

Министерство образования и науки Российской Федерации
**Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профес-
сионального образования**
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
КАЧЕСТВА

*Утверждено учебно-методическим советом БГТУ им. В.Г.Шухова в каче-
стве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению подготовки магистров 151900.68 “Конструкторско - техноло-
гическое обеспечение машиностроительных производств”*

Белгород
2012

УДК 621. 01(075)
ББК 34.5я7
Т38

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета «Станкин» *В.П.Вороненко*

Доктор технических наук, профессор Белгородской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Я.Горина *А.Г.Пастухов*

А в т о р ы: **И.В. Шрубченко, Т.А. Дуюн**

Т38 Технологическое обеспечение качества. учеб. пособие/ И.В. Шрубченко, Т.А.Дуюн, - Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. - 181 с.

В учебном пособии рассмотрены показатели качества машин и методы определения единичных показателей. В разделе «Обеспечение качества машин при изготовлении» рассмотрены: качество машиностроительных материалов; обеспечение и повышение качества стали; обеспечение качества чугуна; обеспечение качества высокопрочных материалов; обеспечение высоких упругих характеристик; обеспечение высокой пластичности и сверхпластичности, а также обеспечение других необходимых качественных характеристик материалов. Рассмотрено также обеспечение качества отливок, заготовок получаемых обработкой давлением, сварных соединений, обеспечение качества при термообработке, обеспечение качества при механической обработке, повышение качества деталей машин и их соединений пластическим деформированием, повышение качества нанесением покрытий, а также обеспечение качества при сборке изделий машиностроения.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Табл. 81. Ил. 77. Библиогр.: 23 назв.

УДК 621. 01(075)
ББК 34.5я7

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Показатели качества машин	5
1.1. Методы определения единичных показателей качества машины	6
2. Обеспечение качества машин при изготовлении	10
2.1. Качество машиностроительных материалов.....	10
2.1.1. Обеспечение и повышение качества стали.....	11
2.1.2. Обеспечение качества чугуна.....	19
2.1.3. Обеспечение качества высокопрочных материалов.....	22
2.1.4. Обеспечение высоких упругих характеристик.....	24
2.1.5. Обеспечение высокой технологической пластичности и сверхпластичности материалов.....	28
2.1.6. Обеспечение высокой удельной прочности материалов при малой плотности.....	30
2.1.7. Обеспечение высокой коррозионной стойкости и жаростойкости материалов.....	37
2.1.8. Обеспечение высокой жаропрочности материалов.....	39
2.1.9. Обеспечение высокой износостойкости материалов.....	40
2.2. Качество отливок.....	44
2.2.1. Структура производства с позиции обеспечения качества отливок.....	44
2.2.2. Обеспечение качества отливок на этапах изготовления.....	47
2.2.3. Переделы от шихты до готовой отливки.....	47
2.2.4. Переделы от формовочных материалов до литейной формы	55
2.2.5. Принципы управления качеством отливок на производстве..	58
2.3. Качество заготовок при обработке давлением.....	59
2.3.1. Параметры объемной штамповки.....	59
2.3.2. Параметры и контроль качества поковок.....	70
2.3.3. Совершенствование качества поковок.....	77
2.4. Качество сварных соединений.....	89
2.4.1. Технологичность сварной конструкции.....	89
2.4.2. Свариваемость.....	94
2.4.3. Строение сварного соединения.....	95
2.4.4. Характерные дефекты, снижающие свариваемость материалов	96
2.4.5. Процессы сварки, обеспечивающие качество соединений.....	98
2.4.6. Особенности сварки конструкционных материалов.....	107
2.5. Обеспечение качества деталей машин термообработкой.....	112
2.6. обеспечение качества деталей машин при механической обработке	120
2.6.1. Управление качеством деталей машин за счет изменения условий обработки.....	120
2.6.2. Обеспечение качества деталей из труднообрабатываемых материалов.....	127
2.6.3. Обеспечение качества при обработке резанием ответственных деталей.....	132

2.7. Технологические методы повышения качества деталей машин и их соединений пластическим деформированием...	137
2.7.1. Сущность методов обработки пластическим деформированием	145
2.8. Повышение качества деталей машин нанесением покрытий.....	149
2.8.1. Гальванические способы нанесения покрытий.....	149
2.8.2. Твердое никелирование.....	152
2.8.3. Борирование.....	153
2.8.4. Оксидирование и фосфатирование.....	154
2.8.5. Химические способы нанесения покрытий.....	155
2.8.6. Лакокрасочные покрытия.....	157
2.8.7. Покрытие деталей пластмассами.....	157
2.8.8. Наплавка материала.....	159
2.8.9. Напыление материала.....	161
2.9. Способы повышения долговечности ответственных деталей машин	162
3. Обеспечение качества при сборке изделий.....	167
Библиографический список.....	182

1. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА МАШИН

Показатель качества машины — это количественная характеристика одного или нескольких ее свойств, рассматриваемая применительно к определенным условиям создания и эксплуатации данной машины (ГОСТ 15467—79). Для оценки качества машин применяют единичные и комплексные показатели.

Наибольшее применение в машиностроении получили единичные показатели, которые подразделяют на эксплуатационные и производственно-технические [21]. К группе эксплуатационных относятся показатели назначения, надежности, эргономики и эстетики.

Показатели назначения характеризуют степень соответствия машины ее целевому назначению — мощность, производительность, коэффициент полезного действия и т.д.

Одним из важнейших обобщающих свойств машин является надежность.

Надежность — свойство объекта сохранять в течение определенного времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции при заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. К параметрам, характеризующим способность выполнять требуемые функции, относят кинематические и динамические параметры, параметры прочности, точности функционирования, производительности, скорости и т. п.

Являясь комплексным свойством, надежность в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Показателями безотказности являются вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, средняя наработка на отказ, интенсивность отказов, гамма-процентная наработка до отказа и др. Показатели безотказности могут вводиться как по отношению ко всем возможным отказам объекта, так и по отношению к какому-либо одному типу отказа.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Показателями долговечности являются ресурс, гамма-процентный ресурс, средний срок службы, срок службы до первого капитального ремонта, межремонтный срок службы, срок службы до списания.

Ремонтпригодность — свойство объекта, заключающееся в его способности поддерживать и восстанавливать работоспособное состояние путем технического обслуживания и ремонта.

К показателям ремонтпригодности относят вероятность и среднее время восстановления, удельную и среднюю трудоемкость технического обслуживания и ремонта и др.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования. Показателями сохраняемости являются гамма-процентный срок сохраняемости, средний срок сохраняемости и др.

Эргономические показатели характеризуют машину в системе человек - машина, и учитывают ее приспособляемость к антропометрическим, биомеханическим, физиологическим и инженерно-психологическим свойствам человека, проявляющимся в производственных процессах.

Соответствие машины требованиям технической эстетики характеризуется следующими показателями:

композиционной целостностью формы (внешняя гармония формы, целостность композиции, соответствие современному стилю, красота цветовых сочетаний);

функциональной целесообразностью формы (соответствие формы изделия и его отдельных элементов конкретному назначению и характеру, использования, приспособленность формы к выполняемой функции и ее информационная выразительность);

качеством наружной поверхности (качество выполнения стыков и соединений, прочность и качество декоративного покрытия), качеством внутренней отделки, качеством надписей и обозначений (графические достоинства, четкость исполнения, соразмерность надписей, указателей, фирменных знаков, символов и т.п.).

Расходы на эксплуатацию машины являются единовременными затратами эксплуатационников. Они включают цену машины, а также издержки на ее транспортирование к месту установки, монтаж и наладку.

Затраты на изготовление единицы продукции или стоимость работы, выполняемой с помощью данной машины, являются суммой издержек (заработная плата персонала, занимающегося обслуживанием машины, стоимость электроэнергии, сумма амортизационных отчислений и другие эксплуатационные расходы), отнесенных к единице продукции или работы.

Прочие экономические показатели используют в зависимости от требований, которые предъявляются к новой машине. Наиболее часто применяют производственную мощность и производительность, которые могут существенно меняться в процессе внедрения машины. Эти показатели применяются дополнительно к сумме капиталовложений эксплуатационников и себестоимости единицы продукции или работы.

Производственно-технологические показатели характеризуют затраты общественного труда на производство единицы продукции (машины, приборы и т.п.) и свидетельствуют о степени соответствия конструкции машины производственно-техническим условиям ее изготовления при заданном масштабе выпуска изделий.

К показателям технологичности относятся трудоемкость, материалоемкость, энергоемкость, блочность (сборность), показатели конструктивной стандартизации и унификации [19].

Трудоемкость определяет количество труда, затрачиваемого на изготовление единицы продукции (или выполнение единицы работы). Необходимо различать следующие разновидности трудоемкости, используемые при обосновании или анализе технологичности конструкций новых изделий: общую, структурную, удельную и относительную.

Общая трудоемкость характеризует суммарные затраты труда на изготовление единицы продукции. С помощью структурной трудоемкости определяют затраты труда по профессиям или по цехам предприятия, например, токарей, литейщиков, сварщиков и т.д. Удельную трудоемкость рассчитывают как отношение общей трудоемкости к одному из показателей назначения машины, например, к массе, к вместимости ковша экскаватора, длине ленточного конвейера и т.д. Относительной трудоемкостью является также отношение трудоемкости проектируемого изделия к принятой для сравнения трудоемкости.

Если, например, общая трудоемкость выпуска машины ранее составляла 1000 ч и это было наилучшим достижением в данной отрасли, а вновь осваиваемая машина с аналогичными показателями имеет проектную (или фактическую) трудоемкость 800 ч, то относительная трудоемкость будет равна $800:1000=0,8$.

С помощью материалоемкости определяют количество конструкционных материалов, необходимых для создания и применения изделия с учетом его конструктивных особенностей, проявляемых в сфере производства, эксплуатации и ремонта [19].

Как и трудоемкость, материалоемкость имеет следующие разновидности: общую структурную, удельную и относительную. Общая материалоемкость характеризует суммарную затрату материалов на изделие, причем ее находят двумя способами: по общей массе машины (за вычетом массы комплектующих изделий) и по массе материалов, израсходованных на производство, эксплуатацию и ремонт машины, включая все виды отходов и потерь.

Структурная материалоемкость характеризует затраты отдельных видов материалов, удельная — затраты материалов на один из показателей назначения машины, относительная — рассчитывается по отношению к аналогичному показателю, принятому для сравнения.

Энергоемкость характеризует затраты энергии на единицу продукции, выраженные в киловатт-часах, килограммах пара или в других единицах. Показатели энергоемкости также имеют разновидности, как трудоемкость и материалоемкость. Однако они используются значи-

тельно реже — только при обосновании и анализе технологичности в энергоемких производствах.

Блочность (сборность) изделия характеризует трудоемкость ее монтажа. Коэффициент блочности

$$k = N_{\text{сб.с}}/N_{\text{сб.о}} = 1 - N_{\text{сб.н}}/N_{\text{сб.о}}, \quad (1.1)$$

где $N_{\text{сб.с}}$ и $N_{\text{сб.н}}$ — число соответственно унифицированных и неунифицированных составных частей изделия, $N_{\text{сб.о}} = N_{\text{сб.с}} + N_{\text{сб.н}}$; $N_{\text{сб.о}}$ — общее число составных частей изделия.

Сначала определяют $N_{\text{сб.с}}$ — число унифицированных составных частей, записанных в разделах спецификации «Комплексы», «Сборочные единицы», «Стандартные изделия», «Комплекты». Затем устанавливают $N_{\text{сб.н}}$ по данным разделов «Детали», «Стандартные изделия» и др. Коэффициент блочности машин также можно определить по массе или стоимости ее элементов.

Показатели стандартизации и унификации позволяют определить степень конструктивного единообразия проектируемой или изготавливаемой машины, прибора или другого изделия; они свидетельствуют об усилиях или достижениях конструктора " в применении минимально необходимого количества типоразмеров составных частей изделия (деталей, комплексов, комплектов и т.д.) в целях повышения эффективности производства.

К числу важнейших показателей стандартизации и унификации относятся коэффициенты применяемости, повторяемости, насыщенности изделия, а также унификации группы изделий.

Коэффициент применяемости

$$k_{np} = \frac{n - n_0}{n}. \quad (1.2)$$

где n — общее число типоразмеров составных частей изделия; n_0 — число оригинальных типоразмеров.

К оригинальным относятся составные части, спроектированные или разработанные впервые для данного изделия.

Коэффициент повторяемости k_n характеризует среднее число составных частей, приходящееся на один типоразмер, и определяется по формуле $k_n = N/n$, где N — общее число составных частей, входящих в данное изделие.

Коэффициент насыщенности изделия повторяющимися составными частями k_n вычисляется по формуле

$$k_n = \frac{N - n}{n}, \quad (1.3)$$

Коэффициент унификации группы изделий $k_{y.z}$ определяется следующим образом:

$$k_{y.z} = \frac{\sum_{i=1}^m k_{npi} D_i S_i}{\sum_{i=1}^m D_i S_i}, \quad (1.4)$$

где m — число изделий в группе; k_{npi} — коэффициент применяемости для i -го изделия; D_i — годовая программа для i -го изделия; S_i — оптовая цена, а в отдельных случаях себестоимость i -го изделия.

При отсутствии данных о цене или себестоимости изделий коэффициент унификации можно определить по одной из следующих упрощенных формул:

$$k_{y.z} = \frac{\sum_{i=1}^m k_{npi} D_i}{\sum_{i=1}^m D_i}, \quad k_{y.z} = \frac{\sum_{i=1}^m k_{npi}}{m} \quad (1.5)$$

При определении всех рассмотренных показателей стандартизации и унификации необходимо выбрать степень детализации этих расчетов, которые могут выполняться для деталей или сборочных единиц. При этом расчеты не следует проводить для простых деталей (болты, винты, шурупы, шпильки, шпильники и другие крепежные детали, шпонки, муфты, накидные гайки, прокладки и т.п.).

1.1. Методы определения единичных показателей качества машины: измерительный, регистрационный, расчетный, органолептический, экспертный, социологический

Метод определения единичных показателей качества машины зависит от ее конструктивных и технологических особенностей. В машиностроении применяют описанные ниже методы определения показателей.

Измерительный метод осуществляется на основе технических средств измерений. Базируется на информации, получаемой с использованием средств измерений и контроля. С помощью измерительного метода определяют значения таких показателей качества, как масса изделия, сила тока, скорость автомобиля, частота вращения двигателя и др.

Регистрационный метод осуществляется на основе наблюдения и подсчета числа определенных событий, предметов или затрат, например, подсчета отказов изделия при испытаниях, числа дефектных изделий в партии и др.

Расчетный метод осуществляется на основе использования теоретических и (или) эмпирических зависимостей показателей качества машины от ее параметров. Применяется в основном при проектировании продукции. Позволяет также установить зависимости между отдельными показателями качества. Служит для определения массы изделия, показателей его производительности, например, определение производительности металлорежущего станка по скорости и глубине резания, а также подаче и др.

Органолептический метод осуществляется на основе анализа восприятий органов чувств, например, при контроле окраски машины, при проверке отсутствия рисок и царапин или других дефектов на обработанной поверхности детали. При его реализации возможно использование технических средств (лупа, микроскоп и т.п.), повышающих восприимчивость и разрешающие способности органов чувств.

Экспертный метод осуществляется на основе решения, принимаемого экспертами, например, при оценке эстетической характеристики машины или прибора.

Социологический метод осуществляется на основе сбора и анализа мнений фактических или возможных потребителей продукции, например, при оценке качества выпущенной серии электродвигателей, телевизоров и т.д.

При оценке качества любого изделия применяют обычно в сочетании несколько рассмотренных методов. Они служат, как правило, для оценки не только уровня-качества продукции, но также для технического контроля в ее производстве.

При оценке показателей качества продукции по балльной системе можно использовать, например, четыре балла: 5 («отлично»), 4 («хорошо»), 3 («удовлетворительно») и 0 («плохо»). Возможны и другие балльные системы.

Баллы присваивают изделию, качество которого нужно оценить, и аналогу. Относительным единичным показателем качества в случае балльной оценки является отношение баллов оцениваемого изделия к баллам аналога.

Балльный метод оценки показателей качества на практике часто применяют в сочетании с экспертным методом.

Экспертный метод оценки качества продукции осуществляется экспертной группой, состоящей из высококвалифицированных специалистов примерно одинаковой степени компетентности. Экспертов должно быть не менее семи человек (при меньшем их числе велика вероятность принятия группой случайных решений).

При голосовании решение принимается только в том случае, если за него подано не менее $2/3$ голосов членов экспертной группы. Для улучшения степени объективности оценок опрос экспертов должен производиться в следующем порядке. Сначала оценки проставляются экспертами независимо друг от друга; затем после короткого публичного обоснования выставленных оценок проводится второй тур голосования, в ходе которого эксперты вновь, независимо друг от друга, устанавливают новые оценки. Желательно проводить два-три тура проставления оценок.

Показатель качества продукции определяют как среднее арифметическое значение оценок, проставленных каждым экспертом:

$$P_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} / N, \quad (1.6)$$

где p_{ij} —значение показателя качества, проставленное j -м экспертом; N — число экспертов.

Окончательное значение показателя качества определяют как среднее арифметическое значение оценок, полученных в каждом туре опроса экспертов:

$$P_i = \sum_{u=1}^m p_{iu} / m, \quad (1.7)$$

где p_{iu} — значение показателя качества, полученное в каждом туре; m — число туров опроса.

Комплексные показатели характеризуют качество машины по совокупности ее нескольких простых свойств или одному сложному свойству, состоящему из нескольких простых. Комплексные показатели часто определяют методом среднего взвешенного (арифметического, геометрического и т.д.).

Примером комплексного показателя, определенного методом среднего взвешенного (арифметического), может служить показатель

$$q_k = \sum_{i=1}^n q_i c_i, \quad (1.8)$$

где q_i —показатель i -го свойства оцениваемой продукции; c_i — коэффициент весомости показателя q_i .

В случае большого разброса значений q_i рекомендуется другая формула (средне-взвешенное геометрическое):

$$q_k = \prod_{i=1}^n q_i^{c_i}, \quad (1.9)$$

Определяющим называют показатель, по которому оценивают качество продукции. Определяется он по формулам (1.8) и (1.9), но при этом q_i характеризует q_k средние результаты оценки i -го свойства (оценка, как правило, дается экспертами с помощью балльного метода). В том случае, когда определяющий показатель является комплексным, он называется обобщенным. Если хотя бы один единичный показатель неудовлетворительный, то обобщенный показатель следует принимать равным нулю, т.е. качество оценивается как неудовлетворительное.

Интегральным $r_{ин}$ называется комплексный показатель, характеризующий эффективность машины. Его рассчитывают следующим образом: либо как отношение суммарного полезного эффекта (в натуральном выражении) от эксплуатации машины к затратам на ее создание и работу за весь срок службы:

$$r_{ин} = W / (K_0 + S), \quad (1.10)$$

либо как обратное отношение этих затрат к полезному эффекту:

$$r_{ин} = (K_0 + S) / W, \quad (1.11)$$

где W — количество единиц продукции или выполненной машиной работы за весь срок ее эксплуатации, например, число произведенных заготовок, деталей, тонн или килограммов продукции и т.д.; K_0 — начальные капиталовложения в машину, включающие ее оптовую цену, 9А9тавку, монтаж и наладку; S — эксплуатационные расходы на весь срок службы машины, включая расходы на ее ремонт и обслуживание.

В первом случае интегральный показатель определяется работой, приходящейся на 1 руб. суммарных затрат; во втором — суммой этих затрат в рублях, приходящихся на единицу работы.

Приведенные формулы пригодны для определения интегрального показателя изделий со сроком службы до одного года. При больших сроках службы необходимо внести поправку в сумму капитальных расходов, учитывающих фактор времени (поскольку эти расходы производятся одновременно).

С помощью этой поправки капитальные расходы приводятся к начальному моменту приобретения или изготовления машины. При одинаковых годовых эксплуатационных расходах S в течение T лет значение интегрального показателя рассчитывается по формуле

$$p_{ин} = \frac{W}{k_0(1 + E_n)^T + S}$$

где E_n — нормативный коэффициент эффективности, принимают $E_n=0,15$.

2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА МАШИН ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ

2.1. КАЧЕСТВО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Качество машин в значительной степени зависит от качества деталей на каждой стадии их изготовления, начиная с производства машиностроительных материалов и заканчивая сборкой.

Качество материала — это комплексная характеристика, обеспечивающая технологическую возможность использования материала и надежную его работу в определенных условиях. В нее входят механические, эксплуатационные и технологические свойства. Материал должен обеспечивать заданную конструктивную прочность изделий, что определяется не только прочностными свойствами в условиях статического нагружения, но и достаточным сопротивлением хрупкому разрушению при динамических нагрузках, а часто и в условиях низких температур. Механические свойства (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ , φ , КС, твердость) должны обеспечивать надежную работу деталей в условиях циклического нагружения (что оценивается часто величиной σ_1), контактной усталости, сопротивления изнашиванию и т.д.

Материал должен отвечать также требованиям минимальной трудоемкости изготовления детали, в частности, хорошей обрабатываемости резанием и давлением, способности получать необходимые свойства при термической и других видах обработки.

Важными являются и экономические требования. Материал должен обеспечивать минимум расходов в процессе изготовления и эксплуатации машин. Эти общие требования к материалам часто противоречивы, например, более прочные материалы менее технологичны. Конкретные решения о выборе материала обычно компромиссны. В массовом производстве в машиностроении предпочитают упрощение технологии и снижение трудоемкости изготовления деталей. В специальных отраслях машиностроения исходят из достижения максимальных эксплуатационных свойств. Однако при этом не следует стремиться к излишне высокой долговечности деталей по отношению к долговечности всей машины.

К типовым факторам обеспечения качества материалов деталей относятся: химический состав; способы получения; способы дополнительной обработки материалов на стадии их изготовления; способы механического, термического и химического воздействия на материал в изделиях.

Качество материала в значительной мере определяется его внутренним строением (структурой). На структуру влияют как химический состав, так и различные методы воздействия на материал. Поэтому один и тот же материал, но по-разному обработанный, обладает разными свойствами и его применяют при различных условиях эксплуатации. Структурный контроль, наряду с химическим анализом и механическими испытаниями, является важной стадией обеспечения качества материалов.

2.1.1. Обеспечение и повышение качества стали

Среди конструкционных материалов первостепенное значение имеют стали и чугуны. Качество стали зависит от ее химического состава, технологии выплавки, дополнительной обработки в жидком состоянии и условий переплава слитков.

Основными требованиями к механическим свойствам конструкционных сталей являются требования по пределу текучести $\sigma_{0.2}$, пластичности (которая оценивается значением относительного удлинения δ и относительного сужения φ образцов), сопротивлению хрупкому разрушению (KCV, KCT, K_{Ic}) и порогу хладноломкости t_{50} . Долговечность работы изделия зависит от сопротивления усталости (σ_{-1}), изнашиванию и коррозии.

Прочность стали обеспечивается за счет нескольких механизмов упрочнения: твердорастворного ($\Delta\sigma_{тр}$), дислокационного ($\Delta\sigma_{д}$), дисперсионного ($\Delta\sigma_{д.у}$), зернограничного ($\Delta\sigma_{з}$), субструктурного ($\Delta\sigma_{с}$) и перлитного ($\Delta\sigma_{п}$). Общая прочность стали может быть определена суммированием этих значений, например, применительно к пределу текучести:

где

$$\sigma_{0.2} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{тр} + \Delta\sigma_{д.у} + \Delta\sigma_{з} + \Delta\sigma_{д} + \Delta\sigma_{с} + \Delta\sigma_{п},$$

где $\sigma_0 = 2 \cdot 10^4$ G; G — модуль сдвига железа.

Таблица 1

Механизмы упрочнения стали

Механизм упрочнения	Структура	Компоненты механизма упрочнения	Расчетная формула
Твердорастворный	Феррит+перлит Мартенсит	Легирование феррита Легирование мартенсита	$\Delta\sigma_{тр} = \sum K_i C_i$
Дислокационный	Феррит+перлит Мартенсит	Дислокации в феррите ($\beta = 10^7 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$) Дислокации в мартенсите ($\beta = 10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$)	$\Delta\sigma_{д} = \varphi M_0 G b \beta^{1/2}$
Дисперсионный	Феррит+перлит Мартенсит	Перлитная составляющая Дисперсные карбонитриды	$\Delta\sigma_{д.у} = 0,84 M_0 [Gb/2\pi] \cdot k_d \ln(\lambda/2_v)$
Зернограничный	Феррит+перлит Мартенсит	Размер зерен и субзерен феррита Размер мартенситных пакетов, двойников, субзерен	$\Delta\sigma_{з} = k_v d^{-1/2}$ $\Delta\sigma_{с} = k_c l^{-m}$ где $m = 0.5 \dots 1.0$

Условные обозначения: G — модуль сдвига железа ($G \sim 84000$ МПа); K_i — коэффициент упрочнения i -м элементом; C_i — концентрация i -го элемента в α -Fe; M_0 — ориентационный множитель, для α -Fe $M_0 = 2.75$; v — вектор Бюргера, $v = 0,25$ нм; k_d — расстояние между частицами; k_d — коэффициент, определяющий тип дислокаций, $k_d = 1,25$; Π — содержание перлита в структуре, %; φ — коэффициент, $\varphi = 0,5$; β — плотность дислокаций; K_v — коэффициент упрочнения, $K_v = 20 \text{ Н/мм}^{3/2}$; d — размер зерна, мм; K_c — коэффициент, учитывающий строение субструктуры, $K_c = 0,13 \text{ Н/мм}$ при $m = 1$; l — размер субзерна, мм.

В табл.1 приведена краткая характеристика перечисленных механизмов упрочнения стали. Необходимые значения прочностных характеристик обеспечивают подбором состава стали, а также путем термической, термомеханической, химико-термической и деформационной обработок. В ферритно-перлитных низкоуглеродистых сталях повышение $\sigma_{0.2}$ в основном обеспечивается упрочнением феррита за счет $\Delta\sigma_{тр}$, $\Delta\sigma_{д.у}$ и $\Delta\sigma_{з}$, а роль $\Delta\sigma_{д}$, $\Delta\sigma_{с}$ и $\Delta\sigma_{п}$ сравнительно невелика. В сталях, закаленных на мартенсит, большую роль играют величины $\Delta\sigma_{д}$ и $\Delta\sigma_{с}$, зависящие от содержания растворенного углерода.

Порог хладноломкости может быть определен из зависимости

$$\beta t_{50} = \ln \beta - \ln C - \ln d^{-1/2};$$

где β и C — постоянные; d — диаметр зерна.

Для сталей с малой твердостью t_{50} практически линейно зависит от $d^{1/2}$ [26].

Увеличение прочности обычно сопровождается уменьшением пластичности, вязкости и повышением порога хладоломкости. Только измельчение структуры стали приводит к одновременному повышению прочности и понижению порога хладоломкости (рис. 1), увеличивая температурный запас вязкости.

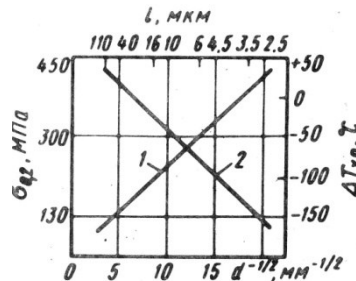


Рис. 1. Влияние размера зерна феррита на предел текучести (1) и температуру перехода в хрупкое состояние (2) в стали, содержащей 0,1% углерода

Наряду с зернограничным фактором большое влияние на свойства стали оказывает химический состав. Для *низкоуглеродистых мягких сталей* можно использовать следующие зависимости:

$$\sigma_{0,2} = 15,4(3,5 + 2,1\text{Mn} + 5,4\text{Si} + 23\sqrt{N} + 1,13d^{1/2})$$

$$t_{50} = -19 + 44\text{S} + 700\sqrt{N} + 2,2\Pi - 11,5d^{1/2},$$

где N — содержание несвязного азота, % по массе; Π — содержание перлита, % по массе.

Перлит и несвязанный азот очень вредны в деформируемых сталях, так как повышают хрупкость стали. В низкоуглеродистых сталях перлит практически не влияет на предел текучести. Положительно влияет марганец, повышая $\sigma_{0,2}$ и практически не влияя на t_{50} . Поэтому в качестве деформируемых часто используют низкоуглеродистые марганцевые стали (например, 09Г2), однако содержание марганца должно быть связано со скоростью охлаждения (чем выше скорость охлаждения, тем меньше марганца) и обычно не превышает 2%. В противном случае могут образовываться игольчатые структуры, вредно влияющие на вязкость.

Таблица 2

Влияние 1% легирующего элемента на свойства стали [40]

Легирующий элемент	$\Delta\sigma_{0,2}$, МПа	$\Delta\sigma_{в}$, МПа	Δt_{50} , °C	Легирующий элемент	$\Delta\sigma_{0,2}$, МПа	$\Delta\sigma_{в}$, МПа	Δt_{50} , °C
C	+4600	+6800	-	Mn	+32	+28	0
N	+4600	+6800	+700	Mo	+11	+45	-
P	+670	+670	+400	Ni	0	+9	-
Sn	+140	-	+150	Cr	-30	-28	-
Si	+85	+85	+44	Al	0	0	+75
Cu	+35	+9	-				

В табл.2 приведены данные, характеризующие изменения предела текучести и температуры охрупчивания при легировании в расчете на 1 % (по массе) легирующего элемента.

Влияние различных параметров микроструктуры и химического состава на изменение Δt_{50} на каждые 15 МПа увеличения предела текучести приведено в табл. 3.

Из анализа этих данных следует, что предпочтительной является низкоуглеродистая марганцевая сталь с зерном, измельченным присадкой алюминия (рис. 2).

Таблица 3

Влияние параметров микроструктуры и состава на Δt_{50} при $\Delta \sigma_t = 15 \text{ МПа}$ [40]

Параметры микроструктуры и состава	$\Delta t_{50}, ^\circ\text{C}$	Параметры микроструктуры и состава	$\Delta t_{50}, ^\circ\text{C}$
Перлит	—*	Олово	+17
Дислокации	+6	Углерод	+10
Выделения	+4	Кремний	+8
Чистота границ	—10	Марганец	—5
Фосфор	+53	Алюминий	—27
Азот	+30		

* В низкоуглеродистых сталях $\sigma_{0,2}$ не увеличивается; при 20% перлита $\Delta t_{50} = +44^\circ\text{C}$.

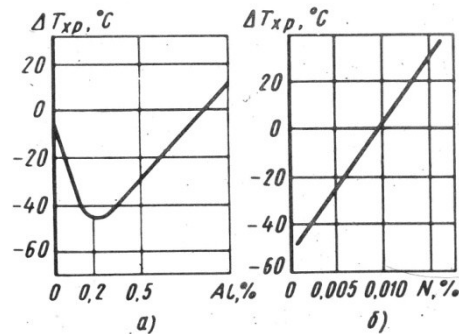


Рис. 2. Влияние алюминия (а) и азота (б) на температуру охрупчивания высокопрочных низколегированных сталей с феррито-перлитной структурой

Для среднеуглеродистых ферритно-перлитных сталей интенсивность влияния различных факторов на свойства количественно отличается от описанной и существенно зависит от содержания углерода или от количества перлита в их структуре. По мере роста содержания перлитной составляющей она начинает играть основную роль в изменении прочности и пластичности. Для сталей, содержащих разное количество перлита (вплоть до эвтектоидного состава), можно использовать следующее соотношение:

$$\sigma_{0,2} = 15,4 [\alpha^{1/3} (2,3 + 3,8\text{Mn} + 1,13d^{-1/2}) + (1-\alpha)^{1/3} (11,6 + 0,25\text{So}^{-1/2}) + 4,15\text{Si} + 27,6\sqrt{N}],$$

где α — доля феррита по объему; d — размер зерна феррита; So — межпластиночное расстояние в перлите, мм.

Анализ этого уравнения позволяет установить влияние различных факторов на предел текучести (рис. 3); $\sigma_{0,2}$ зависит от размера ферритного зерна тем меньше, чем больше содержание перлита. При эвтектоидном составе (100% перлита) определяющим является влияние перлита и межпластиночного расстояния в нем, но при этом сохраняется и влияние легирующих элементов.

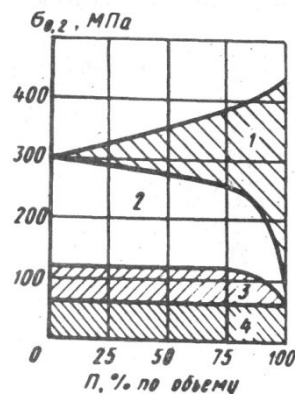


Рис. 3. Влияние объемной доли перлита на вклад различных факторов, способствующих повышению предела текучести сталей: 1 — перлит; 2 — величина ферритного зерна; 3 — содержание марганца; 4 — содержание кремния и азота

Температура, при которой ударная вязкость образцов средне- и высокоуглеродистых ферритно-перлитных сталей составляет 27 Дж/см², [40].

$$t = \alpha(-46 - 11,5d^{1/2}) + (1 - \alpha)(-335 + 5,6S_0^{-1/2} - 13,3p^{-1/2} + 3,48 \cdot 10^6 a) + 48,751 + 762\sqrt{N}$$

где p — размер перлитного зерна, мкм; a — толщина цементитной пластинки в перлите, мм.

Влияние содержания углерода на температуру перехода в хрупкое состояние и ударную вязкость нормализованной стали показано на рис. 4. С увеличением содержания углерода понижается значение ударной вязкости стали и возрастает температура вязко-хрупкого состояния.

Морфология перлита влияет на свойства стали сложным образом (рис. 5). Уменьшение S_0 ухудшает ударную вязкость стали, но одновременное утонение цементитных пластин (уменьшение a) влияет противоположным образом. Когда оба эти процесса взаимно уравниваются, суммарное влияние морфологии перлита не проявляется. Оптимальное межпластиночное расстояние в перлите зависит от содержания углерода в стали:

$$S_{opt} = 6,7 \cdot 10^{-6} [0,8(1-a)\%C - 0,12]^{2/3}.$$

Из этого уравнения следует, что с увеличением содержания углерода в стали для обеспечения S_{opt} нужно добиваться измельчения структуры. Этот вывод справедлив также и для эвтектоидной стали.

