твердостью следует удалить, чтобы они не вызывали задиров на поверхности пары трения и повышенный их износ. Для

этого отверстия хонингуют, а валы – шлифуют. Однако при шлифовании из-за погрешности установки детали в центрах, соизмеримой с глубиной профиля, карман можно сошлифовать, т.е. равномерный съём наплывов, не удалив сам карман, при шлифовании весьма проблематичен.

Иногда карманы создают до термообработки, но в таком виде эти карманы являются резервуарами для подпитки маслом пары трения, и они не обеспечивают гидродинамический эффект.

Карман с углом $1 - 2^\circ$ можно получить прерывистым кругом с 1 – 4 режущими выступами при перемещении изделия со скоростью 25 – 100 м/мин. Карманы можно получить лезвийным инструментом, например фрезой, на соответствующих станках.

Наличие карманов на направляющих прессов позволяет заменить бронзу на чугун (в паре бронза–чугун), а это приводит к экономии около 500 кг бронзы на один пресс.

Управлять долговечностью можно и путем изменения коэффициента трения качения или скольжения в трущейся паре. Многочисленными исследованиями установлено, что на преодоление трения и его последствий расходуется 30 % вырабатываемой в мире энергии и до 25 % производимого металла.

Многие машины большую часть своей мощности расходуют на преодоление сил трения, до 80 % машин выходит из строя вследствие износа. Так, потери мощности на трение доходят до 80 % у текстильных машин, до 50 % – на железнодорожном транспорте и 25 – 40 % – в автомобилях.

Явление снижения сил трения и износа за счет смазки известно давно, например, археологи обнаружили смазку на осях древних колес.

Сила трения зависит от вязкости смазки (используя масло). Даже если смазка не образует сплошного слоя, а покрывает трущиеся поверхности тонкой пленкой до 0,1 мкм, силы трения снижаются на порядок, а износ – в сотни раз. Например, коэффициент трения скольжения чугуна по чугуну без смазки составляет 0,6, относительный износ – 430, а при наличии смазки из минерального масла – 0,02 и 1 соответственно.

На тяжело нагруженных поверхностях (опоры штампов, колонки, направляющие, плоские направляющие) происходит большая выработка при скольжении или качении. Данные по коэффициенту трения–скольжения f_c приведены в табл. 48, а по коэффициенту трения–качения значения f_k таковы: дерево–сталь – $f_k = 0,04$; мягкая сталь–мягкая сталь – $f_k = 0,005$; закаленная сталь–закаленная сталь – $f_k = 0,001$.

Коэффициент трения чугуна по стали изменяется от суммарной шероховатости R_z обоих трущихся тел. При малом значении параметра шероховатости поверхности R_z имеет место схватывание, а при большом значении параметра R_z – механическое зацепление, деформирование и срез неровностей. Коэффициент трения минимален при беспорядочном расположении следов обработки.

Снижению износа и повышению долговечности способствуют оптимальная несущая способность рабочих поверхностных слоев деталей машин. Практически все эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей маши-

ны (контактная жесткость и прочность, износостойкость, герметичность, прочность посадок и др.) в значительной мере зависят от их несущей способности.

Таблица 48

Коэффициент трения f_c в различных парах трения

Материал	Коэффициент трения f_c			
	покоя		движения	
	сухое	смазка	сухое	смазка
1	2	3	4	5
Сталь–сталь	0,15	0,1 – 0,12	0,15	0,05 – 0,1
Сталь–мягкая сталь	–	–	0,2	0,1 – 0,2
Сталь–чугун	0,3	–	0,18	0,1
Сталь–бронза	0,12	0,08 – 0,12	0,1	0,07 – 0,15
Чугун–бронза	–	–	0,15 – 0,2	0,07 – 0,15
Мягкая сталь–дуб	0,6	0,12	0,4 – 0,6	од
Чугун–дуб	0,65	–	0,3 – 0,5	0,2
Бронза–дуб	0,6	–	0,3	–
Дерево–дерево	0,4 – 0,6	0,1	0,2 – 0,5	0,07 – 0,15
Кожа–чугун	0,3 – 0,5	0,15	0,6	0,15
Резина–чугун	–	–	0,8	0,5
Алмаз по стали	–	–	0,1	0,05 – 0,08

Под несущей способностью поверхностного слоя детали понимается ее способность сопротивляться действию сил, стремящихся его деформировать или разрушить.

Анализ показывает, что эта способность может быть оценена коэффициентом средней контактной жесткости, определяемым пластическими $Y_{пл.ср.}$, упругими $Y_{уп.ср.}$ или упруго–пластическими $Y_{об.ср.}$ деформациями поверхностного слоя, а именно:

$$I_{ср.} = \frac{P_{ср.}}{Y_{ср.}},$$

где $P_{ср.}$ – среднее давление в контакте;

$Y_{ср.}$ – средние контактные деформации соответственно $Y_{пл.ср.}$, $Y_{уп.ср.}$ или $Y_{об.ср.}$.

При определении несущей способности поверхностного слоя для оценки контактной жесткости при первом нагружении, трения и износа, и прочности посадок в зависимости необходимо вместо $Y_{ср.}$ представить $Y_{об.ср.}$, а для оценки герметичности и фретинга вместо $Y_{ср.}$ – соответственно представить $Y_{пл.ср.}$ и $Y_{уп.ср.}$.

Формирование несущей способности поверхностного слоя, как при изготовлении, так и эксплуатации определяется его температурно–напряженным состоянием. Если эти состояния равны или близки, то обеспечивается требуемая точность, безотказность и долговечность собранного изделия с наименьшей

технологической себестоимостью. Если эксплуатационное температурно-напряженное состояние выше, чем технологическое, то понижается точность, безотказность и долговечность изделия, если же наоборот, то неоправданно повышается технологическая себестоимость их изготовления.

Пары трения не во всех машинах могут быть в среде смазки, поэтому для повышения долговечности иногда используют нанесение твердых смазок на поверхности интенсивного трения.

К поверхностям интенсивного трения можно отнести различные направляющие, поверхности режущих, давящих, волочильных инструментов, штампов и др. Для инструментальных поверхностей применяют молибденовые смазки (табл. 49).

Таблица 49

Состав молибденовых твердых смазок

Компоненты	Количество, %	
	Состав №1 с СОТС	Состав №2 без СОТС
Раствор моноалюминиевого фосфата (52 %)	24,7	12,35
Трехокись хрома	1,3	0,65
Дисульфид молибдена	20,0	20,0
Алкиловый фенолополиглюколовый спирт	0,4	0,4
Вода	53,6	66,6

Плотность смазок №1 – 1,32 и №2 – 1,22. Состав смазки №1 применяют, если есть СОТС, а смазки №2 – без СОТС. Толщина покрытия 0,005 мм (сушат на воздухе 10 мин, или 2 – 3 мин при температуре $\theta = 60^\circ\text{C}$, для отверждения покрытия после нанесения его следует выдержать 1 час при температуре $\theta = 200 \dots 300^\circ\text{C}$).

Стойкость при износе увеличивается для фрез в 2,65 раза, для метчиков в 2,7 раза, для сверл в 1,6 раз, для холодновысадочного инструмента в 3,6 раз, для штампов в 2 раза.

Долговечность может увеличиваться (износ уменьшается) и путем реализации принципа самоустановки сопряженных поверхностей. Например, подшипники скольжения изготавливают из отдельных вкладышей (они поворачиваются и самоустанавливаются в зависимости от положения вала). Уменьшение давления – второй путь повышения долговечности. Для этой цели повышать площадь опоры не имеет смысла, т.к. увеличивается масса. Следует произвести перераспределение нагрузок, например, у направляющих станков масса стола и частично усилие резания воспринимаются специальной тележкой на пружинах, а направляющие изменяют свою функцию: из несущих они становятся ориентирующими.

Долговечность можно изменить, если выделить изнашивающиеся поверхности в отдельные детали (накладки, пластины, губки, вкладыши), которые быстро и легко заменить, а впоследствии восстановить для повторного применения.

Замена металла в паре трения на пластмассу (в одной детали) приводит к повышению долговечности и сокращению расхода металла вдвое и значительному уменьшению трудоемкости ремонта при восстановлении (например, нанесение пленок полимеров на направляющие станков).

Упрочнение рабочих поверхностей деталей покрытием пластмассами и специальными материалами. Пластмассовые (полимерные) покрытия применяют для защиты от коррозии химической аппаратуры и других изделий, выравнивания неровностей их поверхности и повышения износостойкости узлов трения. По химической стойкости к действию самых агрессивных сред, таких как концентрированные кислоты и окислители, многие пластмассы превосходят даже золото и платину.

Пленки полимеров чаще всего наносят на поверхность деталей машин вихревым или газоплазменным напылением или облицовкой листовыми материалами. Для покрытия деталей газоплазменными вихревыми методами пригодны только термопластичные материалы в виде мелкодисперсного порошка, который при нагреве переходит в вязкотекучее состояние без существенного разложения, а необходимые физико-механические и химические свойства приобретает после охлаждения.

Ниже приведены материалы, применяемые для покрытия деталей, и температуры заготовок перед напылением:

Полиэтилен:

высокого давления 180 – 200 °С

низкого давления 200 – 220 °С

Полипропилен 220 – 240 °С

Фторопласт–3 260 – 270 °С

Процесс нанесения напылением пластмасс аналогичен процессу металлизации напылением и отличается от него только нагревом заготовок до указанной выше температуры.

Защитные покрытия обычно выполняют многослойными. Толщина покрытия зависит от назначения детали и напыляемого материала. При использовании полиэтилена хорошую защиту от коррозии обеспечивает покрытие толщиной 0,25 – 0,35 мм, при использовании фторопласта–3 следует использовать покрытие толщиной 0,18 – 0,25 мм.

Для нанесения стеклопластиков разработана установка, позволяющая наносить покрытия на ванны, корпуса, бочки с целью их защиты от коррозии и повышения долговечности при работе в агрессивных средах.

Методом вихревого напыления можно наносить и многослойные покрытия. Для этого рядом с нагревательным шкафом располагают две установки для напыления, содержащие соответствующие порошки, и напыляют слой сначала одного, а затем другого порошка. Оплавление и охлаждение производят обычным способом. Вихревым и эжекционным напылением можно покрывать различные металлы и их сплавы (сталь, чугун, алюминий), керамические и другие детали, выдерживающие нагрев до температур 300 – 500 °С (табл. 50).

Нанесение пластмассовых покрытий позволяет применять углеродистую сталь вместо дефицитных легированных и цветных металлов.

Применение пластмасс для покрытия деталей вихревым
и эжекционным способом

Пластмасса	Температура в °С		Область применения
	плавление	растекание	
Полиэтилен низкого давления	120	160 – 170	Антикоррозионное покрытие, пригодное для контакта с пищевыми продуктами и химически активными средами
Полиамид	220	250	Антикоррозионное покрытие для деталей, работающих на трение
Поликапролактан	215	250	Антикоррозионное, декоративное покрытие, хорошо работает при трении
Поливинил-бутираль (бутвар)	160 – 167	260 – 270	
Ацетобутират целлюлозы	120 – 125	–	
Полиуретан	180	190	Антифрикционное покрытие
Полипропилен	140 – 150	160 – 170	Антикоррозионное покрытие

Кроме описанных способов нанесения пластмассовых покрытий применяются и другие. Например, на одном из заводов чугунные ролики диаметром 250 мм и шириной 100 мм покрывают слоем полиамида толщиной 5 мм центробежным способом.

За последнее время разработаны новые покрытия и материалы, многие из которых, например полиамиды, применяют в узлах трения; по эксплуатационным свойствам они могут заменять цветные металлы. Для повышения износостойкости и твердости покрытий к полиамидным порошкам добавляют 5 % Mo_2S ; 5 ... 10 % графита; 10 ... 20 % $BaSO_4$.

Коэффициент трения полиамидов f_c при трении без смазки равен 0,1 – 0,124; со смазкой водой равен 0,077 – 0,134; с маслом равен 0,075 – 0,1.

Защитные покрытия деталей машин используются для повышения износостойкости в различных условиях изнашивания. Основными методами уменьшения износа схватыванием при малых скоростях скольжения трущихся поверхностей, больших давлениях (превышающих предел текучести на участках фактического контакта) в условиях граничного трения и высоких температур являются: подбор металлов пар трения, не склонных к взаимному схватыванию и способных к образованию устойчивых прочных защитных пленок вторичных структур; создание защитных пленок путем травления растворами кислот и щелочей, фосфатизации, сульфидирования, а также создания вторичных структур вследствие диффузии кислорода или углерода в поверхностные объемы металла в процессе их пластической деформации; повышение твердости (уменьшение пластичности) трущихся поверхностей механическим наклепом, поверхностной закалкой, химико-термической обработкой, нанесением гальванических покрытий.

В случаях, когда процесс схватывания возникает и развивается при больших скоростях скольжения трущихся поверхностей и повышенных давлениях,

что обуславливает интенсивный рост температуры в поверхностных слоях пары трения, для повышения износостойкости рекомендуется: увеличивать теплоустойчивость металлов пар трения путем легирования их редкими металлами в сочетании со специальной термической обработкой; снижать работу трения (уменьшать коэффициент трения) путем применения специальных смазок и различных присадок к ним графита, металлозоли, химически и физически активных веществ, уменьшать температуры трущихся поверхностных слоев и т.п.

1.4.6. Стабилизация деталей и структур их материалов

В этом подразделе рассмотрены такие вопросы, которые, на первый взгляд, не имеют видимого влияния на экономию ресурсов при эксплуатации машин. Однако это только на первый взгляд. Более пристальное и аргументированное рассмотрение вопросов стабилизации деталей и структур материалов, из которых они изготовлены, приводит к усталостному разрушению деталей под нагрузкой, а отсюда ремонт, дополнительные расходы на запчасти, приводящие к повышению расхода материалов.

Очистка и консервация деталей – это защита от коррозии на этапах изготовления, хранения и транспортирования, поскольку страшны последствия от коррозии особенно черных металлов.

1.4.6.1. Основные методы стабилизации структуры и уменьшения внутренних напряжений

Основные операции литья, обработки давлением и упрочняющей термической обработки, обработки резанием и сборки создают структурную неустойчивость и увеличивают напряженность материала деталей.

Отпуск, старение и обработка холодом повышают стабильность структуры и уменьшают напряжения. Для обеспечения постоянства размеров готовых деталей и сборочных единиц предпочтительны такие виды и режимы обработки, которые вызывают меньшие остаточные напряжения и приводят к меньшей неустойчивости структур. Необходимо особо отметить важность правильного выбора режимов упрочняющих термических операций, так как в некоторых случаях высокие закалочные напряжения не удастся свести к минимуму даже после завершения всего цикла стабилизирующей обработки (остаточные напряжения в закаленной детали иногда могут превышать напряжения в незакаленной детали более чем в 10 раз).

Для понижения уровня внутренних напряжений и увеличения стабильности структуры во всех возможных случаях рекомендуется применять ступенчатую или изотермическую закалку в горячих средах (расплавленные соли, нагретое масло). Необходимо иметь в виду, что закалка сталей в горячих средах может приводить к существенному увеличению содержания остаточного аустенита. Поэтому во избежание последующего изменения размеров вследствие самопроизвольного аустенит–мартенситного превращения необходимо принимать меры для устранения или стабилизации остаточного аустенита.

Основным средством стабилизации структуры и уменьшения внутренних напряжений является отпуск, применяющийся как для закаленных, так и для термически неупрочненных, но наклепанных при механической обработке деталей. Вследствие нагрева при отпуске увеличивается подвижность атомов металла, облегчается их перегруппировка в более устойчивые фазы. Наиболее выгодно производить отпуск детали при высшей допустимой температуре нагрева, так как эффективность отпуска быстро возрастает с повышением температуры. Продолжительность выдержки имеет значительно меньшее значение. Так, например, отпуск стали в течение 15 мин при температуре 450 °С примерно эквивалентен отпуску в течение 10 часов при температуре 300 °С. Отпуск при температуре 650 °С в течение 15 часов эквивалентен отпуску в течение 150 часов при температуре 550 °С.

Наиболее высокая степень стабилизации структуры стали и снятия внутренних напряжений может быть достигнута путем нагрева до температур, близких к нижней критической температуре (723 °С), т.е. практически до температуры 650 ... 680 °С. Несколько менее эффективен может быть отпуск при температурах 600 °С и 550 °С. Низкотемпературный отпуск является малоэффективным.

При температуре отпуска 150 ... 200 °С заметное снятие внутренних напряжений наблюдается только при их значительной первоначальной величине. Эффективность отпуска при низких температурах не может быть существенно повышена в результате продолжительности выдержки, так как наступающая через определенный период времени практическая стабилизация напряженного состояния делает продолжение отпуска бесполезным. Таким образом, при стабилизирующем отпуске в интервале температур 150 ... 400 °С нет необходимости применять выдержки более 10 – 15 часов.

Нормализация или полный отжиг при температурах выше критической (обычно в интервале 750 ... 900 °С) целесообразны в качестве подготовительных операций для общего улучшения структуры (перед основной термической или механической обработкой).

Предельно допустимая температура нагрева для отпуска определяется требуемым комплексом механических устройств, а в случае неупрочняемых материалов – только условием сохранения светлой или чистой (неокисленной) поверхности детали. При достаточной продолжительности отпуска его температура практически определяет уровень остаточных внутренних напряжений. Например, в разных изделиях из конструкционной стали после выдержки в течение 20 часов при температуре 600 °С были получены одиночные конечные напряжения около 40 Н/мм², хотя первоначальные напряжения в них отличались в 5 раз (100 – 500 Н/мм²). Стабилизирующий отпуск деталей, изготовленных из стали 35Л, в течение 6 часов при температуре 380 °С обеспечивает неизменность размеров после 20-дневного хранения, тогда как размеры контрольных нестабилизированных деталей увеличиваются в течении всего периода проверочных измерений. Скорость охлаждения деталей после отпуска должна быть минимальной.

При стабилизации алюминиевых сплавов необходимо иметь в виду, что температура их плавления ниже температуры плавления стали. Поэтому снижаются области температур отжига, отпуска и старения. Обычно применяющееся кратковременное искусственное старение алюминиевых сплавов при температурах 150 °С и 175 °С недостаточно способствует стабилизации структуры и снятию внутренних напряжений. Старение для стабилизации размеров алюминиевых и магниевых сплавов желательно производить при более высоких температурах – не ниже 200 °С, желательно около 290 °С.

Существенное влияние на стабилизацию структуры сплава Д16 оказывает искусственное старение при температуре 180 °С в течение 8 часов. Увеличение продолжительности выдержки до 12 – 18 часов не изменяет эффекта. Весьма положительные результаты обеспечивает обработка сплава холодом в сочетании с последующим нагревом. Один цикл охлаждения до температуры –70 °С и нагрева до температуры 180 °С более эффективен, чем старение при температуре 190 °С в течение 5 часов. Величина размерной нестабильности магниевого сплава МЛ5 уменьшается в 2 – 4 раза в результате старения при температуре 200 °С в течение 8 – 16 часов. Для деталей из магниевых сплавов также весьма эффективна обработка холодом.

Эффективное влияние обработки холодом на уменьшение остаточных напряжений алюминиевых и магниевых сплавов объясняется, по-видимому, тем, что при охлаждении при температуре ниже нуля в деталях возникают термические напряжения, которые в сумме с ранее имевшимися остаточными напряжениями начинают превосходить предел упругости (или текучести) сплава. Избыточная часть напряжения снимается путем пластической деформации, и при возвращении к комнатной температуре уровень остаточных напряжений оказывается пониженным по сравнению с первоначальным. Никаких структурных изменений в сплавах в результате обработки холодом не происходит. Механические свойства сплавов не изменяются.

Режим обработки холодом алюминиевых и магниевых сплавов следующий: охлаждение до температуры –50 ... 100 °С, нагрев до температуры 100 °С и затем до температуры обычного отжига. Эффективность обработки холодом тем больше, чем выше первоначальные внутренние напряжения, чем более сложна форма детали и чем ниже температура при охлаждении.

В реальных деталях из сплавов АЛ2 и АЛ9 охлаждение до температуры –70 °С приводит к снижению внутренних напряжений на 20 ... 40 % в зависимости от величины начального напряжения и формы детали. Основное значение при обработке холодом имеет первый цикл охлаждения. Дополнительное снижение напряжений после второго цикла обычно не превышает нескольких процентов. Третий цикл практически почти не изменяет величину остаточных напряжений. Поэтому при стабилизирующей обработке алюминиевых и магниевых сплавов с применением охлаждения ниже нуля (так называемой циклической обработки) практически достаточно одного – двух циклов охлаждения и нагрева. При отрицательной температуре длительной выдержки деталей из легких сплавов (более 1 ч) не требуется. Скорость охлаждения до отрицательной

температуры также практически не сказывается на эффективности циклической обработки. Нагрев при циклической обработке должен быть по возможности более высоким. Для сплавов в термически упрочненном состоянии он ограничивается температурой искусственного старения. Для неупрочняемых сплавов температура нагрева должна соответствовать температуре обычного отжига, т.е. 260 ... 300 °С.

Обработка холодом стальных деталей необходима в том случае, если они изготовлены из закаленных сталей, содержащих в структуре остаточный аустенит. Существуют данные о благоприятном влиянии на стали с остаточным аустенитом многократных (например, шестикратных) охлаждений ниже нуля с промежуточным отпуском. Смысл такой обработки (для изделий особенно высокой точности) может заключаться в обеспечении полного превращения остаточного аустенита, так как глубокое охлаждение, как правило, все же не приведет к окончательному устранению этой фазы из структуры закаленной стали. Применение обработки холодом для деталей из стали в отожженном состоянии или из стали закаленной, но не содержащей в структуре остаточного аустенита, нецелесообразно.

На надежность деталей и машин оказывает влияние чередование механических, термических и сборочных операций. Вредное влияние остаточных внутренних напряжений на постоянство размеров деталей проявляется особенно резко, если их распределение в массе металла нарушается операциями механической обработки. Например, при механической обработке деталей из алюминиевых сплавов коробление может возникать даже при низком начальном уровне внутренних напряжений (около 20 – 30 Н/мм²). При изготовлении точных деталей, как правило, необходимо чередование операций механической обработки и операций термической стабилизации размеров, чтобы возникающие при обработке напряжения не накапливались, а снимались по мере появления. Кратность такого чередования, т.е. число промежуточных термических операций, зависит от требуемой степени постоянства размеров, габаритных размеров и сложности формы детали (в том числе в массе сопряженных элементов), а также от соотношений между поверхностью и массой изделия, между всей поверхностью и той ее частью, которая подвергается механической обработке (чем больше последняя, тем больше относительная роль наклепа, т.е. больше возникает причин для коробления детали). Применяемые в практике сложные комбинации термических операций, чередующихся с механической обработкой, оправдываются в тех случаях, когда механические свойства материала или качество поверхности готовых деталей не допускают продолжительного высокотемпературного отжига с очень медленным охлаждением нагретых деталей до комнатной температуры.

Наряду с описанными способами стабилизации геометрических и физико-механических свойств деталей в практике широко используются вибрационно-термическая стабилизационная обработка и другие способы.

Следовательно, для устранения структурной неоднородности и внутренних остаточных напряжений при проектировании технологических процессов для конкретных изделий с учетом допуска на нестабильность геометрических

размеров и физико-механических свойств деталей машин необходимо выбрать оптимальное чередование операций формообразования деталей. Последовательность и чередование операций зависят от жесткости детали, допуска на нестабильность размеров и материала заготовки.

Применительно к определенному изделию практически эта задача решается в следующей последовательности: детали классифицируют по категориям жесткости, для каждой категории жесткости устанавливают коэффициент продолжительности выдержки при операциях стабилизирующей обработки. Например, для категории жесткости: высокая – 0,5 – 0,6; повышенная – 0,75; средняя – 1,0; малая – 1,25.

Все детали разбивают на три категории по значениям допуска на нестабильность главных размеров детали.

С учетом жесткости, допуска на нестабильность и материала заготовки разрабатывают режимы термостабилизации и комплексные типовые процессы изготовления деталей.

Чередование операций и способов предварительной обработки поверхностей оказывают влияние на механизм формирования поверхностного слоя, на физическое состояние слоев металла и его эксплуатационные свойства.

Особое значение имеет правильное чередование операций механической и термической обработок при изготовлении деталей из закаленных и низкоотпущенных сталей.

Для деталей стабильных структур изменение условий обработки со снятием стружки, в основном, вызывает изменение микрогеометрии и упрочнение поверхностного слоя. Структурные изменения поверхностного слоя при этом в значительном диапазоне режимов обработки не имеют места.

1.4.6.2. Очистка и консервация деталей

В процессе изготовления деталей с целью повышения надежности и сохранности их необходимо тщательно очищать от окалины и всевозможных жировых и других загрязнений. Для защиты от коррозии в процессе производства и при последующем хранении детали часто подвергают консервации.

В практике находят применение различные способы и установки для выполнения процессов очистки и консервации деталей. Ультразвуковой метод очистки деталей является наиболее эффективным. Например, серийная ванна УЗВ–15 предназначена для ультразвуковой очистки деталей от жировых, лакокрасочных покрытий и смол.

В дно ванны из нержавеющей стали встроен магнитострикционный преобразователь, который является источником ультразвуковых колебаний частотой около 20 кГц. Ванна заключена в звукоизоляционный кожух. Под крышкой кожуха вдоль длинной стороны ванны установлен бортовой отсос, который выходным отверстием соединяется с вентиляционной системой цеха. По змеевику пропускается холодная или горячая вода (для охлаждения преобразователей или подогрева моющей жидкости). Очищаемые детали загружают в сетку ванны с растворителем, температура которого контролируется.

Очищают детали в органических растворителях, водных растворах щелочей или синтетических поверхностно-активных веществах. Применение кислот ограничивается кавитационно-коррозионной стойкостью ванн и излучающей поверхности источников колебаний.

Для очистки деталей от жировых и механических загрязнений чаще применяют органический растворитель – бензин «калоша»; для очистки от смол и нитроэмалей – ацетон или его смесь со спиртом (температура раствора не выше 30 °С). Применение хлорированных органических растворителей ограничивается их высокой токсичностью. Обычно очистку деталей в органических растворителях ведут последовательно в двух или трех ультразвуковых ваннах. Продолжительность операции (в зависимости от формы и загрязненности деталей) составляет 2 ... 5 мин.

При применении водных растворов щелочей и синтетических поверхностно-активных веществ обычно очистку ведут в одной ультразвуковой ванне. Для очистки стальных деталей наиболее широко применяется раствор, содержащий 30 г/л тринатрийфосфата и 3 г/л ОП–7 или ОП–10, нагретый до температуры 55 ... 60 °С; для очистки деталей из алюминия, меди и их сплавов – раствор, содержащий 3 ... 5 г/л тринатрийфосфата, 3 ... 5 г/л кальцинированной соды и 3 г/л ОП–7 или ОП–10, нагретый до температуры 50 ... 55 °С. При очистке полированных поверхностей концентрацию тринатрийфосфата понижают до 1 – 2 г/л, а температуру раствора доводят до 45 ... 50 °С, чтобы не ухудшать внешний вид деталей.

Испытания, проведенные Ф. И. Катушевым и Д. Б. Ратнером, показали, что предохранить детали от коррозии можно при помощи остающихся на поверхности металла кристаллов нитрита натрия, поглощающих из окружающей среды воду и образующих нечто вроде пленки раствора, непрерывно создающей окисную пленку на поверхности металла. Качество консервации раствором нитрита натрия зависит от тщательности обезжиривания и промывки поверхности деталей.

На основании лабораторных и производственных опытов для поточно-массового производства разработан технологический процесс последовательной мойки в водных растворах: 1,5 % кальцинированной соды и 1 % жидкого стекла; 1 – 2 % кальцинированной соды; 1 – 2 % тринатрийфосфата. Промывка в каждом растворе осуществляется в течение 1,5 мин при температуре 80 ... 90 °С в трехкамерной моечной машине на полуавтоматической конвейерной линии консервации.

Консервацию деталей следует осуществлять в ванне, содержащей 30%-ый раствор нитрита натрия, при температуре 40 ... 60 °С. Детали нужно погружать в ванну постепенно, без толчков, и держать там не менее 2 – 3 мин. Тогда на них образуется равномерная пленка, позволяющая хранить детали в складском помещении свыше 2 лет.

Было исследовано также влияние упаковки деталей в крафт-оберточную бумагу, пропитанную 10%-ым раствором нитрита натрия, на коррозионную стойкость деталей. Испытания показали, что если детали после консервации в

растворе нитрита натрия не завернуть в крафтоберточную бумагу, пропитанную раствором нитрита натрия, и не упаковать в соответствующую тару, то их нельзя защитить от коррозии в течение длительного времени. Так, на коленчатых валах, которые не были соответствующим образом упакованы, коррозия начала проявляться через 25 – 30 дней, а валы, упакованные в крафт-оберточную бумагу или уложенные в ящики, выложенные ею изнутри, хранились 2 – 3 года и более.

Имеются данные, что кальцинированная сода или тринатрийфосфат, оставшиеся на поверхности деталей после промывки в растворе нитрита натрия и высыхания раствора, вызывают местную коррозию металла.

Коррозия металлов и деталей при их хранении имеет место и достигает огромных величин. Так, потери металла от коррозии при хранении автомобилей на открытом воздухе составляет около 22 кг на 1 000 кг массы, т.е. 2,2 %.

Особенно вредно действуют отрицательные температуры, периодически чередующиеся с положительной температурой (зона пустынь, где дневная жара сменяется ночными заморозками). При резких колебаниях температуры на поверхности аппаратуры механизмов и ее внутренних частях конденсируется влага, которая адсорбируется через микрокапилляры и проникает в зазоры между деталями. При низкой температуре вода, заполняющая трещины, поры и зазоры, замерзает и, расширяясь, вызывает дальнейшее увеличение пор, трещин, зазоров. Низкая температура, как правило, увеличивает пусковые моменты машин вследствие загустения смазки. Механизмы могут заклиниваться от изменения зазоров между деталями, материалы которых имеют различные коэффициенты линейного расширения.

Влажность резко ухудшает теплоизоляционные свойства материала. Вода, проникая в материал, вытесняет воздух из пор и ячеек. Коэффициент теплопроводности воды в 2,5 раза больше коэффициента теплопроводности воздуха, поэтому даже небольшое увлажнение материала вызывает резкое увеличение коэффициента его теплопроводности.

Вред, причиняемый коррозией металла, определяется не только потерями металла и снижением механической прочности конструкций, но и уменьшением точности и сокращением сроков работы механизмов. Продукты коррозии загрязняют детали, снижают механические характеристики и ухудшают внешний вид машин.

На механизм разрушения деталей оборудования, установленного на открытом воздухе, влияет ряд факторов, зависящих от атмосферных осадков (дождь, снег, вихревые влажные потоки воздуха), ударного их действия, загрязнения атмосферы, разности электрохимических потенциалов примененных металлов.

Существует некоторая критическая относительная влажность воздуха, выше которой при прочих равных условиях наступает резкое возрастание коррозии металла. Критическая относительная влажность, по некоторым данным, для стали находится в пределах 65 – 70 %.

При влажности выше 70 % конденсирующаяся на поверхности металла влага начинает создавать адсорбционную пленку, которая играет роль раство-

рителя агрессивных агентов среды. В то же время при влажности выше критической начинается разрушение оксидной пленки, покрывающей металл.

Коррозия в атмосферных условиях интенсивно начинается при влажности, близкой к 100 %, когда происходит конденсация водяных паров. Коррозия металлических деталей развивается более интенсивно, когда внутри изделия накапливаются газообразные вещества, образующиеся в результате окислительного процесса высокомолекулярных смол или высыхания лакокрасочных покрытий.

Ориентировочные данные скорости коррозии материалов в зависимости от состава окружающей среды приведены в табл. 51.

С коррозией в водных средах приходится встречаться реже, чем с атмосферной коррозией. Только некоторые специализированные машины эксплуатируются в водной среде или охлаждаются водой. Чаще в процессе эксплуатации машины подвергаются кратковременным погружениям в воду. Наиболее тяжелые условия при таких погружениях возникают тогда, когда температура изделия значительно выше температуры воды. Скорость коррозии в водных средах зависит от материала, состава и физических свойств воды, растительных и животных организмов, всегда имеющих в воде, ее подвижности, периодического или постоянного смачивания изделия и других факторов второстепенного значения. При температуре воды, близкой к нормальной, коррозия железа в пресной воде определяется концентрацией растворенного в ней кислорода. Чтобы понизить агрессивность применяемой для охлаждения воды, ее предварительно пропускают через железо, реагирующее с растворенным в ней кислородом. Если в воде имеются бактерии, восстанавливающие сернокислые соли, то железо может корродировать и при отсутствии кислорода. Такие бактерии часто встречаются в глубоких колодцах, в почве и в морской воде. В хлорированной воде бактерии не размножаются. Многие бактерии, грибки, образующие слизь, и водоросли способствуют коррозии металлов путем образования пленки, состоящей из самих организмов и продуктов их жизнедеятельности.

Таблица 51

Стойкость к атмосферной коррозии металлов

Материал	Возникновение продуктов коррозии	Стойкость к атмосферной коррозии
1	2	3
Углеродистые и слабо легированные стали, чугун	Без поверхностной защиты быстро покрываются ржавчиной ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$)	Величина коррозий в год в чистой сухой атмосфере 0 – 5 мкм и во влажной загрязненной (город) – 100 мкм, в приморье – 100 мкм, в сильно загрязненной промышленной (промышленной на побережье до 1 км) – 100 мкм
Нержавеющие стали (не менее 13 % Cr)	Продукты коррозии не возникают; они появляются лишь в исключительных случаях у плохо отшлифованных сталей без никеля	Величина коррозии в атмосфере всех типов незначительная

1	2	3
Медь и сплавы меди (бронза и латунь)	В чистой сухой атмосфере образуется цветная пленка; в загрязненной атмосфере в течении нескольких дней возникают красные (Cu_2O), затем черные (CuO), продукты коррозии, в наружной атмосфере зеленеют (медянка); продукты коррозии неэлектропроводны	Коррозия меди (более 99 % Cu) в год: в чистой сухой атмосфере 2 мкм, в умеренной загрязненной 2 ... 3 мкм, в промышленной 3 ... 4 мкм, на побережье 4 ... 10 км (наибольшая величина коррозии в атмосфере, содержащей H_2S). Бронза имеет стойкость того же порядка, что и медь; образование продуктов коррозии более медленное; стойкость различных видов бронзы мало отличается. Латунь обычного типа (58 – 64 % Cu) корродирует несколько больше, чем чистая медь. Латунь с меньшим содержанием меди при механической нагрузке и обработке в холодном состоянии иногда ломается (особенно в присутствии NH_3), на побережье (при соприкосновении с морской водой) имеется опасность разрушения цинка и латуни; ее можно уменьшить присадкой мышьяка и сурьмы в малых количествах. Сплавы с никелем гораздо более стойки; их обычно можно применять без поверхностной защиты
Алюминий и его сплавы	В чистой сухой атмосфере продукты коррозии образуются; в атмосфере, загрязненной хлоридами или пылью, быстрое возникновение рыхлых продуктов коррозии	Величина коррозии в год: в незагрязненной атмосфере 1 мкм, в промышленной – 1 – 9 мкм, на побережье – 3 – 12 мкм, коррозия имеет вид мелких точек глубиной до 0,02 мм
Цинк и его сплавы	В сухой атмосфере продукты коррозии почти не возникают; в жаркой влажной атмосфере быстро появляются рыхлые продукты коррозии – основные соли; стойкость сплавов различных типов и различной чистоты различна	Величина коррозии в год: в чистой сухой атмосфере (пустыня, сухие тропики) 0,5 мкм, в чистой влажной атмосфере – 5 мкм, в приморье – 4 – 20 мкм, в загрязненной промышленной атмосфере – 4 – 15 мкм
Никель и его сплавы с медью и цинком	В чистой влажной атмосфере продукты коррозии не образуются; в промышленной атмосфере появляются тонкие слои продуктов коррозии	Величина коррозии в год: в чистой атмосфере 1 мкм, в загрязненной – 1 – 5 мкм, в приморье – 3 мкм
Магний и его сплавы	В сухой атмосфере стойкие; в загрязненной атмосфере и приморье быстро покрывается белым продуктом коррозии	Величина коррозии в год 50 мкм, особо быстро разрушается в приморье (более стойкие сплавы с кремнием)

Среднюю скорость коррозии стального листа, погруженного в вертикальном положении в морскую воду, можно считать равной примерно 25 мг/дм² в сутки. В зоне прилива и отлива, т.е. при переменном погружении в морскую воду, скорость коррозии стали зависит от температуры: в условиях умеренного климата скорость коррозии в 2 раза больше, а в условиях тропического климата в 4 раза больше, чем при полном погружении.

Среди сортов латуни лучшие характеристики в условиях полного погружения в морскую воду имеют сплавы, содержащие от 65 до 85 % меди. Сплавы меди с оловом хорошо сопротивляются коррозии в морской воде. В сплавах меди с никелем стойкость против коррозии возрастает. Титан является наиболее стойким из всех материалов к действию соленой воды и морской атмосферы. Морская вода обладает хорошей электропроводностью. Поэтому при сочетании разных металлов и сплавов, подвергающихся действию морской воды, приходится учитывать повреждения от гальванической коррозии (табл. 51).

Кальций, магний и стронций, присутствующие в морской воде, могут осаждаться в виде углекислых солей на катодных поверхностях и снижать их гальваническое действие.

Во влажном климате, особенно в тропических областях, приобретает особое значение электрохимическая коррозия контактных соединений металлов. Часто материалы, применяемые отдельно, не имеют заметных следов коррозии, но при соприкосновении друг с другом в тех же условиях их поверхность подвергается коррозии.

Образцы из пассивированного алюминия марки АОМ и винты из латуни марки Л62 выдерживали испытание в камере влажности без местных коррозионных повреждений. В то же время контактные соединения этих материалов подвергались заметным повреждениям; более сильно была выражена коррозия алюминия и менее заметно коррозия латуни. Контактное соединение меди марки М-1 с травленной и пассивированной сталью 10 вызывает сильную коррозию стали. Бронза марки Бр.КМц 3-1 и пассивированный дуралюмин марки Д16 в закаленном и состаренном состоянии, не корродировавшие в субтропических условиях, заметно корродировали в контактных соединениях.

Подобные повреждения металлов, соприкасающихся между собой, достаточно многочисленны в практике. При соприкосновении разных металлов во влажной атмосфере образуются электрохимические микропары. Один металл является анодом, влажная пленка – электролитом и другой металл – катодом. Чем дальше в электрохимическом ряду напряжений стоят друг от друга эти металлы, т.е. чем больше между ними разность потенциалов, тем больше вероятность контактной коррозии. Роль анода (а это менее благородный металл), разрушающегося более интенсивно, выполняет металл с более отрицательным потенциалом.

При выборе контактных пар металлов практическое значение имеет поведение не относительно чистых металлов, а металлов определенных промышленных марок и металлов с покрытиями.

Эффект коррозии зависит от отношения площади более благородного металла (катодного) к площади менее благородного (анодного). Следует стре-

миться к тому, чтобы площадь более благородного металла была меньшей. Лучше применять (если это необходимо) медную заклепку в стальной пластине, чем стальную в медной пластине.

Коррозию паяных швов следует рассматривать в основном как контактную, при которой припой (паяный шов) имеет значительно меньшую поверхность, чем спаиваемый металл. Если припой (ПОС–40, ПСР–45) является анодом, то процесс коррозии развивается гораздо интенсивнее, чем в парах, где припой является катодом. Для увеличения срока службы паяного изделия следует выбирать припой с более высоким потенциалом, чем спаиваемые металлы. В этом случае будут незначительно разрушаться спаиваемые металлы, а паяный шов будет защищен.

Коррозионная стойкость припоев в сельской местности приблизительно в 1,5 раза выше, чем в промышленных районах. Для алюминиевых припоев характерно увеличение стойкости с повышением температуры. Испытания, проведенные в районе г. Батуми, показали большую стойкость этих припоев, чем в условиях севера.

Следует иметь в виду, что соприкосновение некоторых сортов древесных пород с металлами вызывает коррозию последних, например дуб, каштан и западную тую не следует применять в соединении с железом, сталью, алюминием и его сплавами, свинцом и свинцовыми сплавами. Некоторые сорта фанеры выделяют активные вещества (вероятно, жирные кислоты), интенсивно действующие на металл, главным образом на цинк, стали и кадмий.

Влияние света на материалы заключается, главным образом, в химическом разложении некоторых органических материалов – пластмасс, красителей, тканей и коррозии от продуктов разложения.

Вопросы для самопроверки к пп. 1.4

1. Какова рациональная величина шероховатости поверхности?
2. Какая связь шероховатости поверхности с величиной износа этой поверхности?
3. Каким образом способ или метод обработки влияет на эксплуатационные свойства поверхности?
4. Какая связь характера следов обработки с износостойкостью поверхности в трущейся паре?
5. Влияние технологии обработки на долговечность детали.
6. Какие способы стабилизации структуры деталей из чугуна и стали?
7. Можно ли технологически изменять структуру материала при изготовлении деталей?

2. РЕНОВАЦИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Цель – описать, обосновать и доказать целесообразность внедрения современных технологий восстановления изношенных деталей машин и режущих инструментов, а также использование рециклинга и реноваций.

При восстановлении изношенных деталей широко применяют наплавку, напыление, гальваническое хромирование, электроискровое легирование и другие методы. При этом восстановленные детали не только не теряют износостойкость, а наоборот ее увеличивают. Такое восстановление без потери первоначальных свойств изделия называется *реновацией*.

В настоящее время передовые достижения по восстановлению деталей выглядят так: авиация – более 50 %, судоремонт и судоэксплуатация – до 30 %, сельхозтехника – до 10 % потребляемых запчастей. Эти цифры свидетельствуют об очень больших затратах труда, времени и материальных ресурсов, которые экономятся.

При производстве автомашины в США требуется до 2-х лет на создание формы кузова, 1,5 года – на создание самой конструкции и 1,5 – 2 года на подготовку производства массового выпуска самой автомашины. Для доводки авиадвигателя требуется изготовить 12 прототипов, из которых 8 должны пройти испытания на стендах и аэродинамической трубе, 3 прототипа должны пройти испытания на самолетах в воздухе в течении не меньше 3 000 часов работы авиадвигателя. Для запуска в серийное производство испытания нужно повторить. Вся эта работа занимает около 5 лет и стоит 24 млн. долларов США (данные 1960 года, т.к. более поздних данных нет).

Английская практика показывает, что турбореактивный двигатель с тягой около 6 т создается около 5 лет и на конструирование, доводку и проведение испытаний расходуют не менее 6 млн. фунтов стерлингов.

В США трудоемкость работ от начала конструирования образца современного самолета до доводки его к передаче в серийное производство составляет приблизительно 5 млн. человеко-часов.

2.1. Рециклинг запасных частей

В настоящее время интересно наблюдать за таким явлением как *рециклинг*, т.е. повторным использованием деталей или сборочных единиц в новых машинах, естественно, при условии, что они будут выполнять повторно свои функции. Часть таких повторно используемых объектов может быть частично восстановлена, и об этом будет сказано ниже, часть требует проверки и восстановления покрытий, а часть ничего не требует, кроме желания и организации процесса возврата.

Большую часть затрат при восстановлении машины, например при ремонте автомобилей, составляют затраты на запасные части. В то же время до 90 % деталей автомобиля, которые можно восстановить, не используются – они уходят в отходы. В США в отходы уходит столько черных металлов, что их бы

хватило на всю автомобильную промышленность, а алюминия – на воздушный флот США.

На восстановление деталей требуется всего 1,5 – 2 % от объема материалов, необходимых на их изготовление, а энергоресурсов – еще меньше. Стоимость восстановления деталей составляет до 30 % от стоимости их изготовления. Ресурс восстановленных деталей может даже значительно превышать ресурс новых деталей.

На изготовление коленчатого вала весом 25 кг затрачивается 60 кг железной руды, 0,26 м³ воды, 10 кг топлива, 1,2 кг кислорода и большое количество трудно поддающихся точному расчету энергоресурсов. При этом в атмосферу выбрасывается 27 кг углекислого газа.

С учетом затрат на добычу, транспортировку и переработку сырья, обработку заготовок и производство энергии, которые ежегодно прогрессивно увеличиваются, в ближайшие 10 – 20 лет стоимость машин многократно возрастет.

Значительно возрастут и экологические затраты, определяющие экологическую стоимость новой машины, которая уже сегодня сопоставима или превосходит производительную стоимость и должна калькулироваться отдельной статьей себестоимости изделия.

Принятая недавно в автомобилестроении развитых стран концепция рециклинга при конструировании и эксплуатации автомобилей направлена на решение актуальнейшей мировой проблемы ресурсосбережения и охраны окружающей природной среды.

Рециклинг – конструирование техники (машин) с таким расчетом, чтобы в дальнейшем их детали могли быть использованы повторно (определение по международному стандарту ИСО 22628:2002).

С середины 1990-х годов по инициативе трех крупнейших фирм-производителей автомобилей Chrysler, GM, Ford в США появилась новая отрасль – рециклинговая индустрия, позволяющая повторно и многократно использовать бывшие в эксплуатации детали машин и приносящая большие прибыли производителям техники. Повторно используется почти 75 % каждого вновь выпущенного американского автомобиля. По данным германского концерна BMW рецикличные запасные части (детали) до начала нового тысячелетия уже составляли 80 % от общей массы автомобиля этой марки, а сейчас эта цифра доведена до 95 %. И это только один пример одного из очень крупных производителей автомобилей.

В табл. 52 и табл. 53 приведены цифры 10 крупнейших производителей автомобилей в мире в докризисном 2007 году и количество купленных автомобилей по регионам и странам мира в том же году.

В Украине в 2007 году было куплено всего 400 000 штук новых автомобилей. В 2008 году парк автомобилей составлял 7,7 млн. штук, из них 5,2 млн. штук легковых, 0,916 млн. грузовых и около 0,115 млн. автобусов. Автобусы были, в основном, старше 10 лет эксплуатации.

Чтобы оценить эффект реноваций и рециклинга только с позиций расходования материалов, следует иметь в виду, что автомобиль массой 1 500 кг в среднем состоит из 840 кг стали; 260 кг чугуна (черные металлы составляют

75 % массы); 140 кг цветных металлов (9 %); 100 кг резины; 60 кг стекла и 35 кг красок.

Таблица 52

10 крупнейших производителей автомобилей мира 2007 г.

№	Фирма	Количество автомобилей, млн.
1	Toyota	9,5
2	GM	9,3
3	Volkswagen Group	6,3
4	Ford	6,2
5	Hyundai-Kia	4,0
6	Honda	3,9
7	PSA Peugeot-Citroen	3,5
8	Nissan	3,4
9	Fiat	2,7
10	Renault-Dacia-Samsung	2,7
Итого:		51,5

Таблица 53

Покупка легковых автомобилей в 2007 г.,
их распределение по регионам и странам мира

№	Регион	Покупка, млн. шт.	Всего, млн. шт.
1	Европа	19,2	22,7
	вт. ч. Германия	5,7	6,2
	Франция	2,5	3,0
	Россия	1,3	1,7
	Италия	0,9	1,3
	Чехия	0,9	0,9
	Польша	0,7	0,8
	Украина	0,4	0,4
2	Америка	9,3	19,1
3	Азия	24,1	30,7
Итого:		53,0	73,1

Очевидно, что эта идея, уже подхваченная и модернизированная многими производителями техники в лице ведущих мировых корпораций, не может оставить равнодушными отечественных проектировщиков и производителей различных машин совместно с отечественными же предприятиями, занятыми их эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом. Более того, по прогнозу развития науки и технологии на начало 21-го века, опубликованному еще в 1995 году влиятельным японским журналом Tokyo Business Today, 2004-й год будет «... годом определения ответственности по закону производителей за сбор и утилизацию изготовленной ими продукции, когда она станет ненужной потребителю ...». Сегодня 2016-й год и проблема решается полным ходом.

2.2. Технологии восстановления деталей

При капитальном ремонте затраты на запасные части составляют 50 – 70 % себестоимости. Себестоимость восстановления изношенных ремонтпригодных деталей не превышает 30 – 50 % цены новых деталей при сопоставимом ресурсе. Отсюда следует, что при приемлемом уровне рентабельности отпускная цена капитально отремонтированных машин может быть на 35 – 40 % ниже цены новых при сопоставимом ресурсе.

Исследования ученых показали, что в выбракованных тракторах годных деталей для эксплуатации без ремонта до 45 %, подлежащих восстановлению до 50 % и только 5 – 9 % не подлежат восстановлению, что свидетельствует о значительном объеме ремонтного фонда и целесообразности организации и развития рынка подержанной техники.

В создании производств по выпуску подержанной техники важное место должно занимать восстановление деталей. Следует обратить внимание на то, что по сравнению с изготовлением новых запасных частей количество операций обработки при восстановлении сокращается в 3 – 8 раз. Создание производств по восстановлению деталей требует в 2 – 2,5 раза меньше капитальных вложений по сравнению с аналогичными предприятиями по производству запасных частей.

Важное преимущество восстановления – малая металлоемкость. Для восстановления деталей необходимо в 20 – 30 раз меньше металла, чем для изготовления новых запасных частей.

Восстановление деталей, как правило, исключает экологически разрушительный энергоемкий металлургический цикл производства. Только за счет исключения металлургического цикла при восстановлении 1 тонны деталей из стали можно экономить 180 кВт/ч электроэнергии, 0,8 тонны угля, 0,8 тонны известняка, 175 м³ природного газа.