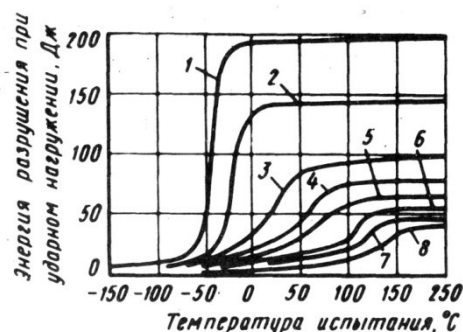


Рис. 4. Влияние содержания углерода на температуру перехода в вязко-хрупкое состояние и ударную вязкость нормализованной стали: 1 — 0,11% C; 2 — 0,20% C; 5 — 0,31% C; 4 — 0,41% C; 5 — 0,49% C; 6 — 0,60% C; 7 — 0,69% C; 8 — 0,80% C

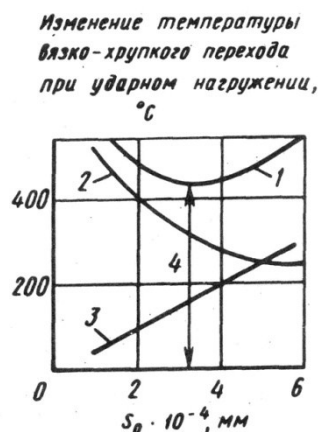


Рис. 5. Влияние межпластиночного расстояния S_0 и толщины a цементитных пластинок на их вклад в температуру вязкого перехода: 1 — общий эффект; 2 — вклад S_0 ; 3 — вклад a ; 4 — оптимальное межпластиночное расстояние

Хорошим сочетанием свойств обладают *термоулучшенные стали*. Чаще всего это среднеуглеродистые (0,3—0,5 % C), низко- и среднелегированные стали. Основные особенности этих сталей: повышенные прочностные свойства (для низколегированных сталей $\sigma_{0,2} = 700 \dots 850$ МПа, $\sigma_b = 900 \dots 1100$ МПа), малая чувствительность к концентраторам напряжений, высокий предел выносливости, достаточный запас вязкости. Кроме того, эти стали должны обладать хорошей прокаливаемостью и малой чувствительностью к отпускной хрупкости. Для термоулучшенных легированных сталей $k_{1c} \sim 250$ МПа·м^{1/2}, а для сталей, легированных никелем и молибденом, $K_{1c} = 300 \dots 350$ МПа·м^{1/2}.

В табл. 4 приведена качественная оценка влияния углерода и наиболее широко используемых легирующих элементов на свойства термоулучшаемых сталей.

Таблица 4

Влияние углерода и некоторых легирующих элементов на свойства стали

Свойства стали	Элемент								
	Mn	Si	Cr	Ni	W, Mo	B до 0,005%	V, Ti, Nb <0.2%	V>0.3 %	C
Прочность	↑	↑	↑	↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑
Хладостойкость	—	↓	↓	↑	↑	↓↑	↑	↓	↓
Прокаливаемость	↑	↑	↑	↑	↑↑	↑↑	—	↑	↑
Склонность к перегреву		↓	—	—	↓	↓	↓↓	↓↓	
Склонность к обезуглероживанию	↓	↑↑	↓↓	↑	↓	—	—	↓↓	↑
Склонность к графитизации	↓	↑↑	↓↓	↑	↓	—	—	↓↓	↑↑

Условные обозначения: ↑ — повышает; ↑↑ — сильно повышает; ↓ — понижает; ↓↓ — сильно понижает; ↑↓ — двойственный характер влияния.

Чаще всего используют легирование хромом, который повышает прокаливаемость и прочностные свойства стали. Но хромистые стали склонны к отпускной хрупкости, поэтому после отпуска их быстро охлаждают (в воде или масле). Введение 0,1—0,2% -V (например, в сталь 40ХФА) повышает механические свойства хромистых сталей, главным образом ударную вязкость. Введение бора в эти стали (0,002—0,005 %) увеличивает прокаливаемость, но повышает порог хладноломкости.

Совместное легирование хромом (например, стали 40ХГ) (0,9—1,2%) и марганцем (0,9—1,2%) обеспечивает получение высокой прочности и прокаливаемости. Однако, такие стали имеют невысокую вязкость и повышенный порог хрупкости, склонны к отпускной хрупкости и укрупнению структуры при термической обработке. Титан в этих" сталях уменьшает склонность к перегреву, а бор увеличивает прокаливаемость.

Часто термоулучшаемые стали легируют комплексом Cr+Si+Mn (такие стали называют хромансилами). Эти стали обладают высокой прочностью и хорошей свариваемостью, но склонны к отпускной хрупкости и обезуглероживанию при нагреве. Высокие прокаливаемость и ударная вязкость хромансильных сталей (например, сталь 30ХГСНА) обеспечивает их дополнительное легирование 1,4—1,8% Ni.

Высокой прокаливаемостью, прочностью и ударной вязкостью при низкой температуре вязко-хрупкого перехода обладают хромоникелевые стали, содержащие до 3% Ni. Склонность этих сталей к обратимой отпускной хрупкости устраняют дополнительным легированием молибденом или вольфрамом (например, сталь 40ХН2МА). Такие комплексно-легируемые стали являются воздушно-закаливаемыми. Еще более высокие свойства этих сталей, особенно прочность и ударная вязкость, обеспечиваются измельчением структуры за счет дополнительного легирования ванадием (например, сталь 36Х2Н2МФА). Такие стали обладают повышенной теплостойкостью и могут быть использованы при температуре 400—450°С. Их применяют для изготовления наиболее ответственных деталей турбин и компрессорных машин.

Качество стали в значительной мере зависит от содержания *вредных примесей*. Вредными примесями являются, прежде всего, сера, фосфор, мышьяк, кислород, азот и водород. Содержание некоторых примесей в сталях разных по качеству групп приведены в табл. 5.

Содержание вредных примесей в сталях

Группа стали по качеству	Содержание примесей, %, не более				
	S	P	As	N	O
Обыкновенного качества	0,06	0,08	0,08	0,010	0,006+ 0,040++
Качественные	0,04	0,04	0,08	0,020	0,006+ 0,040++
Высококачественные	0,025	0,025	—	0,020	0,003

+ в спокойных сталях, ++- в кипящих сталях.

Кислород и сера присутствуют в стали в основном в виде неметаллических включений (оксидов, сульфидов и оксисульфидов). Фосфор и мышьяк находятся в твердом растворе, существенно усиливая хладноломкость стали. Водород растворен в твердых фазах стали, азот частично находится в растворе, а частично связан в нитриды.

Неметаллические включения (оксиды, сульфиды, нитриды) снижают прочность, контактную выносливость, сопротивление усталости, ударную вязкость и другие свойства стали, если размеры включений составляют 20 мкм и более. Субмикроскопические включения (менее 1 мкм), к которым в основном относятся дисперсные нитриды, не оказывают вредного влияния на свойства, а даже наоборот повышают прочность стали (дисперсионное упрочнение).

Сульфиды, оксиды, оксисульфиды, силикаты заметно снижают пластичность и ударную вязкость стали, прежде всего в поперечном направлении относительно направления прокатки. Эти включения при прокатке вытягиваются в волокна и полоски, доля металл анизотропным. Такая анизотропия не устраняется термической и другими видами обработки и поэтому единственным способом повышения механических свойств по всем направлениям в металле является его глубокая очистка от вредных примесей в процессе плавки, раскисления и последующей выпечной обработки.

Вредное действие растворенного азота проявляется в снижении пластичности и вязкости стали вследствие ее старения. Содержание азота в сталях составляет 0,005—0,020%; оно выше в сталях, выплавленных в дуговых электропечах. Азот усиливает эффекты старения и уменьшает срок технологической годности стального листа и ленты для операций холодной обработки давлением. Перевод азота из раствора в нитриды или карбонитриды делает сталь нестареющей. Кроме алюминия для этой цели иногда используют небольшие добавки ванадия, титана или ниобия (например, сталь 08Фкп). Эти элементы обеспечивают не только измельчение зерна, но и значительное дисперсионное упрочнение стали.

Вредное действие водорода особенно проявляется в легированных сталях и состоит в усилении склонности стали к хрупкому разрушению. Содержание водорода в легированных сталях не должно превышать 1,5—2,8 см³, а в углеродистых сталях допускается до 3—4 см³ на 100 г стали [26]. Если содержание водорода больше, то возможно появление флокенов, представляющих собой трещины толщиной 0,01 — 0,1 мм, заполненные водородом. Для предупреждения образования флокенов нужно удалять газы из жидкой стали или проводить диффузионный отжиг заготовок с очень медленным охлаждением по специальному режиму.

Для удаления кислорода из жидкой стали проводят ее *раскисление*, обеспечивая прочность и предупреждая хрупкое разрушение при горячем деформировании. По степени раскисления различают спокойные (сп), полуспокойные (пс) и кипящие (кп) стали. В спокойных сталях содержание кислорода снижается до 0,005—0,006% (в высококачественных сталях даже до 0,002—0,003 % [26]) путем раскисления марганцем, кремнием и алюминием. Кипящие стали

раскисляют марганцем до содержания кислорода 0,02—0,04 %, а полуспокойные — марганцем и алюминием до содержания кислорода примерно 0,02% [7, 12].

Высококачественные и большинство качественных сталей выпускают только спокойными. Стали обыкновенного качества и низкоуглеродистые качественные стали выплавляют спокойными, полуспокойными и кипящими. Кипящие стали дешевле спокойных и обладают повышенной технологической пластичностью, так как содержат очень мало кремния (до 0,07%), но они менее прочны, более склонны к старению и имеют высокий порог хладноломкости, что исключает возможность их применения при низких температурах (за исключением деталей, получаемых глубокой вытяжкой). Пластичность кипящих сталей должна сохраняться не менее 6 мес. хранения [12].

Полуспокойная сталь имеет повышенный выход годного по сравнению со спокойной и менее выраженные недостатки по сравнению с кипящей сталью.

При увеличении объема непрерывной разливки стали выход годного увеличивается до 95—98% и кипящая сталь теряет свое главное преимущество (по экономичности из-за высокого выхода годного). Поэтому в будущем следует ожидать существенного уменьшения объема выпуска кипящих и полуспокойных сталей.

Для повышения качества стали применяют *внепечную обработку, микролегирование жидкого металла и переплав слитков*. Внепечная обработка включает в себя процессы вакуумирования, обработки синтетическим шлаком, продувки инертным газом, модифицирования активными добавками (кальцием, редкоземельными металлами и др.). Более подробная характеристика методов внепечной обработки приведена в табл. 6.

Микролегирование — это добавки в сталь небольших количеств (до 0,2%) активных легирующих элементов (V, Nb, Ti) для измельчения структуры и повышения прочностных свойств и хладнотойкости. Микролегирование в сочетании с контролируемой прокаткой обеспечивает повышение прочности углеродистых и низколегированных сталей без термической обработки [40].

Микролегирование бором (до 0,003%) обеспечивает как измельчение структуры, так и сильное повышение прокаливаемости, что проявляется в значительном увеличении прочностных свойств термообрабатываемых сталей. Однако стали с бором имеют высокую температуру перехода в хрупкое состояние.

Таблица 6

Способы внепечной обработки металла [19, 26]

Способ обработки	Результат обработки
Вакуумирование (в ковше или при переливе из ковша в ковш)	Повышение пластичности стали, выхода годного металла, сокращение длительности противоблоксной обработки
Продувка инертными газами (в частности, аргон), разливка в среде инертного газа	Повышение пластичности стали и улучшение качества поверхности проката
Обработка в ковше синтетическим шлаком	Повышение изотропности свойств и выхода годного металла, увеличение производительности печи
Разливка под жидкими шлаками	Повышение выхода годного, улучшение качества поверхности
Продувка порошкообразными материалами	Очистка от газов и неметаллических включений, снижение содержания серы, повышение механических и эксплуатационных свойств стали, повышение выхода годного
Вакуумирование с обработкой синтетическим шлаком	Сокращение продолжительности плавки и противоблоксной обработки, повышение свойств стали и выхода годного

Переплав сталей обеспечивает потребности машиностроения в особо чистом металле, отличающемся однородностью механических свойств [65]. Краткая характеристика способов переплава приведена в табл. 7.

Таблица 7

Показатель	Переплав			
	вакуумный индукционный	вакуумный дуговой	электрошлаковый	электронно-лучевой
Максимальная масса слитка, т	50	50	50	20
Шихтовые материалы	Скрап, ферросплавы, металл в кусках произвольной формы	Специальные электроды	Специальные электроды	Литые электроды или прессованные блоки
Рабочее давление, Па	$10^{-1} — 10^{-2}$	≥ 1	10^5	$10^{-2}-10^{-3}$
Температурный режим	Температура ограничена стойкостью огнеупоров, хорошая регулировка режима, нужная выдержка	Высокая температура дуги, выдержка невозможна	Ограниченная температура, выдержка невозможна	Любая температура, возможны перегрев и выдержка
Источник теплоты	Индукцируемый ток	Электрическая дуга	Прохождение тока через шлак	Поток электронов
Качество слитка	Обычное, поверхность чистая	Высокое, требуется обдирка поверхности	Высокое, очень хорошая поверхность	Высокое, требуется обдирка поверхности
Основной эффект очистки	Хорошо удаляются газы, уменьшение оксидов; возможны потери марганца и хрома из-за испарения	Посредственная очистка от газов; уменьшение оксидов	Отличная очистка от сульфидов и оксидов; слабое удаление газов	Полное удаление газов, снижение содержания оксидов, удаление легкоплавких примесей; потери элементов из-за испарения
Производительность, т/ч	0,3 — 5	До 2	1,2-2	До 1,2
Расход энергии, кВт*ч/кг	4	1	1	1

Новым направлением повышения качества стали является производство отливок из армированной квазимонолитной стали АКМ. Армирующие вкладыши в слитках уменьшают ликвацию примесей и по качеству делают такую сталь близкой к стали электрошлакового переплава, но дешевле ее. Дальнейшим резервом повышения качества стали является производство стали из металлизированных окатышей, отличающихся малым содержанием вредных примесей (S, P, газы) [60].

2.1.2. Обеспечение качества чугуна

Чугун является основным материалом литых деталей машин. В машиностроении на долю чугуновых отливок приходится около 75% всей массы литья [5]. Качество чугуна обеспечивается выбором шихты, оптимизацией химического состава, условий плавки и разливки и комплексом мер для получения требуемой структуры.

Структура является основным фактором, определяющим свойства чугуна. По структуре чугуны подразделяют на графитизованные (серые, высокопрочные и ковкие), белые и половинчатые.

Широкое применение серого чугуна объясняется его хорошими технологическими свойствами (литейные свойства, обрабатываемость резанием) и достаточными для многих мало- и средненагруженных деталей машин прочностными свойствами. Кроме того, наличие пластинчатого графита в структуре серого чугуна обеспечивает его повышенные антифрикционные свойства и демпфирующую способность. Графитные включения делают чугун малочувствительным к различным концентраторам напряжений (дефектам поверхности, надрезам, выточкам и т.д.). Поэтому серый чугун является изотропным материалом и нечувствителен к качеству обработки поверхностей деталей. Основные недостатки серого чугуна: пониженная прочность и практически полное отсутствие пластичности. Наименьшую прочность (100—180 МПа) имеют серые чугуны с ферритной основой, в перлитных чугунах прочность почти в 2 раза выше.

Структура и свойства серого чугуна зависят от его химического состава, прежде всего содержания углерода и кремния, а также скорости охлаждения, зависящей от толщины стенки отливок. Примеры структурных диаграмм чугунов, связывающих указанные выше параметры, приведены на рис. 6. В зависимости от степени графитизации структуры чугуна различают белый чугун (область I), в котором весь углерод находится в виде цементита; половинчатый чугун (область II), в котором большая часть углерода (более 0,8%) находится в виде цементита, т.е. структура чугуна графитизована только частично; перлитный серый чугун (область III), в котором 0,7—0,8% С находятся в виде эвтектоидного цементита, а остальная часть углерода — в виде пластинчатого графита; ферритно-перлитный серый чугун (область IV), в котором только небольшая часть углерода (обычно 0,1—0,6%) связана в виде цементита; ферритный серый чугун (область V), в котором весь углерод находится в виде графита.

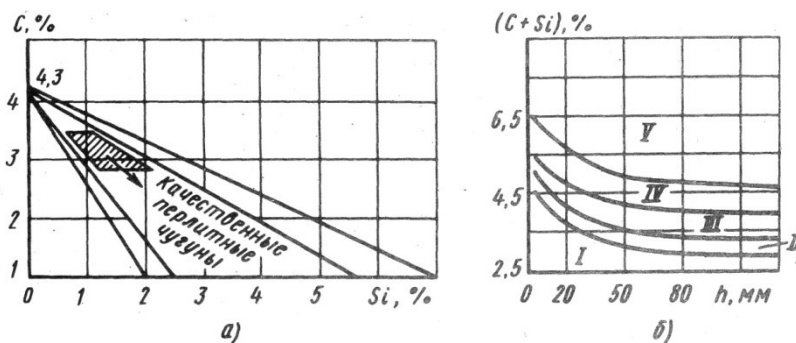


Рис. 6. Структурные диаграммы чугунов [6]:

а — влияние С и Si; б — влияние скорости охлаждения (толщины h стенки отливки) и (С+ Si) на структуру чугуна; I — белые чугуны; II — половинчатые чугуны; III—V — серые чугуны

Наиболее качественными являются перлитные серые чугуны с измельченной структурой перлита и графита. Область этих чугунов показана заштрихованным участком на рис. 6, а. Для получения таких чугунов необходимо увязывать химический состав и скорость охлаждения. В отливках небольшого сечения, охлаждающихся ускоренно, или в чугунах с пониженным содержанием углерода нужно увеличивать содержание кремния.

Содержание марганца в серых чугунах не превышает 1,25—1,40%. Марганец способствует перлитизации структуры, но затрудняет графитизацию чугуна. Вредной примесью в чугуне является сера. Она ухудшает механические и литейные свойства чугуна. Поэтому ее содержание ограничивают обычно 0,1%. Содержание фосфора в сером чугуне обычно составляет

до 0,2%, но иногда допускается даже до 0,4—0,5%. Фосфор образует фосфидную эвтектику, которая улучшает литейные свойства чугуна.

Для увеличения количества перлита в структуре серого чугуна и повышения его прочности, износостойкости и антифрикционных свойств применяют его легирование небольшим количеством хрома, марганца, никеля, меди, ванадия, молибдена. Относительное влияние этих элементов на прочность серого чугуна показано на рис. 7 [47]. Наиболее часто легирование применяют при получении чугунов высоких марок и антифрикционных серых чугунов.

С целью измельчения структуры серых чугунов, устранения опасности частичного отбела (т.е. исключения участков со структурой белого и половинчатого чугунов) и повышения свойств (прочностных, технологических, эксплуатационных) применяют

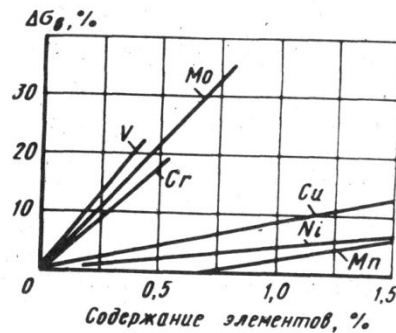


Рис. 7 Относительное влияние легирующих элементов на увеличение прочности ΔG_g модифицирование

Модификаторы серого чугуна весьма разнообразны по составу однако точных данных об их эффективности нет. Некоторое представление о влиянии модификаторов на параметр качества чугуна дает рис.8 [57] Большое внимание в последнее время уделяется использованию редкоземельных металлов (Ce, Y), которые в небольших количествах (0,03-0,1%) способствуют графитизации, а в количестве 0,15-0,25% сфероидизируют и резко повышают механические свойства чугуна.

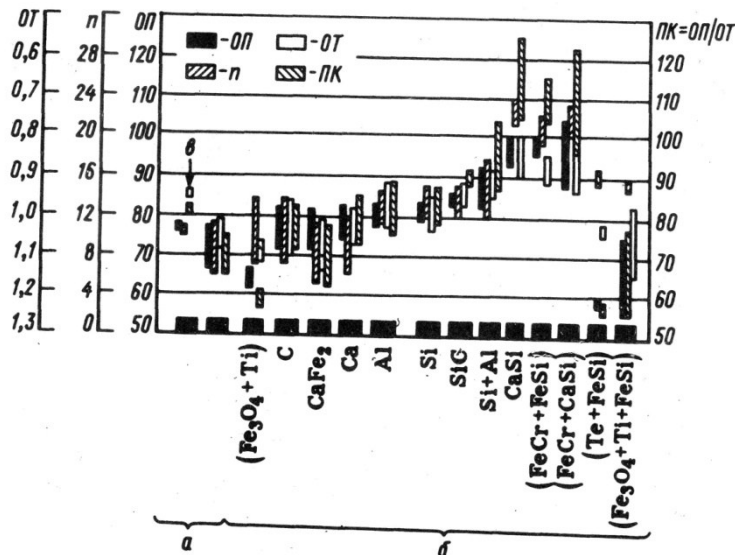


Рис. 8 Влияние модификаторов на структуру и свойства чугуна со степенью эвтектичности ($S_{\Sigma}=0,77$) [8]: А – не модифицированный; б – модифицированный; в – без перегрева; Оп – относительная прочность; От – относительная твердость; n – число включений графита на 1 см^2 поверхности отливки; ПК – показатель качества (ПК=ОП/ОТ)

С помощью модифицирования в сочетании с легированием можно значительно повысить прочность серых чугунов (до $\sigma_B=450 \text{ МПа}$). Однако необходимым условием получения таких чугунов является их электроплавка (взамен ваграночной) или применение дуплекс-процесса вагранки — электропечь. В этих случаях обеспечивается более точный химический

состав чугуна и возможна выплавка чугунов с низким содержанием серы (около 0,02%) и углерода (2,2—2,5%).

Одновременное повышение прочности и пластичности чугуна достигается при переходе от пластинчатой формы графита к шаровидной или вермикулярной (переходной). Высокопрочный чугун с шаровидным (ВЧШГ) или вермикулярным (ВЧВГ) графитом получают путем модифицирования жидкого чугуна магнием, церием или комплексными присадками, содержащими щелочноземельные (ЩЗМ) и редкоземельные (РЗМ) металлы. В качестве ЩЗМ используют магний и кальций, а в качестве РЗМ — чаще всего церий или иттрий. Составы применяемых модификаторов и способы модифицирования высокопрочных чугунов приведены в табл. 8.

Таблица 8

4.8. Модификаторы для получения высокопрочного чугуна [57]

Модификатор	Содержание элементов, %			Метод обработки чугуна
	Mg	Ca	РЗМ	
Mg	100	-	-	Под давлением в специальных ковшах и автоклавах
Ni-Mg Ni-Fe-Mg Ni-Cu-Mg	5-20	-	-	В ковшах открытого типа
Fe-Si-Mg	5-15	-	-	В барабанных, конвертерных или других открытых ковшах с введением присадок в колоколах, карманах ковшей или пригрузением в ковшах
Fe-Si-Ca-Mg	5-8	2-20	-	
Fe-Si-Ca-Mg-РЗМ	3-12	3-15	1,5-12	
РЗМ	До 7	-	80-90	В открытых ковшах или в литниковую чашу
Fe-Si-Al-РЗМ	-	-	10-30	

Различие в получении ВЧВГ и ВЧШГ состоит лишь в меньшем количестве глобуляризирующих элементов, вводимых в расплав при модифицировании (в случае ВЧВГ). ВЧШГ значительно превосходит серый чугун по прочности, пластичности и ударной вязкости. Он отличается также высокой плотностью и герметичностью и пригоден для деталей гидроаппаратуры, работающих под давлением до 40 МПа. ВЧШГ и ВЧВГ обладают хорошей износостойкостью и их используют для деталей, работающих в условиях трения при высоких давлениях и затрудненных условиях смазывания. ВЧВГ уступает ВЧШГ по механическим свойствам, но обладает меньшей чувствительностью к изменению толщины стенки отливки и поэтому его используют при получении крупногабаритных массивных отливок.

Некоторые примеси оказывают вредное влияние на процесс модифицирования и свойства высокопрочных чугунов. Поэтому их содержание должно быть ограничено (0,009% Pb; 0,13% Sn; 0,026% Sb; 0,04% Ti; 0,08% As; 0,3% Al).

Для получения чугуна высоких марок используют легирование небольшими количествами Ni, Cr, Cu, Mo. С целью обеспечения высокой пластичности ВЧШГ содержание Mn в нем не должно превышать 0,04%, что сокращает, а иногда и вовсе исключает термическую обработку.

Содержания C и Si в ВЧШГ должны быть взаимно согласованы (рис. 9), а их сочетание зависит от толщины стенки отливки. С увеличением толщины стенки уменьшают суммарное содержание C и Si.

Ковкий чугун получают путем графитизирующего отжига. Оптимальное содержание элементов в ковком чугуне (2,3—3% C; 0,8—1,4% Si; 0,3—0,7% Mn; до 0,18% S) рассчитано на получение требуемых структуры и свойств после отжига. Сокращение продолжительности отжига (с использованием специального модифицирования жидкого чугуна) снижает стоимость литья [5].

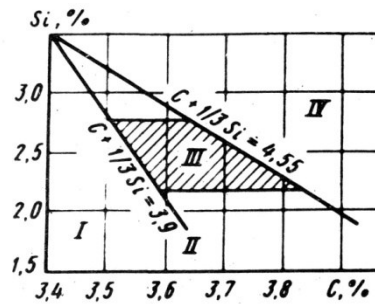


Рис. 9. Рекомендуемое для ВЧШГ содержание углерода и кремния [8]:

I—область повышенных усадочных раковин; II—область составов с тенденцией в отбелу; III — область оптимальных составов; IV — область составов, при которых возможна флотация графита

Ковкие чугуны применяют только для получения мелких тонкостенных отливок, но в последнее время эти отливки получают часто из ВЧШГ и ВЧВГ.

В настоящее время находит применение конструкционный алюминиевый чугун с пластинчатым графитом [57]. По сравнению с обычным серым чугуном в нем уменьшено содержание Si (до 1—1,5%) и введен Al (до 2,5—3,0%). Наиболее благоприятное сочетание характеристик прочности, вязкости и пластичности достигается в нем при содержании Si до 1% и модифицировании силикокальцием. Отливки из такого чугуна подвергают отжигу для снятия напряжений.

Резервом повышения прочности чугунных отливок является термическая обработка. Термическое упрочнение используют преимущественно для отливок из легированных чугунов.

2.1.3. Обеспечение качества высокопрочных материалов

К высокопрочным материалам относят стали с $\sigma_b > 1600$ МПа (или $\sigma_{0,2} > 1400$ МПа) [7, 21], титановые сплавы при $\sigma_b > 800$ МПа и алюминиевые сплавы при $\sigma_b > 450$ МПа [21]. Получение материалов высокой прочности ведет к понижению характеристики пластичности и вязкости и прежде всего сопротивления хрупкому разрушению.

Поэтому надежность материала в конструкциях характеризуется конструктивной прочностью, т.е. комплексом механических свойств, находящихся в корреляции с эксплуатационными условиями работы изделия. Критериями конструктивной прочности являются характеристики прочности (σ_b , $\sigma_{0,2}$ и т.д.) и критерий Ирвина K_{Ic} , характеризующий способность материала тормозить развитие трещин. Критерий Ирвина связан с длиной трещины, способной вызвать хрупкое разрушение, следующим соотношением:

$$K_{Ic} = \alpha \sigma_{cp} \sqrt{\pi l_{кр}}$$

где α — коэффициент, учитывающий форму трещины; σ_{cp} — среднее расчетное напряжение; $l_{кр}$ — критическая длина трещины.

Величину K_{Ic} следует учитывать при расчете деталей на прочность. На рис. 10 представлена обобщенная диаграмма конструктивной прочности высокопрочных сталей различных классов и способов упрочнения [2]. Штриховой линией на диаграмме отмечено значение $\sigma_{0,2} = 1400$ МПа, являющееся нижней границей предела текучести для высокопрочных сталей. Сочетание высоких значений $\sigma_{0,2}$ и K_{Ic} достигается только при использовании термомеханической обработки или применении мартенситно-старяющих (МСС) или принципиально новых (МАС, СМЗ) сталей. Высокопрочные стали имеют несколько характерных особенностей. Во-первых, они обладают повышенной чувствительностью к концентраторам напряжений, поэтому должны быть приняты меры по их уменьшению, а также по уменьшению водородной хрупкости, коррозии под напряжением, склонности к замедленному разрушению. Все эти виды хрупкости усиливаются с ростом прочности сталей. Поэтому оптимальная конструктивная прочность обычно не соответствует максимальным прочностным свойствам сталей. Кроме того,

требуется защита сталей от коррозии. После термообработки очистка должна быть дробе- или пескоструйной, обработка в травильных ваннах недопустима.

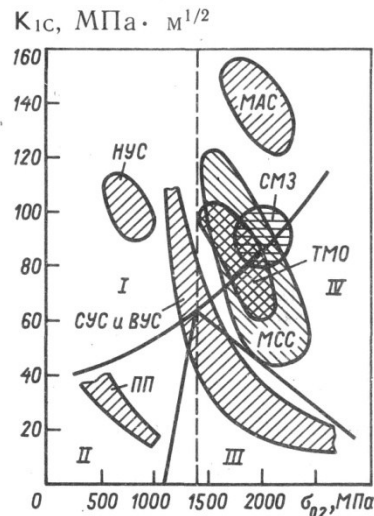


Рис. 10. Диаграмма конструкционной прочности сталей:

МЛС—метастабильные аустенитные стали; *СМЗ*—стали со сверхмелким зерном; *ТМО* — стали после термомеханической обработки; *МСС*— мартенситно-стареющие стали; *СУС* и *ВУС*— средне- и высокоуглеродистые стали; *НУС*—низкоуглеродистые низколегированные стали; *ПП* — эвтектоидные стали с пластинчатым перлитом; I—область вязкого разрушения; II — область транскристаллитного скола; III—область интеркристаллитного скола; IV — область квазискола

Шлифование целесообразно сопровождать поверхностным пластическим деформированием.

Второй особенностью высокопрочного состояния сталей является уменьшение предела выносливости при повышении статической прочности (рис. 11). Аналогичная зависимость характерна и для высокопрочных алюминиевых сплавов.

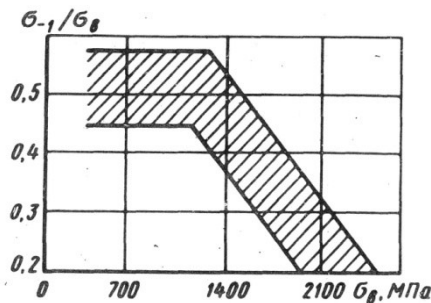


Рис. 11. Зависимость отношения σ_1/σ_B от σ_B для различных сталей

Высокопрочные среднелегированные стали содержат до 0,4% С, что обеспечивает σ_B до 2100 МПа. Дальнейшее повышение прочности за счет увеличения содержания углерода недопустимо, так как при этом резко возрастает чувствительность к концентраторам напряжений.

Мартенситно-стареющие стали отличаются от высокопрочных углеродосодержащих сталей меньшей чувствительностью к концентраторам напряжений и меньшей склонностью к коррозионному растрескиванию под напряжением. Они также менее склонны к водородной хрупкости. Предел выносливости этих сталей эффективно повышается накаткой роликом и азотированием. Технологическими преимуществами этих сталей являются высокая прокаливаемость, малая деформируемость при термообработке, хорошая свариваемость и обрабатываемость резанием и давлением. Основная упрочняющая обработка этих сталей состоит из закалки и старения. При этом значительное влияние на свойства сталей оказывают легирующие элементы (рис. 12). Обычно старение проводят при 480—520°C. Однако длительное старение (до 50 ч) при 425—450°C обеспечивает более высокую прочность без снижения пластичности [38]. Весь комплекс свойств МСС существенно повышается за счет термоциклической обработки [33].

Высокопрочные метастабильные аустенитные стали (трип-стали) обладают необычно высокими пластическими свойствами (удлинение до 100%) во время деформирования, сопровождающегося превращением метастабильного аустенита в мартенсит.

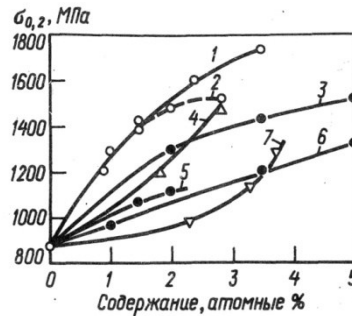


Рис. 12. Влияние содержания легирующих элементов на повышение $\sigma_{0,2}$ железник-левого аустенита (18% Cr) при старении [11]: 1 — Ti; 2 — V; 3 — Al; 4 — Mn; 5 — Nb; 6 — Si; 7 — Mo

Обычно эти стали содержат 0,2—0,5% C, 9—13% Cr, 8—9% Ni, 3—9% Mo, около 2% Si, 1—2% Mn. Основная упрочняющая обработка состоит из закалки для полной аустенизации и теплого наклепа при 400—600°C. Недостатком трип-сталей является склонность к водородной хрупкости, которая может быть уменьшена вакуумным отжигом или обычным отжигом с медленным охлаждением.

Одним из способов значительного увеличения прочности является получение сверхмелкозернистых сталей (СМЗ) с размером зерна до 10 мкм. Обеспечивается это сверхскоростным нагревом до температур, немного выше критических, и очень короткими выдержками. Достоинством СМЗ является сочетание высоких значений прочности, ударной вязкости и критерия K_{Ic} . Эти стали имеют также высокое сопротивление усталости. Недостатком процесса получения СМЗ является невозможность получения сверхмелкого зерна в больших сечениях. Другой недостаток СМЗ — разупрочнение при нагреве.

2.1.4. Обеспечение высоких упругих характеристик

К характеристикам, которыми должны обладать рессорно-пружинные сплавы, относятся высокий предел упругости, высокая релаксационная стойкость, низкие значения характеристик не упругости (статического гистерезиса, упругого последействия, внутреннего трения). Между сопротивлением малым пластическим деформациям (предел упругости) и пределом выносливости во многих случаях существует корреляционная связь.

К основным способам упрочнения, обеспечивающим высокие упругие свойства, относятся:

- пластическое деформирование и последующий стабилизирующий отпуск (старение);
- закалка сталей на мартенсит с последующим отпуском (иногда закалка совмещается с различными видами термомеханической обработки);
- закалка на пересыщенный твердый раствор с последующим старением (иногда и в этом случае используют термомеханическую обработку).