Восстановление и упрочнение деталей позволяет восстановить ресурс машины, а в некоторых случаях значительно его повысить. Исследования показывают, что за счет восстановления и упрочнения соединений деталей их ресурс можно увеличить в 1,2 – 2,5 раза.

Для повышения уровня восстановления деталей в системе технического обслуживания и ремонта машин необходимо развивать три приоритетных направления, в которых проблема восстановления деталей займет должное место. Во-первых, необходимо реанимировать или создавать цеха и участки по ремонту топливной аппаратуры, гидроагрегатов, КПП и других узлов и агрегатов. Эти участки должны обеспечивать отремонтированными агрегатами механизаторов, например, в сельской местности. На этих участках должен осуществляться необезличенный ремонт с максимальным количеством восстановленных деталей. Доля в общем объеме восстановления деталей – 65 % (районный уровень).

Второй путь – осуществлять модернизацию имеющегося парка технических средств на промышленной основе на специализированных ремонтных заводах и в мастерских. При модернизации должны быть заменены ненадежные в

работе агрегаты (КПП, гидроагрегаты, турбокомпрессоры и др.). Доля в общем объеме восстановления деталей – 25 % (областной уровень).

Третий путь – это развитие производств по восстановлению изношенных деталей, как основа сокращения затрат на поддержание техники. Доля в общем объеме восстановления деталей – 10 % (межобластной уровень). Естественно, для каждого уровня специализации восстановления деталей должен быть свой набор оборудования и технологий для восстановления деталей.

Наиболее востребованными становятся предприятия районного уровня. Поэтому разработка новых технологий и оборудования ведется в большей части для них. Современные технологии базируются на интенсивном потреблении первичных природных ресурсов, которые используются только на 2 – 3 %. Поэтому на 1 тонну продукции получается свыше 10 тонн отходов. Использование их как вторичного сырья снижает загрязнение природы только на 60 – 80 %, в то время как планета перенасыщена ими в 4 – 6 раз больше, чем она их может локализовать.

Отказаться от благ цивилизации невозможно, но при таком несоответствии производства изделий и потребления природных ресурсов экологическая катастрофа в ближайшем будущем неминуема. Кардинальный выход из сложившейся экологической ситуации – организация массового реновационного производства, которое не только обеспечивает номинальные параметры изделий, сокращает в 5 – 10 раз использование первичных природных ресурсов при себестоимости до 30 % от первичного изготовления, но и снижает уровень загрязнения окружающей среды также в 5 – 10 раз.

Реновационная концепция производства не требует значительных затрат, так как она базируется на существующих производственных мощностях, которые зачастую используются менее чем на 50 %.

Примеры такого подхода будут рассмотрены ниже.

Существующая горелка для сверхзвукового газопламенного напыления покрытий из порошковых материалов и проволоки работает на пропан-бутановой смеси или газе МАФ, кислороде и сжатом воздухе в качестве транспортирующего и охлаждающего газа. Однако происходит загрязнение окружающей среды продуктами сгорания углеродосодержащих горючих газов.

Устранение вышеуказанных недостатков достигается использованием газодинамического напыления. Газодинамический метод нанесения покрытий разработан на основе открытого в 1980-х годах эффекта закрепления твердых частиц, движущихся со сверхзвуковой скоростью, на поверхности при соударении с ней. Технология является новой, и ранее в промышленном производстве не использовалась.

В настоящее время ведутся разработки принципиально новой сверхзвуковой горелки «Термика–Н5» (система «НУОР»).

Технология нанесения покрытий включает в себя нагрев сжатого газа (воздуха), подачу его в сверхзвуковое сопло и формирование в этом сопле сверхзвукового воздушного потока, подачу в этот поток порошкового материала, ускорение этого материала в сопле сверхзвуковым потоком воздуха и направление его на поверхность обрабатываемого изделия. В качестве порош-

ковых материалов используются порошки металлов, сплавов или их механические смеси с керамическими порошками.

Привлекательность технологии нанесения металла на поверхность деталей и изделий газодинамическим напылением состоит в том, что оборудование и создаваемые с его помощью покрытия свободны от большинства недостатков, присущих другим методам газотермического напыления покрытий, и обладают рядом технологических, экономических и экологических преимуществ.

Основные свойства покрытий: высокая адгезия (30 – 100 МПа); высокая когезия (30 – 100 МПа); однородность покрытий; низкая пористость (1 – 3 %); плотное соединение покрытия с защищаемой основой без зазоров и полостей, с надежным электрогальваническим контактом покрытия и основы; шероховатость поверхности покрытий составляет $R_z = 20 \dots 40$ мкм и обеспечивает высокую прочность закрепления на них лакокрасочных материалов; толщина может быть любой и обеспечивается технологическим режимом нанесения; покрытия могут обрабатываться всеми известными способами механической обработки; при специальной последующей обработке некоторые покрытия могут приобретать дополнительные или новые свойства.

В практике ремонтного производства для восстановления деталей из алюминиевых сплавов все шире применяется *микродуговое оксидирование* (МДО), что позволяет получить достаточно высокую износостойкость восстановленных деталей. МДО – один из перспективных видов поверхностной обработки. Способ находит в последнее время все более широкое распространение для получения многофункциональных покрытий при упрочнении восстановленных деталей из алюминиевых сплавов. Однако данные покрытия обладают одним недостатком – износостойкость верхних слоев недостаточно высокая. Для ее увеличения целесообразно использовать следующие технологические приемы: охлаждение электролита при оксидировании; термообработка упрочненного слоя; заполнение пор покрытия паром, маслом или твердыми смазочными материалами; орошение оксидируемой поверхности воздухом.

Для увеличения ресурса восстановления деталей предлагается использовать комбинированные способы, заключающиеся в приращении металла различными способами (аргоно–дуговая наплавка, различные виды напыления, пластическое деформирование, кислородно–водородная пайка) с последующим упрочнением восстановленных поверхностей МДО.

Для упрочнения и восстановления деталей из железоуглеродистых сплавов (стали и чугуны) использование метода МДО не нашло применения. Однако исследования в этом направлении ведутся двумя путями. Во-первых, получение оксидных покрытий на самом железоуглеродистом сплаве за счет расширения технологических возможностей процесса до нескольких режимов. Во-вторых, газодинамического напыления покрытия на стальную или чугунную деталь вентильного металла (например, сплава алюминия) и упрочнения его МДО. В качестве порошковых материалов используется порошок, содержащий $Al + Al_2O_3$. В области газопламенной обработки материалов одним из перспективных источников получения горючего газа являются электролизно–водные установки, получившие довольно широкое распространение в последние годы.

В установках в результате электролиза водных растворов электролита получают водородно-кислородную смесь. Использование таких установок позволяет в значительной мере сократить потребление дефицитного карбида кальция и многомиллионного парка ацетиленовых и кислородных баллонов. Электролизное водные установки, предназначенные для получения водородно-кислородных смесей электролитическим разложением воды, нашли применение в различных областях промышленности и бытовых целях. С их помощью можно производить сварку и резку низкоуглеродистых сталей, золота, серебра, латуни, свинца, меди и других металлов. Возможно, производить работы по стеклу, керамике, напыление слоя стеклоэмали и других неметаллических покрытий, термическую обработку стоматологических изделий и другие работы, требующие высокотемпературный нагрев. Все выше перечисленные технологии упрочнения и восстановления деталей, используемые при ремонте машин, объединяет одно качество – их высокая экологичность, так как для их реализация используется электроэнергия, воздух и вода.

Развитие ремонтного производства ставит задачу создания новых и совершенствования существующих технологических методов, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей машин и механизмов. Одним из направлений повышения надежности и долговечности деталей является применение различных методов электронаплавки, основанных на использовании концентрированных потоков энергии.

Перспективным методом восстановления и упрочнения является *электромагнитная наплавка* (ЭМН), позволяющая восстанавливать поверхности деталей с величиной износа до 0,6 мм и одновременно увеличить их ресурс в 2,5 раза по сравнению с закаленной сталью 45. Являясь простым и доступным способом восстановления и благодаря недорогому оборудованию, метод может быть применен как при серийном восстановлении деталей машин, так и на участках ремонтных мастерских.

Развитием метода ЭМН стало применение в качестве наплавочного материала паст на основе железных порошков и связующего компонента.

Применение пасты для процесса ЭМН приводит к преимуществам:

- защита наплавочной ванны от воздействия окружающей среды. При сгорании органического связующего пасты в процессе наплавки в рабочей зоне выделяется значительное количество углекислого газа, предотвращающего прямой контакт наплавочной ванны с кислородом окружающего воздуха, что предотвращает сгорание легирующих компонентов;

- точное дозирование расхода порошкового материала. При применении пасты значительно возрастает стабильность процесса наплавки из-за точного дозирования порошка ее состава. При этом коэффициент использования порошка составляет 80%, что значительно экономит затраты на приобретение наплавочного материала;

- возможность легирования наплавленного слоя необходимыми компонентами. В процессе наплавки под влиянием больших температур происходит разложение связующих материалов и перенос элементов, находящихся в их составе, в покрытие. Таким образом, появляется метод легирования наплавленно-

го слоя не только за счет компонентов, находящихся в составе порошков, но и за счет компонентов связующего. Это приводит к возможности использования при наплавке недорогостоящих порошков, а легирующие компоненты вносить в составе связующего пасты.

Проведенные исследования показали, что износостойкость дисков сошника у сеялки зерновой СЗП-3, упрочненных ЭМН, выше по сравнению с износостойкостью дисков, изготовленных по типовой технологии.

При упрочнении дисков сошника в качестве связующего вещества использовали эпоксидную смолу ЭДП (ТУ 2395–001–49582674–99), растворенную в жидком стекле (ГОСТ 13078–89), ТО РБ 02974150–015–99), а пасту на основе железа и хрома ($Fe - 6,5 \% Cr$). На поверхность обработанного лезвия сошника наносили покрытие толщиной 0,5 – 0,6 мм и шириной 10 мм на оптимальном режиме ЭМН.

Испытывали две партии дисков в количестве 24 штуки в каждой. Испытания проводились на среднесуглинистых почвах с твердостью 0,7 – 0,9 МПа, влажностью 18 – 22 %, при глубине хода сошников 60 мм, усилии нажатия пружины нажимных штанг 80 кг и рабочей скорости 12 км/ч. Нарботка сошников составила 120 ч (380 га).

По результатам сравнительных испытаний сделаны следующие выводы: покрытие, полученное наплавкой пасты в электромагнитном поле, позволяет уменьшить износ в 1,5 раза по сравнению с заводской технологией. Выявлено, что предложенная технология упрочнения дисков сошника позволяет обеспечить условие самозатачивания лезвий последних.

2.3. Повышение износостойкости узлов трения

Для повышения износостойкости узлов трения необходимы новые износостойкие защитные покрытия и методы их нанесения. Одной из таких ресурсосберегающих технологий является упрочнение и восстановление рабочих поверхностей деталей с помощью нанесения покрытий триботехнического назначения. Железнодорожный транспорт является энерго- и материалоемкой отраслью, на который приходится 10 – 12 % потребления топливно-энергетических ресурсов в стране и до 20 % металла. Более трети расходуемой энергии затрачивается на преодоление трения, в результате износа теряется более 10 % металла, процессами трения и износа обуславливается 80 – 85 % отказов железнодорожной техники. Известно, что техническое обслуживание и ремонт транспортных средств обходятся в 5 – 20 раз дороже их первоначальной стоимости. Для достижения желаемой износостойкости и безопасности необходимо решить проблемы износа основных узлов трения в подвижном составе и пути.

Приоритет принадлежит проблемам взаимодействия подвижного состава и пути, где критическими являются: гребень колеса, рабочая грань наружного рельса в кривых малого радиуса и элементы стрелочных переводов.

Второе место занимают проблемы экипажной части грузовых (тележка модели 18–100) и пассажирских (тележка КВЗ–ЦНИИ) вагонов, рессорного подвешивания локомотивов.

Третье место занимают ударно–сцепные устройства подвижного состава.

Научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями Украины разработан ряд технологий для повышения надежности и увеличения сроков службы основных деталей подвижного состава и пути. Упрочнение гребней колес плазменной закалкой, смазывание рельсов, изменение профиля колес и рельсов, а также другие мероприятия дали определенные положительные результаты с точки зрения износостойкости, но не решили всех проблем. Так, мероприятия по улучшению условий работы узлов трения в тележках не устранили причин повышенного износа сопрягаемых поверхностей, где помимо усиления рабочих зон по износостойкости необходимо решить проблему фрикционных характеристик таких узлов трения, как детали гасителей колебаний, скользунув, шарнирно-поворотных устройств.

Из многообразия существующих технологий упрочнения и восстановления рабочих поверхностей узлов трения транспортной техники наиболее распространенной является электродуговая наплавка. К числу ее достоинств относятся простота и доступность наплавки различных по форме и площади изношенных поверхностей, достаточно высокая производительность (при автоматической наплавке достигающая 27 кг/ч), сравнительно невысокая цена наплавляемых материалов (электродов). Основные недостатки заключаются в интенсивном выделении тепла при наплавке слоями большой толщины, что приводит к росту зерен основного металла и в дальнейшем к его разупрочнению, значительном выгорании легирующих элементов, особенно легколетучих (углерода, бора), невозможности обеспечения стабильных характеристик наплавленного металла как по фрикционным свойствам, так и по однородности структуры и качества при наплавке в один проход (шлаковые и газовые включения). Другие используемые технологии, например плазменно-порошковая металлизация, дороги, технологически сложны или применимы не для всех марок стали.

Наибольшее число узлов трения находится в автосцепных и буферных устройствах. И здесь применение электродуговой наплавки или приварки пластин из сырой стали Ст3 частично решает вопрос восстановления геометрии изношенных поверхностей, но не их надежности и долговечности. Следует также отметить, что детали фрикционных аппаратов типов Ш–2В, ЦНМИ–6, ЛМК–110А по износу просто не ремонтируются и подлежат замене новыми деталями, что не всегда выполняется из-за их отсутствия или большой стоимости.

Предлагаемый метод нанесения покрытий отличается от остальных своей дешевизной и простотой в применении. На рабочую поверхность (новую, которую необходимо упрочнить, т.е. повысить износостойкость) наносят покрытие, которое получают в герметическом контейнере при температуре 600 ± 20 °С, выдержкой 60 – 80 мин; в качестве насыщающей среды используют парогазовую среду, содержащую активные элементы, такие как: кислород, азот, молибден и серу. На поверхности обрабатываемых образцов формируются покрытия, которые уменьшают износ пары трения. Результаты испытаний приведены в табл. 54.

Испытания показали, что пары трения с покрытием имеют износостойкость в 2 – 3 раза большую, чем типовые пары трения.

Величина износа рельсов со специальными покрытиями

№ п/п	Тип рельса	Износ без покрытия, мг	Износ с покрытием, мг
1	P50	1,8 – 1,87	0,6 – 0,61
2	P65	1,65 – 1,68	0,58 – 0,61
3	P75	1,75 – 1,8	0,55 – 0,61

2.4. Ресурсосбережение в производстве и эксплуатации прецизионных твердосплавных инструментов

Ситуация с дефицитом качественных инструментов отечественного производства начала активно изменяться с 2005 года, к сожалению, угрожающими темпами. Этому есть объяснение: старые запасы исчерпались, производство инструментов, особенно прецизионных, сократилось до минимума (и не только в Украине), металлообработка начинает набирать обороты. Проблемы с приобретением твердосплавных смесей в связи с отсутствием вольфрамовых руд в Украине будут только нарастать. Уже сегодня зависимость страны от экспортеров твердосплавного сырья ведет к крупным валютным затратам, перспектива работать на привозном сырье тревожит многих потребителей и заставляет уделять серьезное внимание ресурсосберегающим технологиям, использовать только оптимальные, а не универсальные конструкции в сочетании с эффективными технологическими средствами (ТС).

Научно-производственная фирма «Инбор» специализируется на изготовлении прецизионных инструментов $\varnothing 0,3...14$ мм, в том числе – многолезвийных сложного профиля. По данным систематических испытаний, проводимых на фирме, работоспособность различных инструментов (сверл спиральных и комбинированных (BK6–M, BK6–OM), фрез контурных типа «кукурузка», концевых, шпоночных и фасонных, резцов (T5K10, BK8, P18), разверток и т.п.) производства ведущих мировых фирм совсем не так высока, как это рекламируется на выставках. Соотношение «цена–качество» совершенно не в пользу иностранных конкурентов, и проблема импортозамещения может успешно решаться, если приложить определенные усилия. Работа НПФ «Инбор» планируется по комплексному подходу, при котором исследование, конструирование, изготовление и эксплуатация инструмента объединяются в единую взаимосвязанную систему.

Первым шагом в достижении ресурсосбережения является строгое соблюдение технологической дисциплины, при которой инструменты используются только по своему назначению, в соответствии с их конструкцией. Учитывая небольшую длину фрез концевых и шпоночных (BK8), их рационально производить монолитными методом глубинной вышлифовки до $\varnothing 14$ мм включительно.

Что касается сверл и разверток, то здесь целесообразно иметь в виду следующие аспекты. Во-первых, следует учитывать особенности сверл для обра-

ботки бетона, дерева, металла и композиционных материалов. При этом, исходя из значительной длины хвостовика, монолитные сверла имеет смысл производить и использовать до $\varnothing 7 \dots 8$ мм, а свыше – изготавливать для рассверливания с напайной твердосплавной пластиной. Развертки прямозубые и спиральные (BK8) $\varnothing 5 \dots 10$ мм рационально производить сборной конструкции со стальным хвостовиком.

Кроме экономии, стальной хвостовик служит демпфером, смягчающим ударные нагрузки на тонкие режущие кромки.

Твердосплавные сверла $\varnothing 5 \dots 8$ мм при условии использования эффективных СОТС и соблюдения нормальных параметров режимов резания тоже целесообразно производить сборной конструкции. Поэтому возрастает роль соединительных операций (запрессовка, пайка, диффузионная сварка, клеємеханическое соединение).

С целью реализации импортозамещения, по желанию заказчика, можно производить прецизионные инструменты $\varnothing 0,4 \dots 5$ мм монолитными из заготовок экзотических сплавов типа BK6–ХОМ, BK8–МП разработки и изготовления ВНИИТС (Россия) и H10P фирм SANDVIK (Швеция), GUHRING (Германия). Эти заготовки в изобилии представлены посредниками, однако стоимость выше в 5 – 6 раз, поэтому перед их использованием следует экономически обосновать необходимость такого инструмента.

Имидж фирмы будет не полным, если не указать технологии многократного восстановления работоспособности изношенных инструментов, в том числе дорогостоящих импортных. В этом направлении нельзя недооценивать значимость операций химико–термической очистки. Значительно активизировать процессы можно при помощи физических воздействий, в частности, ультразвуковых, магнито–импульсных, нагрева. Поиск удачных сочетаний СОТС и физико-химических воздействий представляет значительный интерес для ресурсосбережения.

По технологии, защищенной авторским свидетельством № 1782024, предложено специальное смазочно-охлаждающее средство для механической обработки композиционных материалов. Оно значительно эффективнее алюминиевых прокладок, применяемых на фирме Olivtiti (Италия) по патенту США № 4761495.

Как показала практика, еще более перспективная и доступная технология в данном направлении – химико-термическая очистка загрязненного твердосплавного инструмента в специальном составе с ингибитором. За счет введения в щелочной состав ингибитора коррозии на основе тиоамидных соединений не только полностью удаляются отходы обработки, но и повышаются антифрикционные свойства очищенных рабочих поверхностей.

Для производства фрез, разверток, сверл $\varnothing 2 \dots 12$ мм применяются шлифовальные автоматы моделей F–102 (Швейцария), FV–1000 (Швейцария) 024С «GEFRA» (Голландия), «WALTEK» (Германия). Значительно экономнее выполнять эти же работы можно при использовании специальной оснастки – разработки и изготовления ВНИИ-инструмент (Россия). Конкурентоспособность этой технологии обеспечивается автоматическим циклом работы и возможно-

стью многостаночного обслуживания. Вышлифовка стружечных канавок, спинок и заточка производится одним станочником на трех станках.

Для полной идентичности с импортным инструментом – можно использовать шлифованные стержни–заготовки, указанные выше.

Производство концевых инструментов включает в себя технологии, оборудование и оснастку для обработки ступенчатых тел вращения, валиков, осей, фасонных стержней, электродов, специальных полуфабрикатов. В этом направлении максимальной эффективности можно достичь путем полной автоматизации бесцентрового шлифования за счет модернизации станков моделей 3Д180, 3Е180В и их аналогов вибробункерными подающими устройствами, а также – специальными приводами для правки кругов.

Вопросы для самопроверки к разделу 2

1. Что такое рециклинг?
2. Что такое реновация?
3. Какие методы восстановления изношенных поверхностей деталей можно рекомендовать?
4. Методы восстановления деталей из алюминиевых сплавов.
5. Технология наплавки материала.
6. Как можно повысить долговечность режущих инструментов?
7. В чем преимущество ионно-плазменного насыщения поверхностей перед обычными поверхностями?
8. Сущность, преимущества и практическое применение электромагнитной наплавки.
9. Достоинства электродуговой наплавки, применяемой для упрочнения и восстановления рабочих поверхностей узлов трения?
10. Назовите основные направления ресурсосбережения в производстве и эксплуатации прецизионных твердосплавных инструментов.

3. ЭКОНОМИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Цель – описать и показать структуру энергозатрат в машиностроении, пути экономии технологической энергии на этапе производства деталей машин.

Одним из ресурсов, реализуемых и расходуемых в машиностроении, есть энергия в различных ее видах. Эта энергия требуется для выполнения различных работ, функционирования производств и процессов, происходящих в них, и это дает нам право называть определенный объем энергии *технологической энергией*. Понятно, что на любом производстве имеет место расход энергии на отопление в соответствующий период времени, на освещение территории завода и прилегающих территорий и другие направления потребления энергии, помимо непосредственно технологической энергии. Как показывают статистические данные, технологическая энергия составляет основную часть всего ее потребления в машиностроении, и экономия энергии – одна из главнейших государственных программ.

По данным Госкомитета по энергосбережению Украины на \$ 1 произведенного валового внутреннего продукта в Украине (ВВП) расходуется 4,7 кг условного топлива, в Японии – 0,37 кг, в США – 0,6 кг, в России – 5,076 кг. В 2005 году в Украине абсолютная энергоемкость произведенной продукции на \$1 США составляла 35,37 кВт/час, в Польше – 6,18 кВт/час, в США – 2,92 кВт/час и в Германии 1,46 кВт/час.

Значения энергоемкости Q ВВП Украины в 1995 – 2005 гг. приведены в табл. 55. Как видно, имеет место снижение потребления энергии, но разрыв между Украиной и другими странами велик.

Таблица 55

Значения энергоемкости Q ВВП Украины за 1995 – 2005 гг.

Год	Q , кг усл. топлива / грн
1995	1,2
1997	1,1
1999	1,07
2001	0,92
2003	0,85
2005	0,75

В металлургической промышленности Украины уровень потребления энергии превышает общемировые в 3,3 раза, в химической отрасли – в 1,9 раза. Из 27 работающих украинских металлургических комбинатов мировым стандартам энергопотребления соответствуют – 9, в химической промышленности – из 1 300 предприятий только 12, а в машиностроении 540 наших заводов не соответствуют мировому уровню.

Главными источниками получения энергии в Украине являются уголь, газ, нефть, ядерное топливо, гидроэнергетика и нетрадиционные источники (энергия солнца, торф, сланцы, ветровая энергия и др.).

По запасам угля Украина занимает 6 место в мире. В 2010 году было добыто 100 млн. тонн угля. При такой интенсивности добычи угля его запасов хватило бы еще примерно на 300 лет, если не экспортировать уголь.

Проблем угледобычи несколько:

- мало коксующихся углей, а они являются основными для производства металлов, поэтому приходится завозить этот вид угля из Польши и даже из Австралии;

- глубокое залегание пластов угля, что усложняет и удорожает их добычу;

- тонкие и «тощие» пласты, что требует постройки малых шахт в большом количестве, а они малоэффективны;

- проблемы с экологией, безопасностью труда шахтеров.

Украина располагает собственными месторождениями газа. Его добыча составляет приблизительно 21 млрд. м³ газа в год (данные 2010 года), можно увеличить добычу до 30 млрд. м³, если освоить шельф Черного и Азовского морей и пробурить глубокие скважины на суше. Однако потребление газа составляет около 60 млрд. м³, т.е. большая часть газа будет закуплена за границей по высоким ценам. Следовательно, газ требует замены на другие источники.

Украина имеет запасы нефти (подтвержденные) 0,4 млрд. баррелей (1 баррель = 158,76 л) и занимает 52 место в мире, но при этом потребляет нефти в 4,2 раза больше, чем добывает и поэтому до 75 % нефти приходится импортировать. Главными импортерами на 2010 год являются Россия и Казахстан, цены на нефть нестабильны.