По первому способу упрочняют углеродистые и легированные стали перлитного класса с повышенным содержанием углерода (0,4—1,0%), а также низкоуглеродистые стали аустенитного класса. К этой группе относятся также сплавы меди (однофазные латуни, бронзы), молибдена и рения, ниобия и др. Особенностью сплавов этой группы является анизотропия свойств, резко выраженная в деформированном состоянии, но уменьшающаяся после отпуска.

По второму способу упрочняют углеродистые и легированные стали с содержанием углерода 0,5—0,7%. Упрочнение в этих сталях происходит по мартенситному типу, но при отпуске снимаются напряжения и формируется дисперсная троостно-мартенситная или трооститная структура. Важно при этом, чтобы после термообработки отсутствовал обезуглероженный слой.

По третьему способу упрочняют мартенситно-стареющие стали, бериллиевые бронзы и др. в результате выделения дисперсных частиц избыточных фаз из пересыщенного после закалки твердого раствора при последующем старении. Максимальное упрочнение этих сплавов достигается при использовании термомеханической обработки по следующей технологической схеме: закалка, холодное пластическое деформирование, старение.

Перспективным направлением повышения свойств и создания, новых высокопрочных, пружинных сплавов является совмещение в них нескольких структурных механизмов упрочнения. Существенное повышение свойств достигается с помощью отпуска под напряжением (динамическое старение). На сталях 65Г и 60С2 динамическое старение обеспечивает значение предела упругости на уровне 2000—2100 МПа, что на 30% больше, чем при обычном методе упрочнения [21].

Для изготовления холоднодеформированной, термически обработанной пружинной проволоки обычно применяют углеродистые стали с 0,4—1,0% С, реже сталь 65Г, а в некоторых случаях стали 50ХФА, 70С2ХА, до холодного пластического деформирования подвергнутые патентированию. Предварительное патентирование обеспечивает наибольшее упрочнение при сохранении достаточной пластичности и вязкости. Для уменьшения напряжений и повышения предела упругости и релаксационной стойкости готовые пружины после навивки или гибки подвергают отпуску при 200—350°С. При этом предел упругости может возрасти в 2 раза, хотя предел прочности и предел выносливости возрастают лишь на 5—10%.

При больших диаметрах проволоки не удается обеспечить высоких степеней обжата. Однако по ограниченной выносливости и меньшей склонности к хрупкому разрушению пружины из патентированных сталей превосходят упрочненные с помощью закалки и отпуска. В то же время стали, подвергаемые закалке и отпуску, имеют более высокий предел упругости и большую релаксационную стойкость при 20°С.

Твердость пружин после обычной закалки и отпуска, как правило, составляет HRC 42—48. При большей твердости пружины склонны к хрупкому разрушению.

Пружины и рессоры больших сечений, от которых требуется повышенная релаксационная стойкость, рекомендуется изготавливать из легированных сталей (кремнистых, хромомарганцевых, кремнехромистых, хромованадиевых и др.). Качество пружинных сталей зависит как от их химического состава, так и от режима термической обработки. В табл. 9 приведены свойства и режимы термической обработки углеродистых и легированных пружинных сталей, а в табл. 10 — зависимости предела упругости от температуры отпуска и динамического старения.

В ряде случаев (например, для сталей 60С2, 60С2А, 65С2ВА, 50ХФА) применяют изотермическую закалку на нижний бейнит, что повышает пластичность и вязкость и уменьшает склонность к хрупкому разрушению. Дополнительный отпуск изотермически закаленных сталей при температуре, равной температуре изотермической выдержки, повышает их предел упругости и релаксационную стойкость (табл. 11).

Особую группу составляют пружинные сплавы специального назначения (коррозионностойкие, немагнитные, с низким температурным коэффициентом модуля упругости, высокоэлектропроводные). Высокую коррозионную стойкость пружинных сталей обеспечивает их высокое легирование хромом (стали 30Х13, 40Х13), а также тщательная обработка поверхности (шлифованием и полированием). Используют также хромоникелевые стали аустенитного класса (например, 09Х15Н8Ю, 03Х12НЮД2ТВ и др.), которые одновременно являются и немагнитными. При использовании сталей 08Х18Н9Т и 08Х18НЮТ пружины после навивки подвергают отпуску при 450—500°С. Когда нужна полная немагнитность, применяют стали 17Х18Н9 и 37Х12Н8Г8МФБ в сильно деформированном состоянии. Для упругих элементов с высокой коррозионной стойкостью применяют также сплавы на никельхромовой основе [21]. Свойства сплавов с постоянным и низким температурным коэффициентом модуля упругости приведены в табл. 12.

К высокоэлектропроводным пружинным сплавам относятся бериллиевые и фосфористые бронзы, а также некоторые другие сплавы, преимущественно на основе меди. Свойства бериллиевых бронз после различных видов обработки приведены в табл. 13.

Особый характер упругих свойств лежит в основе эффекта, названного «памятью формы». Этот эффект заключается в восстановлении формы детали, измененной с помощью пластического деформирования, при последующем нагреве или охлаждении. Объясняется этот эффект термоупругим мартенситным превращением, открытым Г.В. Курдюмовым и Л.Г. Хандром в 1949 г. Эффект памяти формы обнаружен у сплавов различных систем (Ti—Ni, Fe—Ni, Cu—Al, Cu—Mn, Ni—Al, Ni—Mn и др.). Наиболее изучен и широко используют сплав нитинол (соответствующий составу NiTi).

Сплавы с эффектом памяти формы обладают сверхупругостью, которая проявляется в том, что образец претерпевает обратимые деформации, которые на один-два порядка больше, чем деформация металлических материалов до условного предела упругости. Такие сплавы используют при создании неразъемных соединений, систем слежения и регулирования, а также в конструкциях, подлежащих самосооружению. Более подробная информация об этих сплавах приведена в работах [21,60].

Таблица 9

Свойства и режимы термической обработки пружинных сталей [21]

Сталь	Критические точки		Режим термической обработки (ориентировочный)			$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	Φ , %
	Ac1	Ac2	Температура закали, °С	Закалочная среда	Температура отпуса, °С				
65	727	752	830	Масло	470	785	980	10	35
70	730	743	830	—”—	470	835	1030	9	30
75	730	—	820	—”—	470	885	1080	9	30
80	730	—	820	—”—	470	930	1080	8	30
85	730	—	820	—”—	470	980	1130	8	30
У9А*	730	—	760-790*	Масло или вода	33-420	—	—	—	—
У10А-У12А*	730	—	770-810*	То же	300-420	—	—	—	—
60Г	—	—	830	Масло	470	785	980	8	30
65Г	—	—	830	—”—	470	785	980	8	30
70Г	—	—	830	—”—	470	835	1030	7	25
55С2	775	840	870	Масло или вода	470	1175	1270	6	30
55С2А									
60С2	750	820	870	Масло	470	1175	1270	6	25
70С3А	—	—	850	—”—	470	1470	1470	6	25
60С2Г	—	—	870	—”—	470	1325	1470	6	25
50ХГ	750	775	850	—”—	470	1175	1270	7	35
50ХГА	750	775	850	—”—	470	1175	1270	7	35
55ХГР	750	790	850	—”—	470	1175	1270	7	35
60С2А	750	820	870	—”—	420	1375	1570	6	20
50ХФА	—	—	850	—”—	470	1080	1270	8	35
50ХГФА	—	—	850	—”—	470	1325	1420	6	35
55С2ГФ	—	—	870	—”—	470	1375	1570	6	25
60С2ХА	—	—	870	—”—	470	1325	14270	6	25
60С2ХФА	—	—	870	—”—	470	1470	1670	6	25
А									
65С2ВА	—	—	850	—”—	420	165	1860	5	20
60С2Н2А	—	—	870	—”—	470	1325	1470	8	20

*При закалке в воде температуру закали принимают по нижнему пределу, а при закалке в масле – по верхнему

Таблица 10

Предел упругости $\sigma_{0,005}$, МПа, пружинных сталей после закалки и отпуска (числитель) и после закалки и динамического старения (знаменатель)

Сталь	Температура отпуска (динамического старения), °С					
	200	250	300	350	400	450
65	1050/1600	1220/1600	910/1300	850/1250	820/1170	730/1030
65Г	1100/2100	1200/2100	1350/2050	1500/1850	1350/1650	1200/1400
60С2А	110/1940	1450/2050	1490/2020	1450/1900	1210/1620	1180/1300
60С2ХА	1220/1700	1500/1900	1520/1920	1620/1900	1500/1800	1300/1060
65С2БА	1220/1680	1400/1890	1580/1950	1690/1910	1590/1850	1420/1660
50Х	950/1510	1000/1550	1150/1550	1160/1500	1200/1400	1050/1259
50ХГА	940/1500	1050/1600	1200/1560	1260/1520	1200/1400	1050/1220
50ХГФА	950/1500	1230/1600	1250/1580	1300/1550	1250/1500	1170/1220
50ХФА	1050/1500	1200/1600	1200/1580	1270/1580	1200/1550	1150/1400
40ХФА	900/1370	930/1450	1050/1420	1100/1400	900/1380	850/1290

Таблица 11

Влияние изотермической закалки и отпуска на механические свойства стали 60С2А

Обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{пл}$, МПа	δ , %	φ , %	КCV, кДж/м ²
Изотермическая закалка с выдержкой при 290°С	2050	1715	1499	11	11	489
То же, отпуск 1 ч при температуре, °С:						
150	1980	1765	1567	12	46	568
290	1930	1812	1648	12,5	50	489
400	1773	1715	1568	13,5	40	372
Закалка и отпуск при 420°С	1765	1648	1529	11	48	353

Таблица 12

Механические свойства сплавов с постоянным и низким температурным коэффициентом модуля упругости

Сталь	Рекомендуемый режим термической обработки	Толщина ленты, мм	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	HRC	$\sigma_{0,005}$, МПа
42НХТЮ	Закалка при 910±10°С, охлаждение водой	0,1—0,9	980	—	5	—	600—700
		1,0—2,0	1080	735	8	30	
44НХТЮ	Старение при 690±10°С, в течение 3 ч	0,1—0,9	1030	—	5	—	600—650
		1,0—2,0	1080	685	—	30	

Примечание. При толщине ленты 0,3 мм для стали 42НХТЮ $\sigma_{0,005} = 700$ МПа, для стали 44 НХТЮ $\sigma_{0,005} = 650$ МПа.

2.1.5. Обеспечение высокой технологической пластичности и сверхпластичности материалов

Высокая технологическая пластичность необходима для сплавов, подвергаемых холодному пластическому деформированию, например, для холодной штамповки. Критерием высокой штампуемости сталей является отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B=0,50..065$, при относительном сужении образца ϕ не менее 40%.

Стали высокой технологической пластичности подразделяют на две группы: нестареющие холоднокатаные и двухфазные. Нестареющие стали должны иметь минимально возможное содержание всех примесей (С, N, Mn, Si, Cr, Ni, S, P и др.). Чтобы сталь была нестареющей, выводят азот из твердого раствора, связывая его нитридообразующими элементами (Al, V, Ti, Cr, В). Важно также низкое содержание в стали кремния. Поэтому для холодной штамповки широко используют кипящие стали (0,8кп, 0,8Фкп) и стали с 0,02—0,07% Al (0,8Ю).

Таблица 13

Свойства некоторых бериллиевых бронз [21]

Обработка (состояние)	Толщина полосы, мм	σ_B , МПа	$\sigma_{0,002}^*$, МПа	E^* , ГПа	δ , %	HV	μ^{**} , мм не менее
Бронза БрБ2							
Закалка(мягкое)	0,15-0,25	400-600	120-150	110-120	≥ 20	≤ 130	8
	>0,25	—	—	—	≥ 30	—	—
Закалка и старение	0,15-0,25	1100-1500	580-600	—	—	≥ 330	—
	>0,25	1150-1500	—	—	≥ 2.0	—	—
Деформация 30-40% (твердое)	0,15-0,25	600-900	440-500	—	—	≥ 170	3
	>0,25	650-950	—	—	≥ 2.5	—	—
Деформирование и старение	0,15-0,25	1150-1600	—	—	$\geq 1,5$	—	—
	>0,25	1200-1600	—	—	—	—	—
Бронза БрБНТ1,7							
Деформация 30-40% (твердое)	0,15-0,25	650-950	380-400	110-120	—	≤ 150	3
	>0,25	—	—	—	≥ 2.5	—	—
Деформирование и старение	0,15-0,25	1100-1500	600-650	120-130	≥ 2.0	≥ 340	—
Бронза БрБНТ1,9							
Закалка (мягкое)	0,15-0,25	400-600	120-150	120	≥ 20	≤ 120	8
Закалка и старение	0,15-0,25	1100-1500	620-650	120-130	—	≥ 330	—
	>0,25	1150-1500	—	—	≥ 2.0	—	—
Деформация 30-40% (твердое)	0,15-0,25	600-900	450-500	110-120	—	≥ 160	3
	>0,25	650-950	—	—	≥ 2.5	—	—
Деформирование и старение	0,15-0,25	1150-1600	900-950	120-130	—	≥ 360	—
	>0,25	1200-1600	—	—	≥ 1.5	—	—

*значения предела упругости $\sigma_{0,002}$ и модуля упругости E приведены для полос толщиной 0,3 мм.

**вытяжка по Эриксену для полос и лент толщиной 0,10-0,25 мм.

Штампруемость зависит и от размера зерна феррита. Слишком мелкое зерно приводит к «пружинящему» эффекту, увеличивающему изнашиваемость штампов. Крупное зерно не обеспечивает качество поверхности и может вызывать разрывы. Поэтому рекомендуется сталь с баллом зерна 6—8.

Для штампованных деталей повышенной прочности применяют низколегированные стали с ферритномартенситной структурой (при количестве мартенсита 20—30%). Такую структуру получают в низкоуглеродистых (0,06—0,12 С) низколегированных сталях (09Г2С, 09Г2, 16ГФР, ЮГ2Ф, 12ХМ и др.) после закалки в воде из межкритического интервала температур (A_{c1} — A_{c3}). В результате стали имеют высокую пластичность, низкий предел текучести ($\sigma_{0,2}$ до 450 МПа) и высокий предел прочности ($\sigma_B > 700$ МПа) при $\sigma_{0,2}/\sigma_B \sim 0,5$. Однако в процессе штамповки σ_B и $\sigma_{0,2}$ существенно повышаются, что приводит и к возрастанию отношения $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ до 0,85—0,88, хотя и в этом случае отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ остается ниже, чем у ферритно-перлитных сталей (0,94—0,96).

Применение двухфазных ферритно-мартенситных сталей позволяет уменьшить толщину листов для штамповки деталей, что обеспечивает значительную экономию металла.

Высокой технологической пластичностью обладают алюминиевые сплавы, используемые при прокатке, ковке, прессовании, волочении, гибке, листовой штамповке. Деформируемые алюминиевые сплавы подразделяют на упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой.

Сплавы на основе систем Al—Mn и Al—Mg (АМц, АМг2, АМгб и др.) не упрочняются термической обработкой и отличаются высокой пластичностью. Сплавы системы Al—Si—Mg (дуралюмины Д1, Д16, Д18 и др.) упрочняются термической обработкой и имеют хорошее сочетание прочности и пластичности. Ковочные (деформируемые) сплавы системы Al—Mg—Si—Cu (АК6, АК8) обладают хорошей пластичностью и стойкостью против трещин при горячем пластическом деформировании. Свойства некоторых деформируемых алюминиевых сплавов приведены в табл. 4.14.

В металлах и сплавах на основе Fe, Ni, Ti, Zr, W, Co, Cd, Bi, Pb, Sn, Zn, Al обнаружено явление сверхпластичности [9,18,38]. Сверхпластичность — это способность металлов и сплавов к равномерной пластической деформации, достигающей сотен и тысяч процентов (без ярко выраженной зоны локализации) при низком сопротивлении деформированию.

Сверхпластичность достигается при напряжениях 1 — 10 МПа. Существуют два вида сверхпластичности: при деформировании материалов вблизи температур фазовых превращений; при деформировании неполимофных металлов или многофазных сплавов при температуре (0,5—0,8) $T_{пл}$, где $T_{пл}$ — температура плавления, в отсутствие фазовых превращений.

Первый вид сверхпластичности проявляется, например, при термоциклировании сталей с различным содержанием углерода (0,2—1,0%) при температуре 540—580°C (деформация до разрушения $\delta=500\text{...}700\%$). Сверхпластичность, связанная с мартенситным превращением, проявляется в трип-сталях.

Второй вид сверхпластичности проявляется в материалах с очень мелким зерном при высоких температурах ($\geq 0,5 T_{пл}$) и при малых скоростях деформирования ($\dot{\epsilon}=10^{-3}\text{...}10^{-5}\text{c}^{-1}$) [18,38]. Допустимая скорость деформирования увеличивается с уменьшением размера зерен. Этот вид сверхпластичности характерен и для материалов, обычно считающихся хрупкими, например, для белых чугунов.

Наилучшие условия сверхпластичности создаются при объемном соотношении фаз 1:1, что характерно для белого эвтектического чугуна. Хорошие результаты достигнуты на мелкозернистых материалах (с размером зерен 0,5—1 мкм), полученных методами порошковой металлургии.

Высокая дисперсность структуры обеспечивается в феррито-аустенитных сталях (микродуплекс-структура). Такую структуру получают закалкой сплавов Fe—Cr—Ni с последующими операциями холодного деформирования и вторичного нагрева.

Свойства некоторых деформируемых алюминиевых сплавов [3, 9, 21, 45, 64]

Сплав	Полуфабрикат	Состояние	Толщина, мм	Свойства			
				$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ, кДж/м ²
АМц	пруток	Без термической обработки	20	170	110	18	—
АМг2	Лист	Отожженный	2	190	100	23	—
	Пруток		20	190	80	25	0,9
АМг5	Лист	“	2,5	300	150	20	0,3
АМг6	Лист лакированный профиль горячекатанный	“	2	340	170	20	—
			6	345	170	20,5	0,2
Д1	профиль прессованный	Закаленный и естественно состаренный	До10	360	220	12	—
Д16	лист	то же	2-4	450	320	19	0,2
АД31	Полоса		20-100	250	210	13	—
АВ	Профиль	Закаленный и искусственно состаренный	20	350	290	13	—
АК6	Штамповка массой более 30 кг	То же	—	427-447	367-378	11,2-12,5	0,14-0,19
В95	профиль прессованный	“	—	600	50	12	—

2.1.6. Обеспечение высокой удельной прочности материалов при малой плотности

Под удельной прочностью понимают значение прочности, приходящееся на единицу плотности ρ или удельного веса $\gamma = \rho g$ материала, т.е. отношение $\sigma_{\text{в}}/\rho$ или $\sigma_{\text{в}}/\rho g$ размерность отношения $\sigma_{\text{в}}/\rho g$ обычно выражают в км.

Из материалов этой группы следует выделить широко применяемые алюминиевые, магниевые, титановые, бериллиевые сплавы, полимерные и композиционные материалы. Плотность этих материалов существенно различается, но не превышает 4,5 г/см³.

Алюминиевые сплавы широко используют в промышленности благодаря выгодному сочетанию механических и физических свойств, коррозионной стойкости, высокой технологичности и большим сырьевым ресурсам. У высокопрочных алюминиевых сплавов отношение $\sigma_{\text{в}}/\rho g$ составляет 11 — 23 км при плотности 2,6 — 2,8 г/см³.

Повышение свойств алюминиевых сплавов достигается за счет совершенствования металлургического процесса, снижения содержания вредных примесей, рационального легирования, выбора рациональных способов получения заготовок и оптимизации режимов упрочняющей обработки.

Высокими прочностными свойствами обладают сплавы систем Al — Cu — Mg (дуралюмины Д1, Д16, Д18, Д19, ВД17), Al — Mg — Si — Cu (ковочные сплавы АК6, АК8), Al — Zn — Mg — Cu (высокопрочные сплавы В95, В93, В96Ц1), Al — Mg — Li (сплавы 1420 и

01429). Все эти сплавы упрочняются термической обработкой, состоящей из закалки и старения. Режимы термической обработки и свойства некоторых сплавов приведены в табл. 15.

Улучшение характеристик конструкционной прочности сплавов В95 и В93 достигается повышением их чистоты и применением двухступенчатого старения. Повышение прочности и жаропрочности, получение аномально высокой упругости обеспечивается за счет легирования сплавов литием. Алюминиевые сплавы 1420 и ВАД23, легированные литием, используют в авиакосмической технике.

Таблица 15

Свойства алюминиевых термообработанных сплавов [21, 33, 45]

Сплав	Обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	$\sigma_B/\rho g$, км
1420	Закалка (воздух), старение при 120°C, 12—24 ч	450	280	12	
01429	Закалка, старение при 120°C, 12 ч	460	340	12.5	18.9
ВАД23	Закалка, старение при 140°C, 24 ч	550	440	12	20.6
В95	Закалка, старение при 115—128°C, 15—17 ч	600	500	9	21.4

Значительному повышению качества изделий из алюминиевых сплавов способствуют процессы горячего изостатического прессования (ГИП) и высокотемпературной газостатической обработки (ВГО). ГИП применяют для увеличения плотности порошковых изделий, ликвидации дефектов в отливках, улучшения структуры материала, повышения пластичности и прочности, снижения анизотропии свойств. ВГО позволяет устранить некоторые литейные дефекты, повысить свойства и их стабильность, уменьшить массу деталей. Разработаны также новые методы высокоскоростного затвердевания алюминиевых сплавов, позволяющие уменьшить неоднородность состава и свойств деталей, измельчить структуру и существенно повысить конструкционную прочность [45].

Таблица 16

Химические составы Mg—Y-сплавов

Марка сплава	Легирующий элемент, %			Остальное
	Y	Mn	Cd	
ИМВ6	7,8—9,0	0,4—0,6	0,2—0,5	0,5—0,15 Ce
ИМВ7	3,0—5,0	0,4—0,8	7,0—10,0	
ИМВ8	7,5—8,5	—	—	0,7—1,1 Zn 0,2—0,5 Nb 0,3—0,8 Zr

У высокопрочных магниевых сплавов отношение $\sigma_B/\rho g = 11...20$ км при плотности 1,6—1,9 г/см³. Для этих сплавов характерны также высокая удельная жесткость и хорошие демпфирующие свойства; их сопротивление усталости в 100 раз выше, чем сопротивление усталости дуралюмина; они могут длительно работать при температуре 350°C и кратковременно при 400°C. Магниевые сплавы легко обрабатываются резанием, хорошо деформируются и свариваются. Основной их недостаток — низкая коррозионная стойкость, которую повышают путем рафинирования, легирования и поверхностной защитой деталей.

Наиболее высокий уровень прочностных свойств имеют магниевые сплавы, легированные иттрием, иногда в комплексе с другими РЗМ, а также цинком, марганцем, кадмием. К этой

группе относят деформируемые сплавы ВМД10, ИМВ6, ИМВ7, ИМВ8 (табл. 16, 17). Хорошие результаты дает легирование магния самарием [83], одновременно иттрием и скандием [47].

Наиболее низкой плотностью обладают сплавы магния с литием ($\rho = 1,3...1,6 \text{ г/см}^3$). Из этих сплавов оптимальным комплексом свойств обладают сплавы МА21 и МА18. Сопоставление свойств этих сплавов со свойствами сплавов средней прочности МА8 и МА2-1, а также сплава LA141A (США) приведено в табл. 18. В США разработано несколько литейных высокопрочных Mg—Li-сплавов (табл.19).

Таблица 17

Механические свойства сплавов Mg—Y в сопоставлении со сплавом Д16 [47,60]

Марка сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ρ т/м ³	$\sigma_B/\rho g$, км
Д16	440—520	290—380	14	2,78	18
ВМД10	270—310	190—210	14—12	1,89	16
ИМВ7	400—460	360—390	6—9	1,90	20

Марка сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
	при 250°С			при 300°С		
Д16	250	200	12	170	120	12
ВМД10	250—270	180—220	18—24	140—200	100—130	44—45
ИМВ7	290—360	260—300	18—24	190—210	160—170	50—66

Таблица 18

Свойства магниевых сплавов, легированных литием [31]

Марка сплава	ρ , т/м ³	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ кДж/м ²	E, ГПа
МА21	1,6	200—280	130—250	8—25	50—150	44—48
МА18	1,48	150—220	100—180	15—40	150—450	44—48
A141A*	1,35	120—180	80—150	10—40	150—450	39—45
МА8	1,77	100—250	100—160	2—15	80—140	41—44
МА2-1	1,8	250—300	140—200	6—10	80—120	41—44

* Содержание лития 13 — 15%

Сплавы титана обладают комплексом ценных свойств: большой удельной прочностью ($\sigma_B/\rho g = 16...30$ км), высокой коррозионной стойкостью, повышенной жаропрочностью, немагнитностью, малым коэффициентом термического расширения, биологической инертностью и др. К недостаткам этих сплавов относят активное взаимодействие с газами при повышенных температурах, низкие антифрикционные свойства и плохую обрабатываемость резанием. Некоторые из этих недостатков уменьшаются специальным легированием, термической или химико-термической обработкой.

Все сплавы на основе титана содержат алюминий, который снижает их плотность, повышает удельную прочность, жаропрочность, модуль упругости, сопротивление ползучести, а также уменьшает их склонность к водородной хрупкости. Свойства титановых сплавов повышают термической, химико-термической и термомеханической обработкой.

Таблица 19

Составы и свойства литейных Mg — Li-сплавов (США) [31]

Содержание легирующих элементов, %	Плотность, т/м ³	Термическая обработка (после литья в кокиль)	σ_b , МПа	δ , %
14 Li	1,31	Без термообработки Стабилизирующий отжиг (75°C, 80 сут.)	100 100	30,0 30,0
14 Li; 0,5 Si	1,33	Без термообработки Стабилизирующий отжиг	138 136	23,0 25,0
14 Li; 5 Zn; 3Ag	1,48	Без термообработки Закалка, старение, стабилизирующий отжиг	240 170	1,0 15,0
14Li;5Zn;3Ag;2Si	1,51	Без термообработки Закалка, старение, стабилизирующий отжиг	265 203	1,0 5,0

Таблица 20

Химический состав и свойства некоторых титановых сплавов

Марка сплава	Химический состав, * %					Структура	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$	δ , %
	Al	V	Mo	Mn	Прочие				
BT5	4,3—6,2	—	—	—	—	α -сплавы	700— 950	650— 850	12— 25
BT5-1	4,5—6,0	—	—	—	2—3 Sn		750— 950	650— 850	12-25
OT4-1	1,0—2,5	—	—	0,7— 2,0	—	Псевдо α - сплавы	600— 750	460— 650	20— 40
OT4	3,5—5,0	—	—	0,8— 2,0	—		700— 900	550— 650	12— 20
BT20	6,0—7,5	0,8—7,5	0,5— 2,0	—	1,4-2,5 Zr		950— 1150	850— 1000	8
BT6**	5,3—6,8	3,5—5,5	—	—	—	(a+ β)- сплавы	1100— 1150	1000— 1050	14— 16
BT14**	4,5—6,3	0,9—1,9	2,5— 3,8	—	—		1150— 1400	1100— 1300	6— 10
BT3-1**	5,5—7,0	—	2,0— 3,0	—	1,0-2,5 Cr		1100— 1200	950— 1100	10— 15
BT16**	1,6—3,0	4,0—5,0	4,5— 5,5	—	—		1250— 1450	1000— 1200	4—6
BT15**	2,3—3,6	—	6,8— 8,0	—	9,5-1 1 Cr	β -сплавы	1300— 1500	1200— 1300	6

* Остальное титан

** После закалки и старения, остальные сплавы — в отожженном состоянии.

Химический состав и свойства сплавов Ве—Al—Mд

Содержание легирующих элементов, %	Сплав	экструдированный			Сплав, отожженный при 425°C в течение									
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, Па	δ , %	E, ГПа	2 ч			10 ч			100 ч		
						σ_B , Па	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , Па	$\sigma_{0,2}$, Па	δ , %	σ_B , Па	$\sigma_{0,2}$, Па	δ , %
38 Al	524	479	3,7	186	486	470	4,3	468	428	3,8	448	401	6,5	
38 Al; 3 Mg	670	566	4,3	186	638	538	4,7	625	516	6,1	572	481	3,9	
47 Al	315	268	10,2	152	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
57 Al; 3 Mg	525	396	12,0	152	473*	321*	21,1*	—	—	—	—	—	—	

* После отжига в течение 24 ч.

Относительно высокая стоимость сплавов титана компенсируется высокими эксплуатационными свойствами, а в некоторых случаях эти сплавы являются незаменимыми. Основными потребителями титановых сплавов пока остаются авиационная и космическая техника. Характеристика некоторых высокопрочных титановых сплавов приведена в табл. 20. Более полная информация о сплавах титана приведена в работах [21,60].

Бериллий и сплавы на его основе по удельной прочности и жесткости превосходят все другие легкие сплавы, имеют высокие тепловые свойства, хорошо сопротивляются изнашиванию и ползучести, отличаются повышенной жаростойкостью и коррозионной стойкостью, обладают размерной стабильностью. Эти сплавы применяются в авиационной, ракетно-космической и атомной промышленности. Основные недостатки бериллиевых сплавов: невысокая пластичность, низкая ударная вязкость, анизотропия свойств, плохая свариваемость, токсичность процессов получения сплавов. Широко используют сплав бериллия с 38% Al (локалой). Он имеет повышенную технологическую пластичность. Сплав хорошо обрабатывается и сваривается. Свойства сплавов Ве—Al повышают дополнительным легированием магнием (табл. 21).

Таблица 22

Основные свойства термопластичных пластмасс

Материал	σ_B , МПа	δ , %	Температура эксплуатации (без нагрузки), °C
Полиэтилен высокого давления	10—18	300—1000	65—75
Полиэтилен низкого давления	20—30	100—600	70—80
Полистирол	40—60	3-4	50—70
Поливинилхлорид (жесткий)	50—65	20—50	60—80
Поливинилхлорид (пластикат)	10—40	50—300	50—55
Фторопласт-3	35—45	160—190	100—150
Фторопласт-4	20—40	250—500	200—250
Поликарбонат	60—65	80—120	120—135
Капрон	75—95	50—130	80—100
Органическое стекло	70—90	5—6	65—90
Эпоксидно-диановые смолы	65—90	3—4	—

Полимерные материалы (прежде всего пластические массы) имеют малую плотность, но по удельной прочности они существенно уступают металлическим материалам. Их отличитель-

ными особенностями являются химическая стойкость, изоляционные свойства, высокая адгезионная способность и хорошие демпфирующие свойства.

Из термопластичных пластмасс наиболее высокими прочностными свойствами обладают полистирол, поливинилхлорид (жесткий), фторопласт-3, поликарбонат, капрон, органическое стекло (табл. 22). Свойства термопластов пытаются повысить за счет изменения структуры их молекул. Например, в США разрабатывают ориентированные полимеры с вытянутой молекулярной цепью. Волокна такого ориентированного полимера имеют $\sigma_b=420$ МПа, $E=421000$ МПа при $\rho=1,6$ г/см³. Более высокими прочностными свойствами (по сравнению с термопластами) обладают наполненные терморезактивные пластмассы (реактопласты). Особенно это относится к реактопластам с волокнистым наполнителем (волокниты) и слоистым наполнителем (текстолиты, гетинаксы, стеклотекстолиты) (табл. 23). Практически все сложные пластики анизотропны.

Текстолит имеет низкий коэффициент трения в паре со сталью. Его применяют для изготовления подшипников скольжения, бесшумных зубчатых колес, панелей, щитов и прокладок. Гетинакс используют в электрооборудовании и радиоаппаратуре.

Таблица 23

Основные свойства терморезактивных пластмасс

Материал	σ_b , МПа	δ , %	Температура эксплуатации (без нагрузки), °С
Терморезактивные полимеры без наполнителей:			
фенолоформальдегидные	15—35	1—5	200
полиэфирные	42—70	2	95—120
эпоксидные	26—70	3—6	80—130
кремнийорганические	20—40	5—10	300—350
Порошковые реактопласты	30—60	1—3	100—200
Волокниты	30—90	1—3	120—140
Гетинаксы	60—70	—	125
Текстолиты	65—110	1—3	90—100
Стеклотекстолиты	200—600	1—3	200—400
Компаунды ЭП	40—45	—	60—140

К высокопрочным материалам относят стеклотекстолиты. Они имеют малую плотность ($\rho=1,6...1,9$ г/см³) при высокой удельной прочности ($\sigma_b/\rho g=12...32$ км) и жесткости. Дальнейшее повышение свойств стеклопластиков возможно за счет разработки новых видов терморезактивных полимеров и методов плетения и ориентации наполнителя.

Композиционные материалы (КМ) обладают таким комплексом свойств, который не достижим в традиционных материалах. Они отличаются высокой удельной прочностью и жесткостью, сопротивлением усталости, различными специальными свойствами. Процесс изготовления КМ обычно совмещают с процессами изготовления заготовки или деталей. Основными группами КМ являются волокнистые, дисперсионно-упрочненные и слоистые. К КМ относятся также направленные эвтектики и псевдосплавы.

Свойства КМ зависят от схемы армирования, свойств армирующих материалов и свойств матрицы, а также от сопряжения армирующего материала с матрицей. Свойства часто применяемых армирующих материалов приведены в табл. 24. Для упрочнения металлических и неметаллических матриц используют волокна бора и углерода, дешевым и технологически рациональным упрочнителем металлических матриц являются проволоки из коррозионно-стойких сталей и бериллиевая проволока, высокая прочность обеспечивается применением монокристаллических волокон («усов»). Для армирования неметаллических матриц широко используют стекловолокно и органические волокна, например, сульфон-Т, фенилон, номекс (США), кевлар (Франция). В качестве металлических матриц КМ высокой удельной прочности используют

легкие металлы (Al, Mg, Ti) и их сплавы, применяя различные твердофазные и жидкофазные методы соединения их с упрочнителем (горячее прессование, прокатка, сварка взрывом, непрерывное литье, вакуумное всасывание, плазменное напыление и др.). Свойства некоторых КМ на металлической основе приведены в табл. 25. В производстве полимерных КМ используют матрицу на основе эпоксидных и полиамидных связующих. В зависимости от типа наполнителя (упрочнителя) различают несколько групп полимерных КМ. Свойства некоторых из них приведены в табл.26.

Таблица 24

Свойства армирующих материалов [23]

Материал	ρ , т/м ³	σ_B , МПа	E, ГПа	$\sigma_B/\rho g$, км	$E/\rho g \cdot 10^{-3}$, км
Волокно:					
бор	2,63	2500—3800	380—448	95—144	14,4—17,0
углерод	1,6	2500—3500	250—300	156—218	15,6—18,7
углерод	2,0	2000—2500	400—500	100—125	20,0—25,0
оксид алюминия	3,96	2100—2600	500	52—65	12,6
карбид кремния	3,21	2000—4000	400—500	62—124	12,4—15,5
Стекло:					
органическое	1,5	1400—1700	77—90	93—113	5,1—6,0
арамидное (тапа «Кевлар-49»)	1,45	2800—3500	130—170	193—242	9,2—11,7
Проволока:					
бериллиевая	1,8	1400—1800	230	76—100	13,9
стальная	7,8	3600—4000	200	45—51	2,6
Нитевидные кристаллы:					
оксида алюминия	3,96	28000	500	710	12,6
карбида кремния	3,21	37000	580	1150	18,0

Таблица 25

Свойства одноосно-армированных КМ с металлической матрицей

Материал			ρ , т/м ³	σ_B , МПа	E, МПа	$\sigma_B/\rho g$, км	$\frac{E \cdot 10^3}{\rho g}$, км	σ_{-1} , МПа	σ , МПа
Тип	Матрица	Волокно							
ВКА-1	АД1	Борное $\sigma_B=2500$ МПа, $V_B=50\%$	2,65	1000—1200	250—240	41—45	9,4—9,6	600	600
ВКА-1	АДЗЗ	Борное, $\sigma_B=3500$ МПа, $V_B=50\%$	2,65	1500	230	67	8,7	1000	950
ВКУ-1	АД1	Углеродное, E=450 ГПа	2,4	1150—1200	270	49—51	11,5	450	650
КАС-1	АД1	Сталь ВНС-9,	4,62	1300—	110	29—33	2,4	300	400

		$\sigma_B=3600$ МПа, $V_B=35\%$		1450					
КАС-1	АД1	Сталь ВНС-9, σ_B =4000..4200 МПа, $V_B=40\%$	4,84	1600— 1750	120	34—37	2,5	—	400— 450
ВКМ-1	Mg	Борное, $V_B=50\%$	2,15	1000— 1200	220	47—55	10,2	600	650

Примечание: V_B — объемная доля волокон.

Таблица 26

Свойства некоторых одноосно-армированных КМ с полимерной матрицей [24]

Материал	Связующее	Наполнитель	ρ , т/м ³	σ_B , МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	E , ГПа	σ_{-1} , МПа	σ_B/p , г/см	$\frac{E10^{-3}}{\rho}$, г/см ³
Углепластики									
КМУ-1л	Полиамидное	Лента ЛУ-2	1,4	650	300	120	300	46	8,6
КМУ-2у	—”—	Жгут ВМН-4	1,4	900	400	140	400	64	10,0
КМУ-1у	Эпокситри- фенольное	Жгут ВМН-4	1,5	1020	400	180	500	68	12
КМУ-1в	—	Жгут ВМН-4 вискеризо- ванный	1,55	1000	540	180	500	65	11,6
КМУ-3л	Эпоксифе- нольное	Лента ЛУ-2	1,4	650	400	120	300	46	8,6
КМУ-3	—	Жгут ВМН-4	1,45	1000	450	180	400	69	12,4
Боропластики									
КМБ-1м	Эпоксидное	Волокно бор- ное (1-й сорт)	2,0	1200	1160	270	400	60	13,5
КМБ-3	Эпоксидное	Нить КБСН-4	2,0	1200	1500	255	500	60	12,7
КМБ-2к	Полиамидное	Нить КБСН-4	2,0	1000	1250	250	400	50	12,5
Органо- пластик	Эпоксидное	Арамидное волокно («Кевлар-49»)	1,38	1400	280	77	—	101	5,6
Стекло- пластик	Эпоксидное	Стекло- волокно	1,38	1250	770	45	—	68	2,54
Стекло- пластик	—”—	То же	—	1625	1150	73	—	—	—

2.1.7. Обеспечение высокой коррозионной стойкости и жаростойкости материалов

К жаростойким (окалиностойким) относят сплавы, устойчивые к газовой коррозии при высоких температурах (свыше 550°C). Повышение окалиностойкости достигается использованием элементов, образующих на поверхности защитные пленки, прочно связанные с основным металлом. Такими элементами в сталях чаще всего являются хром, алюминий и кремний, образующие защитные оксидные пленки типа $(M, Fe)_2O_3$, где М — легирующий элемент. Влияние содержания хрома и алюминия на окалиностойкость стали дано в табл. 27.

Таблица 27

Влияние Cr и Al на окалиностойкость стали

Содержание элементов, %	Окалиностойкость, °С
-------------------------	----------------------

Сг	Al	
5—8	—	700—750
15—17	—	950—1000
25	—	1100
25	5	1300

Стали и сплавы, устойчивые к электрохимической коррозии, называют коррозионно-стойкими. Их разделяют на хромистые (с ферритной или мартенситной структурой) и хромоникелевые (с аустенитной или аустенитно-мартенситной структурой). В табл. 28 приведены свойства некоторых коррозионно-стойких сталей.

Таблица 28

Свойства коррозионно-стойких сталей во влажной атмосфере и морской воде [61]

Марка стали	Термообработка	Фазы	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	Балл коррозии	
					на воздухе	в морской воде
08X13	Закалка + отпуск	Ф + К	600	20	4	4
20X13	Закалка + отпуск	Ф + К	650	10	4	4
08X18H10T	Закалка	А	520	45	3	3
12X1 8H10T	—”—	А	520	40	3	3
10X17H13M2T	—”—	А	520	40	1	2
10X14Г14Н4Т	—”—	А	650	35	1	8
12X17Г9АН4	—”—	А	700	40	1	8
08X22H6T	—”—	А + Ф	680	40	1	2
08X17H5M3	Нормализация + обработка холодом + старение	А + М	1200	8	1	1

Примечание: Ф — феррит; К — карбид; А — аустенит; М — мартенсит.

Вредными примесями в этих сталях являются фосфор и сера (при содержании более 0,01%). Сульфиды и оксиды являются зародышами развития точечной коррозии. Примеси М, Мо, As, Р, Bi в количестве 0,01% вызывают коррозионное растрескивание. Повышенной коррозионной стойкостью обладают медь, никель и сплавы на их основе, а также благородные металлы (Ag, Au, Pt, Pd). Медь устойчива против коррозии на воздухе, в воде, растворах серной, уксусной, фосфорной кислот, в сульфатных и слабощелочных растворах, в морской воде. Из коррозионно-стойких сплавов меди наибольшее распространение получили «адмиралтейская» латунь (70% Cu, 29% Zn, 1% Sn) и алюминиевая латунь (75% Cu, 23% Zn, 2% Al). Хорошей коррозионной стойкостью обладают также оловянные (8—10% Sn), алюминиевые (9—10% Al) и кремнистые (до 15% Si) бронзы. Никель обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, неокисляющих кислотах, растворах солей, морской воде. Обычно используют никелевые сплавы систем Ni—Mo, Ni—Cr—Mo, Ni—Cu.

Благородные металлы обладают высокой коррозионной стойкостью, но их применение ограничено высокой стоимостью. Наиболее часто их используют для изготовления химической посуды, неокисляющихся электроконтактов, фильтров, в ювелирном деле и т.д.

Повышение коррозионной стойкости металлов и сплавов обеспечивается снижением содержания вредных примесей, получением бездефектных монокристаллов, использованием сплавов в аморфном состоянии. Последнее направление особенно перспективно. Примером аморфных сплавов является хромоникелевый сплав, получаемый в виде ленты, закаливаемой из жидкого состояния.

Распространенным средством повышения коррозионной стойкости и долговечности деталей машин является применение коррозионно-стойких покрытий [29], подразделяемых на металлические и неметаллические.

Для получения металлических катодных покрытий используют более электроположительные металлы по сравнению с защищаемым, чаще всего олово или свинец. Покрытия наносят гальваническим методом, распылением металла или окунанием в жидкий металл.

Шассивирующие катодные покрытия получают путем хромирования и никелирования стали. Распространен и метод плакирования, при котором горячей прокаткой получают двухслойный металл (например, листовой прокат СтЗ Г2Х18НЮТ).

Металлические покрытия с более электроотрицательными металлами называют анодными. Они менее долговечны, чем катодные. Стали покрывают цинковыми, кадмиевыми, алюминиевыми покрытиями. В пищевой промышленности применяют лужение.

Неметаллические покрытия очень разнообразны по составу и способам нанесения.

Оксидные покрытия повышают стойкость сталей, алюминиевых и магниевых сплавов во влажной среде и в воде. Их наносят термическим, химическим и электрохимическим методами.

Покрытия лакокрасочными материалами выполняют методами окунания, полива или распыления красящего раствора (или суспензии) с последующей сушкой. Для повышения стойкости во влажной среде используют лаки на основе высокомолекулярных полимеров (эпоксидные, полиэфирные, фенолформальдегидные и др.), а также элементоорганические соединения и фторопласты.

Для защиты от коррозии листового проката и труб во влажном воздухе и почве применяют пленочные материалы (полиэтилен, поливинилхлорид, полиамид).

2.1.8. Обеспечение высокой жаропрочности материалов

К жаропрочным относят стали и сплавы, способные работать под напряжением при высоких температурах (более $0,45 T_{пл}$). Жаропрочность сталей обеспечивают легированием и термической обработкой. Легирование задерживает процессы диффузии, повышает температуру рекристаллизации и обеспечивает получение специальной структуры, состоящей из упрочняющих карбидных и интерметаллидных частиц, когерентно связанных с матрицей. Эти частицы затрудняют пластическое деформирование матрицы и предотвращают рост зерна при повышенных температурах.

Таблица 29

Характеристики жаропрочных материалов [32]

Марка материала	Рекомендуемая максимальная температура применения, °С	Температура интенсивного окалинообразования, °С	Температура испытания, °С	σ_{10000} , МПа	$\sigma_{1/100000}$, МПа
23Х1МФ	570—585	600	560	140	84
25Х2МФ	520—550	600	550	160—220	70
15Х5М	600	650	540	100	40
40Х10С2М	650	850	550	100	40
15Х11МФ	550—580	750	550	200	90
11Х11Н2В2МФ	600	750	550	400* ¹	—
12Х18Н10Т	600	850	660	80—100	30—40
45Х14Н14В2М	650	850	650	130	40
10Х11Н20Т3Р	700	850	700	400* ²	-
ХН77ТЮР	750	1050	750	110—200	200* ⁴
ХН55ВМ4КЮ	950	1050	900	150* ³	130* ⁴
ЖС6К	1050	1050	950	100* ³	—

*¹ Предел длительной прочности σ_{100}

*² Предел длительной прочности σ_{50} .

*³ Предел длительной прочности σ_{1000} .

*⁴ Предел ползучести $\sigma_{1/1000}$.

Такую структуру получают в результате закалки с высоких температур и последующего старения.

Жаропрочные стали используют при рабочих температурах 500—750°C. В качестве основных легирующих элементов для этих сталей используют хром, никель, молибден, кремний, ванадий, титан, ниобий. При температуре 700—1050°C используют жаропрочные никелевые сплавы. При температуре 1000—1050°C применяют тугоплавкие сплавы и жаропрочную керамику (на основе соединений SiC и Si₃N₄). При более высоких температурах используют вольфрам и его сплавы, а также графит.

Характеристики некоторых жаропрочных материалов приведены в табл. 29, а свойства высокотемпературной керамики — в табл. 30.

Таблица 30

Свойства высокотемпературной керамики [4]

Вид керамического материала	ρ , т/м ³	теплопроводность, Вт/(м·°C)	E, ГПа	$\sigma_{и}$, МПа при	
				25°C	1200°C
SiC* ¹	3.20	80	450	840	620
SiC* ²	3.15	48	420	600	550
SiC* ³	3.10	200	420	530	530
Si ₃ N ₄ * ¹	3.25	30	320	1000	800
Si ₃ N ₄ * ²	3.15	20	310	700	500
Si ₃ N ₄ * ³	2.60	17	220	300	300
Al ₂ O ₃ * ²	3.90	18	390	400	300
ZrO ₂ * ¹	6.0	3.2	150	1200	200
2MgO·2Al ₂ O ₃ ·5SiO ₂ * ²	2.0	1.9	20	20	15
Al ₂ O ₃ ·TiO ₂	3.0	1.2	5	20	30

*¹ Горячепрессованный.

*² Спеченный при нормальном (атмосферном) давлении.

*³ Реакционно-спеченный.

В некоторых случаях не удается реализовать жаропрочные свойства материалов из-за их недостаточной жаростойкости. В этих случаях применяют специальное легирование (например, никель легируют хромом) или жаростойкие покрытия (никелевые сплавы подвергают алитированию или хромоалитированию, молибден — алюмосилицированию или хромоалитированию).

2.1.9. Обеспечение высокой износостойкости материалов

Износостойкие материалы подразделяют на материалы, устойчивые к абразивному изнашиванию, усталостному изнашиванию, к изнашиванию в условиях больших давлений и ударных нагрузок, к изнашиванию в условиях трения (антифрикционные и фрикционные).

Материалы, устойчивые к абразивному изнашиванию, должны обладать высокой поверхностной твердостью, причем структура поверхностного слоя должна состоять из высокопрочной матрицы, армированной включениями твердой (карбидной или карбонитридной) фазы [15,60]. Этим требованиям отвечают износостойкие стали, чугуны и карбидные сплавы, порошковые твердые сплавы, износостойкие наплавочные материалы, керамические материалы, износостойкие покрытия и модифицированные слои.

Износостойкие стали и графитизированные чугуны применяют для сравнительно легких условий изнашивания при граничной смазке (гильзы цилиндров, кулачковые и коленчатые вала, поршневые кольца и т.д.). В этом случае, помимо абразивного изнашивания, наблюдаются и другие виды изнашивания, например, окислительное. Для повышения износостойкости стали подвергают цементации (стали 15X, 15XA, 20X, 15XФ, 20XФ, 18XP, ЮХНЗА, 18ХГТ и др.), азотированию (стали 38X2Ю, 38X2МЮА), нитроцементации (стали 20ХНР, 27ХГР и др.), поверхностной закалке ТВЧ (стали 40, 45, 40X, 40ХН, 47ГТ, 55ПП и др.), поверхностной лазерной закалке (стали У8, У10, ШХ15 и др.).

Высокоизносостойким материалом является легированный белый чугун [15,66]. Широко применяют хромистые белые чугуны, а также чугуны, легированные комплексами Сг+Ni, Сг + Ni+ Mo, Сг+Mn. Составы таких чугунов приведены в табл. 31. Отливки из этих чугунов подвергают отпуску для снятия внутренних напряжений или воздушной закалке на высокую твердость (НВ 500—600). Хромистые чугуны обладают высокой стойкостью при гидроабразивном изнашивании (относительная стойкость 5,2—14,5, эталон — СЧ15). За рубежом применяют сплав, содержащий 2,5—3,5% С, 2,8—4,2% Si, 25—31% Сг, 3—5% Ni, до 1,5% Mn, имеющий твердость около HRCэ 50 и характеризующийся высокой износостойкостью в абразивных средах, в том числе и при повышенных температурах.

Для условий изнашивания при больших нагрузках, ударного изнашивания и изнашивания с термоциклированием целесообразно использовать комплексно-легированные белые чугуны с композиционным упрочнением. Структуры чугунов с эвтектическими композициями на базе специальных карбидов обеспечивают сочетание необычно высоких механических и эксплуатационных свойств: повышенной пластичности, вязкости и удароустойчивости при сохранении высокой твердости и износостойкости. Композиционное упрочнение в таких чугунах особенно сильно проявляется при повышенных температурах и термоциклировании. Химический состав и свойства таких чугунов приведены в табл. 32.

Карбидные сплавы применяют при наиболее тяжелых условиях работы в виде литых изделий и наплавов. Чаще всего это сплавы на основе железа с высоким содержанием углерода (до 4%) и легирующих элементов (Сг, W, Ti и др.). Количество карбидов в таких сплавах может достигать 50%.

Порошковые твердые сплавы используют как в качестве инструментальных материалов, так и для деталей, работающих в условиях изнашивания при средних нагрузках. Эти сплавы состоят из специальных карбидов (WC, TiC, TaC), связанных кобальтом (сплавы типа ВК, ТК и ТТК). Методом спекания из порошков получают материалы, аналогичные сталям Х12, Х12М, Р16, Р6М5 с мартенситной матрицей и мелкодисперсными карбидами.

Таблица 31

Состав Хромистых износостойких чугунов [57]

Марка чугуна	Содержание элемента, %						
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Прочие
ИЧХН4	3,0—3,4	2,0—2,8	1,0	0,8—1,2	3,5—5,0	—	—
ИЧХ2Н4	2,7—3,6	0,5—0,9	0,8	1,6—2,6	3,8—5,0	—	—
ИЧХ3ГД	2,6—3,6	0,7—1,5	1,0	2—3	0,5	—	0,5— 0,8 Cu
ИЧХ4Г7Д	3,0—3,8	1,4—1,8	6,0—8,0	3—5	0,5	—	0,7 Cu
300X13ГЗС2М	2,7—3,0	1,3—2,5	2,0—4,0	12—14	—	1,0	—
ИЧХ13ГЗМ	2,7—3,0	0,5—0,7	3,4—3,9	11—18	—	0,8	—
ИЧХ12Г5	2,6—3,0	0,7	4,5—5,2	12—14	—	—	—
ИЧХ15М2	2,8—3,6	0,5—0,8	1,0	12—18	—	2,0—3,0	—
ИЧХ28Н2	2,7—3,0	0,7—1,4	0,8	28—30	1,5—3,0	—	—
ИЧХ28Н2М2	2,6—3,0	0,4—0,8	1,0	28—30	1,5—3,0	1,8—2,2	—

Условные обозначения: ϵ , $\epsilon_{уд}$, $\epsilon_{с.а}$ — коэффициенты износостойкости при испытаниях соответственно без удара по закрепленному абразиву, с ударом по закрепленному абразиву и в свободном абразиву (мелкодробленый гранит), эталон — нормализованная сталь 45.

Из порошковых твердых сплавов изготавливают горнобуровой и режущий инструмент, инструмент для обработки металлов давлением, быстроизнашивающиеся детали машин и приспособлений. Износостойкость некоторых твердых сплавов приведена в табл. 33.

Таблица 32

Химический состав и свойства комплексно-легированных белых чугунов [15]

Содержание элемента, %						Термическая обработка	HRC	σ_B , МПа	ϵ	$\epsilon_{уд}$	$\epsilon_{с.а}$
C	Si	Mn	V	Cr	Прочие						
2,7—3,8	0,5—1,5	3,0—4,5	6—9	7—11	—	Без термической обработки	50—55	600—650	—	—	—
2,7—3,8	0,5—1,5	3,0—4,5	6—9	7—11	—	Закалка 800-850°C на воздухе	55—65	600—700	4—6	4,5—6,5	10—25
2,2—2,6	0,5-1,5	4,5—20	5—7	7—11	—	Без термической обработки	40—50	600—700	—	—	—
2,2—2,6	0,5—1,5	4,5—20	5—7	7—11	—	Закалка от 800°C на воздухе	45—57	650—800	3—5	6—8	15—28
3,5—3,9	До 1,0	0,6,—0,8	6—8	17—18	—	Отжиг при 400°C, 3 ч	60—63	—	—	—	—
3,5—3,9	До 1,0	0,6—0,8	6—8	17—18	—	Закалка от 900—1050°C	66—70	—	—	—	—
2,9—4,06	0,69-0,75	0,72-0,80	2,8—8,8	5,8—15,3	0,8—6,0 Ni	Без термической обработки	50—56	До 910	—	—	—
2,9—4,06	0,69-0,75	0,72-0,8	2,8—8,8	5,8—15,3	0,8—6,0 Ni	Отжиг при 1000°C,	62—63	—	—	—	—
2,9—4,06	0,69-0,75	0,72-0,8	2,8—8,8	5,8—15,3	0,8—6,0 Ni	Закалка от 950-1000°C, отпуск при 575°C, 1 ч	50	До 1100	—	—	—
2,2—2,6	До 0,6	0,5—0,8	—	7—12	1,5—3 Ti	Закалка 800-850°C на воздухе	45—62	500—700	3—6	—	—
2,0	2,0	1,0	4—5	21—25	—	—	—	—	—	—	—

Условные обозначения: ϵ , $\epsilon_{уд}$, $\epsilon_{с.а}$ — коэффициенты износостойкости при испытаниях соответственно без удара по закрепленному абразиву, с ударом по закрепленному абразиву и по свободному абразиву (мелкодробленый гранит), эталон — нормализованная сталь 45.

Таблица 33

Износостойкость твердых сплавов при контактировании с абразивной прослойкой из электрокорунда [66]

Сплав	Твердость HRA (не менее)	Износостойкость, км/мм	Сплав	Твердость HRA (не менее)	Износостойкость, км/мм
ВК3	89,5	1,2	Т30К4	92,0	0,6
БК3-М	91,0	2,0	Т15К6	90,0	1,7
ВК4	89,5	1,3	Т14К8	89,5	1,1
ВК6	88,5	1,7	Т5К10	88,5	1,1
ВК6-М	90,0	3,3	Т5К12	87,0	0,8

ВК6-ОМ	90,5	10,0	ТТ7К12	87,0	0,9
ВК8	87,5	1,4	ТТ8К6	90,5	3,3
ВК10	87,0	1,1	ТТ20К9	89,0	1,7
ВК15	86,0	0,8	ТН-20	90,0	0,3
ВК20	84,0	0,6	КНТ16	89,0	0,3
ВК25	82,0	0,4	КХН-15	85,0	0,2

Износостойкие наплавочные материалы применяют в виде электродов, проволоки, порошков. Наплавочные электроды, применяемые для повышения износостойкости, приведены в табл. 34.

Таблица 34

Наплавочные электроды [68]

Группа	Тип	Марка	Применение
I	Э-10Г2—Э-10Г5	ОЗН-250У— ОЗН-400У	Детали, подвергаемые интенсивному ударно-абразивному изнашиванию
II	Э-30В8Х3 Э-35Х12В30Ф	ЦШ-1, ИН-1, Ц-16	Штампы горячего деформирования
III	Э-37Х9С2 Э-70Х3СМТ	ОЗШ-3, ЭН-60М	Штампы холодного деформирования
IV	Э-65Х11Н3 Э-65Х25ПЗН3	ОМГ-Н ЦНИИН-4	Изнашиваемые детали из стали 110Г13Л
V	Э-90В10Х5Ф2 Э-105В6Х5М3Ф3 Э-08К15В7М5Х30Ф	ЦН-2У И-1 ОЗИ-4	Металлорежущий инструмент, штампы
VI	Э-95Х7Г5С Э-30Х5В2ГСМ	12АН/ЛИВТ ТКЗ-Н	Детали, подвергаемые ударно-абразивному изнашиванию
VII	Э-300Х28Н2404 Э-110Х14В13Ф2	ЦС-1 ВСН-6	Детали, подвергаемые интенсивному ударно-абразивному изнашиванию
VIII	Э-320Х23С2ГТР Э-320Х25С2ГТР	Т-620 Т-590	Детали, подвергаемые преимущественно абразивному изнашиванию
IX	Э-08Х17Н8С6Г Э-13Х16Н8М5С5Г4Б Э-190К61Х29В5С2	ЦН-6М ЦН-6Л, ЦН-12М ЦН-12Л, ЦН-2	Уплотнительные поверхности трубопроводной арматуры для энергетики и нефтеаппаратуры

Для наплавки материалов с повышенным содержанием углерода и легирующих элементов применяют проволоки и ленты из порошкового материала.

Для наплавки износостойких и жаростойких слоев газопламенным и дуговым (неплавящимся электродом) способами применяют литые присадочные прутки из сормайта, стеллита и рэлита. Сормайты — сплавы, близкие по составам к высокохро-мистым чугунам, стеллиты — хромовольфрамокобальтовые наплавочные сплавы (В2К, В3К, В3К-Р), рэлит — эвтектическая смесь карбидов вольфрама (WC и W_2C), содержащая 95—96% W и 3,6—4,0% C.

В качестве наплавочного материала используют также гранулированные порошки (при плазменной, газоплазменной наплавке или наплавке ТВЧ). Выпускают порошки на железной и никелевой основе, а также наплавочные смеси С-2М, БХ, КБХ, ФБХ6-2 (ГОСТ 21448—75).

Высокой твердостью и износостойкостью обладают керамические материалы (на основе оксидов алюминия, бериллия, циркония, хрома и др.). Наибольшее применение получил оксид алюминия (корунд). Корундовую керамику применяют в металлообработке (в виде пластинок), в нефтяной промышленности (износостойкие насадки), в ткацком оборудовании (нитеводите-

ли), в приборостроении, электротехнике и в других отраслях промышленности. Для получения износостойких покрытий широко используют методы химико-термической обработки (в первую очередь цементацию и азотирование). Применяют методы ионно-плазменного напыления, осаждения покрытий из газовой фазы, напыления порошкообразных материалов, нанесения слоев методом контактного эвтектического плавления. Используют также лазерные методы модифицирования и легирования поверхностей.

2.2. КАЧЕСТВО ОТЛИВОК

2.2.1. Структура производства с позиции обеспечения качества отливок

Получение литой заготовки — многооперационный, длительный процесс. Качество отливок формируется в результате сложного взаимодействия многих заготовок и инструментов, при этом для изготовления только одной отливки бывает необходимо изготовить несколько «поколений» индивидуального инструмента. Так, при изготовлении отливки по выплавляемым моделям необходимо изготовить инструмент — разовую керамическую форму. Для изготовления этой формы необходимо изготовить инструмент — разовую выплавляемую модель, в свою очередь для изготовления выплавляемой модели нужен инструмент — пресс-форма, которая обычно является постоянной, но тоже может быть разовой, например, гипсовая пресс-форма в художественном литье.

Сложность обеспечения качества литых заготовок усугубляется еще и тем, что организационно операции технологических процессов сгруппированы достаточно произвольно, определены имеющимися площадями, рациональностью грузопотоков, принятой расстановкой оборудования, заводскими традициями. Процесс изготовления отливки как изделия может быть разнесен на несколько самостоятельных цехов или производств (плавки, заливки — выбивки и термообработки), в то же время изготовление форм, являющихся инструментом для получения отливки, может быть совмещено в одном цехе с изготовлением отливок.

Для разработки эффективной системы управления качеством необходимо иметь набор ее основных принципов, методологию, инструментальный и алгоритмический аппарат, что в совокупности представляет теорию этих систем. С научной точки зрения, в литейном производстве практически полностью отсутствуют разработки, связанные с обоснованием, разработкой и внедрением систем управления качеством отливок.

Более всего целям системного подхода при решении задач повышения качества отливок отвечает так называемая дендритная структура производства, использованная для формирования технологических маршрутов и анализа затрат. В структуре производства, представленной в виде дендрита, по оси первого порядка следуют пределы от материала (шихты) до изделия (отливки), на осях второго порядка расположены пределы по изготовлению (разрушению) инструмента (например, литейной формы) и подготовке (переработке) дополнительных материалов, идущих на изготовление или образующихся в процессе обработки. По осям третьего порядка — тоже для изготовления инструмента (например, производство выплавляемых моделей как инструмента для изготовления керамических форм) или переработки дополнительного материала и т.д. Если основная продукция — отливка, то по оси первого порядка (рис. 13) последовательно представлены производства: М1.1—подготовки шихты; М1.2— жидкого металла; М1.3 — разливки металла; М1.4—заливки форм; М1.5 — охлаждения отливок; М1.6 — выбивки отливок из форм; М1.7 — очистки отливок; М1.8—отделения литниково-питающих систем, обрубки отливок и исправления дефектов; М1.9 — термообработки и другие способы переформирования физико-химических свойств отливок.

При этом материалы (М2) и инструменты (И2), поступающие в соответствующее производство, прошли все группы превращений по осям второго порядка и к моменту работы с ними в производстве первого порядка находятся в полной готовности, а материалы (—М2) и инструменты (—И2), уходящие из производства, не прошли никаких превращений, кроме разделения с

основным изделием, и вся их переработка осуществляется в производствах, расположенных по осям второго порядка.

Из производств, расположенных по осям второго порядка, наиболее важным с позиции качества отливок является производство изготовления форм М1.4, И2 (рис. 14). Принимаем, что основной продукцией является форма, и представляем последовательные производства при изготовлении формы: И2.1 — подготовки формовочных материалов; И2.2—формовочной смеси; И2.3 — подачи формовочной смеси; И2.4—формообразования; И2.5—сушки (отверждения) форм; И2.6—разделение модели и формы; И2.7 —отделки форм; И2.8 — сборки форм; И2.9 — подготовки форм к заливке.

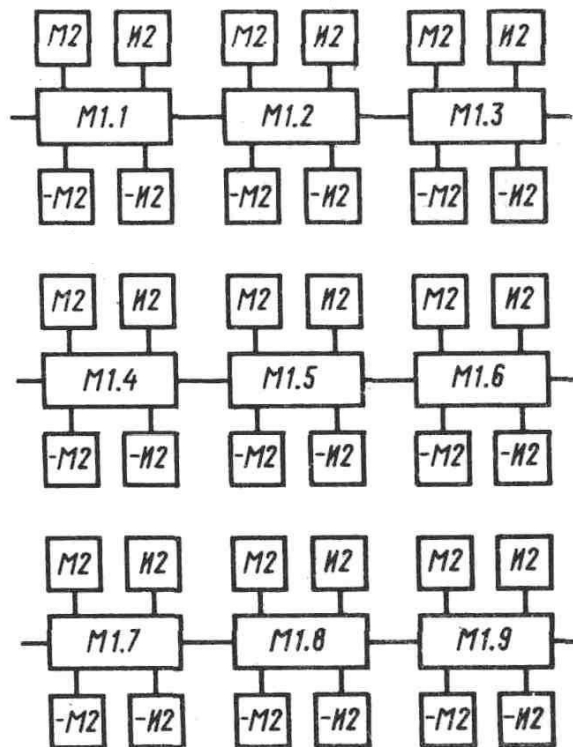


Рис. 13. Ось первого порядка М1 — изготовление отливки дендритной структуры производства

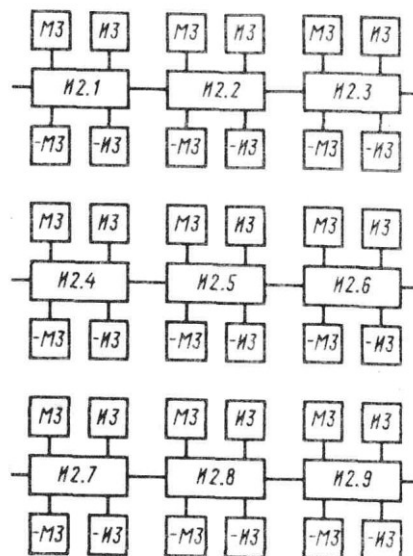


Рис. 14. Ось второго порядка М1.4, И2 — изготовление формы дендритной структуры производства

Изготовление модельной оснастки как инструмента для получения форм будет расположено по оси третьего порядка: М1.4, И2.4, И3. Также по этой оси будет расположено производство стержней (М1.4, И2.8, М3) как дополнительного материала в процессе изготовления формы. По оси третьего порядка последовательно представлены производства при изготовлении стержня (рис. 15): М3.1 — подготовки стержневых материалов; М3.2 — стержневой смеси; М3.3 — подачи стержневой смеси; М3.4 — формообразования стержня; М3.5 — сушки (отверждения) стержня; М3.6 — извлечения стержня из ящика; М3.7 — отделки стержней; М3.8 — склейки (сборки) стержней; М3.9 — подготовки стержней к установке в форму.

Аналогично раскрываются производства по любой другой оси, обозначающей поступление или удаление дополнительных материалов и инструмента.

Такая структура позволяет раздвинуть рамки понятия о качестве отливок как степени бездефектности, определяемой по результатам цехового и внешнего контроля, когда качество отливки считается тем выше, чем выше уровень механических свойств и точность геометрических размеров отливок.

Кроме этих главных показателей, решая вопросы повышения качества отливок, необходимо рассматривать уменьшение материальных, трудовых и энергетических затрат, стабильность характеристик, экологичность производства и безопасность труда.

Показатели качества отливки формируются последовательно в каждом производстве (пересечении осей) дендритной структуры. Качество изделия на каждом этапе 1-ехнологического процесса определяется качеством и количеством пяти материальных объектов и характером их взаимодействия. Качество изделия определяют следующие факторы:

качество заготовки, поступившей с Предыдущего производства (узла дендрита);» качество» дополнительных материалов, используемых в данном производстве;

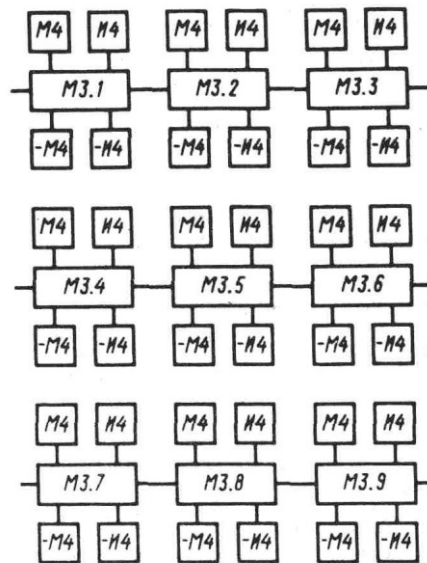


Рис. 15. Ось третьего порядка М1.4; И2,8, М3 — изготовление стержня дендритной структуры производства

качество инструментов (средств труда), с помощью которых выполняются технологические операции в данном производстве;

полнота удаления и переработки излишнего материала;

полнота удаления и переработки отработанного инструмента;

соответствие параметров процесса взаимодействия заготовки, инструмента и дополнительных материалов требованиям получения заданных показателей качества.

Обеспечение качества конечного продукта (отливки) достигается выполнением следующих трех основных правил.

Правило полноты: в любом производстве дендритной структуры по любой оси должно быть обеспечено требуемое качество и количество входящих в данное производство заготовок, материала и инструмента.

Правило экологичности: в любом производстве дендритной структуры по любой оси должны быть предусмотрены технологии переработки, возврата и утилизации всех уходящих из производства материалов и инструментов.