В стране имеется 17 атомных реакторов, которые производят самую дешевую в стране электроэнергию в количестве около 52 % всего производства 2010 года. Украина имеет месторождения урана, ведется его добыча и запасов хватит на сотни лет, однако существуют проблемы экологии и безопасности АЭС, так как последние события марта 2011 в Японии (авария на АЭС Фукусима) ставят под сомнение активное развитие энергии атома.

В Украине развита гидроэнергетика. На ГЭС производят около 7 % электроэнергии от всего производства, однако перспектив развития это направления не имеет.

Очень важно использование возобновляемых источников энергии (ветро- и гидроэнергии, солнечной энергии, применение тепловых насосов и др.) или их еще называют нетрадиционными. Однако в Украине они развиты слабо, тогда как в Германии этими видами энергии заменили около 20 % мощностей АЭС.

Нефть и остальные виды энергетического сырья если и падают в цене на мировых рынках, то лишь на короткий период и только для того, чтобы затем взять очередную вершину. Пока опасения экономистов о том, что стоимость барреля сначала в 50, а потом в 60, а затем и в 70 долларов приведет к коллапсу мировой экономики, не сбываются. Вряд ли стоит доверять и тем, кто считает, будто в ближайшие годы «черное золото» одномоментно и надолго рухнет в цене до \$ 25 ... 30. Объяснения, что удорожание сокращает спрос, а значит, создает невостребованные излишки нефти, можно было бы считать приемлемым, если бы Европа и США отгородились от остального мира. Между тем, сейчас

любые излишки нефти готовы использовать Китай, Индия и ряд других государств Азиатского региона с их растущими экономиками. Так, Китай вышел на второе место мировых импортеров этих углеводородов, оттеснив Японию, и в последние годы обеспечивает спросом не менее 36 % от всего роста нефтепотребления на планете.

Запасы ресурсов, которыми сейчас располагают страны, являются стратегической тайной каждого из государств–энергоэкспортеров. Повышение цен делает рентабельными даже те месторождения, которые в других условиях были нерентабельны. Надо признать, что новые нефть, уголь, природный газ и прочие продукты, которые кидают в ту или иную топку, природа больше не производит. А значит, рано или поздно они закончатся.

Активнее всех по придумыванию новых видов топлива выступают до сих пор уроженцы Германии. В Штутгарте применяют в качестве топлива отходы от производства сыра. А в Пригнице местные немцы с 1999 года экспериментируют с альтернативными источниками энергии. И там дело поставлено уже на промышленные рельсы: они заправляют 400-литровые баки рейсовых автобусов соевым и рапсовым маслом. В некоторых городах Бельгии автобусы тоже ездят на растительном масле, а вот в Канаде разработали двигатель, работающий на рыбьем жире. Говорят, что после проезда автобуса на рапсовом масле в воздухе надолго остается аромат жареной картошки.

В Сингапуре местный бизнесмен вообще постарался обойтись без исходных издержек и стал производить топливо... из кухонных отходов. В ресторанах и кафе после жарки растительное масло обычно просто сливают в канализацию. Так он забирает такие отходы, перерабатывает и на их основе выпускает вполне качественный биодизель. Как заверяет предприниматель, на таком топливе его собственный автомобиль ездит уже почти год.

Еще один китайский умелец вспомнил опыт предков (или воспользовался историческими наработками народов Средней Азии, которые издавна топили печи кизяком (высушенным навозом).

К перспективным альтернативным источникам энергии сейчас можно отнести водород, солнечную энергию, ветряную энергию, энергию приливов и отливов, геотермальную и так называемую биотопливную энергию. Последнюю можно поделить на биодизель (топливо получают из масличных культур) и биоэтанол (по сути, спирт, который можно делать из всего, что содержит целлюлозу, – хоть из табуретки). В Бразилии, где нефти нет, биоэтанол стали применять еще в 1970-х годах, а сейчас им удовлетворяется более 40 % всех потребностей в топливе. Стоимость такого заменителя бензина не превышает 16 центов за литр.

Сейчас в ФРГ более тысячи автозаправок, которые продают топливо растительного происхождения. Разработкой новых видов топлива заняты крупнейшие корпорации по всему миру, самые передовые и высокоразвитые государства принимают программы и открывают гигантское финансирование на подобные проекты в расчете на будущую отдачу.

Так, по подсчетам, опубликованным Worldwatch Institute, мировые инвестиции в возобновляемые источники энергии достигали в 2004 году рекордных

30 млрд. долларов. И в первых рядах подобных поборников нового, как бы странно это ни выглядело на первый взгляд, – крупнейшие нефтяные концерны. Это вполне объяснимо: они хотят получать прибыль и в те времена, когда истощится последняя нефтяная скважина.

Например, один из нефтяных монстров «BP» уже через пару лет хотел бы продать электроэнергию, полученную от солнечных батарей, не меньше чем на миллиард долларов. Shell вместе с компаниями Siemens и Eon организовали совместную компанию по поиску экономичных способов создания и эксплуатации солнечных батарей. Англо–голландская корпорация Royal Dutch/Shell запланировала направлять в разработку альтернативной энергетики 0,5 – 1 млрд. долларов ежегодно, в основном, на освоение ресурсов Солнца и ветра.

Евросоюз, например, поставил задачу: к 2010 году увеличить долю альтернативных источников до 12 % от общего объема потребления. И в Европе есть у кого перенимать опыт. Для этого даже не надо лететь за океан, в ту же Бразилию, а достаточно посмотреть, как обстоят дела в Швеции. В 1970 году в этой скандинавской стране доля нефти в общем топливном балансе составляла 77 %. А сейчас ею отапливается меньше 10 % всех домов в стране. На альтернативные и возобновляемые источники энергии в Швеции приходится уже более 26 % всего энергопотребления.

Президентом США был издан указ об опережающем развитии экологически чистых и возобновляемых источников энергии. В планах американской администрации поставлена цель: к 2012 году нарастить производство биодизеля с нынешних 30 млн. галлонов в год до 124 млн. галлонов. Кроме ускорения перехода на биодизельное топливо, президент США предложил ускорить разработку технологий для повышения эффективности солнечных и ветряных электростанций и сделать ставку на гидроэнергетику. Биоэтанол и биодизель производят из растений, которые можно постоянно выращивать и которые поглощают углекислый газ в процессе своей жизни и выделяют в атмосферу кислород.

Неисчерпаемыми являются и другие источники альтернативной энергии: вода, ветер и солнце. Главным вопросом до сих пор остается ценовая конкуренция новых и традиционных источников энергии. С одной стороны, стоимость нефти, газа и производных из этих углеводородов постоянно растет. С другой – ученые разрабатывают новые технологии, которые удешевляют получаемую энергию. Так, цены на солнечную энергию за 10 лет снизились почти вдвое. И хотя она обходится еще дороже традиционной солярки, в ближайшие годы ситуация может измениться. А ведь Солнце всего за три дня посылает на Землю столько энергии, сколько ее содержится во всех разведанных запасах ископаемых.

Другим перспективным видом топлива считается водород. Сжигая его, экологически чисто в процессе горения получается вода. КПД водородного двигателя потенциально гораздо выше традиционных (экспериментаторы добились показателя в 75 % по сравнению с теоретическим КПД традиционного двигателя внутреннего сгорания, равным 40 %). Тем более, что такое топливо – синтетическое, и его можно получать из той же нефти, угля, газа, в конце концов, разлагая воду. Только вот беда, водород – дорог. Впрочем, и здесь в по-

следние годы наметились точки для прорыва. Некоторые ученые считают возможным использовать одни нетрадиционные энергоисточники для получения других. Так, например, появилась идея разлагать воду на водород и кислород за счет электроэнергии, полученной от ветряных двигателей.

Энергобаланс Украины приведен в табл. 56.

Таблица 56

Энергобаланс Украины

Источник энергии	Доля, %
Газ	54
Уголь	15
АЭС	16
ГЭС	2,5
Другие нетрадиционные	1,5
Другие углеводороды	11

После окончания второй мировой войны в качестве репараций из Германии в СССР и в США были вывезены заводы по производству синтетического бензина из угля. В Германии эту технологию изобрели еще в тридцатые годы, и если бы не синтетическое топливо, производство которого составляло примерно 3 миллиона тонн в год, бронетанковые армады Гудериана просто бы не сдвинулись с места. Но с тех самых пор, как освоили газовые месторождения Западной Сибири, в СССР об этих технологиях предпочли забыть. А ведь это перспективное направление. К примеру, Южно-Африканская Республика (ЮАР), когда ей объявили всемирный бойкот из-за режима апартеида, сумела экономически выжить, используя эту технологию, которую довела до совершенства. Сейчас в Китае строится 5 заводов, которые будут использовать ЮАРовские технологии. Хотя нефти в Китае нет, зато, как и у нас, в Украине, есть уголь.

В России сейчас известно лишь об одной компании, которая производит топливо из рапсового масла. Хоть и полей здесь больше, чем в любом другом государстве, и рапс расти может. Причем, по оценке руководства компании, это топливо вскоре обойдется минимум в четыре раза дешевле, чем солярка.

Несмотря на такие низкие темпы поиска альтернативных источников энергии, следует отметить, что в последние годы энергоемкость ВВП Украины снизилась.

В Украине 40 – 45 % всего газа уходит на производство тепла для населения, бюджетных и промышленных предприятий, поэтому модернизация коммунальной энергетики – основной резерв экономии газа. По данным Госэкономсбережения Украины при отоплении до 50 % тепла теряется: в самом котле при его производстве, в теплотрассах при транспортировке, в теплопунктах и жилых домах.

Чтобы в доме была хорошая теплоизоляция, стена должна быть толщиной 75 – 80 см, т.е. в два раза толще старых стен, а экономия от такой изоляции ощутится через 10 – 15 лет и только в новых домах. Утилизация выхлопных га-

зов позволяет сберечь 6 – 7 млрд. м³ газа в год при сроке окупаемости технических средств 2 – 3 года.

В Украине в настоящее время установлено всего 90 утилизаторов, а котлов – около 100 000, из них 30 000 малой мощности, находящихся в частной собственности.

Когенерационная технология – это безопасный способ получения тепла и электричества. На работающем котле в течение одного года надстраивается турбина или газопоршневой двигатель. Газ поступает вначале в турбину или двигатель, где сжигается и используется для производства электроэнергии, а выхлопные газы с температурой 450 ... 700 °С идут в котел. После котла газ имеет температуру 100 °С – если нет утилизации, и 60 °С – если имеется утилизации. Когенерация обеспечивает экономию газа до 11 %, а в печах – до 20 %. При этом производится не только тепло, но и электроэнергия. В Украине есть 30 объектов когенерации.

Для справки: самые популярные котлы мощностью – 2 МВт и их потребность составляет 30 000. Изготавливать их могут 30 – 40 предприятий Украины, а при необходимости они могут поступать из-за рубежа.

По стандартам Украины газ из котла выбрасывается при температуре $\theta = 160 \dots 170$ °С, а например, в Германии запрещено выбрасывать газ из котла после отработки и при температуре 60 °С.

Для того чтобы на морозе не образовывался конденсат, необходимо тепло забирать для полезных целей и специально вызывать конденсацию. Конденсат в этом случае пускают на переработку, а при охлаждении его с 170 до 60 °С образуется тепло конденсации 600 ккал/кг. Этот процесс позволяет повысить коэффициент использования топлива еще на 10 %. Замена старой системы автоматики на современную позволяет увеличить экономию газа на 5 %.

Ближайшая перспектива сбережения ресурсов – это тепловые насосы – завтрашний день энергетики!

Предполагается, что к 2020 году 70 % тепла в коммунальной сфере будет поступать через тепловые насосы (по данным журнала «Эксперт», №8, 2006. – С. 24–26).

Шахтный метан – газ, которого в Украине триллионы м³ и который можно утилизировать и использовать в миниэлектростанциях. В США этот газ после обработки попадает в обычную сеть.

В Украине металлургия потребляет 7 – 8 млрд. м³ газа, при этом главными источниками потребления газа являются доменное и мартеновское производство (Украина и Россия – 2 страны в мире, где еще осталось такое производство). В Украине 45 % стали производят таким способом, а в России – 25 %.

Парогазовая энергетика имеет КПД 35 %, при использовании котлов-утилизаторов и паровых турбин – КПД 60 %. На Западе уже имеются разработки с КПД до 80 %.

Машиностроение Украины является одним из самых крупных потребителей как электрической, так и тепловой энергии. Поэтому вопросы экономии всех видов энергии для нашей страны чрезвычайно важны сегодня и еще важнее будут завтра.

3.1. Энергозатраты на разные технологические процессы и операции

В ходе технологического процесса или его отдельной части (операции) для реализации воздействия в соответствии с требованиями положенного в его основу физико-химического процесса необходимо затратить определенную работу и ее носителя – энергию.

По данным В.С. Гусарева энергия, затраченная на производство изделия E_{II} , определяется [6]:

$$E_{II} = E_M + E_T + E_N,$$

где E_M – энергозатраты на производство материала;

E_T – технологические энергозатраты;

E_N – энергозатраты на обслуживание внешней среды.

Энергозатраты на производство материала можно представить:

$$E_M = m_M \cdot C_M,$$

где m_M – масса материала на изделие, кг;

C_M – энергозатраты материала, МДж/кг (табл. 57).

Таблица 57

Энеогозатраты материала

Материал	Энергосодержание, МДж/кг
Нефть	3,6
Цемент	7,5
Чугун	18,0
Стекло	32,0
Сталь (лист)	57,0
Медь (лист)	150,0
Алюминий	300,0
Титан	1 100,0

Технологические энергозатраты E_T можно записать так:

$$E_T = P_p \cdot t_p + P_o \cdot t_o + \frac{t_m}{t_{об}} \cdot M_{об} \cdot C_{тоб},$$

где P_p – удельная энергия рабочего (человека), кДж/мин (табл. 58);

t_p – время на вспомогательные переходы, мин;

P_o – мощность, кВт;

t_o – время основное, мин;

t_m – время штучное, мин;

M_o – масса машины (станка), кг;

$C_{тоб}$ – аккумулируемая энергия машины (станка), кДж/кг;

$t_{об}$ – материальный («моральный») ресурс машины, мин.

Слагаемое $P_o \cdot t_o$ можно представить в виде:

$$P_o \cdot t_o = P_m \cdot t_m + a \cdot V,$$

где a – удельная работа (энергия) процесса, приходящаяся на 1 см^3 материала или вещества, кДж/см³;

V – объем удаляемого или преобразуемого вещества, см³.

Таблица 58

Энергозатраты на деятельность человека

Виды деятельности	Энергозатраты, кДж/кг
Машиностроение и механообработка	10,5 – 19,3
Станочные работы	10,5 – 15,1
Слесарные работы	21,4 – 23,1
Электротехника	21,4 – 24,0
Металлургия	19,3 – 52,0
Строительство	17,2 – 17,8
Чтение лекций в аудитории	9,6 – 18,8
Печатание на механической машине	5,9 – 8,8
Игра на скрипке или фортепиано	9,2 – 11,2
Игра в баскетбол	37,6 – 40,0
Игра в теннис	29,8
Бег	90,0 – 95,0
Отдых лежа	3,8 – 5,5
Отдых сидя	5,9 – 7,2

Подводя итоги, можно записать общие энергозатраты E_{II} в кДж на производство штучного изделия:

$$E_{II} = m_M \cdot C_m + P_p \cdot t_p + P_m \cdot t_m + a \cdot V + \frac{t_m}{t_{об}} \cdot M_{об} \cdot C_{тоб}.$$

Из анализа этой зависимости вытекает возможность варьирования энергозатратами на изготовление изделий из различных материалов:

$$\Delta E_m = E_m^{(1)} - E_m^{(2)} = m_m \cdot (C_m^{(1)} - C_m^{(2)}),$$

с использованием различных технологий:

$$\Delta E_T = E_T^{(1)} - E_T^{(2)} = V \cdot (a^{(1)} - a^{(2)}) + P_m \cdot t_m$$

и другим решениям, которые могут быть менее энергозатратными и поэтому более дешевыми.

При выполнении технологической операции затраты энергии могут выглядеть, по данным В. С. Гусарева, следующим образом:

$$E_{оп} = E_p + E_{np} + E_m,$$

где E_p – затраты энергии рабочего;

E_{np} – затраты энергии на процесс резания;

E_m – затраты энергии обрабатывающей машины.

Если две операции отличаются только применяемым оборудованием, то:

$$E_p^{(1)} = E_m^{(2)} \text{ и } E_n^{(1)} = E_n^{(2)},$$

а энергозатраты обрабатывающей машины можно представить:

$$E_m = t_m \cdot \left(P_m + m \cdot \frac{e}{T} \right),$$

где t_m – машинное время;

P_m – мощность машины;

m – усредненная масса машины;

T – ресурс эксплуатации;

e – энергосодержание (удельная энергия) машины.

Эффект экономии энергии равен:

$$\Delta E_m = E_m^{(1)} - E_m^{(2)} = t_m^{(1)} \cdot \left(P_m^{(1)} + m^{(1)} \cdot \frac{e^{(1)}}{T^{(1)}} \right) - t_m^{(2)} \cdot \left(P_m^{(2)} + m^{(2)} \cdot \frac{e^{(2)}}{T^{(2)}} \right).$$

В табл. 59 на примере 2-х вариантов станков: револьверного IB340 Ф2 и полуавтомата шестипиндельного 1А 282Б показана экономия энергии при изготовлении крышки в соответствии с ГОСТ 11641–89.

Таблица 59

Экономия энергии при изготовлении крышки (ГОСТ 11641–89)
по двум вариантам техпроцесса

Критерии	Варианты	
	станок IB340 Ф2	станок 1А 282Б
t_m , с	100	20
P_m , Вт	$6 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$
m , кг	$2,5 \cdot 10^3$	$13 \cdot 10^3$
T , с	$7,2 \cdot 10^7$	$7,2 \cdot 10^7$
e , Вт/кг	$2 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^7$
E_m , Дж	$7 \cdot 10^5$	$5,3 \cdot 10^5$

Экономия энергии на одно изделие (обработка на станке 1А 282Б) равна:

$$\Delta E_m = 7 \cdot 10^5 - 5,3 \cdot 10^5 = 1,7 \cdot 10^5, \text{ Дж.}$$

При выпуске 1 000 крышек экономия составит $\Delta E_{m1000} \approx 50$ кВт/ч.

Если воспользоваться примерным эквивалентом: 1 кг нефти ≈ 1 кВт/ч электроэнергии ≈ 4 грн, то эта экономия составит приблизительно 200 грн.

Таким образом, на основе анализа двух операций точения, реализуемых на разных станках, показано, что существует хоть и не большой, но резерв экономии энергии.

Важно сравнить два процесса, часто применяемые для обработки поверхностей по h7–h8 с $R_a = 1$ мкм: тонкое точение на алмазносточном станке и чистовое шлифование на внутришлифовальном станке.

Работа или энергия A , затрачиваемая на чистовое точение и шлифование, может быть представлена:

$$A = a \cdot V$$

или по процессам: шлифование – $A_{ш} = a_{ш} \cdot V_{ш}$; тонкое точение – $A_T = a_T \cdot V_T$,
 где $A_{ш}$ и A_T – работа, Дж/см³;

$a_{ш}$ и a_T – удельная работа, Дж/см³;

$V_{ш}$ и V_T – объем материала – воздействия, см³.

В табл. 60 приведены данные для 28 различных технологических операций с указанием удельной работы a для них [8].

Таблица 60

Значения удельной работы (энергии) различных технологических операций

Наименование процесса	Наименование операции	Удельная работа a , Дж/см ³
ОМД (обработка металлов давлением)	Холодная листовая гибка	5 ... 10
	Холодная гибка проф. (труб) на роликах	20 ... 40
	Штамповка на гидравлических прессах	20 ... 60
	Штамповка взрывом	20 ... 76
	Горячая штамповка без учета нагрева	60 ... 80
	Волочение проволоки	66 ... 70
	Волочение труб без оправки	(2,1 ... 2,7)·10 ²
	Волочение труб с оправкой	(5 ... 6)·10 ²
	Холодная резка на ножницах	(4 ... 5)·10 ²
	Обдирка однопроходная	(4 ... 5,5)·10 ²
	Выдавливание холодное	(5,5 ... 8,5)·10 ²
	Высадка холодная	(5,6 ... 14)·10 ²
ОМР (обработка металлов резанием)	Резание баллистическое	(1,0 ... 1,3)·10 ³
	Точение	(1,7 ... 2,5)·10 ³
	Протягивание	(2,5 ... 4,8)·10 ³
	Зенкерование	(3,0 ... 4,8)·10 ³
	Сверление	(1,0 ... 6,2)·10 ³
	Фрезерование	(5,0 ... 7,5)·10 ³
	Развертывание	(1,2 ... 3,0)·10 ⁴
	Шлифование	(5,1 ... 7,5)·10 ⁴
ФХО (физико-химическая обработка)	Электроконтактная обработка	(0,3 ... 1,2)·10 ⁴
	Электрохимическое шлифование	(1,4 ... 5,8)·10 ⁵
	Электрохимическое полирование	(2,2 ... 4,3)·10 ⁵
	Электронно-лучевая обработка	(2,4 ... 5,8)·10 ⁵
	Электроимпульсная	(3,5 ... 7,0)·10 ⁵
	Ультразвуковая	(0,6 ... 3,6)·10 ⁶
	Электроискровая	(0,4 ... 5,5)·10 ⁶
	Лазерная	(2,8 ... 4,7)·10 ⁷

При одинаковом припуске на точение и шлифование:

$$\frac{A_{ш}}{a_{ш}} = V_{ш} = V_t = \frac{A_T}{a_T}.$$

Из таблицы следует: $a_{ш} = (5,1 ... 7,5) \cdot 10^4$; $a_T = (1,7 ... 2,5) \cdot 10^3$;

$$\frac{A_{ш}}{A_T} = \frac{a_{ш}}{a_T} = \frac{(5,1 \dots 7,5) \cdot 10^4}{(1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3} \cong 30.$$

Как видно, затраты энергии на тонкое точение в 30 раз меньше, чем на шлифование, а отсюда можно сделать выводы о целесообразности применения того или иного метода обработки.

3.2. Работа технологической операции (процесса)

Приведенные выше материалы показывают, что технология машиностроения содержит широкий спектр физических процессов, начиная от обработки металлов давлением (ОМД) и обработки металлов резанием (ОМР) до физико-химической обработки (ФХО).

Основным показателем этих процессов, несмотря на их физическое разнообразие, является время τ или обратная величина – производительность ($1/\tau$). Как физическая категория, время – длительность (период) протекания процессов, а производительность – частота, с которой производится продукт технологического процесса, иначе говоря – это скорость выпуска технологической продукции.

Время, как основной технологический показатель, необходим для анализа и синтеза процессов, но не является достаточным его показателем.

Любой физический (химический) процесс, положенный в основу технологического процесса (операции) для выполнения технологического воздействия, требует затраты работы и его носителя энергии.

Работа и ее эквивалент – энергия являются необходимым и достаточным показателем технологического процесса (операции) вне зависимости от физического содержания. Поэтому этот показатель часто используют в инженерной практике для оценки удельной работы процесса и работы технологической операции.

Удельная работа (энергия) процесса a – это энергия (Дж), необходимая для выполнения работы над объемом материала (в 1 см^3). Значения удельной работы (энергии) различных технологических операций приведены в табл. 60. Удельная энергия процесса характеризует технологический процесс по расходу энергоресурса. Основные классы технологических процессов существенно различаются по удельной энергии (Дж/см³): процессы ОМД ($5 \dots 5,5 \cdot 10^2$); ОМР ($2 \cdot 10^3 \dots 1,5 \cdot 10^4$); ФХО ($3 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^7$).

Как видно, наиболее экономичные процессы ОМД – холодная гибка листов (производство кузовов автомобилей), штамповка взрывом (производство емкостей бытовой техники). Достаточно экономные процессы ОМР в традиционных операциях точения (обработка тел вращения) и фрезерования (обработка плоскостей корпусов). Совершенно неэкономичные процессы ФХОМ – ультразвуковая и лазерная обработка. Эти процессы специального назначения, необходимые для обработки сверхтвердых материалов.

Удельная работа (энергия) физического процесса (операции) a определена на интервалом значений, который зависит от обобщенных физико-

механических характеристик обрабатываемых материалов в данном конкретном процессе. Нижняя граница интервала соответствуют менее, а верхняя более высоким характеристикам материалов.

Так, например, холодная гибка на роликах труб из алюминия $a_{ал} = 20$ Дж/см³, а из стали $a_{ст} = 40$ Дж/см³, что приводит к двукратной экономии энергии на производство изделий при одинаковом их функциональном применении. Это лишь один из многих примеров того, что на производство алюминия и его сплавов и заготовок из них последнее время обращено чрезвычайное внимание (см. пп. 1.1.6).