Правило обратной связи: при ведении технологического процесса в каждом производстве его параметры должны меняться адекватно изменению параметров участвующих в этом производстве материальных объектов (заготовка, поступающие дополнительные материалы и инструмент, удаляемые материалы и инструмент).

Сформулированная в такой постановке задача обеспечения и повышения качества отливок является всеобъемлющей, но сложной, ориентированной на обработку баз данных на ЭВМ. Существенно упростить, сделать ее доступной позволяет принцип независимости: формирование качества в любом производстве дендритной структуры не зависит от того, каким путем шло формирование качества исходной заготовки, дополнительных материалов и инструмента, а зависит только от их конечного состояния. Этот принцип позволяет выделять любой узел из сложной структуры многоуровневой схемы и рассматривать его независимо от всех остальных.

2.2.2. Обеспечение качества отливок на этапах изготовления

В соответствии с приведенной выше структурой производства отливок и принципом независимости рассмотрим формирование качества по осям первого—третьего порядков. При этом, если дополнительный материал или инструмент поставляется со стороны, то этапы формирования его качества не рассматриваются (ось не разворачивается), заданный уровень качества обеспечивается выбором соответствующего набора материалов и инструментов. В справочнике рассмотрены лишь основные конкретные рекомендации по обеспечению качества отливок.

2.2.3. Переделы от шихты до готовой отливки

Рассмотрим эти переделы поэтапно. *Производство подготовки шихты* (М1.1, см. рис. 13). При получении чугуна и стали исходными являются первичные чугуны и вторичные черные металлы. В качестве исходных материалов используют передельные чугуны (ГОСТ 805—80), нерафинированный литейный чугун шести марок и рафинированный магнием семи марок (ГОСТ 4832—80). При выплавке легированных чугунов в вагранках и электропечах используют чушковые титановые (0,3...1,2% Ti), титаномедистые (0,3...1,2% Ti, 2,0...3,0% Si) и хромоникелевые (0,4...3,2% Cr, 0,4...1,0% Ni) чугуны по ТУ 14-15-4—74 и ТУ 14-15-3—74. Вторичные черные металлы должны соответствовать требованиям ГОСТ 2787—86.

Исходными для получения литейных сплавов цветных металлов являются лом и отходы по ГОСТ 1639—78, чистые металлы, сплавы в чушках. Для медных сплавов в качестве основного шихтового материала применяют чистую медь (ГОСТ 859—78) и стандартные сплавы в чушках: бронзы оловянные (ГОСТ 614—73Е) и безоловянные (ГОСТ 17328—78Е), латуни (ГОСТ 1020—77Е).

Основные шихтовые материалы для выплавки алюминиевых сплавов — алюминий первичный (ГОСТ 11069—74), стандартные алюминиевые сплавы в чушках (ГОСТ 1583—89Е), силумины в чушках (ГОСТ 1583—89Е).

Для выплавки магниевых сплавов — первичный магний (ГОСТ 804—72) и стандартные магниевые сплавы (ГОСТ 2581—78Е) в чушках.

Чистые металлы: никель (ГОСТ 849—70Е), цинк (ГОСТ 3640—79), олово (ГОСТ 860—75), свинец (ГОСТ 3778—77Е) являются исходными при приготовлении соответствующих сплавов [40].

Все поступающие шихтовые материалы должны иметь сертификат с указанием химического состава.

Для получения качественного металла отходы производства, литники, бракованные отливки должны быть очищены от остатков формы. Крупные шихтовые материалы разрезают или

разбивают на более мелкие части. При подготовке шихты для получения медных сплавов витая стружка, сильно загрязненная эмульсией, с повышенным содержанием влаги и стали, должна быть раздроблена, очищена в центрифугах, высушена и подвергнута магнитной сепарации для удаления стали. Перед загрузкой в печь шихтовые материалы подогревают.

Производство жидкого металла (M1.2). Основным средством повышения качества сплава в отливке является правильный подбор дополнительных материалов, лигатур и модификаторов (M1.2, M2, см. рис. 13) и удаления вредных примесей за счет введения флюсов, продувки, вибрации, вакуумирования (M1.2—M2) в процессе плавки и доводки расплава.

Лигатуры и раскислители применяют в виде ферросплавов или чистых металлов.

Наиболее часто используемые ферросплавы: ферросилиций (ГОСТ 1415—78Е), ферромарганец (ГОСТ 4755—80Е), силикомарганец (ГОСТ 4756—77Е), силикокальций (ГОСТ 4762—71Е), ферросиликохром (ГОСТ 11861—77), феррохром (ГОСТ „4757—89Е), ферровольфрам (ГОСТ 17293—82), феррониобий (ГОСТ 16773—85Е), феррованадий (ГОСТ 27130—86Е), ферромolibден (ГОСТ 4759—79Е). Используют также и чистые металлы. Кроме упомянутых в исходной шихте наиболее часто применяют: марганец металлический (ГОСТ 6008—82), алюминий вторичный для раскисления (ГОСТ 295—79Е).

Различные элементы оказывают свое характерное влияние на свойства сплавов (табл. 35—39) [36].

Таблица 35

Влияние легирующих элементов на структуру и свойства стали

Характер влияния или свойство	Ni	Cr	Mn	Si	W	Mo	V	Ti	Nb	Cu
Склонность к образованию карбидов	—	+	+	-	+	+	+	+	+	-
Склонность к образованию феррита	++	--	-	+	--	-	-	--	-	+
Склонность к увеличению зерна	+	--	+	-	-	-	-	--	--	+
Прочность	++	+	+	+	+	+	+	++	+	+
Пластичность	+	-	-	-	-	0	+	+	+	+
Прокаливаемость	++	++	++	+	++	++	+	-	-	++
Износостойкость	+	++	++	+	+	+	0	+	+	+
Трещиностойкость	0	--	+	-	-	-	+	--	-	++
Жаростойкость	+	+	+	+	+	+	+	+	++	+
Коррозионная стойкость	+	++	-	++	+	+	0	+	+	+
Хладностойкость	++	+	+	-	+	++	+	+	+	+
Жидкотекучесть	0	--	+	-	-	-	+	--	-	++
Склонность к образованию усадочных раковин	+	+	+	+	--	-	0	+	0	0

Условные обозначения: + увеличивает; ++ сильно увеличивает; — уменьшает, — значительно уменьшает; 0 не влияет. ;

Таблица 36

Влияние химических на структуру и свойства чугунов

Химический элемент	Чугун		
	серый	высокопрочный	ковкий
1	2	3	4
C	Способствует графитизации чугуна, понижает прочность, повышает пластичность, улучшает литейные свойства	Повышает механические и литейные свойства	Увеличивает количество и размер графитовых включений понижает прочность и пластичность, улучшает литейные свойства
Si	Способствует графитизации чугуна, укрупняет графитовые включения, повышает механические свойства (при содержании более 3% понижает пластичность), улучшает	Способствует образованию ферритной структуры, улучшает литейные свойства, при содержании более 2,3% понижает ударную вязкость и хладостойкость	В ферритном чугуне превышает прочность, но понижает ударную вязкость, в перлитном, наоборот, улучшает литейные свойства

	ет литейные свойства		
Mn	Нейтрализует влияние серы, тормозит графитизацию, повышает склонность к отбеливанию, обеспечивает устойчивость аустенита, дисперсность перлита, прочность, ухудшает литейные свойства	Уменьшает количество феррита (при содержании до 0,4%), повышает прочность, пластичность, понижает хладостойкость	Тормозит процесс графитизации, повышает прочность, твердость, износостойкость, понижает пластичность, способствует образованию зернистого перлита

Окончание табл. 36

1	2	3	4
S	Сильно тормозит графитизацию, способствует образованию горячих трещин, понижает механические и литейные свойства	Заметно тормозит процесс сфероидизации графита, снижает механические и литейные свойства	Повышает прочность, твердость, понижает пластичность; при содержании 0,4% способствует образованию в процессе отжига графити шаровидной формы в перлитной матрице, заметно повышая механические свойства
P	В небольшой степени способствует процессу графитизации, повышает прочность, твердость, износостойкость, жидкотекучесть, понижает ударную вязкость и хладостойкость	При содержании более 0,08% резко уменьшает пластичность, повышает прочность и твердость	Понижает пластичность и хладостойкость
Ni	Благоприятно влияет на выравнивание механических свойств в отливках со стенками различной толщины, повышает твердость, коррозионную стойкость и обрабатываемость резанием	Способствует образованию перлита, повышает прочность, коррозионную стойкость, износостойкость, кавитационную стойкость	Способствует графитизации углерода отжига, увеличивает количество перлита, понижает жидкотекучесть
Cu	Влияние подобно влиянию никеля	При содержании более 2% тормозит процесс сфероидизации графита, при содержании 1,0—1,5% повышает прочность, износостойкость и понижает пластичность	Повышает прочность, коррозионную стойкость, жидкотекучесть, понижает пластичность
Cr	Тормозит графитизацию углерода, измельчает графит, повышает дисперсность перлита, прочность, твердость, понижает пластичность и литейные свойства	Повышает прочность, износостойкость, коррозионную стойкость, сопротивление эрозии, ухудшает литейные свойства	При содержании более 0,06% резко тормозит процесс отжига, понижает пластичность, повышает коррозионную стойкость
Ti	При содержании до 0,05% способствует графитизации углерода, при большем содержании тормозит этот процесс, повышает механические свойства	При содержании более 0,04% тормозит процесс сфероидизации графита	Увеличивает скорость графитизации, ухудшает форму графита, способствует сфероидизации перлита в марганцевом чугуна
Mg	При содержании до 0,01 % способствует графитизации, при большем содержании увеличивает отбеливание, нейтрализует вредное влияние серы	При содержании 0,03—0,08% способствует образованию графита шаровидной формы и повышает весь комплекс свойств чугуна	При содержании 0,05—0,08% изменяет форму графита отжига, приближая ее к шаровидной, способствует выравниванию структуры и свойств в отливках со стенками различной толщины, повышает механические свойства, увеличивает склонность к образованию усадочных раковин.

Примечание. Для измельчения структуры чугуна используют ферросилиций, силикокальций, силикобарий.

Таблица 37

Влияние химических элементов на свойства медных сплавов

Химический элемент	Оловянные бронзы	Безоловянные бронзы	Латуни
1	2	3	4
Al	Снижает жидкотекучесть, механические свойства, коррозионную стойкость	Снижает жидкотекучесть, плотность и механические свойства	Повышает жидкотекучесть, механические свойства и коррозионную стойкость

Продолжение табл. 37

1	2	3	4
Sn	Уменьшает относительное удлинение, ударную вязкость и плотность, повышает коррозионную стойкость и антифрикционные свойства	Снижает коррозионную стойкость марганцевых бронз, повышает прочность и твердость свинцовых бронз	Повышает жидкотекучесть, механические свойства и коррозионную стойкость, но менее заметно, чем Al
Zn	Уменьшает линейную усадку, а при увеличении содержания до 5% повышает жидкотекучесть, уменьшает плотность; при содержании более 5% снижает коррозионную стойкость и антифрикционные свойства, повышает герметичность	Повышает жидкотекучесть, улучшает антифрикционные свойства	При содержании до 30% снижает прочность, повышает пластичность; при содержании более 30% повышает прочность, снижает пластичность; улучшает жидкотекучесть, способствует получению плотных отливок
Pb	Улучшает антифрикционные свойства	Снижает механические и повышает антифрикционные свойства	Улучшает антифрикционные свойства, повышает жидкотекучесть алюминиевых и марганцевых латуней, но ухудшает их механические свойства
Ni	Измельчает структуру сплава, способствует изотропности свойств в различных сечениях отливки; повышает механические и антифрикционные свойства, плотность и коррозионную стойкость	Снижает жидкотекучесть, снижает механические свойства кремнистых бронз, а свинцовых и сурьмяно-никелевых — повышает; улучшает жидкотекучесть, повышает коррозионную стойкость сурьмяно-никелевых бронз	Повышает механические свойства и коррозионную стойкость, улучшает жидкотекучесть
P	Повышает жидкотекучесть, коррозионную стойкость, механические и антифрикционные свойства	Повышение жидкотекучести	Повышает твердость, снижает относительное удлинение и ударную вязкость
Fe	Снижает жидкотекучесть, повышает прочность и твердость, уменьшает пластичность; резко снижает коррозионную стойкость	Снижает механические свойства свинцовых бронз, повышает жаропрочность, измельчает структуру и снижает коррозионную стойкость кремнистых бронз	Снижает жидкотекучесть, измельчает структурные составляющие, повышая механические свойства; при содержании более 0,03% придает сплаву магнитные свойства
Si	То же	Повышает жидкотекучесть, коррозионную стойкость, прочность и твердость кремнистых бронз; снижает жидкотекучесть, механические свойства сурьмяно-никелевых бронз	Повышает жидкотекучесть, прочность, коррозионную стойкость и антифрикционные свойства
S	Снижает механические свойства	Заметного влияния не оказывает	Заметного влияния не оказывает
Mn	То же	Повышает механические и антифрикционные свойства, коррозионную стойкость	Снижает жидкотекучесть, повышает механические свойства и коррозионную стойкость; при наличии в сплаве свинца повышает антифрикционные свойства

	Снижает прочность и пластичность	Повышает прочность и твердость, снижает относительное удлинение и уменьшает линейную усадку сурьмяно-никелевых бронз, снижает механические свойства кремнистых бронз; на марганцевые бронзы заметного влияния не оказывает	Уменьшает прочность, относительное удлинение и ударную вязкость
--	----------------------------------	--	---

Окончание табл.37

1	2	3	4
Bi	То же	Снижает механические свойства, жаропрочность и коррозионную стойкость	То же
As	То же	То же	Повышает твердость, снижает прочность, относительное удлинение и ударную вязкость

Таблица 38

Влияние химических элементов на свойства силуминов

Химический элемент	Характер влияния
Be	Способствует рафинированию (удалению примесей), снижает отрицательное действие железа (примеси) на механические свойства
B	Способствует рафинированию, измельчает структуру и повышает пластичность
Mg	Повышает механические свойства, увеличивает пористость
Cu	Повышает механические свойства, снижает коррозионную стойкость
K, Li, Na	Способствует измельчению структуры, резко увеличивают пористость и повышают вязкость
Sn	Снижает коррозионную стойкость
Zn	Повышает механические свойства и ухудшает литейные
Ca	Восстанавливает алюминий из оксида, образуя оксид кальция, который снижает жидкотекучесть и механические свойства; повышает теплопроводность
Fe	Резко снижает пластичность и повышает жаропрочность
V, Cr, Mn Co, Mo, Ni	Резко снижают отрицательное действие железа (примеси) на механические свойства сплава, повышают жаропрочность и снижают пористость
Ti	Измельчает структуру, повышает прочность
Al	Повышает механические свойства сплавов системы Mg—Al—Zn, но понижает прочность сплавов, содержащих Zn
Be	Понижает окисляемость и прочность, повышает склонность к образованию горячих трещин
B	Способствует измельчению структуры сплавов
Fe	Снижает коррозионную стойкость
Cd	Повышает механические свойства сплавов системы Mg—Zn—Zr
K	Повышает окисляемость, снижает коррозионную стойкость
Ca	Понижает окисляемость, повышает жаропрочность сплавов системы Mg—Al—Zn, снижает их прочность и пластичность при нормальной температуре
Si	Снижает коррозионную стойкость и механические свойства сплавов, содержащих Zr
La	Повышает жаропрочность сплавов системы Mg—редкоземельные металлы
Li	Повышает окисляемость, снижает плотность
Mn	Повышает коррозионную стойкость
Cu	При содержании свыше 0,1% снижает коррозионную стойкость
Na	Повышает окисляемость, снижает коррозионную стойкость
Nd	Повышает жаропрочность сплавов, содержащих Zr
Ni	Снижает коррозионную стойкость
Ag	Повышает механические свойства
Ti	Способствует измельчению структуры сплавов
Th	Повышает жаропрочность
Cl	Резко снижает коррозионную стойкость

Ce	Повышает жаропрочность
Zn	Повышает механические свойства сплавов системы Mg—Zn—Zr
Zr	Измельчает структуру сплавов системы Mg—Zn, Mg—Mn и повышает механические свойства, способствует осаждению железа и кремния (примесей)

Для получения цветных сплавов высокого качества применяют плавку под покровными материалами, дегазацию и рафинирование флюсами, продувкой инертными или нейтральными газами (азот, хлор, гелий, аргон), раскисление углеродом фосфором, бором, бериллием. Алюминиевые сплавы в целях измельчения зерна модифицируют. Вредное влияние железа в них может быть нейтрализовано присадками- марганца, хрома или бериллия (по 0,3—0,4%).

Производство разливки металла (М1.3). Сюда входят операции от выпуска металла, из печи до подачи его к металлоприемному устройству литейной формы. Несмотря на то, что это в основном транспортирование жидкого металла, производство существенно влияет на качество отливок, так как металл при высокой температуре активно взаимодействует с материалом ковша и воздухом. Наиболее важным параметром, влияющим на качество отливок, является температура расплава. Оптимальная температура зависит от вида сплава и вида отливки (табл. 39)

Таблица 39

Рекомендуемая температура заливки форм [36]

Сплав	Отливка	Температура расплава, °С	
		при выпуске	при заливке
СЧ10—СЧ18	Мелкая	1360	1300
	Средняя	1380	1300
	Крупная	1360	1290
	Тонкостенная (средняя и крупная)	1380	1320
СЧ20—СЧ45'	Мелкая	1380	1320
	Средняя	1380	1320
	Крупная	1380	1300
	Тонкостенная (средняя и крупная)	1400	1330
Высокопрочный чугун	Со стенками толщиной, мм:		
	6 — 20	1380	1320
	более 20	1380	1300
Ковкий чугун	Со стенками толщиной, мм:		
	до 4	1480	1380
	4—10	1450	1350
	10 — 20	1430	1350
	более 20	1410	1320
Углеродистая и низколегированная сталь	Мелкая, средняя	1550	1420
	Крупная	1520	1390
	Тонкостенная (мелкая и средняя)	1550	1450
Высоколегированная сталь	Мелкая	1570	1420
	Крупная	1540	1420
	Тонкостенная (мелкая и средняя)	1570	1480
Силумин	Со стенками толщиной, мм:		
	До 10	730—750	710—730
	10 — 20	710—730	700—710
	более 20	700—710	690—700
Остальные алюм. спл.	С различной толщиной стенок	750—770	640—750
Оловянная бронза	Со стенками толщиной, мм:		
	10	1150	1100
	10	1050	1000
Алюминиевая бронза	Со стенками толщиной 10, мм	1150	1100

Магниевый сплав	Со стенками толщиной, мм:		
	До 5	—	770—800
	6 — 8	—	740—770
	более 8	—	710—740
Кремнистая латунь	Со стенками толщиной, мм:		
	10	1130	1100
	20	1080	1050

Излишняя выдержка в ковше требует дополнительного перегрева металла в плавильном агрегате, приводит к изменению химического состава расплава. Особенно это важно для стали. Скорость охлаждения жидкой стали в ковше вместимостью 2,5 т составляет 12—15°С/мин, а после выдержки в течение 10—15 мин содержание остаточного алюминия в стали оказывается настолько низким, что металл получается малораскисленным, склонным к образованию газовых раковин [37]. Повышенный расход алюминия для раскисления вызывает резкое снижение пластических свойств металла.

Эффективным средством повышения качества металла в отливках является внепечная обработка расплава с использованием газометаллургических процессов (обработка газом и газосодержащими веществами), физических и физико-металлургических процессов (вакуумирование, обработка синтетическими шлаками встряхивание, вибрация, ультразвуковая обработка и т.п.) [54]. *Производство заливки форм* (М 1.4). Это один из наиболее ответственных этапов с позиции формирования качества отливок. Исходная заготовка — расплав должен иметь необходимый химический состав, температуру, подаваться в форму с заданным расходом.

Основной инструмент — литейная форма. На этом этапе должно быть обеспечено заполнение ее за оптимальное время с определенной скоростью и задержаны неметаллические включения. Эту важнейшую роль выполняет совокупность каналов, по которым металл из ковша поступает в полость литейной формы. Тип литниковой системы и ее параметры выбирают и рассчитывают при проектировании технологии получения отливки. Оптимальная продолжительность заливки формы [30]

$$\tau = A\sqrt[3]{\delta M},$$

где δ — преобладающая толщина стенки отливки, мм; M — общая масса отливки, литников и прибылей, кг; A — коэффициент; для чугуна $A=2$; для стали $A=1,5$ - для сплавов медных $A=2,0..2,1$; алюминиевых $A=1,7..3,0$; магниевых $A=2,3..4,5$. Меньшие значения принимают для мелких отливок, большие — для крупных.

Заполняемость литейной формы будет обеспечена без образования в отливке спаев недоливов и тому подобных дефектов, если средняя фактическая скорость течения; (подъема) расплава в форме не будет меньше некоторой минимально допустимой величины (табл. 40) [6].

Таблица 40

Минимально допустимая скорость, см/с, подъема уровня металла в форме для отливок сложной конфигурации

Высота отливки, мм	Толщина стенки отливки, мм										
	4	5	6	7	8	10	12	15	20	25	30
100	2,8	2,2	1,8	1,6	1,4	1,1	0,9	0,8	0,55	0,44	0,37
150	3,4	2,7	2,2	1,95	1,7	1,36	1,13	0,91	0,68	0,54	0,45
200	3,9	3,1	2,6	2,25	1,97	1,57	1,3	1,05	0,78	0,63	0,52
300	4,8	3,9	3,2	2,75	2,4	1,9	1,6	1,28	0,96	0,77	0,64
350	5,2	4,18	3,5	3,0	2,5	2,08	1,74	1,38	1,04	0,84	0,69
400	5,5	4,4	3,7	3,15	2,75	2,2	1,84	1,47	1,1	0,88	0,74
500	6,25	5,0	4,18	3,57	3,1	2,5	2,1	1,67	1,25	1,0	0,83

550	6,5	5,2	4,35	3,7	3,27	2,6	2,17	1,73	1,3	1,05	0,87
600	6,8	5,45	4,55	3,9	3,4	2,7	2,26	1,8	1,36	1,09	0,9
800	7,9	6,3	5,25	4,5	3,9	3,15	2,6	2,1	1,57	1,25	1,05
1000	8,75	7,0	5,8	5,0	4,37	3,5	2,9	2,3	1,75	1,4	1,17
1500	10,7	8,6	7,2	6,15	5,36	4,3	3,58	2,86	2,14	1,71	1,43

Особенно важно не допускать понижения скорости подъема расплава в форме при заливке высоколегированных сталей типа 12Х18Н9ТЛ, склонных к образованию пленки. Понижение скорости в каком-либо сечении формы ниже 2,0 см/с приводит к резкому возрастанию толщины достаточно жесткой оксидной пленки она способна остановить поток жидкого металла, образуя спай. На медных сплавах оксидные пленки мягкие, поэтому допускается снижение минимальных скоростей подъема расплава до 0,5 см/с, но при этом требуется плавное заполнение, иначе пленки попадают в металл в виде неметаллических включений.

Производство охлаждения отливок (М 1.5). Основными параметрами, определяющими формирование качественной отливки, при затвердевании и охлаждении отливки являются обеспечение компенсации усадки узлов отливки, скорость и время охлаждения.

Регламентирование времени охлаждения отливок в форме диктуется необходимостью обеспечения полного затвердевания расплава, исключения образования некоторых усадочных дефектов, получения требуемой структуры металла отливки.

Последнее весьма важно для чугунов, структуры которых в большой степени зависят от скорости кристаллизации. Что касается других сплавов, то повышение скорости их затвердевания, как правило, благоприятно влияет на формирование структуры.

Высокая температура отливки при выбивке нежелательна из-за опасности разрушения отливки, образования дефектов или ухудшения ее качества. Вблизи температуры кристаллизации сплавы имеют низкие прочностные и пластические свойства, поэтому в этот момент опасность разрушения отливки особенно велика. Ранняя выбивка может привести к образованию трещин, короблению и сохранению в отливке высоких остаточных напряжений.

Длительная выдержка в форме с целью охлаждения до низкой температуры нецелесообразна, так как удлиняет технологический цикл изготовления отливки. Выбивку необходимо производить при максимально допустимой температуре. Она зависит от природы сплава и сложности отливки. Стальные отливки рекомендуется охлаждать в форме до 500—700°С, чугунные — до 400—500°С. Сложные отливки, склонные к образованию трещин, — до 800—900°С. Отливки из бронз выбивают при 300—500°С, из алюминиевых и магниевых сплавов — соответственно при 200-300 и 100—150°С.

Производство выбивки отливок из форм (М1.6). Процесс выбивки форм не должен влиять на качество отливки. Это достигается тем, что исходная заготовка (затвердевшая в форме отливка) должна поступить на выбивку охлажденной до допустимой температуры, а параметры работы инструмента (выбивного оборудования) должны обеспечить разрушение форм без разрушения или повреждения отливки. Особое значение на этом этапе приобретает экологичность процесса (переработка уходящего из производства разрушенного инструмента, отработанной смеси).

Производство очистки отливок (М1.7). Качество отливок на этом этапе зависит от полноты удаления пригара, образовавшегося в результате физико-химического взаимодействия материалов отливки и формы при высоких температурах. Для удаления пригара и улучшения качества поверхностей отливки подвергают галтовке, дробеструйной, дробеметной, вибрационной и электрохимической обработке. Дробеметный способ очистки в 10 раз эффективнее дробеструйного; при этом энергоемкость его в 10 раз меньше. Недостаток дробеметной очистки — затрудненность очистки внутренних полостей отливок сложной конфигурации [54].

Производство отрезки литниково-питающих систем, обрубки отливок и исправления дефектов (М1.8). При отрезке литников и прибылей необходимо следить за тем, чтобы остатки

питателей были минимальными, но не допускать зареза в тело отливки. В зависимости от вида сплава, серийности производства, массы отливки применяют резку ножовочными полотнами, анодно-механическую резку, резку шлифовальным кругом, газовую и дуговую резку.

Заливы, заусенцы, перекосы и неровности поверхности удаляют шлифовальными кругами. Заусенцы в местах, недоступных для зачистки кругами, обрубает пневматическими рубильными молотками. Поверхностные дефекты исправляют дуговой и газовой сваркой. Для этого дефектное место отливки предварительно разделявают, придавая сечению завариваемого места У-образную форму. Дуговой сваркой без подогрева исправляют дефекты чугуновых отливок. Для этого применяют стальные, медно-стальные и медно-никелевые электроды. Широко используют дуговую, аргонодуговую и газовую сварку с подогревом. Во избежание термических напряжений отливки перед сваркой нагревают (чугунные до 550—700°C, алюминиевые и магниевые до 350—400°C); чтобы исключить окисление, применяют специальные флюсы и защитные газы. В большинстве случаев сварку осуществляют сплавом, не отличающимся по составу от сплава отливки.

При заварке дефекта искажаются размеры и твердость отливки, появляются термические напряжения, поэтому необходима повторная термическая обработка.

Пористые отливки исправляют пропиткой бакелитовым и асфальтовым лаками, натуральной олифой, жидким стеклом и этилсиликатом. Лаками пропитывают в специальных баках при температуре 150—200°C под давлением 0,5—0,6 МПа. Жидким стеклом отливки пропитывают при 85—95°C.

Производство термообработки отливок (М 1.9). Отливки до термообработки имеют крупнозернистую структуру, высокую твердость, низкие прочностные и пластические свойства. В них сохраняются значительные внутренние напряжения. Для улучшения структуры и свойств отливок применяют термическую обработку. Вид термической обработки определяется природой сплава и целью, с которой она проводится. Режимы термической обработки приведены в табл. 4.45 [55].

2.2.4. Переделы от формовочных материалов до литейной формы (М1.4, И2)

Все без исключения свойства отливки, характеризующие ее качество, формируются в производствах, расположенных по принятой структуре на оси первого порядка — М 1.1 — М 1.9 (см. рис. 13). Однако большинство этих свойств закладывается уже при изготовлении инструмента для изготовления отливки (литейной формы) и управлять этими свойствами можно, только управляя свойствами формы на стадиях ее изготовления, аналогично тому, как это было при изготовлении отливки (см. рис. 14).

Производство подготовки формовочных материалов (М1.4, И2.1). Для обеспечения качества отливки необходимо правильно выбрать основу формовочных смесей, связующие и специальные добавки. Характеристика огнеупорных зернистых основ формовочных смесей приведена в табл. 41 [10].

Таблица 41

Характеристика огнеупорных зернистых основ формовочных смесей

Материал	Температура плавления, °С	Особенности основы
Кварц SiO ₂	1713	Главная зернистая основа формовочных смесей применяют почти для всех видов литья
Шамот 3Al ₂ O ₃ - SiO ₂	1670—1750	Обожженная огнеупорная глина. Применяют в стальном литье и для форм многократного использования
Оливин (MgFe)- SiO ₄	1750—1830	Применяют для литья из марганцовистых сталей
Хромистый железняк FeO- Cr ₂ O ₃	1450—1850	Не взаимодействует с оксидами железа и не образуют пригара. Теплопроводен. Применяют при изготовлении форм для крупных стальных отливок

Глинозем Al_2O_3	2050	В чистом виде применяют редко
Циркон $ZrSiO_4$ Маг- незит MgO	2400—2800	Не дает пригара. Теплопроводен. Применяют для ответственных стальных отливок. Применяют для литья из марганцовистых сталей.
Графит С	3750	Самый огнеупорный материал. Применяют при литье из тугоплавких сплавов. Высоко теплопроводен

Для получения качественной формовочной смеси свежие пески сушат, отделяют и дробят крупные комки и просеивают. Глину сушат при температуре 200—280°C, бентониты — при 120°C. Высушенную глину размельчают, размалывают и просеивают.

Производство формовочной смеси (М 1.4, И2.2). Если основные и дополнительные материалы при разработке технологического процесса выбраны правильно, то качество смеси на стадии приготовления обеспечивается обволакиванием каждой песчинки пленкой связующего и равномерным распределением всех связующих в микрообъеме. Поэтому основная операция приготовления формовочных смесей смешение ее составляющих.

Лучшее качество смеси обеспечивает следующий порядок подачи составляющих в смесители: сначала сухие материалы — песок, глина, отработанная смесь, которые перемешиваются 1—3 мин; затем смесь увлажняют и еще перемешивают; последними вводят связующие добавки. Общее время перемешивания наполнительных смесей 2—4 мин, облицовочной смеси — до 10 мин.

Производство подачи формовочной смеси (М1.4, И2.3). Основными операциями, повышающими качество формовочной смеси при подаче ее к месту формовки, являются вылеживание смеси в бункерах для выравнивания структуры и разрыхление в аэраторах. Длительное нахождение смеси на операциях транспортирования снижает ее свойства за счет высыхания и затвердевания связующих.

Производство формообразования (М1.4, И2.4). Это введение формовочной смеси в рабочую полость оснастки и ее уплотнение. Параметры этих двух процессов определяют качество формообразующей полости. Смесь в рабочую полость оснастки засыпают из бункера или лопатой, бросают в оснастку с ускорением (из пескомета), вдувают (пескодувный и пескострельный варианты), намазывают (при формовке в глине), наливают, окунают в смесь (при литье по выплавляемым моделям).

Уплотняют трамбовкой, прессованием (верхним и нижним). Импульсное, пескодувное, пескострельное и пескометное уплотнение совмещены с операцией введения смеси в оснастку. Уплотнение должно быть равномерным по всему объему опоки. Показателем качества уплотнения является твердость сырой формы. Твердость 20 единиц при измерении прибором 071 считается очень низкой, 50 — низкой, 60 — средней, 80 — высокой, 90 — очень высокой [36]. Недостаточное или неравномерное уплотнение приводит к образованию дефектов (подутости, ужимины и др.), поэтому очень важно поддерживать твердость формы в заданных пределах (табл.42).

Таблица 42

Рекомендуемые значения твердости форм

Масса отливки, кг	Расстояние от низа формы до литниковой чаши, мм	Твердость формы, единицы	
		сырой	сухой
До 25	150	30—40	—
26—100	300	35—45	—
101—500	750	45—60	50—60
501—2000	1500	55—65	65—75

2001—5000	2500	—	70—80
Более 5000	Более 2500	—	80—95

*Производство сушки (отверждения) форм ЦМ1.4, И2.5)*1 Осуществляется в том случае, если заливка производится в сухие формы. Повышает качество отливок, но удлиняет цикл производства, увеличивает затраты. Отверждение форм может производиться либо до извлечения модели, либо после. Продолжительность сушки песчано-глинистых форм, обеспечивающая получение качественных отливок, приведена в табл. 43 [10].

Таблица 43

Продолжительность сушки песчано-глинистых форм

Размеры опок в свету, мм	Температура, °С	Время сушки, ч.
500x600 — 800x1200	400	6...8
900x1200 — 2000x3000	400	8...12
2000x3500 — 3000x5500	450	16...24
3500x5000 — 4000x5500	450	24...36
Свыше 4000x5500	450	36...48

Производство разделения модели и формы (М1.4, И2.6). Извлечению модели из формы препятствуют ее выступающие части. Это препятствие устраняют изготовлением отъемных частей у модели, размещением выступающих частей в плоскости разъема формы, применением подрезки, перекидных болванов, которые не связаны с полуформами и представляют самостоятельные элементы.

При машинной формовке эти средства не приемлемы. Поэтому для получения качественных отливок необходимо либо вводить напуски, перекрывающие выступающую часть, что приводит к увеличению объема механической обработки детали, либо оформлять выступающую часть стержнем.

Производство отделки форм (М1.4, И2.7). Отделка сырых форм заключается, как правило, в установке, если это требуется, шпилек и ремонте. Ремонт формы всегда ухудшает качество отливки, поэтому его следует избегать, поддерживая оснастку в надлежащем порядке.

Основной вид отделки форм по сухому — окраска их рабочей полости специальными красками, которые упрочняют смесь, повышают чистоту поверхности отливки, предотвращают пригар или насыщают поверхность отливки определенными элементами. Окраска рабочей полости литейной формы является действенным средством повышения качества отливок. При изготовлении форм из жидкостекольных смесей избежать пригара можно только за счет использования противопригарных красок.

Формы для отливок из чугуна рекомендуется покрывать углеродосодержащими покрытиями на основе графита, для стальных отливок используют краски на основе пылевидного кварца, циркона, магнезита. Для отливок из цветных сплавов используют тальк.

Производство сборки форм (М1.4, И2.8). При сборке форм основным фактором, влияющим на качество отливок, является правильность установки стержней. Если стержневые знаки не обеспечивают правильности положения и устойчивости стержней, между их поверхностями и поверхностями формы устанавливаются жеребейки. Правильность сборки полуформ обеспечивается штыревым аппаратом опок. Во избежание всплытия верхних элементов при заливке сплавом на собранные формы необходимо поставить груз или скрепить их специальными скобами.

Производство подготовки форм к заливке (М1.4, И2.9). Перед заливкой форму устанавливают в положение, обеспечивающее наиболее благоприятное заполнение металлом (горизонтально, вертикально, наклонно). Качество протяженных тонкостенных отливок будет выше при заливке их в вертикальном или наклонном положении.

Металлические формы (кокили) перед заливкой расплава подогревают (табл. 44) [58]. Формы для литья по выплавляемым моделям перед заливкой тонкостенных отливок прокали-

вают и подают на заливку горячими (750—900°C). При изготовлении отливок с массивными стенками формы после прокаливания охлаждают до 200—400°C, что способствует повышению качества структуры отливок.

Производства, связанные с изготовлением стержней (М1.4, И2.8, М3). Этапы производства и факторы, влияющие на формирование качества стержней, в основном аналогичны производствам при изготовлении формы. По конфигурации стержни делят на пять классов, от которых зависят и особенности их получения.

Класс I — наиболее сложные по форме стержни, имеющие большую площадь соприкосновения с расплавом и образующие в отливках узкие, недоступные для очистки внутренние полости. Малая площадь сечения знаковой части затрудняет вывод газов. Стержни должны иметь высокие прочность в сухом состоянии, огнеупорность, газопроницаемость, малую газотворную способность, легко разрушаться и извлекаться из полости отливки.

Класс II — центровые стержни высокой и средней сложности с наличием тонких частей в виде отдельных выступов, переходов, с достаточно развитыми знаковыми частями. Оформляют в отливке поверхности, подвергаемые и не подвергаемые обработке резанием; имеют высокую прочность в сухом состоянии.

Класс III — наружные и внутренние стержни средней и низкой сложности, образующие ответственные необрабатываемые поверхности отливок. Эти стержни более массивны, чем стержни классов I и II, имеют высокую прочность в сыром состоянии.

Таблица 44

Температура нагрева кокилей перед заливкой

Сплав	Отливка	Толщина стенки отливки, мм	Температура нагрева кокиля, °С
Алюминиевый	Тонкостенная ребристая	1,6—2,1	400—420
	Ребристые, корпусные	5—10	350—400
	Простые, без ребер	Менее 8	250—350
		Более 8	200—250
Магниевый	Тонкостенная, сложная	—	350—400
	Толстостенная	—	250—350
Медный	Средней сложности	5—10	120—200
Серый чугун	Различной сложности	Менее 5	400—450
		5—10	300—400
		10—20	250—400
		20—40	150—250
Сталь	Тонкостенная	—	300
	Толстостенная	—	150

Классе IV — небольшие стержни, имеющие несложную форму, которые образуют в отливках внутренние и внешние поверхности, обрабатываемые и необрабатываемые резанием; знаковые части стержней имеют относительно большую площадь сечения.

Класс V — массивные крупногабаритные стержни, которые образуют полость отливок или наружные поверхности. В целях увеличения податливости при изготовлении стержней добавляют опилки, керамзит или их выполняют пустотелыми.

Средние и крупные стержни для исключения поломки под действием собственного веса и давления металла армируют проволочными или литыми каркасами.

Для обеспечения качества отливок стержни должны обладать следующими свойствами: высокой прочностью в сыром состоянии, достаточной прочностью в сухом состоянии, высокой поверхностной прочностью, минимальной осыпаемостью и гигроскопичностью, хорошей податливостью, противопопригарностью, минимальной газотворной способностью, достаточной прочностью в нагретом состоянии, хорошей выбиваемостью из отливок.

2.2.5. Принципы управления качеством отливок на производстве

При отклонении качества отливок в процессе их производства необходимо; в соответствии с дендритной структурой определить:

в каком производстве по первой оси дендритной структуры (см. рис. 13) произошло отклонение;

что явилось причиной отклонения [заготовка, дополнительные материалы (М2), инструмент (И2) или параметры их взаимодействия (технологический процесс, М1.1 — М1.9)].

Если причиной являются параметры процесса, их необходимо корректировать. Если причиной является заготовка, дополнительные материалы или инструменты, изготавливаемые на данном производстве, необходимо определить по следующей оси дендрита, где именно произошло это отклонение, и т.д., вплоть до заготовок, дополнительных материалов и инструмента, получаемых со стороны (комплектующих).

Если причиной отклонения качества являются комплектующие, необходимо либо - отбраковать их и применять только комплектующие соответствующего качества, либо ввести на собственном производстве операции по их доработке (добавить еще одну ось дендрита), либо изменить параметры процесса с учетом фактических характеристик этих комплектующих.

Если существующий технологический процесс не обеспечивает в принципе достижения заданного уровня качества, необходимо вернуться на стадию проектирования технологии и выбрать другой способ литья или вообще метод получения заготовки.

2.3. КАЧЕСТВО ЗАГОТОВОК ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

2.3.1. Параметры объемной штамповки

Качество поковок — это совокупность свойств, обуславливающих удовлетворение определенных потребностей в соответствии с назначением [2]. В зависимости от конструктивно-технологических признаков детали и используемого технологического процесса ее формоизменения изготавливают либо деталь, потребителем которой служит сборочное производство, либо полуфабрикат (поковку).

В первом случае должны быть полностью удовлетворены требования чертежа детали по точности размеров и формы, требования к качеству поверхности и свойствам материала (твердость и др.). Во втором случае форма и размеры полуфабриката в той или иной мере приближаются к указанным параметрам детали, а для выполнения всех требований чертежа детали необходима последующая обработка резанием, упрочняющая и отделочная обработка. Принципиальная схема формирования потребительских свойств детали с использованием технологии объемной штамповки- приведена на рис. 16.

Пригодность продукции для удовлетворения определенных потребностей характеризуется системой показателей качества, которая имеет иерархическую структуру (табл.45). Нижний уровень составляют единичные показатели, количественно отображающие одно из свойств. Единичные показатели по признаку общности содержания на следующем уровне иерархии агрегируются в комплексные, которые, в свою очередь, формируются в интегральный показатель качества. Состав единичных показателей качества зависит от назначения продукции (поковка или готовая деталь). Если продуктом объемной штамповки является готовая деталь, то единичными показателями качества геометрической формы являются поле допуска на размеры, отклонения и допуски формы. Комплексным показателем качества детали по точности будет качество точности. Если продуктом объемной штамповки является поковка, то набор единичных показателей, характеризующих точность, будет несколько иной. В зависимости от особенностей геометрической формы поковки некоторые единичные, ранее приведенные, показатели отпадают, но вводятся дополнительные, учитывающие специфичное влияние объемной штамповки. К ним можно отнести перекося (смещение) поковки по линии разъема штампов, изгиб (кривизну) поковки, припуск на механическую обработку, технологические напуски, глубину дефектного слоя и др. Для деталей ответственного назначения весьма важны показатели качества, определяющие надежность и долговечность детали при эксплуатации. Надежность и долговечность

деталей хорошо корректируют с некоторыми показателями, характеризующими структуру, механические свойства металла и состояние поверхности. Специфичное влияние пластической деформации на структуру и свойства металла заготовки требует включения в состав показателей качества поковок, в частности, размера зерна или субзерна металла, пределов текучести и прочности, относительного сужения и удлинения, ударной вязкости, твердости, температуры перехода от хрупкого к вязкому разрушению (хладноломкости).

Состояние поверхности для деталей, формируемых объемной штамповкой, характеризуется параметром шероховатости. Для поковок определяющими показателями являются глубина дефектного слоя, глубина местных дефектов.

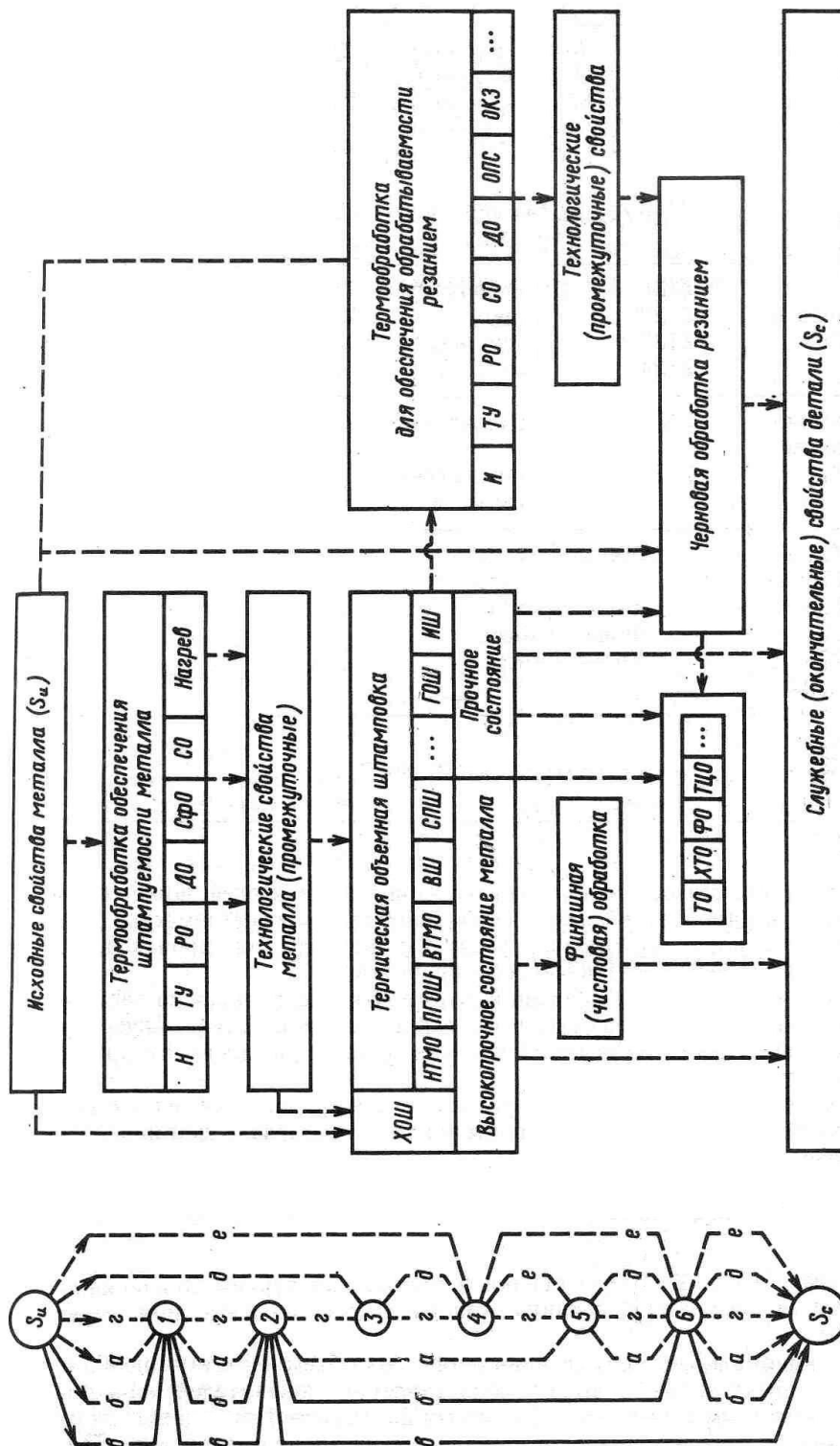


Рис. 16. Формирование служебных свойств деталей, полученных объемной штамповкой и механической обработкой: $5и$ — исходные свойства металла; $5с$ — служебные свойства деталей; $a, г$ — маршруты обработки с косвенным влиянием объемной штамповки на $5с$; $б, в$ — маршруты обработки с непосредственным влиянием объемной штамповки на $5с$; $д, е$ — маршруты обработки без влияния объемной штамповки на $5с$; H — нормализация; $TУ$ — термо-: • улучшение; PO — рекристаллизационный отжиг; $ДО$ — диффузионный отжиг; $СфО$ — сфероидизирующий отжиг; $СО$ — смягчающий отжиг; $ОПС$ — отжиг на перлитную структуру; $OKЗ$ — отжиг на крупное зерно; $ТО$ — закалка+отпуск; XTO — химикотермическая обработка; $ФО$ — физическая обработка (лазерная, плазменная и т.п.); $TЦО$ — термоциклическая обработка.

Рассмотренные функциональные показатели качества в основном определяют технический уровень поковок. Однако для условий крупносерийного и особенно массового производства особое значение приобретает экономический аспект обеспечения качества, связанный с ресурсоемкостью производства поковок (деталей). Ресурсными показателями качества продукции объемной штамповки являются металлоемкость (или коэффициент использования металла), трудоемкость, энергоемкость, фондоемкость и т.п.

Таблица 45

Система показателей качества поковок

Функциональное качество поковок	Физико-механические свойства Z11	Z111 Микроструктура Z112 Макроструктура Z113 Модуль нормальной упругости Z114 Предел текучести Z115 Временное сопротивление	Z116 Ударная вязкость Z117 Твердость Z118 Хладноломкость Z119 Относительное сужение
	Точность Z12	Z121 Поле допуска Z122 Припуск Z123 Смещение Z124 Кривизна	Z125 Плоскостность Z126 Концентричность Z127 Радиальное биение
	Качество поверхности Z13	Z131 Шероховатость Z132 Глубина дефектного слоя	Z133 Локальные дефекты
Ресурсоемкость поковок Z2	Z21 Z22 Z23 Z24 Z25	Энергоемкость Трудоемкость Фондоемкость Хроноемкость	
Затраты Z3	Z31	Себестоимость Затраты на инструмент	

На основании перечисленных показателей может быть определен комплексный экономический показатель качества — себестоимость. Для поковок, обрабатываемых после штамповки резанием, затраты на производство должны быть рассчитаны с учетом механической обработки. Таким образом, качество продукции объемной штамповки оценивается по вектору $Z = (z_1, \dots, z_n)$, составляющими которого являются единичные показатели качества, характеризующие, с одной стороны, технический уровень поковок (деталей), а с другой стороны, затраты на достижение этого уровня.

Интегральный показатель качества, при условии выполнения для единичных показателей попарной независимости по предпочтению, целесообразно формировать как аддитивную функцию

$$k = \sum_{i=1}^n \lambda_{ji} Z_{ji}(z_{ji})$$

где λ_{ji} — весовые коэффициенты; $Z_{ji}(z_{ji})$ — оценки по частным критериям. Значения λ_{ji} и $Z_{ji}(z_{ji})$ определяют в результате технико-экономического анализа или через экспертные процедуры.

Для обоснования рациональности применения процессов объемной штамповки для изготовления деталей представляет интерес сопоставление показателей качества деталей, полученных различными способами их формообразования. Приводимые далее данные в ряде случаев (в основном касающихся ресурсных показателей качества) являются приближенными. Поэтому применительно к конкретным производственным ситуациям их следует использовать для формирования тенденций (ориентиров) при принятии решений на начальных этапах проектирования технологических процессов изготовления деталей. Среди методов объемной штамповки наиболее высокие значения точности достигаются при выдавливании. В частности, если в процессе холодного выдавливания может быть получена деталь, то допуски на размеры и минимальные радиусы переходов могут быть назначены согласно табл. 46 [14].

Таблица 46

Допуски на размеры и минимальные радиусы перехода для деталей нормальной точности, получаемых холодным выдавливанием

Размер d_n , мм	Допуск на размер d_n , мм	Радиус перехода, мм	
		наружный	внутренний
До 10 (включительно)	$\pm(0,04...0,15)$	0,5 — 2,0	1,0—3,0
Св. 10 до 18	$+(0,06...0,18)$	0,7 — 2,0	1,5—4,0
"18"30	$\pm(0,08...0,21)$	1,0—3,0	2,0 — 5,0
" 30"50	$+(0,10...0,25)$	1,2—4,0	2,2—6,0
"50"80	$\pm(0,12...0,30)$	1,5-5,0	2,5 — 7,0
"80" 120	$\pm(0,15...0,35)$	2,0 — 6,0	3,0 — 9,0

Для деталей, требующих после выдавливания механической обработки, припуски Π вычисляются по соотношениям [21]: $\Pi_a = (0,05...0,15)d_n$; $\Pi_b = (0,05...0,15)d_b$; $\Pi_l = (0,01...0,05)l$, где d_n , d_b , l — соответственно наружные, внутренние диаметры и длина детали.

Качество поверхности деталей после холодной объемной штамповки характеризуется параметрами шероховатости. Для заготовок из низкоуглеродистых сталей значения параметра шероховатости R_a в зависимости от способа холодного выдавливания приведены в табл. 47.

Таблица 47

Параметр шероховатости R_a поверхностей деталей, получаемых холодным выдавливанием

Способ выдавливания	Место измерения	R_a , мкм
Редуцирование стержня Прямое выдавливание:	Поверхность стержня	0,63 — 0,32
	Поверхность стержня	1,5—1,0
Обратное выдавливание полости	Поверхность полости	2,5— 1,5
	Наружная поверхность	2,5— 1,5
	Поверхность полости	1,0 — 0,5
	Дно:	
	снаружи	Более 2,5
	внутри	0,63 — 0,32

Для заготовок из цветных металлов и сплавов на их основе качество поверхности в основном получается выше. Параметры точности стальных горячештампованных поковок регламентированы ГОСТ 7505—89, где предусмотрено пять Т1...Т5 классов точности. Более высокая точность соответствует классу Т1. Припуски на механическую обработку поверхностей назна-

чают в зависимости от параметра шероховатости обрабатываемых поверхностей; легированности материала; степени сложности поковок; класса точности, выбираемого в соответствии с принятым оборудованием (кривошипные горячештамповочные прессы, горизонтально-ковочные машины, прессы винтовые и гидравлические, горячештамповочные автоматы, штамповочные молоты) и способа штамповки (открытая, закрытая, калибровка). Значения припусков на механическую обработку и допусков на линейные размеры поковок в зависимости от ряда факторов, влияющих на точность, приведены в табл. 48.

Таблица 48

Предельные отклонения линейных размеров и припуски на механическую обработку (на сторону) для стальных поковок, штампованных на различном оборудовании

Основное деформирующее оборудование, технологический процесс						
Кривошипные горячештамповочные прессы;	закрытая штамповка выдавливание открытая штамповка					
Горизонтально-ковочные машины						
Прессы винтовые, гидравлические						
Штамповочные молоты						
Горячештамповочные авт.						
Калибровка объемная						
Основные размеры (длина, ширина, высота, диаметр) детали, мм	Параметр, мм	Класс точности по ГОСТ 7505				
		T1	T2	T3	T4	T5
До 40	Припуск	0,6	0,6	0,8	1,0	1,3
	Допуск	+0,2 —0,1	+0,3 —0,2	+0,5 —0,2	+0,6 —0,3	+0,8 —0,4

40 — 65	Припуск Допуск	0,6 +0,3 —0,1	0,8 +0,4 —0,2	0,9 +0,5 —0,3	1,1 +0,7 —0,3	1,4 +0,9 —0,5
160 — 250	Припуск Допуск	2,0 + 1,6 —0,9	2,5 +2,1 — 1,1	3,0 +2,7 — 1,3	3,5 +3,3 —1,7	4,1 +4,2 —2,1

Значения припусков и допусков в табл.48 приведены в качестве примера для благоприятного случая, т.е. для сталей группы М1, степени сложности поковок С1, поковок массой до 0,5 кг, шероховатости обработанных поверхностей Ra=10...1,6 мкм, толщины детали до 40 мм. При увеличении массы (т) и размеров поковки, степени ее сложности (С), легированности металла (М) значения припусков и допусков увеличиваются. Для особо крупных и сложных поковок из легированных сталей припуск может составлять до 10 мм, а предельные отклонения линейных размеров'

Таблица 49

Допускаемые отклонения формы поковок для различных классов точности

Размеры, мм

Масса поковки, кг	Допускаемое значение остаточного облоя*	Допускаемое смещение плоскости разъема штампа*	Класс точности поковки					Допускаемое отклонение по изогнутости	Допускаемое отклонение от концентричности пробитого отверстия	Допускаемое отклонение межосевого расстояния	Наибольший размер поковки
			T1	T2	T3	T4	T5				
Св. 0,5 до 1,0	0,3	0,2	*					0,3	0,4	+0,15	До 100 включительно
	0,4	0,2		*			0,4	0,5	±0,20		
	0,5	0,3			*		0,5	0,6	+0,25		
	0,6	0,4				*	0,6	0,8	+0,30		
	0,7	0,5					0,8	1,0	±0,50		
Св. 1,0 до 1,8	0,4	0,2	*					0,4	0,5	+0,20	Св. 100—160
	0,5	0,3		*			0,5	0,6	+0,25		
	0,6	0,4			*		0,6	0,8	+0,30		
	0,7	0,5				*	0,8	1,0	+0,50		
	0,8	0,6					1,0	1,5	+0,80		
Св. 1,8 до 3,2	0,5	0,3	*					0,5	0,6	±0,25	160—250
	0,6	0,4		*			0,6	1,5	+0,30		
	0,7	0,5			*		0,8	0,8	+0,50		
	0,8	0,6				*	1,0	1,0	+0,80		
	0,9	0,7					1,2	2,0	+ 1,20		
Св. 3,2 до 5,6	0,6	0,5	*					0,6	0,8	+0,30	250—400
	0,7	0,6		*			0,8	1,0	+0,50		
	0,8	0,7			*		1,0	1,5	+0,80		
	0,9	0,8				*	1,2	2,0	+ 1,20		
	1,0	1,0					1,6	2,5	+ 1,60		

* Данные приведены для штампов с плоской поверхностью разъема

49. Допускаемые отклонения формы поковок различных масс и размеров приведены в табл. 49.

При полугорячей штамповке (ПГОШ) показатели качества поковок по точности; и параметрам шероховатости поверхности имеют промежуточное значение между этими показателями для поковок, полученных холодной (ХОШ) и горячей (ГОШ) объемной штамповкой. Данные по этим показателям, а также некоторые параметры, характеризующие область предпочтительного применения и специфику указанных процессов, приведены в табл.50.

Важными показателями качества продукции являются служебные свойства' деталей, характеризующие их надежность и долговечность при эксплуатации. На уровне единич-

ных показателей качества служебные свойства деталей могут быть представлены через механические свойства металла.

Способ формообразования деталей существенно влияет на механические свойства: металла. В табл. 51 дано, в качестве примера, сопоставление механических свойств металла деталей, изготовленных из заготовок, полученных различными способами. Данные [44,62] приведены для широко применяемой конструкционной стали 40X и усреднены с учетом анизотропии свойств.

Таблица 50

Сравнительные данные различных способов объемной штамповки

Показатель	Способ штамповки		
	ГОШ	ПГОШ	ХОШ
Точность изделий по ISO: нормальная повышенная особо высокая	IT14— IT16 IT12— IT13	IT12— IT14 IT9—IT10	IT10— IT11 IT8— IT9 IT6— IT7
Параметр шероховатости Rz, мкм	Более 100	Менее 50	1,6—10
Предпочтительная масса штампуемого изделия, кг	0,005—150	0,1—50	0,001—0,5
Предпочтительные для штамповки стали	Любые	Углеродистые с содержанием легирующих элементов менее 10%	С содержанием углерода менее 0,45% и легирующих элементов в сумме менее 3%
Допускаемая при формоизменении деформация заготовки, мм	Любая	Допускается более 1,6	Менее 1,6
Необходимость предварительной подготовки металла	Нагрев	Нагрев	Отжиг+фосфатирование
Необходимость промежуточной обработки заготовок	Нет	Нет	При $\epsilon > 1,6$ отжиг+фосфатирование
Критическая серийность, шт., при массе деталей около 1 кг	500	10000	3000

Примечание ϵ — логарифмическая деформация.

Таблица 51

Сопоставление механических характеристик металла деталей, полученных из различных заготовок (материал заготовок — сталь 40X)

Исходная заготовка	Механические характеристики металла детали					
	σ_{-1} , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_b , МПа	KCV, кДж/м ²	δ , %	φ , %
Отливка в песчано-глинистую форму	186	290	620	55	11	20
	1	1	1	1	1	1
Сортовой прокат (нормализация)	303	320	690	75	20	52
	1,6	1,1	1,11	1,35	1,8	2,6
Поковка из литой заготовки (нормализация)	260	320	685	75,5	17,6	36
	1,4	1,1	1,1	1,37	1,6	1,8

Поковка из сортового проката (нормализация)	$\frac{379}{2,03}$	$\frac{455}{1,57}$	$\frac{866}{1,3}$	$\frac{83}{1,5}$	$\frac{20,9}{1,9}$	$\frac{54}{2,7}$
---	--------------------	--------------------	-------------------	------------------	--------------------	------------------

Примечание: В числителе даны абсолютные значения параметров, в знаменателе: теле — относительные (за единицу приняты значения, полученные для литого металла).

Более высокий уровень механических свойств деталей, изготовленных из заготовок, полученных путем пластического деформирования, обусловлен специфичным влиянием последней на макро- и микроструктуру металла слитка. Правильно назначенные режимы пластического формоизменения способствуют устранению пористости литой структуры; заварке макродефектов типа трещин, дроблению и рациональной ориентации неметаллических включений; перераспределению ликвационных зон, формированию волокнистой структуры и текстуры в местах деформации, измельчению суб- и макрозерна, дроблению карбидных фаз и уменьшению карбидной неоднородности и т.п. Комплексное воздействие деформирования на морфологию структурных составляющих в 2—2,5 раза повышает пластические свойства металла и его сопротивление хрупкому разрушению, а также на 20-, 50% повышает характеристики прочности.

Механические свойства металла деталей, получаемых объемной штамповкой, в основном зависят от термомеханических режимов формоизменения и используемых видов упрочняющей термообработки (табл.52) [21,44,63].

В процессах ХОШ деформационное упрочнение приводит к возрастанию, по мере увеличения степени деформирования, таких характеристик прочности, как $\sigma_{0.2}$ и σ_b при одновременном снижении характеристик пластичности δ , φ и вязкости КСУ металла. В ряде случаев, в частности, когда отсутствует опасность хрупкого разрушения детали и температура ее эксплуатации ниже температуры возврата, благодаря деформационному упрочнению металла можно отказаться от заключительной термообработки детали или заменить материал детали на менее легированный, а соответственно более дешевый или уменьшить площадь поперечного сечения детали, а следовательно, и ее массу.

Таблица 52

Сопоставление механических характеристик металла деталей, полученных объемной штамповкой, при различных режимах формообразования и термообработки (материал — сталь 30ХГСА)

Номер режим	Режим формообразования и термообработки	Механические характеристики металла детали					
		σ_{-1} , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_b , МПа	KCV, кДж/м ²	δ , %	φ , %
1	Холодная штамповка (относительная деформация 60%)	$\frac{560}{0,6}$	$\frac{1100}{0,78}$	$\frac{1200}{0,7}$	$\frac{75}{0,4}$	$\frac{3}{0,33}$	$\frac{18}{7,2}$
2	То же + отпуск при 300°C+скоростная закалка+отпуск 300°C (предварительная термомеханическая обработка ПТМО)	$\frac{1200}{1,3}$	$\frac{1640}{1,16}$	$\frac{1860}{1,1}$	$\frac{200}{1,05}$	$\frac{9}{0,9}$	$\frac{30}{1,2}$
3	Полугорячая штамповка в режиме низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО)	$\frac{1890}{2,03}$	$\frac{2200}{1,56}$	$\frac{2700}{1,59}$	$\frac{400}{2,16}$	$\frac{7}{0,7}$	$\frac{25}{1}$
4	Горячая штамповка в режиме высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО)	$\frac{1760}{1,9}$	$\frac{2000}{1,41}$	$\frac{2400}{1,42}$	$\frac{500}{2,7}$	$\frac{10}{1}$	$\frac{35}{1,4}$
5	Горячая штамповка+закалка со штамповочной температуры+отпуск при 300°C (ТПО)	$\frac{1490}{1,5}$	$\frac{1680}{1,19}$	$\frac{1910}{1,3}$	$\frac{250}{1,35}$	$\frac{10}{1}$	$\frac{30}{1,2}$
6	Горячая штамповка + термоулучшение	$\frac{930}{1}$	$\frac{1410}{1}$	$\frac{1690}{1}$	$\frac{185}{1}$	$\frac{10}{1}$	$\frac{25}{1}$
7	Горячая штамповка+ нормализация	$\frac{450}{0,48}$	$\frac{650}{0,46}$	$\frac{850}{0,5}$	$\frac{116}{0,63}$	$\frac{13}{1,3}$	$\frac{30}{1,2}$

8	Горячая штамповка + термоциклическая обработка в течение 14—15 циклов (ТЦО)	$\frac{409}{0,44}$	$\frac{550}{0,39}$	$\frac{815}{0,48}$	$\frac{314}{1,7}$	$\frac{21}{2,1}$	$\frac{62}{2,5}$
---	---	--------------------	--------------------	--------------------	-------------------	------------------	------------------

Примечание. Механические свойства усреднены с учетом анизотропии; в числителе даны абсолютные значения параметров, в знаменателе — относительные (за единицу приняты значения, полученные после режима №6).

Свойство холодной объемной штамповки повышать прочность металла детали особенно ценно для малоуглеродистых, термически не упрочняемых сталей. Важным потребительским свойством поковок является их обрабатываемость резанием, так как после нормальной по точности горячей объемной штамповки следует черновая механическая обработка, как правило, лезвийным инструментом. Для повышения обрабатываемости резанием поковок используют смягчающий отжиг (на феррит), отжиг на перлит, отжиг на крупное зерно, нормализацию, термоулучшение. Последние два вида термообработки в ряде случаев (когда не требуется высокая твердость) можно считать формирующими окончательное структурное состояние металла в детали.

Различные виды термообработки назначают в соответствии с маркой стали, в частности, согласно [50]: термоулучшение — для поковок из сталей 35X, 40X, 45X, 38ХМД, 40ХН, 40ХГТР, 40ХНГМА, 42ХМФА, нормализацию — для поковок из сталей 20, 30, 35, 40, 45, 55П1, 12НЗА, 18ХГТ, 20X, 40X; нормализацию с высоким отпуском — для поковок из сталей 20ХГНТР, 38ХМЮА, 40ХГТР; изотермический отжиг — для поковок из сталей 25ХГНМТ, 25ХГМ, 15ХГН2ТА, 15ХФ.

Если же по условиям эксплуатации необходима высокая прочность и твердость поверхностного слоя, то они, в зависимости от марки стали, могут быть обеспечены одним из следующих видов упрочняющей термической или химико-термической обработки: закалкой (поверхностной или объемной), цементацией, азотированием, нитроцементацией и т.п., но уже после штамповки и черновой механической обработки.

Ресурсные показатели качества продукции объемной штамповки выражают рациональность и эффективность использования трудовых, материальных, топливно-энергетических ресурсов при ее производстве.

Согласно данным [8] средний уровень использования металла в металлообработке составляет: при изготовлении из прокатных профилей 0,36; из поковок из слитков 0,49; из поковок из сортового проката 0,62; из чугунного литья 0,8; из стального литья 0,83. Средний коэффициент использования металла при получении механической обработкой деталей из различных заготовок составляет 0,65.

Относительные ориентировочные данные по себестоимости, капитальным вложениям и приведенным затратам даны в табл. 53, где за единицу приняты указанные параметры при изготовлении детали из сортового проката.

Таблица 53

Ориентировочные относительные затраты на изготовление 1 т деталей из различных заготовок [17]

Способ получения заготовки	Вид заготовки	Вид затрат		
		Себестоимость	Капитальные вложения	Приведенные
Горячая прокатка	Сортовой профиль общего назначения (круглый, квадратный)	1	1	1
	Фасонный профиль специального назначения	0,738	0,787	0,75
Свободная ковка	Поковка из слитков	0,855	0,825	0,845
Горячая объемная штамповка	Поковка из сортового	0,67	0,59	0,61

Литье в песчаную форму	Стальная отливка	0,33	0,44	0,37
------------------------	------------------	------	------	------

Наиболее низкий уровень приведенных затрат на 1 т готовых деталей имеет место при получении их из отливок, затем из поковок, формообразованных из сортового проката горячей объемной штамповкой, из фасонных профилей специального назначения [50]. Наиболее высокий уровень затрат при изготовлении деталей из поковок, полученных свободной ковкой из слитков.

Однако следует иметь в виду, что приведенные в табл. 53 данные не учитывают разницу в массе и долговечности деталей, изготавливаемых из различных заготовок.

Ориентировочные данные (коэффициенты удорожания 1 т деталей по сравнению со стоимостью 1 т исходного металла заготовки) по эффективности использования ресурсов при производстве деталей из поковок и их сравнение с данными по альтернативным способам приведены в табл. 54.

Таблица 54

Расход металла и относительная стоимость деталей, полученных из различных заготовок, по сравнению со стоимостью исходных материалов [17]

Способ получения заготовки	Коэффициент использования металла			Коэффициент удорожания готовой детали
	на заготовку	заготовки на деталь	общий	
Из горячего проката мелкосортный	—	—	0,5	12,7
среднесортный	—	—	0,45	10,9
крупносортный	—	—	0,4	13,3
калиброванный	0,99	0,565	0,65	7,7
спецпрофиль	—	—	0,75	3,6
трубы	—	—	0,8	3,1
Свободная ковка	0,89	0,29	0,25	14,3
Горячая объемная штамповка	0,8	0,47	0,4	6,0
Холодная объемная штамповка	0,9	0,93	0,85	1,4
Стальное литье в песчаную форму	—	—	0,7	2,5
Точное литье в оболочковую форму	—	—	0,98	1,1

Показатели ресурсоемкости продукции объемной штамповки существенно зависят от температурного режима формообразования. Сопоставление некоторых показателей ресурсоемкости и структура затрат для продукции горячей, полугорячей и холодной штамповки приведены соответственно в табл. 55 и 56 [63].