Удельный показатель работы (энергии) в технологическом процессе можно использовать при определении общей работы (энергии) на выполнение технологической операции.

Работа технологической операции затрачивается на преобразование заготовки в изделие (в объемах, определенных геометрическими величинами):

$$A = a \cdot V$$

– для процессов ОМД, т.к. соблюдается принцип постоянства объема заготовки и изделия, т.е. $V_з = V_д = V$; $A = a \cdot \Delta V$;

– для процессов ОМР и ФХО, т.к. воздействию подвергается не весь объем, а его часть $\Delta V = V_з - V_д$.

Используя условие одинакового объема преобразования для различных по технологическому (и физическому) содержанию процессов, можно произвести их сравнение по энергетическим затратам (см. приведенное ранее сравнение тонкого точения и шлифования).

Закон сохранения работы (энергии) в одинаковом (одноименном) процессе рассмотрим ниже.

При выборе технологического процесса (операции), выполняемого на оборудовании (станках) с различной степенью концентрации инструментов, традиционно отдается предпочтение тому, который имеет более высокую производительность (меньше времени рабочего процесса). Поэтому важно провести анализ операции механической обработки в двух вариантах – точение на универсальном станке одним инструментом и на многорезцовом с максимальной концентрацией инструментов и определим работу технологического процесса (операции).

Как известно, механическая работа A для большинства технологических процессов определяется произведением пути l на усилие F , т.е.

$$A = l \cdot F.$$

Рассмотрим в качестве примера процесс обработки точением валика, имеющего n одинаковых ступеней (длиной l). Во-первых, этот валик можно обработать на универсальном станке одним инструментом и тогда путь будет равен $n \cdot l$ при усилии F . Во-вторых, валик можно обработать на многорезцовом станке n инструментами (каждая ступень своим инструментом). Инструменты обеспечивают одновременную обработку с усилием $n \cdot F$ при ходе l . Работа в первом случае равна $A_1 = F \cdot n \cdot l$, во втором случае – $A_2 = F \cdot n \cdot l$, т.е. $A_1 = A_2$. Вместе с тем, как известно, концентрация инструментов на операции

(процессе) ведет к сокращению времени операции и повышению производительности: $t_{m_1} = \bar{S}$ и $t_{m_2} = \bar{S}$.

Здесь $n \cdot l > 1$ и $t_{m_1} > t_{m_2}$ или $t_{m_1} / t_{m_2} = n$.

Однако, как показано выше, $A_1 = A_2$. Поэтому рассмотрим другие составляющие затрат энергии A , определяемые через время и мощность процесса:

$$A_1 = P_1 \cdot t_{m_1}; \quad A_2 = P_2 \cdot t_{m_2}.$$

Поскольку $A_1 = A_2$, то получим $P_1 \cdot t_{m_1} = P_2 \cdot t_{m_2}$ или $t_{m_1} / t_{m_2} = P_1 / P_2$.

Таким образом, уменьшение времени обработки в n раз требует увеличения используемой мощности в n раз. Выигрыш в производительности оборачивается проигрышем в мощности оборудования при концентрации инструмента.

Здесь следует отметить, что мощность оборудования, используемого для осуществления процесса, имеет нижнее и высшее ограничение:

$$P_{min} < P_i < P_{max}.$$

Нижнее ограничение P_{min} – наименьшая величина мощности, при которой может протекать процесс, преодолевая тепловые и упругие межмолекулярные связи, а также в процессах ОМД и ОМР – затраты на трение.

Верхнее ограничение P_{max} – наибольшая величина мощности, после которой наступает физическое разрушение системы оборудования, инструмента, изделия.

Из этого можно сделать вывод, что, исключив действующие в процессе возмущения (потери внешней работы на трение, тепло, межмолекулярные связи), можно представить «идеальный» технологический процесс (операцию) следующими уравнениями: $A = a \cdot V$ и $A = P \cdot t$, которые после объединения приводят к общему уравнению идеального технологического процесса преобразования материала (вещества):

$$a \cdot V = P \cdot t,$$

где a – удельная работа (энергия), Дж/см³;

V – объем преобразования, см³;

P – мощность преобразования, Вт;

t – время преобразования, с.

Из этого уравнения можно получить все необходимые для исследования расчеты и сравнения энергетической эффективности:

– удельная работа (энергия) преобразования вещества (материала):

$$a = \frac{P \cdot t}{V};$$

– мощность, необходимая для реализации процесса в заданный отрезок времени:

$$P = \frac{a \cdot V}{t};$$

– время длительности конкретного процесса при принятой его мощности:

$$t = \frac{a \cdot V}{P};$$

– объем (припуск) преобразования на определенном оборудовании при заданном процессе:

$$V = \frac{P \cdot t}{a}.$$

Первое выражение позволяет произвести выбор физического процесса при заданных условиях: мощности, времени и объеме преобразования. Второе, третье и четвертое выражения устанавливают связь между этими параметрами в заданном (принятом) физическом процессе.

Экспериментальные исследования технологических процессов, в которых определялась затраченная в процессе энергия, указывают на соотношение:

$$a_1^1 < P_1.$$

Это соотношение было использовано для определения коэффициента технологического использования (КТИ) процесса.

Выяснение обстоятельств, при которых подводимая энергия больше используемой энергии, необходимой для осуществления физического процесса, побудило исследователей искать объяснение данному фактору. Различные авторы выдвигали различные предложения, которые сводились к затратам энергии: на холостой ход; на трение (механическое, электрическое, тепловое и т.п.); на фазовый переход. Рассмотрение реальных технологических процессов обработки различными физическими методами позволяет предложить следующую интерпретацию энергетического баланса:

– для «холодных» процессов (ОМД) $A_x = a \cdot V + \frac{m \cdot v^2}{2}$, где второе слагаемое определяет кинетическую составляющую, реализуемую технологической системой;

– для «горячих» процессов (ФХО) $A_r = a \cdot V + \Delta S \cdot T$, в которых второе слагаемое определяет энтропийную составляющую технологического процесса;

– для «реальных» смешанных процессов (ОМР) $A = a \cdot V + \frac{m \cdot v^2}{2} + \Delta S \cdot T$,

где соответственно второе и третье слагаемые определяют кинетическую и энтропийную составляющие технологического «реального» процесса.

Общее уравнение технологического процесса принимает вид:

$$P \cdot t = a \cdot V + \frac{m \cdot v^2}{2} + \Delta S \cdot T.$$

Анализ этого уравнения энергозатрат на технологический процесс позволяет показать доминирование отдельных составляющих в «реальных» процессах и предложить возможные пути совершенствования как процессов, так и технологических систем, предназначенных для их реализации.

Интересным фактором является расход энергозатрат на метод подачи жидкости (среды) и ее очистку (табл. 61 – табл. 63): чем больше затраты энергии, тем более совершенный метод обработки можно реализовать и тем более высокие показатели качества поверхности будут обеспечены и, очевидно, тем большая экономия ресурсов будет реализована.

Таблица 61

Удельные энергозатраты, связанные с подачей единицы объема СОРС
в зону шлифования и очистки круга

№	Способ подачи СОРС	Удельные энергозатраты, кВт·мин/дм ³
1	Полив (п)	0,00062
2	Напорный (н)	0,018
3	Через канал в круге (кк)	0,0018
4	Через поры круга (пк)	0,0002
5	Струйно-напорный внезапный	0,05
6	Наложение УЗК на струю СОРС	0,061

Таблица 62

Изменение шероховатости поверхности R_a (мкм)
в зависимости от удельных затрат (43 коп/дм³·мин при очистке СОРС)

№	Тип очистки	43 коп/дм ³ ·мин	R_a , мкм
1	Отстойник	0,0001	7,0
2	Транспортер	0,0005	2,0
3	Сепаратор	0,001	1,0
4	Намывной фильтр	0,0015	0,5

Таблица 63

Удельные энергозатраты при очистке \mathcal{E}_o (кВт·мин/дм³)
в зависимости от способа очистки

№	Способ очистки	\mathcal{E}_o , кВт·мин/дм ³
1	Фильтр-транспортер	0,003
2	Магн.-сепаратор	0,003
3	Гидроциклон	0,004
4	Сетчатый фильтр	0,0003
5	Намывной фильтр	0,0045
6	Флотатор	0,006
7	Магнитный фильтр	0,01
8	Центрифуга	0,0063

Условия уменьшения удельной работы (энергии) процесса механической обработки можно установить на основе аналитической зависимости, приведенной в работе [15]:

$$a = \frac{\sigma_{сж}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2\sigma_{сж}}{K_{рез}},$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²;

β – условный угол сдвига обрабатываемого материала (0 ... 45°);

$K_{рез} = P_z / P_y$;

P_z , P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н.

Исходя из приведенной зависимости, удельная работа (энергии) процесса a имеет размерность Н/м^2 , поскольку от размерности Дж/м^3 с учетом размерности $\text{Дж}=\text{Н}\cdot\text{м}$, несложно перейти к размерности Н/м^2 . Следовательно, с физической точки зрения удельная работа (энергии) процесса a идентична условному напряжению резания σ , равному отношению тангенциальной составляющей силы резания P_z к площади поперечного сечения среза $S_{\text{срез}}$.

При максимальном значении условного угла сдвига обрабатываемого материала $\beta=45^\circ$ удельная работа (энергии) процесса $a = \sigma_{\text{сж}}$, что равносильно разрушению прямолинейного бруса в условиях его сжатия силой P_z . Таким образом, наименьшее значение параметра a равно пределу прочности на сжатие обрабатываемого материала $\sigma_{\text{сж}}$, а наибольшее значение параметра a , исходя из условия $\beta=0$, равно бесконечности. Следовательно, параметр a изменяется в широких (бесконечных) пределах и основным условием его уменьшения до минимального значения $a = \sigma_{\text{сж}}$ является увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала $\beta \rightarrow 45^\circ$.

Очевидно, с физической точки зрения условное напряжение резания σ не может превышать предельное значение $\sigma_{\text{сж}}$. В данном случае это связано с тем, что условное напряжение резания σ определяется отношением $P_z / S_{\text{срез}}$, а не отношением тангенциальной составляющей силы резания P_z к фактической площади контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента, которая может многократно (до 10 раз) превышать площадь поперечного сечения среза $S_{\text{срез}}$. Поэтому противоречивое, на первый взгляд, условие $\sigma > \sigma_{\text{сж}}$ и обусловлено превышением фактической площади контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента над площадью поперечного сечения среза $S_{\text{срез}}$.

Согласно формуле К. А. Зворыкина [16], угол сдвига β равен:

$$\beta = 45^\circ + \frac{(\gamma - \psi)}{2},$$

где γ – положительный передний угол режущего инструмента;

ψ – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ($\text{tg}\psi = f$ – коэффициент трения).

Следовательно, увеличить угол сдвига β и соответственно уменьшить параметр a можно увеличением угла γ и уменьшением угла ψ (коэффициента трения f).

Для отрицательного переднего угла режущего инструмента γ формула К. А. Зворыкина принимает вид:

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\gamma + \psi)}{2}.$$

В этом случае с увеличением отрицательного переднего угла режущего инструмента γ угол сдвига β уменьшается, что приводит к увеличению параметра a . Этим объясняются более высокие значения энергоемкости обработки

процесса шлифования и в целом процессов абразивной обработки (которые имеют место на практике) по сравнению с процессами лезвийной обработки вследствие резания абразивными зернами, имеющими отрицательные передние углы. Применение эффективных технологических сред, способствующих уменьшению интенсивности трения в зоне резания и соответственно уменьшению угла ψ , приводит к увеличению угла сдвига β и уменьшению удельной работы (энергии) процесса a .

Из приведенной выше зависимости для определения параметра a следует его уменьшение с увеличением коэффициента $K_{рез} = P_z / P_y$. Экспериментально установлено, что с уменьшением угла сдвига β уменьшается коэффициент $K_{рез} = P_z / P_y$, принимая значения меньше единицы. Это соответствует условиям абразивной обработки. При лезвийной обработке коэффициент $K_{рез} > 1$ и параметр a принимает меньшие значения, чем при абразивной обработке.

По мере износа лезвийного инструмента его фактический передний положительный угол уменьшается, что приводит к уменьшению угла сдвига β и увеличению параметра a . В этом случае значения удельной работы (энергии) процессов лезвийной и абразивной обработки могут быть сопоставимы, что имеет место, например, при обработке алмазно-абразивными инструментами, характеризующимися высокой остротой режущих кромок и низким коэффициентом трения.

Параметры режима резания, исходя из приведенной зависимости, в явном виде не влияют на параметр a , однако они влияют на углы γ и ψ , входящие в зависимость для определения угла сдвига β . Так, экспериментально установлено, что увеличение скорости резания при лезвийной обработке приводит к уменьшению интенсивности трения в зоне резания, условного угла трения ψ и соответственно к увеличению угла сдвига β и уменьшению удельной работы (энергии) процесса a . Это позволяет уменьшить силовую и тепловую напряженность процесса резания и повысить показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей.

С увеличением подачи увеличивается фактический передний угол инструмента, что также способствует увеличению угла сдвига β и уменьшению удельной работы (энергии) процесса a .

При шлифовании параметр a следует рассматривать суммой двух слагаемых, обусловленных энергией «чистого резания» и энергией трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом. Приведенная выше зависимость для определения параметра a получена лишь для условий «чистого резания». Поэтому уменьшить параметр a при шлифовании можно, прежде всего, за счет уменьшения или даже исключения трения связки круга с обрабатываемым материалом.

Установлено, что энергия обработки, обусловленная трением связки круга с обрабатываемым материалом, может многократно (до 10 раз) превышать энергию «чистого резания». В связи с этим следует применять эффективные методы правки кругов, например, электроэрозионную или электрохимическую

правку алмазных кругов на прочных металлических связках типа М2-01, которые фактически не поддаются обычной механической правке, осуществляемой с помощью абразивного бруска или абразивного круга. Это обеспечивает высокую режущую способность алмазного круга и высокие показатели производительности, точности и качества обработки при шлифовании [17].

Рассматривая $V = Q \cdot t$, параметр a может быть представлен в виде:

$$a = \frac{P \cdot t}{V} = \frac{P}{Q},$$

где V – объем снимаемого материала, м³;
 Q – производительность обработки, м³/с;
 P – мощность резания, Вт;
 t – время обработки, с.

Следовательно, для заданной мощности резания P , определяемой, например мощностью металлорежущего станка, увеличить производительность обработки Q можно исключительно уменьшением параметра a за счет применения менее энергоемких способов обработки [18; 19].

Затраты на обработку, связанные с заработной платой рабочего-станочника, выражаются:

$$З = N \cdot t_0 \cdot S_1 \cdot k,$$

где N – количество обрабатываемых деталей;
 t_0 – основное технологическое время обработки, мин;
 S_1 – тарифная ставка рабочего, грн/мин;
 k – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего.

Представляя $N \cdot t_0 = V_{\Sigma} / Q$, получено:

$$З = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k}{Q},$$

где V_{Σ} – объем материала, снимаемого с N деталей, м³.

Как видно, затраты на обработку $З$ вполне однозначно определяются производительностью обработки Q : чем больше Q , тем меньше $З$.

Выражая $Q = P / a$, имеем:

$$З = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k \cdot a}{P} = \frac{S_1 \cdot k \cdot A}{P},$$

где $A = a \cdot V_{\Sigma}$ – работа резания, Дж.

Для заданных значений V_{Σ} и P , уменьшить затраты на обработку $З$ можно за счет уменьшения параметра a или работы резания A . Поэтому процессы лезвийной обработки, которые характеризуются меньшими значениями параметров a и A по сравнению с процессом шлифования, требуют и меньших затрат для их практической реализации [18; 19].

Из зависимости также следует, что увеличение мощности станка P затраты на обработку $З$ уменьшаются, т.е. целесообразно обработку производить на металлорежущих станках повышенной мощности.

Зависимость для определения суммы двух статей затрат на обработку, связанных с заработной платой рабочего-станочника и расходом режущих инструментов, принимает вид:

$$Z = N \cdot t_0 \cdot S_1 \cdot k + N_0 \cdot Ц,$$

где $N_0 = N / n$ – количество потребляемых режущих инструментов;

$n = T / t_0$ – количество деталей, обработанных одним инструментом;

T – стойкость режущего инструмента, мин;

$Ц$ – цена режущего инструмента, грн;

С учетом зависимости для определения стойкости режущего инструмента

$T = \frac{C_4}{V_{рез}^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}$ [16] и зависимости $N \cdot t_0 = V_{\Sigma} / Q$, затраты на обработку Z описываются:

$$Z = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k}{Q} + \frac{V_{\Sigma} \cdot Ц}{C_4} \cdot \frac{Q^{m_1-1}}{S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q}},$$

где C_4, m_1, q, p – постоянные, определяются экспериментально ($m_1 > p > q$; $m_1 > 1$);

$Q = V_{рез} \cdot t \cdot S$ – производительность обработки при продольном точении, м³/мин;

$V_{рез}$ – скорость резания, м/мин;

t – глубина резания, м;

S – подача, м/об.

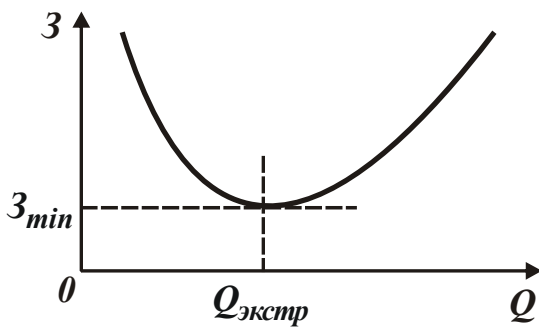


Рис. 16. Зависимость затрат Z от производительности обработки Q

Расчетами установлено, что затраты на обработку Z с изменением производительности обработки Q изменяются по экстремальной зависимости, проходя точку минимума (рис. 16) [20]. Поэтому, подчиняя функцию Z необходимому условию экстремума $Z'_Q = 0$, определены экстремальные значения производительности обработки $Q_{экстр}$, стойкости инструмента $T_{экстр}$ и минимальные затраты на обработку $Z_{мин}$:

$$Q_{экстр} = \left[\frac{C_4}{T_{экстр}} \cdot S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q} \right]^{\frac{1}{m_1}};$$

$$T_{экстр} = \frac{Ц \cdot (m_1 - 1)}{S_1 \cdot k};$$

$$Z_{мин} = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k}{Q_{экстр}} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right].$$

Как видно, с уменьшением $T_{экстр}$ увеличивается значение $Q_{экстр}$ и уменьшается Z_{min} . Это достигается за счет уменьшения параметра m_1 , определяющего износостойкость инструментального материала: чем меньше m_1 , тем она выше. Этим можно объяснить высокую эффективность применения новых твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства ($1 < m_1 < 3$), которые в настоящее время широко внедряются на машиностроительных предприятиях Украины и обеспечивают повышение производительности и качества обработки при одновременном снижении себестоимости обработки. Необходимо отметить, что для отечественных режущих инструментов, изготовленных из твердых сплавов и быстрорежущих сталей, как правило, $m_1 > 5$.

Из приведенных зависимостей следует, что минимальное значение Z_{min} тем меньше, чем больше экстремальное значение $Q_{экстр}$.

Сравнивая полученное значение $Q_{экстр}$ с расчетным значением $Q = P / a$, можно оценить экономическую эффективность рассматриваемого процесса обработки. Если $Q_{экстр} > Q$, то, очевидно, мощности станка недостаточно для реализации минимального значения Z_{min} . Если $Q_{экстр} < Q$, то, наоборот, в процессе обработки недоиспользуется мощность станка.

При условии $Q_{экстр} = Q$ зависимость для определения минимального значения Z_{min} принимает вид:

$$Z_{min} = \frac{V_{\Sigma} \cdot S_1 \cdot k \cdot a}{P} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right] = \frac{S_1 \cdot k \cdot a \cdot A}{P} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right].$$

В итоге получена зависимость, аналогичная зависимости для определения затрат на обработку по заработной плате рабочего-станочника без учета статьи затрат на инструменты. Из зависимости следует, что чем больше параметр a для заданного значения мощности резания P , или работа резания A тем меньше Z_{min} . Следовательно, и в данном случае удельная работа (энергии) процесса a и работа резания A определяют условия уменьшения затрат на обработку и увеличения производительности обработки.

Условие $Q_{экстр} = Q$ можно использовать для определения оптимальных параметров режима резания, характеристик инструментов и других технико-экономических показателей обработки.

Зависимость для определения суммы двух статей затрат на обработку, связанных с заработной платой рабочего-станочника и расходом электроэнергии, описывается:

$$Z = N \cdot t_0 \cdot S_1 \cdot k + N \cdot A \cdot S_{элект},$$

где $S_{элект}$ – стоимость единицы электроэнергии, грн./Дж.

С учетом $A = P \cdot t_0$ зависимость изменится:

$$Z = N \cdot A \cdot \left(\frac{S_1 \cdot k}{P} + S_{элект} \right) = V_{\Sigma} \cdot a \cdot \left(\frac{S_1 \cdot k}{P} + S_{элект} \right).$$

Как видно, затраты на обработку Z однозначно определяются работой резания A или удельной работой (энергии) процесса a . Чем меньше эти параметры, тем меньше затраты на обработку Z . Поэтому параметры A и a можно самостоятельно использовать для оценки экономической эффективности механической обработки.

Данную зависимость можно представить в следующем виде:

$$Z = N \cdot A \cdot t_0 \cdot \left(\frac{S_1 \cdot k}{A} + \frac{S_{\text{электр}}}{t_0} \right).$$

Произведение параметров $A \cdot t_0$ определяет энергетический критерий «действие технологической системы» $D = A \cdot t_0$ [21], который предложено использовать в качестве основного параметра для выбора метода обработки поверхностей. Однако, наряду с этим параметром, в знаменатели приведенной зависимости входят самостоятельно параметры A и t_0 . Поэтому критерий D не может однозначно определять затраты на обработку Z и следовательно не может быть использован в качестве основного параметра для выбора метода обработки поверхностей. Основными параметрами необходимо рассматривать A и a , которые вполне однозначно определяют затраты на обработку Z и которые можно также, как и параметр Z [22] самостоятельно использовать для оценки экономической эффективности различных способов обработки.

3.3. Новые технологии, приводящие к экономии энергии

3.3.1. Снижение расхода энергии путем пересмотра цикла термообработки

Применение высокоскоростных прокатных станов требует повышения точности механической обработки валков, подушек и станин станов, а также повышения точности сборки.

Технология изготовления деталей прокатного оборудования включает в себя большой объем термических операций для стабилизации остаточных напряжений, что в 2 – 3 раза увеличивает цикл изготовления и требует больших затрат энергии на термообработку.

Новая технология изготовления деталей предполагает применение электромеханических методов, таких как электромеханическое точение, фрезерование, накатывание и электромагнитное точение.

Предварительный нагрев снимаемого припуска при электротехнологиях обуславливает его разупрочнение, уменьшение сил резания на 25 – 40 % и позволяет решить проблему стабилизации остаточных напряжений и деформаций деталей по всему циклу обработки. Так, при электромеханическом точении прокатных валков из сталей 50ХН, 90ХН резцами из Т5К10 на режиме: $V_{\text{рез}} = 30 – 35$ м/мин; $t = 15 – 20$ мм; $S_{\text{кр}} = 1,6 – 2,4$ мм/об производительность процесса увеличилась в 2 раза, стойкость инструмента – в 4 раза, остаточные напряжения и деформации деталей снизились на 40 %. Это позволило исключить операцию термообработки с уменьшением на 25 % затрат энергии.

Повышение надежности работы сварных конструкций состоит в уменьшении возникающих при сварке остаточных напряжений, что технологически реализуется чаще всего на операциях термообработки – высокого отпуска. Эта операция весьма энергоемкая, металл разупрочняется, образуется окалина на поверхности.

Новый метод обработки – *электрогидроимпульсная обработка* (ЭГО) состоит в нагружении напряженных участков (сварных швов) многократными импульсами давления, генерируемыми высоковольтными разрядами в воде. При ЭГО остаточные напряжения снижаются на 80 %, т.е. на уровне высокого отпуска. Однако ЭГО в 40 – 50 раз дешевле термообработки, не разупрочняет металл, а за счет повышения служебных характеристик (предел длительной прочности увеличился в 2 раза, коррозионная стойкость – в 5 раз) срок службы конструкций увеличивается, а потребность в металле снижается.

3.3.2. Новые технологии с использованием энергии взрыва

В технологических процессах металлообработки использование энергии взрыва следует рассматривать как одно из значительных достижений последних лет в области науки и техники. Особенности взрывной обработки, связанные с ударными волнами различной интенсивности, позволили создать принципиально новые технологические процессы обработки материалов, расширить границы и возможности существующих технологий.