Таблица 55

Ориентировочные показатели ресурсоемкости различных способов объемной штамповки

Показатель ресурсоемкости	Способ штамповки		
	ГОШ	ПГОШ	ХОШ
Металлоемкость (коэффициент использования металла, КИМ).	0,5 — 0,75	0,8 — 0,9	0,9 — 0,98
Энергоемкость при ука-	60	48	44

занном КИМ, Дж/кг			
Сравнительная трудоемкость	1	0,5 — 0,3	0,9 — 0,5
Стойкость инструмента, тыс. шт.	2—5	10—20	20 — 50

Дифференцированные по типу заготовок и применяемому оборудованию данные по структуре статей расхода в себестоимости поковок, получаемых горячей объемной штамповкой из сортового проката, приведены в табл. 57 [50]. Данные, приведенные в табл. 57, отражают специфику производства, а также системы планирования и учета затрат на конкретном предприятии (кузнечный завод КамАЗа) и могут служить лишь примером для сравнения. Следует обратить внимание на большую долю расходов на оборудование, что связано в данном случае с применением дорогостоящих автоматизированных и механизированных штамповочных комплексов. В то же время доля затрат на технологическую оснастку невелика (4—7%), что свидетельствует, по-видимому, о высоком качестве изготовления оснастки и рациональных способах ее эксплуатации в условиях массового производства.

Таблица 56

Ориентировочные доли статей расхода в себестоимости деталей при различных видах штамповки

Статья расхода	ГОШ	ПГОШ	ХОШ
Материал	$\frac{0,61}{1}$	$\frac{0,545}{0,62}$	$\frac{0,485}{0,91}$
Оборудование	$\frac{0,104}{1}$	$\frac{0,122}{0,81}$	$\frac{0,087}{0,95}$
Штамповый инструмент	$\frac{0,25}{1}$	$\frac{0,195}{0,58}$	$\frac{0,065}{0,396}$
Электроэнергия	$\frac{0,035}{1}$	$\frac{0,0315}{0,64}$	$\frac{0,0064}{0,21}$
Термообработка*	—	—	0,168
Смазка	$\frac{0,0015}{1}$	$\frac{0,09}{55}$	$\frac{0,168}{165}$
Оснастка	$\frac{0,0175}{1}$	$\frac{0,0125}{0,5}$	$\frac{0,02}{1,38}$
Итого	1+расходы на механообработку	$\frac{1}{0,69}$	$\frac{1}{1,14}$

* После ХОШ для низкоуглеродистых сталей требуется химико-термическая обработка (цементация)

Примечание. В числителе указаны доли себестоимости детали, а в знаменателе — соотношение с аналогичной статьей расхода для ГОШ.

Таблица 57

Структура статей расхода в себестоимости поковок, получаемых горячей объемной штамповкой

Тип поковки	Применяемое оборудование	Коэффициент использования металла	Затраты, %					
			М	З	Т	О	Э	Н
Круглая в плане	КГШП	0,81	0,3	2,12	7,1	24,0	1,4	7,8
Удлиненной осесимметричной формы	КГШП	0,78	57,3	1,2	2,9	14,0	1,4	4,52

То же	Ковочные вальцы+КГШП	0,72	52,49	3,45	5,35	27,50	2,56	9,05
	ГКМ	0,94	54,5	2,35	2,9	26,65	4,28	8,7
Круглая в плане	ГША	0,97	63,33	1,9	2,4	21,32	3,41	7,04
То же	АЛ и К	0,9	49,43	2,58	5,97	29,12	2,89	9,57

Условные обозначения: М — затраты на основные и вспомогательные материалы; З — заработная плата основных рабочих; Т — затраты на технологическую оснастку; Э — затраты на энергию; Н — затраты на накладные расходы; О — затраты на оборудование; КГШП — кривошипный горячештамповочный пресс; ГКМ — горизонтально-ковочная машина; ГША — горячештамповочный автомат; АЛ и К — автоматические линии и комплексы.

2.3.2. Параметры и контроль качества поковок

Принципиальная схема контроля основных и вспомогательных операций горячей объемной штамповки приведена на рис. 17.

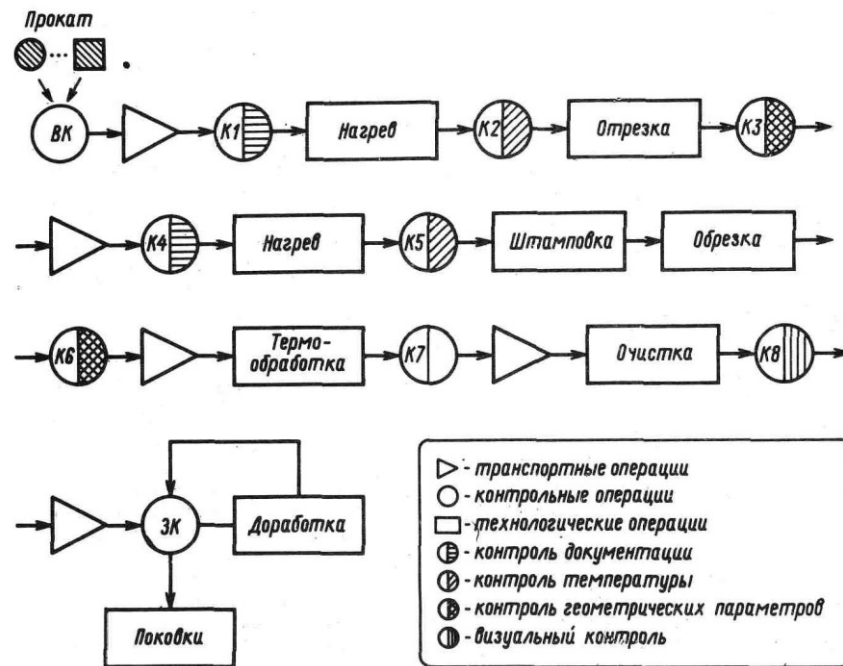


Рис. 17. Принципиальная схема контроля поковок в процессе горячей объемной штамповки

Качество стального проката прежде всего определяет качество поковок или деталей и их надежность в эксплуатации. Для предотвращения случаев попадания в производство металла с отклонениями от требований государственных стандартов или технических условий на поставку проводят входной контроль ВК всего поступающего на предприятие металла. Наиболее характерные виды брака, выявленные в результате входного контроля на одном из автомобильных заводов, приведены в табл. 58.

Поступивший стальной прокат подвергается полному анализу химического состава спектральным, фотоэлектрическим или другими методами. При этом устанавливают, выдержан ли химический состав при выплавке металла, не произошло ли смешивание сталей разных марок при прокатке и хранении, поскольку повышенное содержание углерода и некоторых легирующих элементов приводит к трещинообразованию при закалке и повышению твердости. Содержание углерода и легирующих элементов ниже пределов, устанавливаемых ГОСТом, требует корректировки режимов термообработки.

Проводят также выборочную проверку по размерам сечения, длине (для кратных поставок), кривизне, отсутствию поверхностных дефектов, наличию клейма, номеров плавки и марки стали в пределах 5% от пучка (но не менее пяти прутков). Если при выборочном контроле уста-

навливают какое-либо; отклонение от требований государственных стандартов или технических условий, то весь металл сортируют.

Таблица 58

Структура брака по металлургическим дефектам, %

Отклонения по химсоставу	Поверхностные дефекты	Смешивание марок сталей	Размер зерна	С подсадочной ликвидацией
16—24	40—67	4—11	2—4	10—15

От каждой плавки стали берут заготовку от двух произвольных прутков для определения пределов текучести и прочности, относительного удлинения и сужения, твердости, ударной вязкости, а также прокаливаемости, макро- и микроструктуры, размера зерна, химического состава. Эти характеристики позволяют прогнозировать технологические и эксплуатационные свойства детали.

Прокаливаемость стали является фактором, определяющим качество термической обработки готовых деталей. Макро- и микроструктуры выявляют для установления наличия скрытых металлургических дефекты (рисок, волосовин, закатов, плен, расслоений, инородных включений, флокенов, аномально крупных зерен).

Поверхностные дефекты, имеющие глубину, превышающую припуск, приводят к браку изделия.

Твердые инородные включения могут вызвать поломку инструмента при лезвийной обработке.

Дефекты ликвационного характера (ликвационный квадрат, подсадочная ликвация) могут приводить к браку в процессе пластического формоизменения, в частности в виде микротрещин в зоне облоя при штамповке или в осевой полости при поперечно-клиновой вальцовке. Формирование качества поковок зависит от соблюдения технологической дисциплины, правильности принятых проектных решений при конструировании инструмента и выборе режимов выполнения операций, состояния кузнечно-прессового оборудования, формоизменяющего, измерительного инструмента и приборов, методического и организационного обеспечения служб технического контроля.

Назначение контрольных операций К1 и К4 состоит в предупреждении попадания на операции отрезки и штамповки заготовок не той марки материала.

Контроль состоит в проверке накладных, сертификатов или паспортов на поступившие в цех прутки и заготовки. Металл без сопроводительных документов к обработке не допускается.

Контрольную операцию К2 осуществляют с периодичностью 2 раза в смену для контроля температуры нагрева прутков большого диаметра перед резкой заготовок. Температура нагрева составляет 300—500°С в зависимости от марки стали. При меньшей температуре в процессе последующей резки круглого прутка возможно образование торцовых трещин.

Контрольную операцию К3 проводят для оценки качества отрезаемых заготовок. Контролируемыми параметрами являются длина заготовки и искажение торцов. Для закрытой объемной штамповки контролируемым параметром является масса заготовки. Периодичность контроля — каждый час работы.

При отрезке заготовок возможен брак следующих видов:

заусенцы и смятие конца заготовки из-за неправильного взаимного расположения ножей (большой зазор) или при их изнашивании;

скол с вырывом металла вследствие малого зазора между ножами;

косой срез при несоответствии вырезов в ножах диаметру разрезаемого прутка, большом зазоре между ножами, неправильном угле наклона оси прутка относительно передней плоскости ножей;

торцовые трещины у крупных круглых прутков из высокоуглеродистых и легированных сталей из-за недостаточной температуры подогрева металла;

несоответствие заготовки по длине по причине неправильной установки или недостаточной жесткости упоров, неполной подачи прутков до упора;

несоответствие заготовки по массе (для закрытой штамповки) из-за большого поля допуска на диаметр прутка, некомпенсируемого соответствующим изменением длины заготовки.

Допускаемое отклонение торца стержня поковки после отрезки заготовок по ГОСТ 7505 89 составляет: для s до 40 мм включительно $x=0,08d$, $y=d$, а для $d>40$ мм $x=0,07d$, $y=0,8d$, где d — диаметр прутка; x , y — ширина и глубина приторцового смятия. Отклонение от перпендикулярности поверхности среза к оси заготовки допускается до 7° .

Контрольную операцию К5 проводят для определения температуры металла после; нагрева заготовок непосредственно перед операцией штамповки, она предназначена для предотвращения брака (недогрев, перегрев, пережог).

Недогрев — недостаточная для горячей объемной штамповки температура заготовки приводит к образованию трещин в поковке, перегрузке инструмента из-за низко- пластичности и высокого сопротивления деформированию обрабатываемого металла, а также незаполнению гравюры штампа.

Перегрев — нагрев металла до высоких температур, вызывающих чрезмерное укрупнение зерна в стали, ухудшающее служебные свойства деталей. Брак исправим последующей термообработкой, например, нормализацией. Перегрев способствует интенсивному окалинообразованию и обезуглероживанию материала заготовки. Окалина приводит к потерям до 2—3% металла, ухудшает качество поковки при штамповке, повышает износ штампов. Выгорание углерода в поверхностных слоях на глубину более фактического припуска на механическую обработку приводит к снижению твердости поверхности деталей после закалки и ухудшению усталостной прочности.

Пережог — нагрев металла до температур, близких к температуре плавления. Вызывает окисление и оплавление границ зерен, приводящие к резкому падению пластичности металла и снижению некоторых служебных свойств детали. Этот брак неисправим.

Контрольная операция К6, осуществляемая после выполнения основной формоизменяющей операции—объемной штамповки и обрезки заусенца, необходима для определения соответствия полученной поковки техническим требованиям. Периодичность контроля: первую поковку каждой партии отправляют в ОТК на разметку и проверку отсутствия поверхностных дефектов. Основные причины брака обусловлены нарушением технологической дисциплины на предшествующих данной операциях, а также ошибками, допущенными при проектировании технологического процесса и конструировании штампов. Последние характеризуются систематической повторяемостью одного и того же вида брака.

Характерные виды брака по указанной причине следующие.

1. Недостаточный припуск обусловлен неправильным назначением (соизмерим с глубиной дефектного слоя) припуска на механическую обработку. Проявляется при обработке резанием в виде «черноты» на обработанных поверхностях и местным понижением твердости. Припуск на механическую обработку регламентирован ГОСТ 7505—89. Он состоит из основного и дополнительного припусков, учитывающих номинальную глубину обезуглероженного слоя в прокате, потери на угар при нагревах в кузнечном цехе, отклонения формы поковки.

2. Негодная макроструктура — расположение волокна металла в наиболее нагруженных при эксплуатации сечениях поперек траекторий напряжений, вызванных рабочими нагрузками на деталь. При проектировании технологических переходов штамповки и выборе заготовки необходимо исключить возможность неблагоприятной ориентации волокна в поковке и попадания в напряженные сечения детали металла ликвационных зон заготовки.

3. Неоднородность зеренной структуры по объему поковки (разнозернистость) — размер зерен, далеко выходящих за пределы обычного нормального распределения этих размеров. Методы предупреждения разнозернистости состоят в обеспечении на окончательном переходе штамповки более равномерного распределения деформаций путем назначения рациональных форм предварительных переходов штамповки, использования эффективных теплозащитных слоев, разделяющих инструмент и металл заготовки при формоизменении.

4. Систематический перекося поковки — смещение сверх установленного допуска одной половины поковки относительно другой по плоскости разъема, что является следствием неправильной наладки или неуравновешенности боковых сдвигающих сил при штамповке поковок сложной формы. Устраняется применением в штампах замковых элементов или направляющих, спаренной («валетом») штамповкой поковок.

5. Незаполнение гравюры штампа возникает из-за занижения массы заготовки, неправильного сочетания размеров предварительного и окончательного ручьев штампа, неправильного расположения газоотводящих каналов в глубоких полостях штампа.

6. Систематическое образование зажимов, т.е. заштампованной в поковке складки, образующейся в результате неправильного течения металла в чистовом ручье. В местах возможных зажимов в штампах необходимо предусматривать специальные выемки или «компенсаторы» для затекания избытка металла.

7. Нарушение заданных от базы размеров возникает при несогласовании баз кузнечной и механической обработки. При проектировании чертежа поковки основные контрольные размеры необходимо привязывать к тем поверхностям, относительно которых деталь базируется в процессе обработки резанием.

8. Коробление поковок — отклонение осей и плоскостей поковки от правильного геометрического положения, что происходит из-за застревания при выталкивании поковок малой толщины или при обрезке облоя. Коробление устраняют увеличением уклонов в ковочном штампе или правкой.

Некоторые из указанных видов брака могут являться следствием нарушения технологической дисциплины. Так, недогрев заготовки приводит к незаполнению гравюры штампа, недоштамповке. Такой же брак возникает вследствие эксплуатации изношенных штампов, их загрязнения продуктами сгорания смазочного материала, недостаточного числа ударов на молотах. Эксплуатация изношенного (неисправного) оборудования (увеличенный зазор в направляющих, выработка плоскостей штамподержателя и т.п.) обуславливает перекося поковок. Эксцентричная укладка заготовок в ручей, чрезмерно резкие удары молота при штамповке в протяжном ручье являются причиной образования зажимов. Неправильная установка упоров в штампах при высадке и гибке, нестабильность длины заготовок вызывают отклонение по длине поковок.

Заусенец, кривизна — брак, возникающий при обрезке облоя, что в основном связано с использованием неисправных обрезных штампов при смещении поковки в обрезной матрице.

Контрольная операция К 7 необходима для оценки операции термообработки поковок и их пригодности для последующей обработки резанием. При этом контролируют как параметры самого процесса, так и формирование механических свойств поковок, в основном твердости. Заданные режимы термообработки поддерживают с помощью терморегуляторов, получающих информацию от пирометров (термопар) и программируемых механизмов толкания поддонов. В закалочных установках периодически измеряют и регистрируют температуру охлаждающей жидкости. Режимы регистрируют в журнале для каждого агрегата.

Твердость контролируют через каждый час работы агрегата на поковках, взятых с двух параллельных поддонов по одной штуке. Значения твердости регистрируют в журнале и в карте статистического контроля.

Окончательный контроль твердости (сплошной или выборочный в количестве 5—10 шт. от каждой тары) позволяет установить возможность нормальной обработки поковок резанием.

У первых партий термообработанных поковок проводят металлографическое исследование на шлифах, вырезанных из поковок с крайними значениями твердости. Брак, выявляемый после термообработки, является следствием неправильного выполнения предшествующих операций, несоответствия химического состава стали, несоблюдения режима термической обработки. К характерным видам брака, выявленным с помощью контрольной операции К 7, относятся: недостаточная или повышенная твердость, «разброс» значений твердости, закалочные трещины. Первый вид брака устраним повторной термообработкой, два последних — неустраняемы.

Разброс значений твердости возникает из-за местного обезуглероживания или близкого расположения ликвационной зоны к поверхности поковок.

Закалочные трещины образуются при чрезмерной скорости охлаждения поковок, резкой ликвации и загрязненности металла инородными включениями, большой разницы в содержании углерода в местах среза облоя относительно соседних участков.

Контрольную операцию К8 проводят после дробеструйной очистки для оценки ее качества. Браком после данной операции являются остатки окалины, забоины и вмятины, которые образуются в галтовочных барабанах или дробеструйных установках из-за совместной обработки крупных и мелких поковок.

Заключительный контроль ЗК завершает технологическую цепочку производства поковок. Для поковок рядового назначения он состоит в 100%-ом визуальном контроле поверхности с целью выявления дефектов согласно техническим требованиям чертежа, не обнаруженных на предшествующих контрольных операциях. В частности, устанавливают необходимость зачистки заусенца и дополнительной правки поковок. Для поковок, не соответствующих техническим требованиям, выявляют возможность устранения брака правкой, зачисткой заусенцев и поверхностных дефектов, если их глубина не превышает половины припуска на сторону, перештамповкой, дополнительной термообработкой.

После исправления брака вновь осуществляют контроль, по результатам которого принимают окончательное решение о приемке или отбраковке поковок.

Для деталей ответственного назначения, регламентирующих ресурс и безопасность работы машины, объем заключительного контроля расширен и его проводят, как правило, с привлечением специальных методик и аппаратуры.

Для выявления внешних дефектов кроме визуального осмотра используют люминесцентную и магнитную дефектоскопию [21]. Оба метода позволяют выявить визуально невидимые поверхностные дефекты. Люминесцентный метод более производителен и надежен по сравнению с магнитным, он позволяет выявлять глубокие, идущие с поверхности трещины шириной менее 0,005 мм, в том числе и у немагнитных материалов.

Внутренние дефекты поковок (раковины, трещины, расслоения, флокены, рыхлоты и т.п.) выявляют ультразвуковым методом согласно ГОСТ 24507—80. Ограниченно применяют для этих целей также рентгеноскопию.

Для выявления внутренних скрытых дефектов (разнозернистость, неправильная макроструктура) проводят металлографические исследования поковок в соответствии с действующими ГОСТами и техническими требованиями.

Прочностные характеристики поковок (пределы текучести, прочности, ударную вязкость) проверяют периодически по результатам соответствующих механических испытаний образцов, вырезанных у поковок.

Качество деталей (полуфабрикатов), получаемых холодной объемной штамповкой, главным образом зависит от свойств исходного материала, состояния его поверхности, правильного построения технологического процесса (выбора переходов, схемы течения металла, допустимых по переходам деформаций, конфигурации инструмента), режимов химико-термических операций, конструкции инструмента и его состояния, типа кузнечно-прессового оборудования и его состояния. Возможности исправления брака после холодной объемной штамповки крайне ограничены. Поэтому обеспечение качества продукции требует соблюдения и стабилизации в необходимых пределах параметров технологических процессов, контроля за их отклонением с целью предотвращения условий возникновения брака.

При входном контроле исходного материала необходима оценка химического состава, механических свойств и фактической штампуемости. Применение для ХОШ качественных конструкционных сталей (ГОСТ 1050—88) и легированных конструкционных сталей (ГОСТ 4543—71) весьма нежелательно, так как это может привести к массовому браку по трещинам. Поэтому для ХОШ деталей сложной формы необходимо использовать специальные стали (ГОСТ 10702—78) с пониженным содержанием серы, кремния, фосфора, меди, мышьяка.

Макроструктура стали должна быть однородной, без усадочных рыхлот, неметаллических включений, раковин, флокенов, пористости. Площадь ликвационной зоны не должна занимать более 40% площади сечения заготовки. Лучше, если она расположена в середине сечения.

Горячекатаный прокат по состоянию структуры, поверхности, механическим свойствам, точности размеров и формы поперечного сечения не удовлетворяет требованиям технологии холодной объемной штамповки. Поэтому в технологический процесс ХОШ входят некоторые характерные операции: разупрочняющая предварительная и промежуточная термообработка; подготовка поверхности (фосфатирование, оксалатирование); калибровка (волочение обдирка), доводящие параметры исходного металла до необходимого уровня.

Перед ХОШ с целью стабилизации свойств металла после горячей прокатки, повышения пластичности и снижения сопротивления деформированию проводят разупрочняющую термообработку (РТО). Эффект разупрочнения при термообработке обусловлен сфероидизацией карбидных фаз и формированием оптимального размера зерна. Поэтому чрезмерно крупное зерно у низкоуглеродистых сталей и грубый пластинчатый перлит, видманштеттова структура и структурно-свободный цементит по границе зерен у среднеуглеродистых сталей являются браковочными признаками. Существенным дефектом, препятствующим термоулучшению и поверхностной закалке детали после ХОШ, является обезуглероженный слой. Максимально допустимая глубина обезуглероженного слоя после РТО не должна превышать 0,08—0,2 мм соответственно для диаметров 6—20 мм.

Формирование оптимальной морфологии структурных составляющих (получение 80—100% зернистого перлита) достигается определенным сочетанием температурно-временных параметров нагрева, выдержек и скоростей охлаждения металла, которые подбирают для каждой марки стали, как правило, эмпирически с учетом степени деформации при калибровке и требований к пластичности металла, необходимой для формоизменения детали без опасности разрушения.

Характерный режим РТО для сталей в основном ступенчатый, содержащий нагрев до 720—780°C, выдержку 0,5—1 ч, охлаждение до 680—700°C, выдержку 5—8 ч, охлаждение с печью до 300°C, а затем на воздухе [21].

Более высокие показатели деформируемости достигаются, если РТО проводят после холодной калибровки заготовок, при которой следует избежать деформаций, близких к критическим ($\epsilon = 0,1 \dots 0,16$), так как они стимулируют при нагреве появление аномально крупного зерна.

Снижению энергоемкости и повышению производительности при обеспечении удовлетворительной деформируемости сталей ферритно-перлитного класса способствует применение форсированной РТО, основанной на индукционном нагреве. Оптимальный режим форсированной РТО для стали 15Х: индукционный нагрев за 45 с до 950°C, охлаждение до 900°C на воздухе, замедленное со скоростью 2—8°C/мин охлаждение до 550°C, далее снова на воздухе [30].

К браку по размерной точности может привести отклонение диаметра и профиля поперечного сечения исходной заготовки, особенно при холодной высадке деталей типа болтов, где точность стержня по диаметру соответствует точности исходного профиля. При высадке уголщений большое положительное отклонение диаметра приводит к образованию складок и заусенца, а отрицательное отклонение диаметра — к незаполнению формы, особенно граней.

Допускаемые отклонения размеров профиля проволоки и прутков должны соответствовать для круглой горячекатаной стали ГОСТ 2590—71, а калиброванной ГОСТ 7417—75. В частности, овальность исходного проката по всей длине должна находиться в пределах поля допуска.

Горячекатаный прокат перед ХОШ подлежит калибровке волочением — для проволоки в бунтах или обдирке — для прутковых заготовок. Обдирку осуществляют на специализированных автоматах резанием или шлифованием (лучше лезвийным инструментом) со снятием припуска 0,8—1,5 мм и обеспечением допуска по диаметру не более 0,1 мм и параметра шероховатости поверхности $Ka = 5 \dots 2,5$ мкм. Для заготовок большого диаметра обдирку целесообразно совмещать с отрезкой заготовки с допуском на длину $\pm 0,1$ мм и образованием фаски. Кроме по-

вышения точности заготовок такая калибровка обеспечивает удаление поверхностных дефектов типа волосовин, закатов, задиров, грубых рисок и т.п.

К резкому падению качества поверхности штампуемых деталей из-за налипания металла на инструмент и низкой стойкости инструмента приводит использование смазочного материала, не соответствующего контактным условиям, возникающим при холодной штамповке. Для ХОШ низколегированных сталей наиболее подходящими являются омыленные фосфатные покрытия, на основе фосфата цинка толщиной не менее 15 мкм, чему соответствует масса покрытия 18—20 г на 1 м². Фосфатный слой должен быть сплошным, ровным, мелкокристаллическим. Для получения качественного фосфатного слоя на полуфабрикате между операциями штамповки слой отработанного фосфатного покрытия следует удалить.

В качестве слоя носителя смазочного материала при ХОШ легированных сталей, содержащих более 4% (Cr + Mn), используют глазурь оксалата железа. Масса покрытия 2—3 г на 1 м.

Перед фосфатированием и оксалатированием поверхность заготовок должна быть очищена от загрязнений.

Антифрикционные свойства оксалатовых и фосфатных покрытий повышаются при применении жидких смазочных материалов МБО-21, Укринол-5/5, ЭМБОЛ-3, СИ-Ц, В-32К.

Особенно необходимо применение жидких смазочных материалов при штамповке на автоматах из проволоки или прутка, когда на торцах отрезаемой непосредственно в автоматах заготовки отсутствует слой носителя смазочного материала.

В мелкосерийном производстве применяют и другие способы подготовки поверхности: кальцинирование, известкование, обмазку графитом, меднение, цинкование и т.п.

К операции отрезки заготовок для ХОШ предъявляют более жесткие требования по весовой точности состоянию поверхности среза, чем к процессам горячей штамповки.

Применение предварительной калибровки исходного металла по диаметру позволяет устойчиво получить довольно точные ($\pm 1\%$) по весу (объему) заготовки. Однако удовлетворительное состояние торцевой поверхности заготовок для таких операций, как холодное обратное выдавливание, удастся получить только после калибровки отрезанных заготовок осадкой, при этом наряду с обеспечением плоскостности и параллельности торцов на них целесообразно выполнять наметки для направления пуансонов и фаски. Перед высадкой, редуцированием, а иногда и выдавливанием сплошного стержня калибровку заготовок осадкой не производят и требования к состоянию поверхностного среза остаются обычными.

При резке заготовок сдвигом для обеспечения удовлетворительного качества поверхности среза используют штампы с ножами втулочного типа. Для уменьшения угла скоса торца прутков следует располагать относительно ножей штампа под углом $\alpha = 2 \dots 7^\circ$ в зависимости от разрезаемого материала. Большое значение имеет выбор оптимального зазора между ножами, который для круглых прутков иногда выполняют переменным путем специальной фасонной заточки ножей.

Наиболее характерным браком при ХОШ является образование в деформируемой детали трещин различной ориентации и положения: продольных, скальвания, поперечных, внутренних (рис. 4.18). Причиной возникновения продольных трещин (рис. 18, а) являются, как правило, поверхностные дефекты, которые остались не устраненными при калибровке (обдирке) исходных заготовок. При штамповке деталей типа гаек такие трещины могут быть следствием отрицательного влияния ликвации на пластичность металла (рис. 18, б).

Скальвающие трещины ориентированы под углом 45° к направлению действия силы деформирования (рис. 18, в) и свидетельствуют об исчерпании пластичности металла при холодном деформировании.

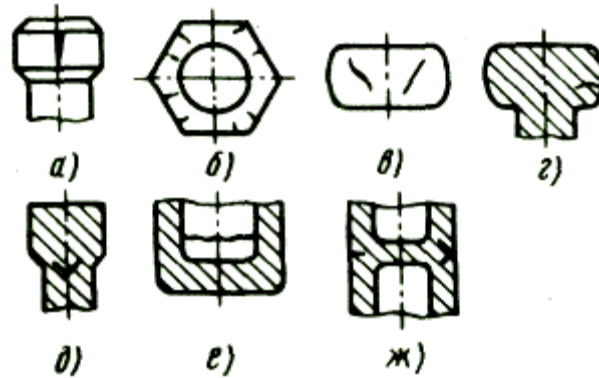


Рис. 18. Виды разрушения при холодной объемной штамповке

Для их предупреждения необходимо повысить пластичность металла путем оптимизации режимов РТО или режимов деформирования (смягчение схемы напряженного состояния в опасной зоне, увеличение числа переходов штамповки, переход на теплую или полугорячую штамповку).

Внутренние трещины (рис. 18, *д—ж*) наиболее характерны при прямом, обратном, комбинированном выдавливании и многократном редуцировании. Они могут возникнуть при заштамповке складки, образовавшейся вследствие потери устойчивости заготовки при высадке головки (рис. 18, *з*) и при обрезке обля из-за вытеснения в него металла ликвационной зоны или затупления кромок обрезного инструмента.

Причина возникновения поперечных трещин разнообразна, но в основном она также связана с исчерпанием пластичности металла. Для предупреждения образования такого рода дефектов кроме повышения пластичности исходного металла следует конструировать рациональный инструмент (применение сигмоидальных матриц для редуцирования и прямого выдавливания, оптимальной формы рабочих поверхностей пуансонов и режима активного трения для обратного выдавливания) и использовать эффективные смазочные средства.

2.3.3. Совершенствование качества поковок

Основными направлениями повышения качества поковок являются получение точных (прецизионных) поковок, требующих минимальной обработки резанием или вообще исключаящих ее; достижение более высокого уровня механических свойств поковок для улучшения весовой эффективности и эксплуатационной надежности деталей; снижение ресурсоемкости (энерго-, металло- и трудоемкости) производства поковок.

Техническая реализация этих направлений повышения качества обуславливает необходимость широкого применения вычислительной техники на стадиях проектирования, производства и контроля продукции, ужесточения требований к исходным материалам, формоизменяющему инструменту и оборудованию, комплексной автоматизации производственного процесса.

Конструкция и материал детали должны быть технологически рациональны, т.е. ориентированы на наиболее эффективные методы формообразования и упрочнения.

Технологические возможности некоторых процессов объемной штамповки позволяют без- или малоотходным способом формировать облегчающие полости и распределить по объему детали упрочнение металла исходя из условия обеспечения ее равнопрочности. Поэтому при конструировании деталей целесообразно ориентироваться именно на такие процессы, позволяющие получать легкие и точные поковки. В идеале повышение точности поковок должно способствовать устранению трудоемкой механической обработки и полному использованию преимуществ объемной штамповки, связанных с упрочнением металла. Однако следует иметь в виду, что конкретным производственным ситуациям присущ свой экономически целесообразный уровень точности заготовок, получаемых в кузнечно-штамповочном производстве.

Рациональная точность поковок должна обеспечивать наименьшую себестоимость изготовления детали, т.е. затраты на материал, формоизменение поковки и последующую обработку должны быть минимальны.

С повышением точности поковки и приближением ее конфигурации к форме готовой детали затраты на механическую обработку резко снижаются. Тем не менее при малой программе выпуска предварительное формообразование заготовок может оказаться нерентабельным, так как расходы на оснастку для штамповки экономически не окупятся. Экономическая целесообразность штамповки наступает с программы выпуска $N > N_{кр}$ (рис. 19). При $N < N_{кр}$ выгоднее использовать сортовой прокат. При любой программе выпуска предварительная штамповка неэффективна [16], если коэффициент использования металла при получении детали из сортового прутка будет больше 0,82. Данной ситуации соответствует линия 5, на рисунке выделена область I, где повышение точности путем предварительного формообразования экономически целесообразно.

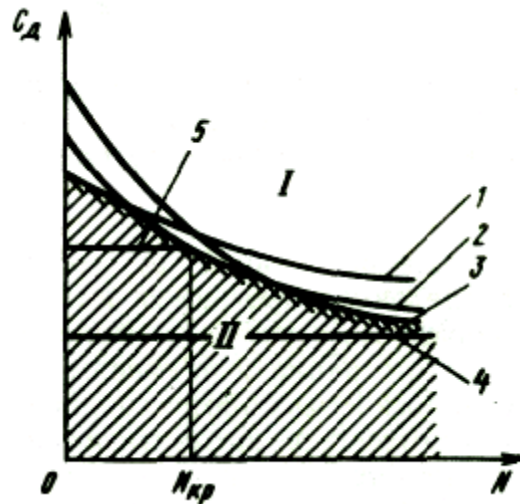


Рис. 19. Оценка целесообразности повышения точности заготовки штамповкой: 1, 2, 3 — зависимости себестоимости C_d изготовления деталей из поковок, полученных различными способами, от программы N выпуска; 4, 5 — то же, но из прутковой заготовки при $KИМ=0,82$ и $KИМ<0,82$ соответственно; I, II — области, где повышение точности заготовок предварительным формообразованием соответственно эффективно и не эффективно

Уровень рациональной точности поковок (допуски на размеры) может быть установлен с помощью зависимостей себестоимостей поковок и деталей, полученных механической обработкой из них, от точности поковок.

Существует такая точность $\delta_{3,опт}$, при которой себестоимость изготовления в целом будет минимальной. Уменьшение точности относительно $\delta_{3,опт}$ приводит к повышению себестоимости из-за роста расходов на материал, что особенно заметно при обработке заготовок из дорогостоящих сплавов. Повышение точности более $\delta_{3,опт}$ также увеличивает себестоимость из-за усложнения технологического процесса штамповки, а также увеличения затрат на изготовление и эксплуатацию более точного инструмента и наладку оборудования (кривая 1 на рис. 20). Затраты на механическую обработку по мере увеличения снимаемого с заготовки припуска возрастают (кривая 2).

В итоге кривая 3 изменения себестоимости изготовления детали в зависимости от точности заготовки также имеет экстремальный характер, при этом минимальная себестоимость детали C_{dmin} соответствует точности $\delta_{опт}$ большей, чем $\delta_{3,опт}$. Такое соотношение затрат на производство поковки и детали из нее свидетельствует о целесообразности повышения точности поковок до уровня δ^* , хотя это и приводит к повышению затрат в кузнечно-штамповочном производстве. Дальнейшее повышение точности поковок в данном случае не эффективно и механическая обработка поковок после штамповки экономически оправдана.

На рис. 20, б показана зависимость себестоимости изготовления детали от поля допуска на размеры поковки (δ_3) и на размеры детали (δ_d).