Энергия взрыва эффективно используется в формообразующих операциях обработки металлов давлением, резки, сварки и упрочнения металлов. С помощью взрыва воспроизводятся тончайшие узоры в металле, ускоряются процессы полимеризации, осуществляется синтез алмазов, создаются высокоплотные компакты из порошковых материалов, стимулируются процессы дефектообразования в сверхтвердых материалах, что резко снижает уровень потребления электроэнергии при дальнейшей их переработке, регулируются величины остаточных напряжений сложных механических конструкций.

3.3.2.1. Сварка взрывом

На первых этапах исследований были установлены поистине уникальные возможности сварки взрывом, позволяющие осуществить прочную связь любых металлов и сплавов.

Прогнозы в области материаловедения сходятся на том, что качественное улучшение свойств материалов в ближайшее десятилетие можно достичь не только усовершенствованием производства и обработки известных сплавов, но и созданием композиционных, в частности, слоистых материалов.

Помимо высокого уровня прочности, коррозионной стойкости и т.д., слоистые материалы обладают одним очень важным свойством – высоким сопротивлением распространению трещин. Поэтому сварка приобретает особое значение в создании различных конструкций с высоким ресурсом надежности и долговечности.

Соединения металлов взрывом осуществляется в режиме высокоскоростного соударения взаимодействующих металлов без предварительного нагрева при высоких энергетических показателях источника и условий деформирования. В основе схватывания металлов при сварке взрывом лежит интенсивная пластическая деформация контактных поверхностей, сопровождающаяся образованием устойчивой либо неустойчивой кумулятивной струи, причем этот процесс сопровождается волнообразованием на границы сварки. Деформирование контактных поверхностей и струеобразование, а, следовательно, и свойства зоны соединения для заданной пары металлов при неизменных условиях определяются: нормальной скоростью соударения, скоростью точки контакта, углом между планкирующим слоем и основанием в процессе накатывания.

Особенностью работ в области сварки взрывом являлись фундаментальные исследования и разработка на их основе технологии производства многослойных труб, как основного вида би- и полиметаллической продукции. Чрезвычайно малая длительность ударных нагрузок (процесс сварки длится несколько десятков микросекунд) потребовала разработки новых методов измерений и создания аппаратуры, позволяющих определять заданные физические величины в условиях высокоскоростного процесса.

Следует отметить, что изучение законов распространения ударных волн в конденсированных средах представляет известные трудности, связанные с оценкой состояния среды, находящейся под высоким динамическим давлением.

3.3.2.2. Упрочнение металлов взрывом

Преимущества взрывной деформации по сравнению с обычными методами деформационного упрочнения, выявившиеся в отсутствии или незначительной остаточной деформации, изотропности упрочнения и деформации при высоких показателях прочности, стимулировали глубокий интерес специалистов к металловедческим проблемам взрывного упрочнения.

Существенным вкладом в проблему упрочнения взрывом следует рассматривать работы, особенностью которых являлись исследования структурных изменений в сталях, подверженных действию различных зарядов взрывчатых веществ (ВВ). На основании исследований установлено, что структурные изменения, обуславливающие высокую степень упрочнения при значительной пластичности материала, могут быть получены в результате использования комбинированных зарядов ВВ с определенными параметрами.

Различие в эффекте упрочнения металлов при контактном взрыве, как было установлено исследованиями, связано с начальными параметрами на границе раздела «ВВ – металл», которые определяются, прежде всего, типом ВВ, условиями развития и взаимодействия детонационной волны с преградой, исходным состоянием и поведением обрабатываемого материала в условиях высокого динамического давления.

Обширные эксперименты по влиянию ударных волн на малоцикловую выносливость металлов, коррозионную стойкость различных сталей показали высокую эффективность взрывной обработки.

Впервые разработана и использована на практике схема упрочнения металлов двухслойным составом ВВ, слои которого резко отличаются по своим физико–химическим свойствам, и показана высокая эффективность этой схемы по сравнению с ранее применяемыми схемами взрывного упрочнения. Установлено, что совместное действие зарядов исключает микро- и макроразрушения материала при его обработке. Исследованы детонационные режимы в комбинированных зарядах с цилиндрической и конической симметрией, на основании которых определен диапазон оптимальных углов встречи фронта детонации с поверхностью металла, при котором достигается максимально возможный эффект упрочнения.

Выполненные исследования по проблемам упрочнения металлов взрывом послужили основанием для разработки технологических условий обработки деталей металлургического и горного оборудования.

Логическим продолжением работ по взрывному упрочнению стали исследования по оценке влияния ударных волн на остаточные напряжения в деталях сложной геометрической формы.

Суть проблемы состояла в том, что целый ряд факторов, связанных с неоднородностью материала изделия, технологией его изготовления, а также конструктивными особенностями, вносят достаточный «запас» остаточных напряжений, существенно ограничивающих ресурс долговечности деталей машин.

Обработка ударными волнами заданной конфигурации и интенсивности, с использованием высокоимпульсных взрывчатых веществ с малой (несколько десятков микрон) критической толщиной радикальным образом изменяет (улучшает) картину напряженного состояния. Достаточно сказать, что такая обработка повышает срок службы деталей в десятки раз.

Перспективность этих работ, как альтернативы термическим и другим способам, связана с возможностью локальной обработки практически неограниченных по весу и габаритам деталей машин и конструкций и существенно экономит расход энергии.

3.3.3. Синтез алмазов и регенерация сверхтвердых материалов в ударных волнах

Создание в 1950-х годах трудами советских и зарубежных ученых системы сохранения продуктов ударного сжатия открыло не только новое направление в физике ударных волн, но и привело к широкому практическому применению самого способа нагружения. К числу крупнейших достижений этого направления следует отнести получение алмазов и других сверхтвердых материалов, активация порошков с помощью ударных волн для дальнейшего использования в традиционных технологиях.

Привлекательность этого направления обусловлена необходимостью развития теоретических представлений о строении и свойствах вещества при действии экстремальных параметров, таких как температура и давление, реализуемых при взрыве, а также все большим проникновением высокоэнергетических способов воздействия в современные технологии.

Физическая особенность ударного сжатия материалов состоит в высокой скорости роста и спада давления, в огромной концентрации энергии, вызывающей структурные и фазовые превращения в микросекундный масштаб времени.

Морфологические особенности и физические свойства кристаллов алмаза, структуры графитизированных материалов исследовались с применением метода ЭМР, рентгена, оптической и электронной микроскопии. Значимость работ заключалась в обосновании гипотетической возможности автоэпитаксиального роста кристаллов алмаза в твердой среде. Впервые было исследовано влияние различных методов обработки (ковка, взрыв, термоциклирование) чугунов с разным химическим составом и структурой матриц на параметры массопереноса углерода.

Проведенные исследования влияния нагружения на реакционную способность твердосплавных массивов показали, что в обработанных материалах существенно повышается внутренняя энергия, плотность различного рода дефектов, а также их химическая активность. Указанные особенности позволили осуществить тонкодисперсное измельчение сплава, исключая физико-термические и металлургические способы регенерации, при этом длительность процесса размола порошка, предварительно обработанного взрывом, более чем в 20 раз меньше по сравнению с существующей технологией размола.

3.3.4. Регенерация твердых сплавов в ударных волнах

Металлокерамические твердые сплавы относятся к гетерогенным смесям, в среде которых есть поверхности, на которых происходят разрывы любых микроскопических параметров. Известные результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что наличие в среде компонентов с различной сжимаемостью, плотностью, неравномерностью распределения их по объему, обуславливает существенную разницу в природе распространения ударных волн, от имеющего места в однородных компактных средах. Следует отметить, что в отличие от классических способов обработки, которые ограничены как по механическому, так и по физико-химическому влиянию на материалы, ударно-волновая обработка вносит фундаментальные изменения в структуру на всех масштабных уровнях. В этой связи, плодотворной оказалась идея стимулирования процессов дефектообразования и разрушения вольфрамсодержащих сплавов в условиях действия высоких градиентов давлений и скоростей нагружения, как первой стадии технологической цепи переработки материала в ультрадисперсный порошок высокой химической активности.

Взрывная обработка произведена в герметизированных металлических цилиндрических ампулах, которые предварительно были заполнены образцами из сплава WC-Co (в опытах использован утилизированный трубный инструмент – волокнистый материал из сплава BK-6).

В результате взаимодействия падающей волны со свободными боковыми границами материала появляются волны разгрузки, которые вызывают поперечное движение частиц, приводящее к тангенциальному разрыву массовых скоростей, и, как следствие, образованию сдвига, что предшествует процессу

разрушения. Давление в исследуемых образцах рассчитывалось по известным уравнениям состояния компонентов и экспериментальным данным и составляло 30 – 35 кбар. Ударная адиабата сплава была определена электроконтактным методом и описывалась известным линейным соотношением для скорости ударной волны:

$$D = C_0 + \lambda \cdot U,$$

где D – скорость ударной волны;

$C_0 = 4,51 + 0,12$ – скорость звука, м/с;

$\lambda = 2,2 + 0,31$;

U – массовая скорость частиц за фронтом ударной волны, м/с.

Методами электронной и оптической микроскопии, рентгеноструктурного анализа, измерениями микротвердости исследованы особенности структурных измерений в сплаве WC–Co, подвергнутого взрывной обработке.

Исследованиями микроструктуры сплава ВК до и после обработки взрывом установлено существенное измельчение зерен карбидов WC и утонение кобальтовой связки. Зафиксирован резкий рост микротвердости, причем свое высокое значение – 1 875 кг/мм² микротвердость сохраняет практически по всей толщине образцов (5,5 мм).

Исследования тонкой структуры показали изменение ширины рентгеновских линий от плоскостей (111) и (211). Изменение ширины линий, также как и увеличение твердости свидетельствует об упрочнении (наклепе) связующего компонента в сплаве – кобальта. В зоне локальной деформации кобальта обнаружено образование и скопление микропор в форме тетраэдров, которые представляют следы выхода дислокаций на поверхность. Концентрация и плотность дислокаций возрастает и составляет $3,9 \cdot 10^{-11}$ см². В качестве возможного механизма генерации дефектов можно рассматривать хаотическое разупорядочение кристаллической решетки карбидов вольфрама за счет многократного отражения ударных волн на межкристаллитных границах и границах зерен.

Таким образом, механизм накопления дефектов металлокерамического сплава типа ВК при его обработке ударными волнами интенсивностью 30 – 35 кбар. обусловлен наличием больших микроискажений кристаллической решетки кобальта, повышением плотности дислокаций, ростом микротвердости и разупорядочением зерен карбидов вольфрама, что связано с действием волн разгрузки, приводящих к тангенциальному разрыву частиц материала.

Проведенные исследования влияния нагружения на реакционную способность порошков показали, что в обработанных порошках существенно повышается внутренняя энергия, а также их химическая активность. Указанные особенности позволили осуществить тонкодисперсное измельчение сплава, исключая физико-термические способы регенерации. Тонкодисперсному размолу были подвергнуты порошки из ВК–6, предварительно полученные в ампулах ударного сжатия крупностью 0,8 – 1 мм. Характеристика регенерированного взрывом порошка WC–Co приведена в табл. 64. Длительность процесса размола порошка обработанного взрывом, более чем в 20 раз меньше по сравнению с существующей технологией размола, что снижает энергопотребление процесса измельчения только по одному агрегату на 7,75 МВт.

Характеристика порошка WC-Co

Марка сплава	Величина исходных зерен, мм	Величина зерен готового продукта, мм	Плотность, г/см ³	Коэффициентная сила, КА/м	Твердость HRC	Напряжения при изгибе, МПа	Плотность, содержание пор до 50 мкм, %
WC – 94 % Co – 6 %	0,8 – 1	0,001 – 0,002	14,6 – 15,0	11,9 – 13,5	88,5	1 500	0,2 – 0,3

Таким образом, показана принципиальная возможность использования ударно-волновой обработки, как фактора, стимулирующего процессы дефектообразования твердосплавных массивов любой конфигурации, с целью получения высококачественного первичного материала для дальнейшей переработки, формовки и спекания в производстве инструмента различного назначения.

3.3.5. Комбинированная обработка

Комбинированные методы обработки обеспечивают повышение качества поверхностей и эксплуатационные показатели машин. Особого внимания заслуживают электрофизические методы обработки в сочетании с абразивной обработкой (шлифование, доводка, др.)

Положительные результаты получены при объединении размерной электрохимической обработки и струйно-абразивной доводки. Введение предварительной абразивной очистки поверхностей позволяет удалить окисные пленки и другие загрязнения, что значительно повышает эффективность электрохимической обработки. Последующая струйная доводка выравнивает микрорельеф поверхности с одновременной зачисткой продуктов обработки.

Заслуживает технологического внимания интеграция электроэрозионной и абразивной обработки особенно при электроискровом легировании деталей, работающих в жестких эксплуатационных условиях.

В силу специфики процесса слой легируемого материала на поверхности детали недостаточно однороден при однократном легировании и содержит слабо связанные с основой дефектные блоки покрытия, окислы и шлаки занимают большую площадь зоны обработки для различных марок стали.

Послеоперационный контроль качества покрытия в этом случае не позволяет в полной мере контролировать фактическую площадь покрытия из-за наличия инородных частиц в слое, а также дефектных участков, снижающих эксплуатационные свойства детали и, в частности, износостойкость при контактных нагрузках.

Предлагается технический вариант удаления окисных пленок с обработанных поверхностей, которые препятствуют переносу покрытий для повышения достоверности контроля; после электроэрозионного легирования выполня-

ется струйная или эластичная абразивная обработка упрочненной поверхности. При этом подбирается режим абразивной обработки, обеспечивающий удаление с поверхности детали слабо закрепленных микрообъемов легирующего материала окислов и т.п. Экспериментально установлено, что при внедрении абразивных частиц суспензий или эластичных волокон в покрытие на глубину 0,05–0,1 от максимальной толщины слоя, полученного при легировании, достигается наибольший эффект очистки слоя от инородных включений. В тоже время не нарушается прочность сцепления легируемого материала с поверхностью детали. Последняя в результате абразивной обработки имеет развитую очищенную поверхность, улучшающую адгезию при нанесении легируемого материала при повторных переходах.

Кроме того, после абразивной обработки на легированной поверхности визуально легко определяются непокрытые участки и зоны под дефектами покрытия, по которым в дальнейшем необходимо провести повторное легирование. При многократном чередовании процессов абразивной обработки, выявлении дефектных зон, в покрытии и повторном легировании поверхности этих зон детали сплошность и равномерность покрытия приближается к 100 % и достигается однородность физико-механических свойств легированной поверхности.

Выступы микрорельефа после легирования в виде окисных отложений легко снимаются абразивными частицами, непокрытые участки раскрываются и легко воспринимают повторное легирование. Если дефекты не удалить, то процесс переноса материала электродов прекращается. По этой причине метод электроискрового легирования до настоящего времени имел ограниченное применение.

Обработанная поверхность по всей площади имеет развитый микрорельеф без направленных следов обработки, микролунки не имеют связи между собой, такая поверхность хорошо воспринимает последующие слои покрытия, а если абразивная обработка финишная, то микрорельеф имеет повышенную газо- и гидростойкость.

Применение предлагаемого комплексного способа позволяет увеличить толщину легированного упрочненного слоя, повысить сплошность покрытия и его сцепляемость с основным металлом, что увеличивает эксплуатационные характеристики деталей.

3.3.6. Совершенствование наплавки крановых колес

Крановые колеса, изготавливаемые на ФГУП «Уралвагонзавод» (Россия), при эксплуатации подвергаются наплавке, однако не все колеса, а лишь те, у которых толщина реборд после удаления обточкой наплавленного слоя составляет не менее 12 мм, т.е. значительная часть изношенных колес не восстанавливается, а отбраковывается в металлолом.

В табл. 65 приведен расчет экономии от восстановления колес, который показывает целесообразность расширения их наплавки на ФГУП «Уралвагонзавод». В настоящее время колеса с остаточной толщиной реборд 12 мм наплав-

ляются проволокой Нп–30ХГСА, Ø4 мм, на токе – 500 А при скорости подачи наплавочной проволоки 97 м/час.

Таблица 65

Экономия от восстановления наплавкой красных колес (Ø 700 мм)

Наименование	Вариант	
	Изготовление нового колеса	Восстановление наплавкой
Стоимость поковки, тыс. руб.*	10	1 (как металллом)
Обточка поковки и «сорбитизация», тыс. руб.	8	–
Наплавка с обточкой, тыс. руб.	–	10
Всего себестоимость, тыс. руб.	18	11
Экономия на 1 шт., тыс. руб.	–	7
Годовая программа на одну наплавочную установку при 2-х сменной работе, шт.	–	480
Годовая экономия на одну установку, тыс. руб.	–	3 360

Примечание. * На 01.01.2011 г. 1\$ США = 33 рубля (Россия)

Наплавка более тонких реборд (принято решение считать допустимой к наплавке реборды толщиной до 5 мм) может сопровождаться их прожогами и вытеканием сварочной ванны. Поэтому целесообразно уменьшить величину сварочного тока. Однако, чтобы не допустить при этом снижения производительности наплавки, одновременно необходимо уменьшать диаметр наплавочной проволоки.

Опытная наплавка производилась проволокой Ø3 мм с током 400 А при скорости подачи проволоки 240 м/час. В результате установлено, что формирование наплавленных валиков и отделимость шлаковой корки хорошие, прожогов тонких реборд не происходит. Производительность наплавки при этом не уменьшилась, а возросла с 9,5 кг/час до 13 кг/час (табл. 66).

Таблица 66

Производительность наплавки проволоки Ø3 мм и Ø4 мм

Проволока	I , А	V_{np} , м/час	Q , кг/час*
Ø4 мм ($r = 0,2$ см)	500	97	9,5
Ø3 мм ($r = 0,15$ см)	400	240	13,2

Примечание. * $Q = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot V \cdot 100 \cdot 7,8}{1\ 000}$.

Известно, что износостойкость увеличивается с ростом твердости. При использовании проволоки Нп–30ХГСА твердость наплавки составляет HRC 30. Более высокая твердость колеса (HRC 38) не приводит к ускоренному изнашиванию закаленного рельса. Кроме того, даже незакаленные рельсы при эксплуатации существенно увеличивают свою твердость за счет наклепа.

Таким образом показано, что твердость наплавки колес целесообразно увеличивать до HRC 38.

3.3.7. Упрочнение и восстановление посадочных мест вторичного вала коробки передач автомобилей КамАЗ электромагнитной наплавкой

В настоящее время для изготовления новых запасных частей и деталей машин необходимо в 2 – 4 раза больше операций обработки, чем при восстановлении и упрочнении идентичных. При этом основное преимущество упрочнения и восстановления изделий – это низкая металлоемкость производства, для которого необходимо в 20 – 30 раз меньше металла, по сравнению с изготовлением новых запасных частей. Однако восстановление и упрочнение является более сложной проблемой по сравнению с изготовлением новых изделий.

Зачастую изготовленные детали машины имеют повышенную металлоемкость, обусловленную отсутствием сведений об износостойкости и надежности основных узлов и механизмов, а также вследствие использования дорогостоящих и неоптимальных материалов и покрытий при их изготовлении. В этих случаях эффективно применение износостойких покрытий с заданными триботехническими свойствами. При этом повышение долговечности и надежности деталей подвижных сопряжений машин, их рабочих органов является одной из наиболее актуальных задач в развитии машиностроительного и ремонтного производств.

Анализ результатов комплексных исследований износа и долговечности конструкционных материалов посадочных мест валов коробки передач автомобилей семейства КамАЗ при различных видах изнашивания – гидроабразивном, в условиях контактной усталости (подшипники качения), при трении скольжения (опоры скольжения) показывает, что величина износа составляет 0,2 – 0,8 мм. Для восстановления геометрических размеров изношенных посадочных поверхностей вторичных валов, а также для упрочнения новых деталей разработан способ нанесения высокопрочных покрытий композиционными порошками на железной основе в комбинированных физических (постоянном магнитном, электрическом и тепловом) полях с предварительной и окончательной *поверхностной пластической деформацией* (ППД). Сущность процесса заключается в предварительной пластической деформации обрабатываемой поверхности, последующей *электромагнитной наплавки* (ЭМН) и ППД нанесенного покрытия. Этот способ обеспечивает пластическим деформированием уплотнение и выравнивание не только наплавленного слоя покрытия, но и обработанной поверхности вала после механической обработки перед ЭМН. В результате этого значительно улучшается качество покрытия, повышается его плотность, изменяется микропогодафия, обеспечивается отсутствие существенного нагрева, как зерен порошка, так и обрабатываемого изделия.

В результате комбинированной обработки (предварительное ППД поверхности, ЭМН порошка Fe – 2 % V, ППД наплавленного слоя) посадочных мест вторичных валов коробок передач автомобилей КамАЗ структура упрочненного слоя имела свои особенности:

– достаточно высокая плотность и однородность покрытия, наличие своеобразной «зеренной» структуры с мелкими (менее 0,1 мкм) порами по границам зерен и ячеек, т.е. отсутствует дендритно-столбчатое строение покрытия;

– отсутствует четко выраженная поверхность раздела между покрытием и основой, наличие которой характерно при ЭМП без ППД;

– образование более развитого диффузионного слоя, в котором происходят превращения, соответствующие полной закалке;

– увеличивается протяженность зоны термического влияния и более глубоко развиваются в ней фазовые превращения как в феррите, так и в перлите. Пористость не превышает 5 %.

Для микроструктуры покрытия характерно образование малоуглеродистого мартенсита и наличие структурно-свободного δ -феррита, особенно в участках, прилегающих к основе. На самой границе с основой со стороны покрытия образуется тонкий слой со структурой полной закалки, что связано с диффузией углерода из поверхности основы в жидкую фазу покрытия. На границе системы покрытие–основа образуется диффузионная зона путем диффузии ванадия в аустенит основы, образующийся при нагреве, и его последующей фазовой перекристаллизации с образованием мартенсита.

Исследования в условиях производства ОАО «Вилейская райагропромтехника» предусматривали сравнительные испытания износостойкости посадочных мест под подшипники качения вторичных валов коробок передач автомобилей семейства КамАЗ. Сравнивали валы, изготовленные по типовой технологии и упрочненные комбинированной обработкой. Пробег автомобилей составил 5 000 – 6 000 км. В процессе испытаний установлено, что интенсивность изнашивания посадочных мест, изготовленных по типовой технологии и технологии упрочнением комбинированной обработкой, составила соответственно: (8,2 ... 10,1) мкм / 1 000 км и (5,7 ... 6,9) мкм / 1 000 км.

Полученные результаты исследований показывают, что использование данного способа упрочнения и восстановления позволяет снизить пористость покрытия до 3 – 6 %, уменьшить износ посадочных мест под подшипники качения валов в 1,5 – 2,0 раза по сравнению с заводской технологией и обеспечить устойчивость и стабильность процесса.

Таким образом, предлагаемая эффективная технология упрочнения и восстановления комбинированной обработкой посадочных мест вторичных валов окупается в течение периода эксплуатации машин, так как позволяет сэкономить примерно 5 % дефицитного и дорогостоящего материала.

3.3.8. Восстановление соединений с гарантированным натягом импульсными электролитическими режимами

В настоящее время приблизительно 57 % подвижного состава железных дорог Украины выработало свой ресурс или на грани этого. Особую роль в безопасности движения играет колесная пара с буксовыми узлами и особенно ее соединение с гарантированным натягом «шейка оси колесной пары – внутреннее кольцо подшипника».

Как показали статистические исследования, шейка оси колесной пары в процессе эксплуатации изнашивается до значений 0,3 мм, а кольцо – 0,25 мм (в результате прокручивания кольца по шейке). Процент ослабления натяга от

общего количества повреждения буксового узла в период 1998 – 2003 гг. составил по годам 54,5; 75; 80,8; 42; 35,7; 31 % соответственно.

Восстановление натяга можно добиться двумя путями: восстановлением изношенных шеек осей или наращиванием внутренней поверхности кольца подшипника. Поскольку ответственность за безопасность движения не позволяет подвергать ось каким-либо воздействиям, понижающим ее усталостную прочность, для восстановления натяга предполагается наращивание кольца. Эффективность применения того или иного метода восстановления предполагает ряд условий: возможность восстановления относительно толстых слоев металла 0,4 – 0,5 мм; обеспечение определенной структуры восстановленного слоя, поскольку последняя влияет на физико-механические свойства покрытия; а также исключение повреждений основных металлов деталей. Существует множество способов восстановления, но в этой работе предлагается метод электролитического осаждения металла, как наиболее простой и дешевый для внедрения на предприятиях железнодорожного транспорта. Методы электролитического осаждения металла на постоянном токе не обеспечивают необходимой структуры и физико-механических свойств восстановленного слоя; средний пробег колес составляет всего 280 тыс. км вместо 1млн. км необходимых.

Предлагаемая технология нанесения гальванопокрытия в импульсно-реверсивных режимах предполагает применение цинка в качестве осаждаемого металла. Мягкий электролитический цинк проникает в самые незначительные углубления микропрофиля сопрягаемой поверхности, увеличивая площадь фактического контакта за счет малых пределов текучести, и не понижает усталостной прочности шейки. При относительных перемещениях кольца по шейке, как следствие динамических воздействий, не возникают глубинные вырывания и царапины, поскольку цинк выполняет роль смазывающей пленки.

Цинкование осуществляют в сернокислом электролите. Нестационарный режим, состоящий из импульсов прямой и обратной последовательности, обеспечивается полупроводниковым преобразователем, применяемым в гальванических цехах. Токи такой формы положительно влияют на внутреннюю структуру покрытия. Осадки, полученные в нестационарных режимах при условии $J_{ср.пр} = 1,3 \text{ А/дм}^2$; $J_{ср.обр} = 0,43 \text{ А/дм}^2$; $T = 1 \text{ с}$ и параметре реверсирования $\tau = t_{пр} / t_{обр} = 20$, характеризуются большой однородностью, имеют мелкозернистую и плотную структуру. В начале процесса осаждения производится толчок тока плотностью до $J_{ср.пр} = 5 \text{ А/дм}^2$ в течении 30 с. Такие толчки вызывают ускорение возникновения кристаллических зародышей.

Нанесенный вначале мелкокристаллический слой, вызывает формирования такого же общего слоя цинка с микротвердостью 850 – 900 МПа вместо 400 – 450 МПа. Процесс осаждения заканчивается электрохимическим полированием при $J_{ср.пр} = 0 \text{ А/дм}^2$, которое уменьшает шероховатость, округляет микровыступы, повышает стойкость основного металла против коррозии. В результате образуется соединение с повышенной прочностью, которая в свою очередь обеспечивает продолжительную эксплуатацию буксового узла, а значит и подвижного состава в целом.

3.3.9. Плазменная закалка штампов

В начале 1950-х годов была разработана технология закалки концов рельсов с нагревом от угольной дуги. Однако из-за быстрого обгарания угольного электрода она распространения не получила. Второй раз интерес к дуговой поверхностной закалке появился в конце 1970-х, когда промышленность приобрела опыт эксплуатации плазматронов (при резке, сварке, наплавке, напылении). Плазменная дуга отличается стабильностью, а плазматроны – способностью длительное время работать без переналадки. Эти свойства позволили использовать плазменную дугу для поверхностной закалки. С ее помощью упрочнялись стальные детали трактора «Беларусь» и автомобиля «МАЗ», чугунные распределительные валы автомобиля «Запорожец», валки горячей прокатки, ролики рольгангов.

Плазменная закалка штампов исследовалась впервые. При стандартной технологии закалки деталей штампов, как правило, их твердость (HRC 40 – 55) ниже, чем максимально возможная твердость стали, из которой они изготавливаются (HRC 57 – 67). Плазменная закалка позволяет придать рабочим поверхностям штампов максимальную твердость.

Производственные испытания показали, что валок с плазменной закалкой для прокатки бандажей трамвайных колес из стали 5ХНМ, отработав в 1,25 раза дольше обычного, сохранил рабочий профиль без задиров. После плазменной закалки пуансон и матрица из стали 5ХВ2С повысили стойкость в 3 раза, расход энергии уменьшился в 1,5 раза.

3.3.10. Дискретная термическая обработка крупногабаритных деталей

Решение проблемы обеспечения работоспособности деталей машин связано с необходимостью создания поверхностей с заданными функциональными свойствами. Достижение таких свойств осуществляется методами поверхностного упрочнения – созданием на поверхности детали необходимых покрытий или путем ее модифицирования.

Особый интерес и актуальность поверхностное упрочнение получает в случае обработки крупногабаритных деталей, работающих в своем большинстве с колоссальными нагрузками, практически без смазки и в абразивной среде. При этом необходимо учитывать специфику деталей, размеры и вес которых накладывают определенные ограничения на применение традиционных способов поверхностного упрочнения. Применительно к таким деталям упрочнение за счет модифицирования поверхности имеет целый ряд преимуществ по сравнению с нанесением упрочняющих покрытий.

При модифицировании воздействию подлежит слой основного металла детали, толщиной и свойствами которого можно управлять за счет технологических факторов процесса обработки – временем, нагрузкой, температурой и т.д. Процесс можно реализовать без специальных операций подготовки поверхности, что позволяет отказаться от использования дорогостоящих легирующих элементов. Важнейшим достоинством модифицированного слоя является то,

что он, в отличие от наносимого покрытия, представляет собой единое целое с основной детали.

Технология создания модифицированных поверхностей базируется, как правило, на применении термического или химико-термического воздействия на материал мощным источником энергии.

Одним из перспективных средств повышения эксплуатационных свойств деталей за счет термического воздействия является дискретное упрочнение. Эффективный способ такого воздействия на поверхность металлической детали – контактный нагрев с помощью электродов из высокотеплопроводных материалов, например, меди. Нагрев участка на поверхности детали происходит за счет джоулева тепловыделения на контактных поверхностях электродов.

Дискретная обработка позволяет создать поверхностный слой, имеющий систему локальных упрочненных участков, что позволяет дислокациям выходить на поверхность, не разрушая термически обработанные элементы детали. Это повышает степень защиты обрабатываемых деталей от возникновения трещин, которые зарождаются в поверхностном слое под действием циклически изменяющихся температур, больших удельных давлений и действия знакопеременных напряжений.

Немаловажным фактором в рассматриваемом способе упрочнения является то, что влияние электрического тока осуществляется через электрод малого размера, а это позволяет выполнять обработку деталей практически любой конфигурации и без специальной предварительной подготовки поверхности.

Компактность и простота оснастки, применяемой при дискретной поверхностной закалке с использованием электрического тока, позволяет обрабатывать крупногабаритные детали на месте их эксплуатации или ремонта. В сравнении с затратами на изготовление крупногабаритных индукторов или закалочных печей и ванн для термообработки таких деталей, метод дискретного упрочнения представляется чрезвычайно экономным, высокотехнологическим и малоэнергозатратным.

3.3.11. Энергосберегающая технология производства крупномодульных шестерен

В ОАО «МИНЭТЕК» (г. Краматорск) разработаны и внедрены в производство новая технология, инструмент и специальная оснастка для чистовой лезвийной обработки зубчатых колес с модулем $m = 12 \dots 65$ мм, закаленных до HRC₃ 45 – 56.

Обработка производится на зубострогальных станках «МАОГ» (Швейцария) или вертикальных зубофрезерных станках 5А 343 (Коломна, Россия) с использованием оригинальных фрезерных суппортов и специальных дисковых не модульных фрез, оснащенных керамикой.

Новая технология в сравнении с традиционной (червячные фрезы или обкаточные резцы) отличается тем, что частота вращения инструмента не связана с частотой вращения заготовки, и поэтому можно применить высокие скорости резания, благоприятные для режущего инструмента из керамики или СТМ. Это

позволяет в 5 – 6 раз увеличить количество профилирующих эвольвентную поверхность резцов инструмента.

Энергоемкость нового процесса в 5 раз ниже энергоемкости зубошлифования, а точность обработки на 2 степени выше, чем при зубофрезеровании твердосплавными червячными фрезами. При равной точности с зубошлифованием новый процесс обеспечивает увеличение производительности обработки в 6 – 8 раз. Важным результатом такого внедрения является возможность работать на отечественных станках, а не на дорогостоящих и малопродуктивных станках «МАН».

Вопросы для самопроверки к разделу 3

1. Какие проблемы с энергоресурсами имеются в Украине?
2. Какие производства и процессы в машиностроении являются наиболее энергоемкими?
3. В чем отличие по энергозатратам процессов лезвийной обработки от процессов абразивной обработки?
4. Какие технологические процессы механической обработки имеют минимум энергии?
5. За счет изменения каких параметров можно добиться уменьшения удельной работы (энергии) процесса механической обработки?
6. Какие факторы определяют работу резания при шлифовании?
7. Как влияют работа резания и удельная работа (энергия) процесса на затраты на обработку?
8. Какие методы обеспечивают минимальные затраты энергии при разрезке проката на порезки?
9. Место процессов обработки лазером и плазмой в структуре энергозатрат при обработке.
10. Какие наиболее рациональные способы подачи СОТС с точки зрения затрат энергии?
11. Какие преимущества имеют технологии с использованием энергии взрыва?
12. Физическая особенность ударного сжатия материалов при синтезе алмазов и регенерации сверхтвердых материалов?
13. Сущность и эффективность практического применения комбинированных методов обработки.
14. Как влияют свойства инструментальных материалов на технико-экономические показатели механической обработки деталей со сложнопрофильными поверхностями?

4. НАНОТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ КАК РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Цель – описать новое направление – нанотехнологию, дать базовые представления о ней и привести примеры действующих нанотехнологий.

4.1. Общие сведения

4.1.1. Поверхностный слой материала

Поверхностный слой материала (ПСМ) включает в себя наружную поверхность, имеющую непосредственный контакт с окружающей средой, так называемый граничный слой, и нижележащий слой деформированного металла, отличающийся от основной части (сердцевины) металла своим строением, механическими, физическими и химическими свойствами.

4.1.1.1. Граничный слой

Идеальная структура материала предполагает, что каждый атом, расположенный внутри его, подвергается воздействию силовых полей окружающих его атомов и находится в состоянии подвижного устойчивого равновесия.

Атомы на поверхности имеют связи только с соседними и нижележащими атомами и поэтому находятся в неуравновешенном и неустойчивом состоянии.

В результате этого граничный слой металла, включающий в себя примерно 2 ряда атомов (толщина его $10^{-6} - 10^{-7}$ мм или 1 – 2 нм), обладает запасом свободной поверхностной энергии. Эту поверхностную энергию можно представить как сумму потенциальной и кинетической энергии. Потенциальной энергии соответствуют искажение нормального построения решетки, а кинетической – изменение режима колебаний атомов в граничном слое. С кинетической энергией связана и сильная зависимость поверхностного напряжения от температуры.

Из-за повышенной активности поверхность ПСМ твердого тела неизбежно адсорбирует элементы окружающей среды и бывает покрыта слоями адсорбированных газов, паров воды и жиров, часто осаждающихся прямо из воздуха.

Так, после технической очистки керосином (уайт-спиритом) или бензином слой жиров составляет 1 – 5 мкм, а при очень тщательной очистке – 0,01 – 0,1 мкм или слой толщиной 10 – 100 молекул. Толщина наиболее тонкого слоя адсорбированных паров соответствует толщине одной молекулы жирной кислоты, равной 0,002 – 0,004 мкм (или 2 – 4 нм). Толщина адсорбированных водяных паров составляет 50 – 100 молекулярных слоев и даже при температуре нагрева до 800 – 900 °С на поверхности сохраняется водяная пленка толщиной в один молекулярный слой. ПСМ в сильной степени адсорбирует также газы, при этом особо прочные связи дает химическая адсорбция, при которой толщина слоя газов составляет $10^{-6} - 10^{-7}$ мм (1 – 0,1 нм).

Адсорбированные слои смазки, особенно поверхностно-активной (ПАВ), оказывает значительное влияние на величину поверхностной энергии и процесс пластического деформирования, диспергирование поверхностных слоев и прочность металла, т.к. адсорбция снижает поверхностное натяжение и энергию поверхностных атомов и облегчает развитие деформации.

ПСМ и в особенности трещины в нем или микротрещины являются как бы воротами, через которые чужеродные атомы проникают в твердое тело.

Воздействие окружающей среды приводит к возникновению на поверхности химических соединений, чаще всего различных окислов. Например, у стали от поверхности в тело следуют окислы Fe_2O_3 ; Fe_3O_4 ; $FeO+Fe_3O_4$; FeO .

Общая толщина наружной пленки составляет в железе от 1,5 – 2,5 нм до 5 нм; в стали 1 – 2 нм; в цинке 0,5 – 0,6 нм; в алюминии 10 – 15 нм.

4.1.1.2. Нижележащий слой

Этот слой или часть ПСМ обычно состоит из сильнодеформируемого и упрочненного металла. Это основная поликристаллическая структура, состоящая из более или менее равновесных кристаллических зерен неправильной формы, размерами от 0,01 до 1,0 мм, связанных межзеренной прослойкой. Эти зерна (кристаллиты) построены из рядов определенно расположенных атомов, образующих соответствующие данному металлу кристаллические решетки.

Межзеренная прослойка имеет искаженную кристаллическую решетку с дислоцированными атомами основного материала и примесей, интенсивно накапливающихся у границ зерен. Прослойка имеет разрыхленное строение с ослабленными силами сцепления и повышенной энергией атомов. Толщина прослойки составляет 5 – 20 атомных слоев. Как нижележащий слой, так и сердцевина металла существенно отличается по прочности от теоретической прочности данного металла. Так, критическое напряжение сдвига $\tau_{кр}$, необходимое для осуществления пластической деформации, теоретически равно $\tau_{кр.теор} \cong G/30$, МПа: железо – $\tau_{кр.теор} = 2\ 300$ МПа; медь – $\tau_{кр.теор} = 1\ 540$ МПа и никель – $\tau_{кр.теор} = 2\ 600$ МПа.

Реальные значения критического напряжения сдвига $\tau_{кр.реал}$ для этих же металлов: 29 МПа; 1 МПа и 5,8 МПа. Такие большие расхождения между теоретической и фактической прочностью металлов объясняются наличием в реальных поликристаллах различных несовершенств и дефектов решетки: точечных дефектов в виде вакансий, дислоцированных атомов и примесей и линейных дефектов в виде дислокаций различного типа. Дислокации особо сильно влияют на снижение прочности реальных металлов. Дислокации возникают в реальном кристалле в процессе его роста из расплава или раствора. В недеформированном кристалле источником дислокаций могут служить также скопления вакансий.

Бездефектные кристаллы (часто это монокристаллы) получены в виде тонких нитей размером 0,05 – 0,2 мкм по толщине и 2 – 10 мм по длине. Предел прочности у них для разных металлов токов: железо – 13 360 МПа;

медь – 260 МПа; цинк – 180 МПа. Упругая деформация у нитевидных кристаллов достигает нескольких процентов, а у обычных – сотых долей процента.

Плотность дислокации ρ (шт./см²) у бездефектных кристаллов (монокристаллов высокой чистоты) составляет $0 - 10^3$, у обычных отожженных монокристаллов $10^5 - 10^6$; у отожженных поликристаллов $10^7 - 10^8$; у металла после интенсивной холодной деформации $10^{10} - 10^{12}$.

4.2. Нанотехнология

Нанотехнология – область прикладной науки и техники, занимающаяся изучением свойств объектов и разработкой устройств размером порядка нанометра (по системе единиц СИ, 10^{-9} метра). Нанотехнологии качественно отличаются от традиционных инженерных дисциплин, ибо на таких масштабах привычные, макроскопические технологии обращения с материей зачастую не имеют смысла, а микроскопические явления, пренебрежительно слабые на привычных масштабах, становятся намного значительнее: свойства и взаимодействия отдельных атомов и молекул, квантовые эффекты и др.

4.2.1. Наночастицы

Частицы, размерами от 1 до 1 000 нанометров обычно называют «наночастицами». Современная тенденция к миниатюризации показала, что вещество может иметь совершенно новые свойства, если взять очень маленькую частицу этого вещества. Так, например, оказалось, что наночастицы некоторых материалов имеют очень хорошие каталитические и адсорбционные свойства. Другие материалы показывают удивительные оптические свойства, например, сверхтонкие пленки органических материалов применяют для производства солнечных батарей. Такие батареи, хоть и обладают сравнительно низкой квантовой эффективностью, зато более дешевы и могут быть механически гибкими. Удастся добиться взаимодействия искусственных наночастиц с природными объектами наноразмеров – белками, нуклеиновыми кислотами и др. Тщательно очищенные, наночастицы могут самовыстраиваться в определенные структуры. Такая структура содержит строго упорядоченные наночастицы и также зачастую проявляет необычные свойства. Как оказалось, природные и искусственные материалы имеют совершенно различные свойства на макро- и наноуровне. Так, наночастицы из золота диаметром несколько нанометров проявляют каталитические свойства, тогда как на макроуровне слиток золота – один из самых инертных материалов.

Самоорганизация наночастиц. Одним из важнейших вопросов, стоящих перед нанотехнологией – как заставить молекулы группироваться определенным способом, самоорганизовываться, чтобы в итоге получить новые материалы или устройства. Этой проблемой занимается раздел химии – супрамолекулярная химия. Она изучает не отдельные молекулы, а взаимодействия между молекулами, которые, организовываясь определенным способом, могут дать новые вещества. Обнадеживает то, что в природе действительно существуют

подобные системы и осуществляются подобные процессы. Так, известны биополимеры, способные организовываться в особые структуры. Один из примеров – белки, которые не только могут сворачиваться в глобулярную форму, но и образовывать комплексы – структуры, включающие несколько молекул протенинов (белков). Уже сейчас существует метод синтеза, использующий специфические свойства молекулы ДНК. Берется комплементарная ДНК, к одному из концов подсоединяется молекула А или Б. Имеем 2 вещества: ----А и ---- Б, где ---- это условное изображение одинарной молекулы ДНК. Теперь, смешав эти два вещества, между двумя одинарными цепочками ДНК образуются водородные связи, которые притянут молекулы А и Б друг к другу. Условно изобразим полученное соединение: ===АБ. Молекула ДНК может быть легко удалена после окончания процесса.

4.2.2. Методы, используемые для изучения наночастиц

Одним из методов, используемых для изучения и даже создания наночастиц, является атомно-силовая микроскопия, а также туннельная электронная микроскопия. Устройство, называемое атомно-силовым микроскопом, способно не только «рассмотреть» отдельные атомы, но и даже передвигать их на некоторые расстояния. Ученым удалось создать наноструктуры, используя этот метод. Например, компания ИВМ выложила свой логотип из нескольких атомов углерода, последовательно перемещая их по подложке. Однако такая операция очень сложна, дорога и требует длительного времени, поэтому атомно-силовые микроскопы используются, в основном, для изучения наночастиц, полученных другими способами.

4.2.3. Проблема образования агломератов

Наночастицы имеют одно отрицательное свойство, которое очень мешает их использованию: они могут образовывать агломераты, т.е. слипаться друг с другом. Так как наночастицы многообещающи в отраслях производства керамики, металлургии, эту проблему необходимо решать. Одно из возможных решений – использование веществ – дисперсантов, таких как цитрат аммония (водный раствор), имидазолин, олеиновый спирт (нерастворимый в воде). Их можно добавлять в среду, содержащую наночастицы. Подробнее это рассмотрено в источнике «Organic Additives And Ceramic Processing», D.J. Shanefield, Kluwer Academic Publ., Boston (англ.).

4.3. Новейшие достижения нанотехнологии

В мире активно развивается индустрия нанотехнологий. В 2004 году мировые инвестиции в сферу разработки нанотехнологий почти удвоились по сравнению с 2003 годом и достигли \$10 млрд. На долю частных доноров – корпораций и фондов – пришлось примерно \$6,6 млрд. инвестиций, на долю государственных структур – около \$3,3 млрд. Мировыми лидерами по общему объ-

ему капиталовложений в этой сфере стали Япония и США. Япония увеличила затраты на разработку новых нанотехнологий на 126 % по сравнению с 2003 годом (общий объем инвестиций составил \$4 млрд.), США – на 122 % (\$3,4 млрд.). Что уже известно о результатах этих работ? Ниже приведены некоторые данные, опубликованные в открытой печати.

4.3.1. Графен

В октябре 2004 года в Манчестерском университете (The University Of Manchester) было создано небольшое количество материала, названного графен. Роберт Фрейтас (Robert Freitas) предполагает, что этот материал может служить подложкой для создания алмазных механосинтетических устройств. В 2010 году Нобелевская премия по физике была присуждена за разработку графена двум выходцам из России: Новоселову К. и Гейму А., основные работы которых были выполнены в научном центре под Москвой в г. Черноголовке.

4.3.2. Геомодификаторы

10 августа 2004 года, зарегистрирован патент № 2264440 на способ формирования антифрикционного покрытия трущихся поверхностей, основанный на использовании специального состава–геомодификатора трения: «композиции силикатно-керамической», или КСК, торговая марка «MEGAFORCE». КСК вводится между трущимися поверхностями при помощи носителя (масла, консистентные смазки, фреон, антифризы и т.д.). В результате этого в процессе эксплуатации на поверхностях трения образуется слой металлокерамики, составляющий с поверхностью детали единое целое. Компоненты состава обладают всеми свойствами наночастиц, в том числе саморегуляцией процессов образования металлокерамики, в зависимости от состояния поверхности (подробнее на сайте cnt-moscow.ru).

4.3.3. Новый процессор Intel

1 марта 2005 года сайт news.com сообщил, что компания Intel создала прототип процессора, содержащего наименьший структурный элемент размерами примерно 65 нм. В дальнейшем компания намерена достичь размеров структурных элементов до 5 нм. Этот прототип использует комплементарные металл-оксидные полупроводники, но планируется перейти на новые материалы, такие как квантовые точки, полимерные пленки и нанотрубки. В настоящее время многие исследователи ведут работу над созданием нанокomпьютера.

4.3.4. Нанообъекты

Нанообъекты делятся на 3 основных класса:

– трехмерные частицы, получаемые взрывом проводников, плазменным синтезом, восстановлением тонких пленок и т.д.;

- двумерные объекты – пленки, получаемые методами молекулярного наслаивания, CVD, ALD, в методом ионного наслаивания и т.д.;
- одномерные объекты – висеры, получаемые методом молекулярного наслаивания, введением веществ в цилиндрические микропоры и т.д.

Также существуют нанокompозиты – материалы, полученные введением наночастиц в какие либо матрицы. На данный момент обширное применение получил только метод микролитографии, позволяющий получать на поверхности матриц плоские островковые объекты размером от 50 нм, применяется он в электронике. Метод CVD и ALD применяется для создания микронных пленок. Прочие методы, в основном, используются в научных целях. В особенности следует отметить методы ионного и молекулярного наслаивания, поскольку с их помощью возможно создание реальных монослоев. Поэтому, скорее всего, именно с ними будет связан прорыв в нанотехнологиях в ближайшие годы.

4.3.5. Плазмон

На сайте PhysOrg.com сообщается о перспективах использования плазмонов. Плазмоны – коллективные колебания свободных электронов в металле. Характерной особенностью возбуждения плазмонов можно считать так называемый плазмонный резонанс, впервые предсказанный в начале XX века. Длина волны плазмонного резонанса, например, для сферической частицы серебра диаметром 50 нм составляет примерно 400 нм, что указывает на возможность регистрации наночастиц далеко за границами дифракционного предела (длина волны излучения много больше размеров частицы).

В начале 2000-го года, благодаря быстрому прогрессу в технологии изготовления частиц наноразмеров, был дан толчок к развитию новой области нанотехнологии — наноплазмонике. Оказалось возможным передавать электромагнитное излучение вдоль цепочки металлических наночастиц с помощью возбуждения плазмонных колебаний.

4.3.6. Наноаккумулятор

В начале 2005 года компания Altair Nanotechnologies (США) объявила о создании инновационного материала для электродов литий-ионных аккумуляторов. Аккумуляторы с Li₄Ti₅O₁₂ электродами характеризуются временем зарядки 10 – 15 минут.

В феврале 2006 года компания начала производство аккумуляторов на своем заводе в Индиане. В марте 2006 года Altairnano и компания Boshart Engineering заключили соглашение о совместном создании электромобиля. В мае 2006 года успешно завершились испытания автомобильных наноаккумуляторов. В июле 2006 года Altair Nanotechnologies получила первый заказ на поставку литий-ионных аккумуляторов для электромобилей. Заказ поступил от компании Phoenix Motorcars (США). Phoenix Motorcars планировал произвести 10 электромобилей в 2006 г., 500 штук – в 2007 г., 5 000 – в 2008 г., 20 000 – в 2009 г., 50 000 – в 2010 г. и 100 000 – в 2011 году.

4.3.7. Материалы

Машиностроение в целом консервативно в развитии, однако, так или иначе, гонка технологий нарастает. И выдержит ее отнюдь не всякий. Помимо постоянно увеличивающихся затрат на НИОКР возрастает необходимость больших вливаний в модернизацию производства. Если раньше для выпуска конкурентоспособной продукции можно было эксплуатировать оборудование лет двадцать без существенной модернизации, то на современном этапе развития уже через каждые 4 – 7 лет производственные линии требуют полного переоборудования.

Американская автомобилестроительная компания «Ford» планирует приступить к более активному внедрению нанотехнологий с целью снижения веса автомобилей и увеличения прочности и долговечности корпуса. По словам руководителя отдела прикладных исследований корпорации «Ford» Мэттью Залузэка (Matthew Zaluzec) применение инновационных материалов чрезвычайно актуально для производства корпусов, элементов интерьера, картеров и отдельных деталей силовых агрегатов машин. По его мнению, внедрение нанотехнологий в производственный цикл позволит компании «Ford» уменьшить вес каждого произведенного автомобиля на 100 – 350 кг, в зависимости от марки машины.

4.3.8. Собаке напечатали протезы

Помогая братьям нашим меньшим, изобретательные умы используют самые новейшие достижения электронной техники. Так, одной собачке-инвалиду подарили протезы передних лап, напечатанные на 3D-принтере!

Пес по имени Дерби появился на свет с врожденной деформацией передних конечностей. Но теперь собака бегаёт по несколько километров в день – а все благодаря помощи группы «Мир и лапы» из Нью-Гемпшира, обратившейся к специалистам по трехмерной печати.

Чтобы сделать Дерби более мобильным, были использованы 3D-сканеры и различное программное обеспечение. В итоге удалось создать почти идеальные протезы для собаки, рассказывает Orange News. И уже в скором времени после обретения новых ног пес начал бегать, к вящей радости своих хозяев.

«Когда я вижу, как он мчится, это восхитительно, – говорит один из «приемных родителей» пса. – Я не могу в это поверить. Он бегаёт со мной и моей женой каждый день. И бежит быстрее нас обоих!».

4.3.9. Рекорд. На литре бензина – почти 5 000 км

Чудеса экономии показали в 2013 году на европейском экоралли – там победила машина, которая проехала на 1 л топлива 4 896 км (как из Киева до Парижа и обратно!). Правда, весило авто из углепластика всего 23 кг, а пилотом была миниатюрная девушка. Автомобиль был идеальной, с точки зрения аэродинамики, формы: яйцеобразная верхняя часть, нижняя – плоская, с клиренсом

2 см. В ралли участвовали и студенты из Харькова – они создали машину, которая на 1 л преодолела 570 км, и заняла 40-е место. Правда, на реальной дороге такие авто развалятся на первой же яме.

4.4. Нанотехнологии в машиностроении и для машиностроения в Европе

Страны ЕС на 2007 – 2013 годы сформировал так называемые рамочные программы ЕС в области НИОКР и НИР, одной из которых и важнейшей по объему денежных вложений является «Нанотехнологии». В табл. 67 приведены задачи науки и области применения этих новейших нанотехнологий применительно к ресурсо- и энергосбережению в промышленности.

4.5. Нанотехнологии как ресурсосберегающие технологии

В России утверждена стратегия развития nanoиндустрии на период с 2006 по 2015 гг., на которую планируют потратить по разным оценкам от 130 до 180 млрд. рублей (\$5 – 7 млрд.). По результатам реализации этой стратегии есть уже внедренные процессы, изделия, пленки и др.

Так, по материалам созданы порошки и суспензии, которые улучшают работу двигателей и механизмов. Созданы покрытия, повышающие износостойкость деталей, имеющих антикоррозионные свойства или помогающих материалу самоочищаться или не смачиваться водой или другими жидкостями.

Разработаны сверхпрочные материалы из углеродных нанотрубок и новые упаковки сверхдлительного хранения. Например, при хранении газосодержащих напитков в ПЭТ бутылках газ начинает выходить через 2 – 3 месяца через пластик, и качество напитка теряется. Нанотехнология: если обработать поверхностный слой тары плазмой, то появится новый поверхностный слой (около 0,1 мкм), не пропускающий газ, и тогда пиво, кока-колу или другой напиток можно сохранять годами.

В медицине разработаны новые лекарства и диагностическое оборудование, созданы нанороботы, способные путешествовать по организму животного или человека и, например, доставлять лекарство в раковую клетку и убивать ее без вреда для здоровых клеток.

В энергетике и электронике разработаны покрытия для солнечных панелей, увеличивающие КПД этих панелей.

С помощью нанотрубок можно хранить безопасно водород, а это путь к новым водородным двигателям, производящим энергию из воды.

В электронике нанотехнологии резко увеличили объемы памяти компьютеров и скорости передачи данных и позволили создать новые приборы и микросхемы. Так в Вашингтонском университете (США) созданы бионические линзы, с помощью которых каждый может стать «Терминатором»: приближать новые объекты, выводить на экран данные GPS, пользоваться Интернетом, слабовидящим людям водить авто и др.

Задачи и области применения нанотехнологий в странах ЕС в 2007 – 2013 гг.

№ п п	Область применения	Задачи	Потенциальный эффект
1	2	3	4
1	Создание наноразмерных структур в материалах	Наноструктурные композитные материалы на основе полимерных матриц	Экономия материалов
2	Основанные на базе знаний и «умные» материалы с заданными свойствами	Органические материалы для электроники и фотоники	Экономия материалов
3	Новые биоматериалы и материалы, основанные на биологическом принципе	Наноструктурные материалы с заданными магнитными свойствами. Высокопористые биоактивные агенты для выращивания тканей	Мембраны, биологические ткани
4	Использование инженерии для разработки высокоэффективных материалов, основанные на базе знаний	Новые материалы, предназначенные для работы в экстремальных условиях и средах	Новые возможности и рамки эксплуатации
5	Интергация технологий для промышленного применения	Новые композиты на основе дерева и их производство Многофункциональные материалы для механизмов будущего. Эффективное использование ресурсов и «чистое» строительство. Наноструктурные материалы для хранения водорода	Новые заменители металла Экономия материалов
6	Нанотехнологии и конвергенция	Механизмы наномасштаба для био- и не биовзаимодействия. Самосборка и самоорганизация Оборудование и методы для нанотехнологий	Создание новых материалов Полная автоматизация
7	Создание наноразмерных структур в материалах	Наноструктурные покрытия и тонкие пленки	Экономия материалов
8	Адаптивные производственные системы	Классификация наноструктурных материалов по их характеру. Быстро программируемые машины и производственные системы.	Новые возможности и экономия труда
9	Быстрая переброска и интеграция новых технологий в создание и управление производственными процессами	Быстрые производственные конструкции для мелкосерийной продукции	Новые возможности и экономия труда

Такая линза из органических материалов вмещает в себя электрическую схему толщиной 0,05 мкм и красные светоизлучающие диоды. Эти линзы испытаны на кроликах. Они безопасны для живых организмов и сейчас разрабатывается система беспроводной связи с линзой и встройки в нее солнечного фотоэлемента для подзарядки и встроенного дисплея, и это в толщине 0,05 мкм! Фантастика!

В России в ближайшие годы планируют с помощью нанотехнологий:

- конструировать любые молекулы;
- создавать абсолютно прочные материалы;
- создавать так называемую наноеду – несуществующую в природе пищу для человека и животных;
- выращивать живые ткани и органы для человека;
- создавать новые типы двигателей и топливных элементов;
- создавать сверхминиатюрные электронные устройства;
- создать новые способы записи и хранения информации, гибкие дисплеи, электронную бумагу и др.

В подтверждение этих фантазий приведены несколько примеров из России и США. В политехническом институте Ренселлера (Нью-Йорк, США) разработан наноклей для склеивания нетехнологичных по клею поверхностей. Этот **наноклей** – это молекулярные цепи с основой из углерода, на концах которых «сидят» молекулы кремния, кислорода и серы, они функционируют как крючки для соединения двух поверхностей.

Прочность связывания растет по мере увеличения температуры (клей выдерживает приблизительно 700 °С). Толщина клеевого шва – внимание !!!!, – 0,0005 мкм. Клей создан для крепления микросхем и жаропрочных красок. Себестоимость 100 г клея всего \$35.

Создана рабочая модель «Полупроводниковый самолет» с крыльями длиной 34 см, материалом которого является ионный полимерно-металлический композит, способный менять форму под влиянием электрического поля. Если верно выбрана сила тока, то крылья такой модели работают как птичьи (подобно альбатросу), большую часть времени планируя в потоке воздуха и изредка помахая ими для набора высоты.

Для твердотплавных инструментов в Мосстанкине (Россия) разработаны нанопокртия толщиной слоя от 0,1 мкм и количеством слоев от 60 до 100 (нескольких десятков). Наносят эти слои на ионно-плазменных установках. Стойкость инструмента на 30 – 50 % дороже того, который не имеет покрытия, а стойкость увеличивается в 2 – 2,5 раза. Такими инструментами можно работать со скоростями резания $V = 400 \dots 1\,000$ м/мин (твердый сплав с покрытиями). Например, «сухое» точение стали HRC 55 осуществляется со скоростью резания $V = 200$ м/мин, глубиной резания $t = 0,5$ мм и подачей $S = 0,1$ мм/об.

В МГУ (Москва, Россия) создано наноуглеродное покрытие толщиной 0,1 – 0,3 мкм – многослойный материал со смазкой (имеет кластерную структуру, упорядоченную, близкую к монокристаллу углерода). Подшипник качения с таким слоем работает в 2 – 2,5 раза дольше, чем традиционный в диапазоне температур до 250 °С. То ли еще будет в ближайшее время?!

4.6. Три составные части новой нанотехнологии

Уже более 30 лет высокотвердые покрытия нитрида титана широко применяются в промышленности. Основным методом получения таких покрытий – вакуумно–дуговое осаждение. Однако из-за высокой температуры данного процесса – 550 °С и выше – эти покрытия применяются, в основном, для упрочнения поверхностей режущего инструмента из твердых сплавов и быстрорежущих сталей, которые имеют высокую температуру отпуска и не боятся разупрочнения при нагреве. Разработан новый метод синтеза сверхтвердых *TiN* покрытий при существенно более низких температурах.

Первым достижением новой технологии стало существенное снижение температуры синтеза *TiN*–покрытий до 100 – 150 °С. Благодаря этому стало возможным наносить покрытия нитрида титана на все типы конструкционных и инструментальных сталей с низкими температурами отпуска, а также на сплавы с низкими температурами разупрочнения, например, термически упрочняемые сплавы алюминия. Кроме инструментов и деталей машин, осаждение низкотемпературных декоративных покрытий стало доступно для «золочения» не только полированной поверхности нержавеющей стали, но и на других низколегированных марках стали, латуни, сплавов на основе алюминия, магния, цинка и, что вовсе непривычно, поверхности полимерных изделий. Таким образом, новая технология уже на этом примере демонстрирует свою высокую значимость на уровне технической революции, а покрытия нитрида титана, в силу ожидаемых масштабов практического использования, можно рассматривать как самостоятельное уникальное торговое предложение.

Второе достижение – получение повышенной адгезии между материалом подложки и наносимым покрытием до столь высокого уровня, что ее можно назвать суперадгезией. Теперь для этого не требуется создание специального промежуточного подслоя. Метод плазменной ионной имплантации и осаждения обеспечивает самую высокую из всех ныне известных аналогичных технологий адгезию. Ее высокие качества обеспечиваются благодаря формированию тонкого переходного слоя между подложкой и поверхностью инструмента.

Третье достижение – синтез сверхтвердых наноструктурных покрытий нитрида титана в Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт». В публикации ХФТИ впервые описан метод получения сверхтвердых *TiN* вакуумно-дуговых покрытий методом плазменной ионной имплантации и осаждения при низких температурах подложки. Исследовали зависимость изменения твердости покрытий нитрида титана от давления азота при подаче на подложку высоковольтных импульсов напряжения. Все полученные покрытия обладали сверхвысокой твердостью, которая в зависимости от условий синтеза изменялась от 40 до 69 ГПа. Значительный прирост твердости по отношению к максимальной твердости образцов из массивного нитрида титана указывает на существование структурных особенностей в покрытиях при их синтезе по механизму «плазма – твердое тело». Эти структурные особенности достигаются благодаря использованию новой нанотехнологии.

Метод плазменной ионной имплантации и осаждения реализуется при типичной электрической схеме приложения к подложке постоянного отрицательного и однополярного отрицательного импульсного потенциалов.

Получение новых покрытий было осуществлено в модернизированной установке «Булат-6», которая является прототипом промышленного образца нового поколения. Ключевым компонентом для осуществления этой процедуры является генератор импульсного напряжения. Он выдает очень высокую мгновенную мощность, обеспечивает короткие времена нарастания и спада напряжения в пределах микросекунды. Именно на таком оборудовании удалось синтезировать сверхтвердые наноструктурные покрытия нитрида титана и разработать новую практическую нанотехнологию.

Особенностью структуры сверхтвердых покрытий является нитевидное строение кристаллитов нитрида титана. Это хорошо видно на электронно-микроскопических снимках на просвет поперечного среза наноструктурного покрытия. Наноструктура покрытия состоит из кристаллитов нитевидной формы, как правило, прорастающих в процессе синтеза на всю толщину покрытия (7 мкм). Изюминка структуры состоит в том, что один линейный размер кристаллитов в условиях низкотемпературного синтеза практически совпадает с толщиной покрытия, а линейные размеры в поперечном сечении кристаллита (средний диаметр) находятся в наноразмерном диапазоне. Данные нитевидные кристаллиты являются аналогом изолированных нитевидных кристаллов. Из анализа формы кристаллитов следует, что наноструктурные покрытия нитрида титана, получаемые данным методом, можно считать консолидированной системой нитевидных кристаллов, которые, как известно, обладают прочностью, близкой к теоретической.

Новая нанотехнология проверена на практике в реальных условиях для упрочнения поверхностей матриц и пуансонов для холодной штамповки на предприятиях серийного и массового производства.

Низкая температура осаждения покрытий, суперадгезия покрытия нитрида титана к поверхности обрабатываемого изделия, наноструктурное состояние в виде нитевидных кристаллитов – это три источника и три составные части новой нанотехнологии.

Вопросы для самопроверки к разделу 4

1. Особенности граничного слоя поверхности детали.
2. Характеристика нижележащего слоя поверхности детали.
3. Какие методы очистки поверхности дают минимальное загрязнение?
4. Нанотехнологии в инструментальном производстве.
5. Нанотехнологии в сборочном процессе.
6. Технологические решения при использовании нанотехнологий в машиностроении.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Технология машиностроения: учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев, Е. Р. Ковальчук, И. М. Колесов и др. – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.
3. Ковшов А. Н. Технология машиностроения / А. Н. Ковшов. – М. : Машиностроение, 1987. – 320 с.
4. Справочник технолога–машиностроителя в 2-х томах / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К.Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 656 с. – Т. 2. – 496 с.
5. Мосталыгин Г. П. Технология машиностроения / Г. П. Мосталыгин, Г. Ш. Толмачевский. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
6. Гусарев В. С. Технологическая энергоэкономика / В. С. Гусарев // Вісник Інженерної Академії України. – Київ, 2001. – Вип. 3 (частина 1), 2001. – С. 174–176.
7. Гусарев В. С. Сравнение и выбор технологических решений на основе энергетического критерия / В. С. Гусарев, Л. С. Стоянова // Научно-технические проблемы станкостроения, производства оснастки и инструмента: сб. научн. статей. – К. : АТМУ 2002. – С. 20.
8. Гусарев В. С. Критерии энергонасыщенности технологических процессов / В. С. Гусарев // Автоматизация, проблемы : сб. научн. статей. – Тула, 2002. – С. 14–18.
9. Гусарев В. С. Энергетическая эффективность технологических процессов / В. С. Гусарев // Авиационно-космическая техника и технология: Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков: ГАУ им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2000. – Вып. 14. – С. 41–44.
10. Гусарев В. С. Энергетические проблемы современной технологии машиностроения / В. С. Гусарев // Вісник Інженерної Академії України. – Київ, 2001. – Вип. 3 (частина 1), 2001. – С. 165–173.
11. Елизаветин М. А. Повышение надежности машин / М. А. Елизаветин. – М. : Машиностроение, 1973. – 430 с.
12. Справочник технолога–машиностроителя. В 2-х томах / под ред. А. М. Дальского. – М. : Машиностроение, 2001. – Т. 1. – 944 с.
13. Механическая обработка материалов : учебник для вузов / А. М. Дальский и др. – М. : Машиностроение, 1981. – 263 с.
14. Технологія машинобудування : підручник / П.П. Мельничук, І.А. Баровик, П.А. Лінчевський та ін. – Житомир : ЖДТУ, 2006 – 836 с.
15. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.

16. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
17. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: монографія / Ф. В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.
18. Кремнев Г. П. Системы технологий: учебное пособие / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новиков, В. М. Колесник. – Днепропетровск: ЛІРА, 2015. – 140 с.
19. Технология обработки типовых деталей: учебное пособие / Г.П. Кремнев, В.М. Колесник, Ф.В. Новиков и др. – Харьков: Изд-во “С.А.М.”, 2014. – 156 с.
20. Жовтобрюх В.А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / В.А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.
21. Яровой Ю. В. Применение принципа наименьшего действия для выбора варианта технологического процесса / Ю. В. Яровой // Физические и компьютерные технологии : Труды 14-й Междунар. научн.-техн. конф. (Харьков, 24–25 сентября 2008 г.). – Х. : ХНПК “ФЭД”, 2008. – С. 181–182.
22. Кремнев Г. П. Методы повышения стойкости лезвийных инструментов / Г. П. Кремнев, В. Н. Дикаева // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О.В. – Д.: ЛІРА. – 2015. – С. 160–164.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕРМИНЫ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭКОНОМИИ РЕСУРСОВ	8
1.1. Конструктивные направления снижения расхода материалов	11
1.1.1. Пути снижения материалоемкости машин	15
1.1.2. Математическое моделирование и оптимизация	23
1.1.3. Выбор материалов, обеспечивающих коррозионную стойкость изделия	29
1.1.4. Металлы со специальными свойствами и их заменители	34
1.1.5. Материалы для изготовления деталей узлов трения	44
1.1.5.1. Износостойкие материалы с малым взаимным внедрением на микроучастках поверхностей трения	44
1.1.5.2. Износостойкие самосмазывающиеся материалы	45
1.1.5.3. Материалы для пар трения, работающих в условиях высокого вакуума	47
1.1.5.4. Полимерные материалы для узлов трения	47
1.1.6. Выбор и совершенствование профилей металлопроката	54
1.1.6.1. Влияние выбора профиля на металлоемкость изделий	54
1.1.6.2. Горячекатаные сортовые профили	56
1.1.6.3. Периодические профили проката	60
1.1.6.4. Гнутые профили проката	62
1.1.6.5. Собственные гнутые профили	64
1.1.7. Выбор рациональных допусков	65
Вопросы для самопроверки к пп. 1.1	67
1.2. Технологические направления экономии ресурсов	67
1.2.1. Обеспечение технологичности конструкции деталей	67
1.2.2. Сокращение производственных потерь и отходов	74
1.2.3. Обеспечение устойчивости и стабильности технологических процессов	77
1.2.4. Экономия металла в инструментальном производстве	87
1.2.5. Повышение надежности машин при их производстве	88
1.3. Направления снижения материалоемкости машин на этапе изготовления	90
1.3.1. Способы производства заготовок	91
1.3.2. Новые технологии и материалы для восстановления дефектных отливок	108
1.3.2.1. Полимерный материал «дихтол» и технология его применения	109
1.3.2.2. Полимерный материал «пластикметалл» и его разновидности	111
1.3.2.3. Технология лазерной стереолитографии (SLA)	112
1.3.2.4. Способ избирательного лазерного спекания (SLS)	113
Вопросы для самопроверки к пп. 1.3.2	114

1.3.3. Упрочнение термическими, химико-термическими и комбинированными (термодиффузионными) способами обработки	114
1.3.3.1. Совмещение упрочнения наклепом с гидрополированием	120
1.3.3.2. Упрочнение конструкционных сталей термомеханической обработкой	122
1.3.3.3. Упрочнение деталей машин наплавкой	125
1.3.3.4. Упрочнение напылением на рабочие поверхности деталей материалов с высокими эксплуатационными свойствами	128
1.3.3.5. Упрочнение нанесением на рабочие поверхности деталей электролитическим способом материалов с высокими эксплуатационными свойствами	129
1.3.3.6. Упрочнение нанесением на рабочие поверхности деталей химическим способом материалов с высокими эксплуатационными свойствами	137
1.3.3.7. Упрочнение нанесением эмалевых покрытий на рабочие поверхности деталей	138
1.3.4. Изготовление деталей из спеченных материалов (порошковая металлургия)	140
1.3.4.1. Методы получения и технологические свойства порошков	141
1.3.4.2. Формообразование и обработка заготовок	143
1.3.4.3. Приготовление смеси и формообразование заготовок	146
1.3.4.4. Спекание и окончательная обработка заготовок	148
1.3.4.5. Технологические требования, предъявляемые к конструкциям деталей из порошковых материалов	152
1.3.4.6. Перспективы развития порошковой металлургии	152
1.3.4.7. Плавленные тугоплавкие соединения для инструментальных материалов	156
1.3.5. Изготовление деталей из пластмасс и резины	161
1.3.5.1. Применение пластмасс в машиностроении	162
1.3.5.2. Классификация пластмасс	164
1.3.5.3. Виды пластмасс	166
1.3.5.4. Способы переработки пластмасс в детали вязкотекучем состоянии	173
1.3.5.5. Обработка резанием заготовок из пластмасс	177
1.3.5.6. Технологические требования, предъявляемые к конструкциям деталей	179
1.3.5.7. Изготовление резиновых технических деталей	180
1.3.5.8. Способы изготовления резиновых технических деталей ..	181
1.4. Экономия ресурсов на этапе эксплуатации	182
1.4.1. Повышение надежности при эксплуатации	182
1.4.2. Влияние способов формообразования деталей на качество их рабочих поверхностей	186
1.4.3. Влияние способов формообразования деталей на их эксплуатационные свойства	199
1.4.4. Способы повышения долговечности	207

1.4.5. Долговечность трущихся пар	213
1.4.6. Стабилизация деталей и структур их материалов	222
1.4.6.1. Основные методы стабилизации структуры и уменьшения внутренних напряжений	223
1.4.6.2. Очистка и консервация деталей	226
Вопросы для самопроверки к пп. 1.4	232
2. РЕНОВАЦИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ...	233
2.1. Рециклинг запасных частей	233
2.2. Технологии восстановления деталей	236
2.3. Повышение износостойкости узлов трения	240
2.4. Ресурсосбережение в производстве и эксплуатации прецизионных твердосплавных инструментов	242
Вопросы для самопроверки к разделу 2	244
3. ЭКОНОМИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	245
3.1. Энергозатраты на разные технологические процессы и операции ...	251
3.2. Работа технологической операции (процесса)	255
3.3. Новые технологии, приводящие к экономии энергии	265
3.3.1. Снижение расхода энергии путем пересмотра цикла термообработки	265
3.3.2. Новые технологии с использованием энергии взрыва	266
3.3.2.1. Сварка взрывом	266
3.3.2.2. Упрочнение металлов взрывом	267
3.3.3. Синтез алмазов и регенерация сверхтвердых материалов в ударных волнах	268
3.3.4. Регенерация твердых сплавов в ударных волнах	269
3.3.5. Комбинированная обработка	271
3.3.6. Совершенствование наплавки крановых колес	272
3.3.7. Упрочнение и восстановление посадочных мест вторичного вала коробки передач автомобилей КамАЗ электромагнитной наплавкой	274
3.3.8. Восстановление соединений с гарантированным натягом импульсными электролитическими режимами	275
3.3.9. Плазменная закалка штампов	277
3.3.10. Дискретная термическая обработка крупногабаритных деталей	277
3.3.11. Энергосберегающая технология производства крупномодульных шестерен	278
Вопросы для самопроверки к разделу 3	279
4. НАНОТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ КАК РЕСУРСО- СБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ	280
4.1. Общие сведения	280
4.1.1. Поверхностный слой материала	280
4.1.1.1. Граничный слой	280
4.1.1.2. Нижележащий слой	281

4.2. Нанотехнология	282
4.2.1. Наночастицы	282
4.2.2. Методы, используемые для изучения наночастиц	283
4.2.3. Проблема образования агломератов	283
4.3. Новейшие достижения нанотехнологии	283
4.3.1. Графен	284
4.3.2. Геомодификаторы	284
4.3.3. Новый процессор Intel	284
4.3.4. Нанообъекты	284
4.3.5. Плазмон	285
4.3.6. Наноаккумулятор	285
4.3.7. Материалы	286
4.3.8. Собаке напечатали протезы	286
4.3.9. Рекорд. На литре бензина – почти 5 000 км	286
4.4. Нанотехнологии в машиностроении и для машиностроения в Европе	287
4.5. Нанотехнологии как ресурсосберегающие технологии	287
4.6. Три составные части новой нанотехнологии	290
Вопросы для самопроверки к разделу 4	291
ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА	292

Навчальне видання

Георгій Петрович Кремнєв

Федір Васильович Новіков

**РЕСУРСО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ
ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ**

Навчальний посібник

Відповідальний за випуск

Новіков Ф. В.

В авторській редакції

Підп. до друку 02.02.2016 р.
Формат 60x84/16. Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 18,56.
Наклад 300 пр. Заказ № 25

Видавництво і друкарня «Ліра»
49000, м. Дніпропетровськ, вул. Наукова, 5
Свідоцтво про внесення до Держреєстру
ДК №188 від 19.09.2000.