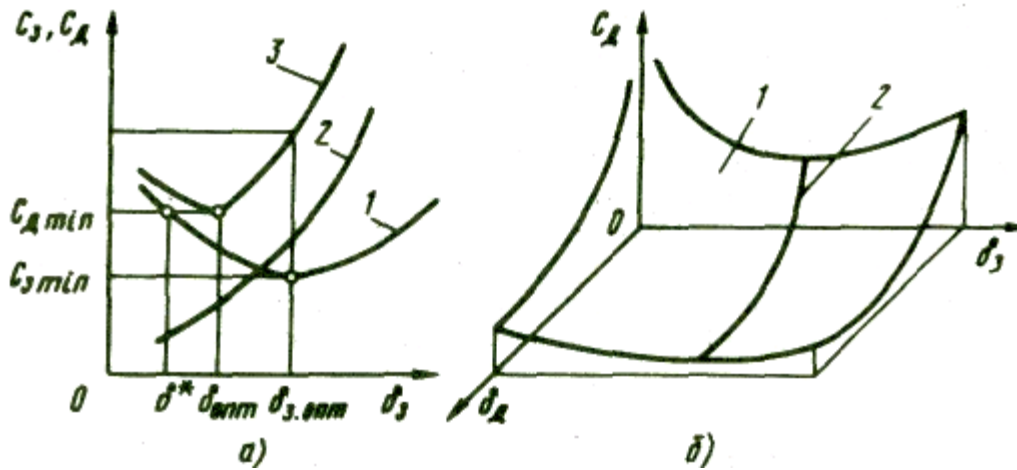


Рис. 20. Влияние точности δ_3 изготовления (поле допуска на размеры) поковки (а) и точности δ_d и δ_3 изготовления соответственно детали и поковки (б) на себестоимость детали C_d и себестоимость поковки C_3

Характер поверхности 1 позволяет определить положение кривой 2, соответствующей минимальной себестоимости детали при определенной программе выпуска.

Задача получения прецизионных поволоков, максимально приближенных по конфигурации и размерам к конфигурации и размерам деталей, вызывает необходимость усовершенствования технологических процессов, повышения качества исходного металла и точности заготовок, комплексной автоматизации операций технологического процесса горячей объемной штамповки и контроля. Металл в состоянии поставки не должен иметь поверхностных дефектов типа глубоких рисок, волосовин, закатов и обезуглероженного слоя. В большей степени этим требованиям отвечает прокат с обточенной поверхностью. Малой склонностью к короблению обладают микролегированные стали.

Большинство (до 70%) поволоков выгодно изготавливать из заготовок, полученных методом непрерывного литья. Однако для высокоответственных деталей целесообразно изготовление поволоков из металла, получаемого электрошлаковым, вакуумно-дуговым, плазменно-дуговым или электронно-лучевым переплавом.

Использование заготовок, полученных методом непрерывного литья, взамен проката позволяет улучшить ресурсные показатели качества поволоков, так как отходы на тонну поволоков уменьшаются в среднем на 20—25%.

Применение профилей повышенной точности и современных методов резки позволяет обеспечить допуски по массе на заготовки $\pm (0,75...1) \%$ для проката и менее $\pm 0,5\%$ для обточенного профиля. Использование точных заготовок с качественной поверхностью разделения является необходимым условием для прецизионной штамповки, которую, как правило, осуществляют в закрытых штампах.

Точность размеров после объемной штамповки зависит от большого числа факторов, основными среди которых являются: точность изготовления инструмента, упругопластические, упругие и температурные деформации инструмента в момент окончания формоизменения, а также деформации поковки (детали) после извлечения ее из инструмента и после термообработки.

Точность изготовления инструмента зависит от уровня инструментального производства и должна быть на 1—2 качества выше требуемой точности штамповки.

Упругие и температурные деформации инструмента при известных режимах его нагружения и нагрева могут быть определены расчетным путем, а следовательно, учтены при проектировании инструмента. Упругопластические деформации инструмента могут быть устранены после определенного числа нагружений путем юстировки гравюры штампа. Упругие, упругопластические и температурные деформации поковки (детали) могут возникнуть в процессе ее удаления из штампа выталкивателями, под воздействием остаточных напряжений, при упругом восстановлении формы и тепловой усадке после извлечения.

Современные методы механики сплошной среды позволяют рассчитывать изменение формы деформированного тела после прекращения нагрузки, если история нагружения и температурная ситуация известны.

Факторы, определяющие точность штамповки, носят как случайный, так и систематический характер, что при анализе точности обуславливает применение методов математической статистики.

Точность штамповки по высоте (отклонение Δh размера поковки по высоте или высоты после осадки, толщина дна при выдавливании и т.п.) зависит от изменения силы штамповки ΔP и податливости системы машина— штамп — промежуточный слой (смазочный материал, окалина) — заготовка;

$$\Delta h = \Delta P (\Delta P_{\mu}, \Delta P_V, \Delta P_S, \dots) / C_1,$$

где ΔP_{μ} , ΔP_V , ΔP_S — изменения силы штамповки в зависимости от колебаний коэффициента трения, объема (массы) заготовки и сопротивления деформированию; C_1 — жесткость системы.

Зависимость $\Delta h = f(\Delta P)$ имеет свой вид для каждого процесса объемной штамповки и оборудования [20,45]. Требуемая точность при ХОШ достигается, если $\Delta P_S = \pm(0,03 \dots 0,05)P$, $\Delta P_{\mu} < 0,05P$, а $C_1 = (0,3 \dots 0,5)C$, где C — жесткость прессы по паспорту.

Величина ΔP_S зависит от рассеяния химического состава материала заготовки, стабильности режимов предварительной или промежуточной разупрочняющей термобработки. Величина ΔP_{μ} определяется качеством подготовки поверхности и применяемых смазочных средств; ΔP_V зависит от точности по объему применяемых заготовок, что особенно проявляется в операциях осадки и высадки и менее значимо в операциях выдавливания полого и сплошного стержней постоянного сечения.

При холодной, горячей и полугорячей штамповке широкое распространение получили механические прессы с кинематически ограниченным ходом (КГШП, ГKM, специализированные кривошипные, кривошипно-коленные прессы для ХОШ и калибровки и т.п.). Общим недостатком таких прессов является непригодность для активного управления точностью штамповки.

На машинах, работающих до упора (молоты, винтовые и гидравлические прессы и т.п.), необходимая точность может быть обеспечена за счет дополнительного хода до соприкосновения штампов, что способствует подавлению действия случайных факторов.

На кривошипных прессах штамповку производят за один ход, что не позволяет использовать указанный прием. Желаемая точность в данном случае может быть обеспечена лишь соответствующей настройкой межштампового расстояния и поддержанием стабильности значимых параметров технологического процесса. Рассмотрим некоторые аспекты формирования точности поковок при штамповке на механических прессах [2].

Поковку по высоте можно считать точной, если

$$h_{\min} < h < h_{\max},$$

где h_{\min} , h_{\max} — соответственно минимально и максимально допустимая высота поковки.

Для того, чтобы вероятность получения точных поковок была максимальной, следует назначать

$$h_0 = 0,5(h_{\max} + h_{\min}),$$

где h_0 — номинальное значение желаемой высоты го расстояния прессы производить согласно условию

$$H_0 = h_0 - P_0 / C$$

где H_0 — расстояние между рабочими поверхностями штампов при отсутствии усилия и выборе зазоров в системе; P_0 — среднее усиление штамповки; C — коэффициент жесткости системы пресс—штамп; $C = 5,4 \dots 12,7$ МН/мч [2].

Поскольку рассеяние случайной величины высоты поковок, как правило, согласуется с нормальным законом распределения, то общий диапазон вариации высоты поковок будет равен 6. Тогда при установке начального между штампового расстояния [2] желаемая точность штамповки будет выполняться, если

$$\sigma_h = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{xi}^2} \leq \Delta h / 6.$$

$$\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$$

где a_i — функции, преобразующие погрешность параметра i в погрешность высоты h поковки; n — число параметров; $0,1$ — среднеквадратичное отклонение случайных параметров.

Точная настройка пресса согласно этому условию является сложной задачей, как правило, не решаемой после штамповки первой поковки. В зависимости от квалификации кузнеца обычно на это расходуется четыре, пять и более заготовок. Алгоритм настройки путем изменения межштампового расстояния [2] позволяет достигнуть требуемого высотного размера не более, чем за две штамповки. Согласно этому алгоритму получение поковки требуемой высоты будет обеспечено, если корректировку межштампового расстояния H_2 после второй штамповки произвести по условию

$$\delta H_2 = -\Delta_2 / (1 - a),$$

где $a = \Delta_2 / \Delta$; $\Delta_1 = h_1 - h_0 > 0$; $\Delta_2 = h_2 - h_0 > 0$; h_1 h_2 — высота поковки после первой и второй штамповки соответственно.

Эта зависимость не требует при настройке пресса информации о его жесткости и усилии деформации поковок. Она также может быть использована для регулировки межштампового расстояния пресса с целью компенсации износа штампов. Точность установки требуемого межштампового расстояния сильно сказывается на точности штамповки. Для нормальной точности штамповки отклонение δH от номинала не должно превышать 0,25—0,5 мм, а для повышенной 0,1—0,2 мм [2]. При существенном влиянии изнашивания (осадки) инструмента на размеры штампуемой детали размер настройки необходимо смещать к верхнему пределу поля допуска.

Изменение коэффициента трения μ при горячей штамповке низких поковок слабо влияет на технологическое усилие. Поэтому для такого типа поковок точность в основном зависит от температуры штамповки, т.е. можно принять, что среднеквадратичное отклонение высоты поковок

$$\sigma_h = \sqrt{a_T^2 \sigma_T^2} ;$$

где a_T — функция, преобразующая погрешность температуры штамповки в погрешность высоты поковок.

Кроме того, при штамповке точных поковок следует учитывать окалинообразование, так как высота поковки после очистки'

$$h_0 = h_{\text{шт}} - 2S$$

где $h_{\text{шт}}$ — высота поковки с окалиной; S — толщина слоя окалины.

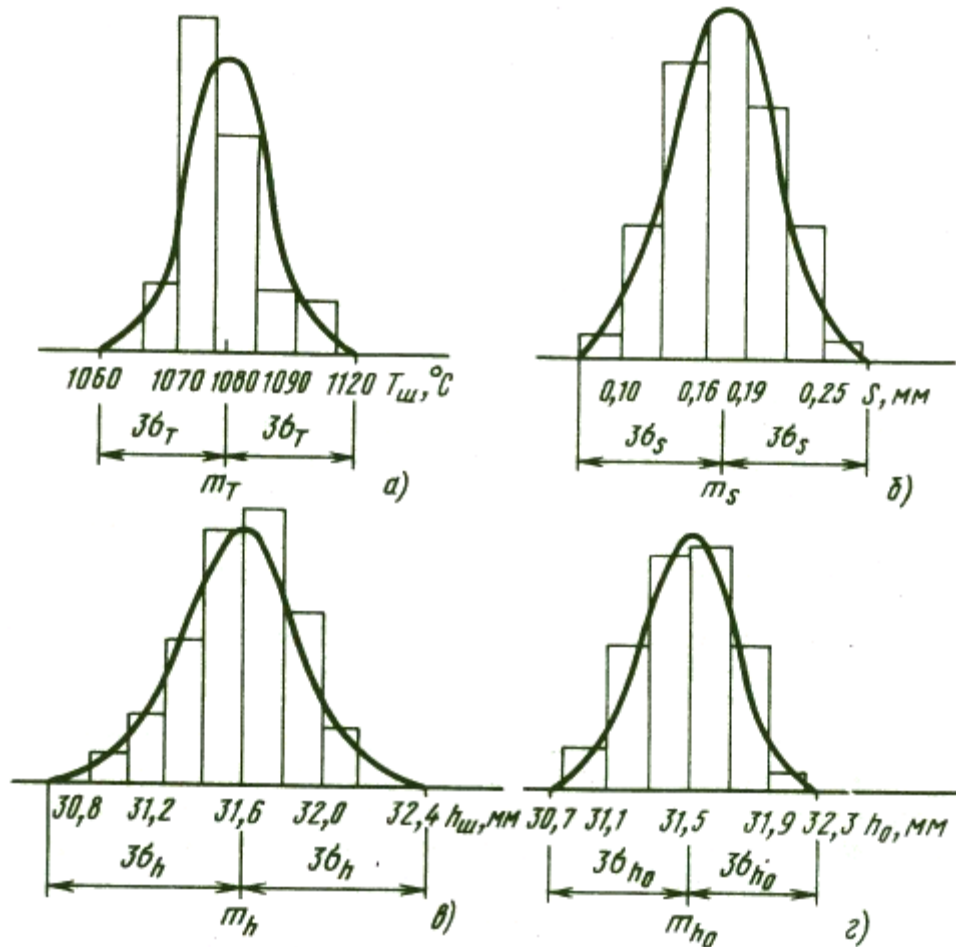


Рис. 21. Распределение случайных величин температуры $T_{ш}$ штамповки (а), толщины окалины S (б), высоты поковок $h_{ш}$ до очистки (в) и h_0 после очистки (г) от окалины

Величины $h_{ш}$ и S случайные и подчинены нормальному закону распределения рис.21, а, б. Закон распределения высоты h_0 очищенных поковок является комбинацией этих законов и также является нормальным (рис. 21, г).

Следовательно, для повышения точности поковок целесообразно уменьшить диапазон колебания температуры штамповки и устранить окалинообразование. Решение указанных проблем связано с дальнейшим совершенствованием нагревательных устройств путем увеличения скорости и стабильности нагрева, ведения нагрева в защитной среде (безокислительная атмосфера, различные защитные покрытия заготовок), повышения точности контроля температуры нагрева. Необходимо также сократить и стабилизировать время штамповочного цикла, интенсифицировать процесс охлаждения горячих поковок.

Стабильное поддержание температуры штамповки в диапазоне $\Delta T=15...30^{\circ}\text{C}$ вместо обычного $\Delta T=90...110^{\circ}\text{C}$, а также снижение толщины слоя окалины до $0,03—0,05$ мм позволяют выявить точность поковок до $0,3—0,5$ мм (кривая 2 на рис. 22).

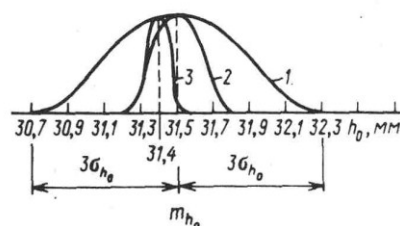


Рис. 22. Выравнивающие кривые нормального распределения для случайной величины высоты поковки: 1 — очистение от окалины поковки (штамповка нормальной точности на КГШП); 2 — то же, но при стабилизации температуры штамповки до $+20^{\circ}\text{C}$; 3 — после плоскостной калибровки точных поковок.

Точность размеров поковки (детали) в плоскости, перпендикулярной к направлению перемещения ползуна пресса, зависит от деформации штампа, допуска на износ, поперечной жесткости пресса и инструмента, момента, опрокидывающего ползун, и других факторов.

Допуск на диаметр Δd выдавливаемой при ХОШ полости определяется износом $\Delta d_{п.}$, пуансона и его «подсадкой» $\Delta d_{д}$ из-за упругопластических деформаций при циклическом нагружении:

$$\Delta d = \Delta d_{д} + \Delta d_{п.}; (0,2...0,4) \cdot 10^{-5} N,$$

где N — число циклов штамповки.

После выталкивания из матрицы размеры детали могут изменяться на 0,05—0,6 мм в зависимости от упругих свойств материала степени деформации и диаметра детали.

Требуемая форма гравюры штампа может быть найдена в результате решения задачи термоупругости с использованием конечно элементной модели штампа [2]. Возможность прогнозирования изменения размеров гравюры в процессе штамповки позволяет корректировать ее форму на стадии проектирования штампов без доводки после опытной штамповки. Коррекция формы гравюры по износу производится путем пропорционального износу увеличения размера гравюры в поле допуска на размеры поковки.

На основании проведенных расчетов разрабатывают чертеж или цифровые программы управления инструментом для формообразования гравюры окончательного штампа. Высокой точности изготовления можно достичь, используя фрезерные станки с цифровым управлением при неглубоких гравюрах и эрозионные станки при глубоких. Точность эрозионного способа составляет 0,05 мм.

Качество формообразования поковок в окончательном ручье во многом зависит от того, насколько удачно спроектированы предварительные переходы штамповки. Сущность проектирования предварительных переходов состоит в поиске формы полуфабрикатов, обеспечивающей оптимальное течение металла в окончательном переходе, в результате которого исключается брак по зажимам, трещинам, незаполнению формы, формируется рациональная макро- и микроструктура металла. Данную задачу также решают математическим моделированием пластического течения металла в конечно элементной постановке.

В отличие от горячей штамповки обычной точности для прецизионной штамповки вместо одного предварительного перехода, в зависимости от сложности формы поковки, требуется два—четыре перехода. Для деталей вытянутой формы (шатуны, рычаги и т.п.) предварительное фасонирование заготовки целесообразно осуществлять на ковочных вальцах или станах поперечно-клиновой вальцовки. Применение последней предпочтительнее вследствие высокой производительности и точности фасонирования. Для деталей типа ступенчатых валов с цилиндрическими, коническими и сферическими поверхностями применяют поперечно-клиновую вальцовку как высокоэффективный самостоятельный способ формообразования поковок для последующей обработки резанием или даже шлифованием.

У деталей сложной асимметричной формы после предварительной штамповки перед окончательной в ряде случаев предусматривается удаление облоя.

Автоматическое выполнение операций без участия человека гарантирует стабильную температуру заготовки и инструмента и темп штамповки, а, следовательно, способствует получению поковок с размерами в пределах поля допуска.

Экономическое достижение требуемой точности поковок (деталей) зависит от показателей, учитываемых при выборе пресса. Чем выше жесткость пресса, тем выше точность поковок. В свою очередь жесткость растет с увеличением номинального усилия (мощности) пресса, но при этом возрастает и стоимость одного рабочего хода пресса. Поэтому наиболее рациональным будет тот пресс, который максимально использует свои возможности по усилию, но при этом гарантирован от перегрузок. Последнее особенно важно для кривошипных прессов, которые чувствительны к *перегрузкам*.

Условие отсутствия перегрузок пресса при штамповке с учетом случайного характера силы штамповки имеет вид [2].

$$\Delta P \leq P_0 + 3\sigma_p$$

где σ_p — среднеквадратичное отклонение силы, связанное со среднеквадратическим отклонением σ_h высоты поковки зависимостью $\sigma_p = C \sigma_h$ или

$$P_{н \geq P_0 + 3 C \sigma_h} = P + 0.5 \Delta h C,$$

где $\Delta h = \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{xi}^2$

Таким образом не будет перегрузки пресса, а точность поковок будет соответствовать заданному диапазону h_{\min} — h_{\max} , если его номинальное усилие выбирают с превышением среднего усилия штамповки P_0 на величину $0.5 \Delta h C$.

Для точной горячей штамповки необходимы специализированные КГШП, желательными признаками которых являются быстроходность, короткий ход, автоматическая подстройка закрытой высоты по мере изнашивания инструмента, увеличенное скольжение электродвигателя. Практически достигаемая на различных видах кузнечно-прессового оборудования точность поковки характеризуется допуском [44]: на КГШП $\pm (0,2 \dots 0,5)$ мм; на винтовых машинах $\pm (0,1 \dots 0,3)$ мм (штамповка до соприкосновения штампов); на молотах $\pm (0,5 \dots 0,8)$ мм; на гидравлических прессах $\pm (0,3 \dots 1)$ мм.

Необходимость обеспечения высокой точности деталей, получаемых ХОШ, обуславливает ряд специфичных требований к прессовому оборудованию. ХОЩ осуществляется на холодновысадочных автоматах, механических и гидравлических одно- и многопозиционных прессах. Прессы для ХОЩ должны обладать продольной, и поперечной жесткостью, снижающей отклонения положения инструмента под действием технологической нагрузки. Ползун пресса должен быть жестким и иметь точные направляющие. Для прессов многопозиционной штамповки поперечная жесткость должна обеспечивать точность позиционирования заготовок, ограничивать боковое смещение ползуна при асимметричной нагрузке. У современных прессов для ХОЩ отклонения от плоскостности стола и ползуна не превышают 0,06 мм на 1 м, отклонения от параллельности плоскостей стола и ползуна до 0,05 мм на 300 мм, отклонения от перпендикулярности направления хода ползуна относительно плоскости стола до 0,06 мм на длине 150 мм.

Увеличение точности поковок сверх указанных пределов может быть обеспечено введением в технологический процесс операции калибровки. Калибровка обычной точности позволяет достигнуть допусков от $\pm 0,1$ до $\pm 0,25$ мм, а повышенной от $\pm 0,05$ до $\pm 0,15$ мм (кривая 3 на рис. 4.22).

Точность калибровки можно повысить до $\pm 0,25$ мм путем многократного нагружения, а также снижением допусков на штамповку или сортировкой поковок на группы, отличающиеся между собой по высоте на 0,2 — 0,3 мм, и соответствующей настройкой пресса для калибровки каждой группы отдельно.

Степень деформирования при плоскостной калибровке назначают не более 10%, обычно - 1-5%. Параметр шероховатости поверхности после калибровки $Ra = 1,26 \dots 0,63$ мкм, что соответствует параметру шероховатости при шлифовании.

Снижению выпуклостей калибруемых поверхностей способствует уменьшение неравномерности контактных напряжений между поковкой и инструментом путем применения эффективных смазочных материалов, полирования рабочих поверхностей штампа, а также выполнение их выпуклыми.

Эффективным приемом уменьшения выпуклости калибруемых поверхностей является калибровка в сомкнутых штампах. При таком виде калибровки высокая точность поковок может быть достигнута на прессах с обычной жесткостью. Качество поковок повышается при переходе от горячей объемной штамповки обычной точности к прецизионной объемной штамповке (рис. 23).

Точная горячая штамповка	_____
Выдавливание	_____
Вальцовка	_____
Калибровка	_____
Токарная обработка	_____
Шлифование	_____

Таблица 60

Значения параметров шероховатости Rz при формообразовании заготовки разными способами

Способ формообразования	Параметры шероховатости Rz, мкм																						
	0,06	0,1	0,16	0,25	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	
Горячая штамповка																							
Точная горячая штамповка																							
Выдавливание																							
Вальцовка																							
Калибровка																							
Токарная обработка																							
Шлифование																							

Для получения высокопрочных деталей холодной объемной штамповкой перспективно применение боросодержащих сталей марок 06ХГР, 17Г2Р, 20Г2Р, 36ХГР, которые с успехом могут заменить среднеуглеродистые легированные стали 3ВХА, 40Х, 38ХГНМ, 40ХНГА, 40ХН2МА и др.

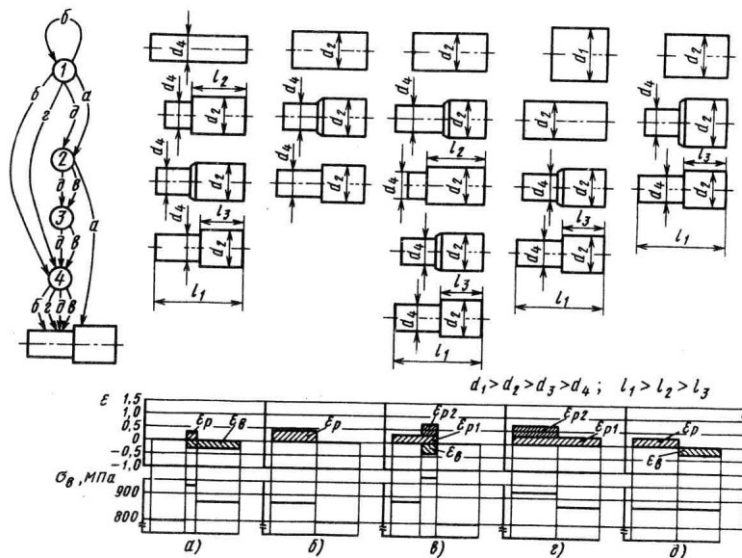


Рис. 24. Варианты построения переходов холодной объемной штамповки детали типа ступенчатый вал с учетом деформационного упрочнения металла: 1 — редуцирование; 2 — высадка; 3 — прямое выдавливание; 4 — калибровка головки; ε_p , E_b — логарифмическая деформация при редуцировании и высадке соответственно

Обладая более высокой деформируемостью даже в горячекатаном состоянии, боросодержащие стали после упрочняющей термообработки приобретают высокие механические свойства (табл.61). Значительное улучшение качества металла, а следовательно и служебных свойств деталей, формообразуемых горячей объемной штамповкой, достигается при реализации режимов термомеханической обработки. Характерным признаком таких режимов является использование теплоты отштампованных поковок для их закалки, которая производится непосредственно после горячего формоизменения в соответствующей данной марке стали охлаждающей среде. Закалка с температур конца штамповки приводит к наследованию элементами микроструктуры металла, высокой дисперсности, плотности дислокаций и благоприятной ориентации, которые возникают при горячем (полугорячем) деформировании в процессе формообразования.

Таблица 61

Механические свойства боросодержащей стали 20Г2Р (в числителе) и стали 40Х (в знаменателе)

Состояние	Твердость	$\sigma_{0,2}$	σ_b	б	φ	КСУ, МДж/м ²
		МПа		%		
После горячей прокатки	$\frac{170}{235}$ НВ	$\frac{350}{450}$	$\frac{540}{790}$	$\frac{30}{19}$	$\frac{70}{50}$	—
		$\frac{135}{170}$ НВ	$\frac{250}{330}$	$\frac{450}{590}$	$\frac{25}{18}$	
После сфероидизирующего отжига	$\frac{32}{32}$ HRC	$\frac{980}{960}$	$\frac{1150}{1100}$	$\frac{16}{13}$	$\frac{67}{60}$	1.8 1.2

Существует несколько разновидностей ТМО, в частности, низко- (НТМО) и высоко- (ВТМО) температурная термомеханическая обработка. Основой обоих видов ТМО является выбор такого режима формоизменения, который исключал бы возникновение и протекание рекристаллизации в процессе деформирования устойчивого аустенита и в технологических паузах. При НТМО такое условие достигается тем, что после аустенизации металл охлаждают до температуры ниже температуры начала рекристаллизации, но выше температуры начала мартенситного превращения, после чего осуществляют деформирование переохлажденного аустенита в области его устойчивого состояния.

При ВТМО температура деформирования лежит выше точки конца аустенизации, а отсутствие рекристаллизации обеспечивается снижением скорости деформирования до уровня, при котором разупрочнение энергетически более выгодно вести по механизму полигонизации, а не по механизму динамической рекристаллизации [44].

Кроме рассмотренных базовых видов ТМО известны и другие, являющиеся, как правило, их комбинацией.

Увеличение прочностных и пластических свойств металла после НТМО и ВТМО ухудшает его обрабатываемость резанием. Поэтому применение этих режимов при объемной штамповке целесообразно в сочетании с прецизионной штамповкой деталей, т.е. тогда, когда окончательное формообразование может быть завершено способами (шлифование и т.п.), не связанными с лезвийной обработкой.

Еще одно ограничение на практическое применение ВТМО связано с необходимостью индивидуального подбора для каждой детали скорости деформирования с учетом температуры и требуемых для формообразования степеней деформации.

Высокие скорости деформирования, характерные для кривошипных прессов, повышают вероятность протекания при горячем деформировании динамической рекристаллизации вместо динамической полигонизации. Поэтому прочностные свойства металла поковок, отштампован-

ных на этом типе оборудования в режиме термомеханической обработки, получаются несколько ниже, чем в типовом процессе ВТМО.

Необходимо отметить, что вследствие неоднородности температурно-скоростных условий при формообразовании реальных поковок в различных зонах разупрочнение при горячей штамповке может происходить по обоим механизмам (динамическая полигонизация, рекристаллизация), что приводит к неоднородности структуры и свойств по объему металла. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании переходов штамповки, в том числе и для рациональной дифференциации механических свойств по объему детали с учетом схемы эксплуатационных нагрузок.

Влияние различных сочетаний режимов штамповки и термообработки на конструктивную эффективность (показатель $\sigma_{0,2} E/\rho^2$, где E — модуль упругости; ρ — плотность стали ЗОХГСА) детали, характеризующую ее способность нести высокие нагрузки при наименьших деформациях и массе, приведено на рис. 25.

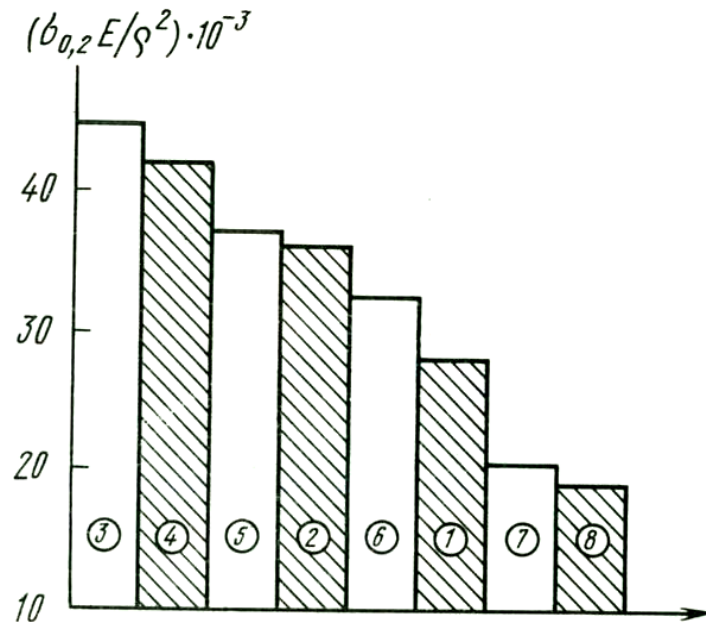


Рис. 25. Обобщенный показатель конструктивной прочности деталей из стали ЗОХГСА для различных вариантов термомеханической обработки: 1, 2...8 — режимы согласно табл. 4.57.

Из гистограммы следует, что выбор рационального термомеханического режима штамповки является эффективным средством повышения конструктивной прочности, которое следует учитывать при конструировании деталей. Практическая реализация возможностей объемной штамповки формировать высокопрочное состояние металла с целью облегчения деталей связана с решением проблемы обрабатываемости резанием поковок, имеющих высокую прочность и твердость. Эффективным направлением, устраняющим существование указанной проблемы, является дальнейшее повышение точности поковок до уровня, при котором окончательное формообразование детали может быть завершено без применения лезвийной обработки.

Радикальным средством повышения качества продукции при объемной штамповке может явиться широкое применение в практике кузнечно-штамповочного производства систем активного контроля и управления параметрами технологического процесса.

В новых моделях автоматов для ХОШ применяют управляющие микроЭВМ на основе микропроцессорного набора (комплекта) с сенсорными датчиками. Такая система обеспечивает контроль процессов формообразования штампуемых заготовок на всех рабочих позициях и позволяет наблюдать за работой механизмов и устройств автомата. С ее помощью контролируют подачу калиброванного материала, качество отрезки заготовки, износ и разрушение инструмента, работу механизма переноса заготовок, погрешность в позиционировании заготовок и др.

Наблюдение с помощью микропроцессов за операциями штамповки гарантирует не только качество отштампованных деталей, но и обеспечивает долговечность инструмента и оборудования.

Требуемую точность размеров поковок по высоте можно обеспечить, например, системой автоматического регулирования (СДР) закрытой высоты пресса, разработанной на базе вычислительного устройства 15ВСМ-5 (рис. 26). В САР измеренные параметры (масса заготовки, температура штампа, температура нагрева заготовки) сопоставляют с базовыми значениями и в случае различия определяют значение и знак коррекции закрытой высоты пресса, которую необходимо внести для поддержания точности поковок на требуемом уровне. Основой алгоритма управления являются качественные и количественные зависимости между контролируруемыми и управляемыми параметрами.

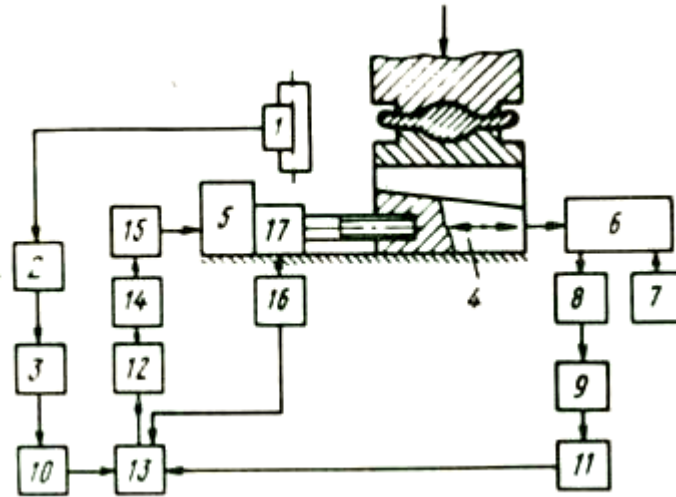


Рис. 26. Система автоматического регулирования закрытой высоты пресса

Указанные параметры измеряются датчиками 1, сигнал с которых усиливается усилителем 2 и преобразуется в двоично-десятичный код аналого-цифровым преобразователем 3. Закрытая высота изменяется перемещением клина 4 с помощью электропривода 5. Перемещение клиновидной плиты передается ползунку переменного резистора 6, на который подается стабилизированное напряжение от источника питания 7. Пропорциональное положению клиновидной плиты, а следовательно, и закрытой высоте, напряжение с резистора, усиленное усилителем 8, преобразуется аналого-цифровым преобразователем 9 в двоично-десятичный код. Интерфейс между ЭВМ и аналого-цифровыми преобразователями осуществлен с помощью преобразователей уровня 10 и 11. Информация в ЭВМ 12 вводится с помощью схемы ввода 13.

Вводимая информация о значениях параметров преобразуется в ЭВМ с помощью записанной зависимости закрытой высоты от параметров штамповки в информацию о закрытой высоте, которая сравнивается с данными о текущем значении закрытой высоты, поступающей с резистора 6. По обработанной информации ЭВМ вырабатывает команды «Стоп», «+», «-», «—», запоминаемые триггером 14. Эти команды с триггера поступают на схему управления электроприводом 15. Схема синхронизации 16 подключает с помощью электромагнитной муфты 17 электропривод 5 к кинематической цепи в промежутке времени между циклами штамповки.

Известны также системы управления процессами обработки металлов давлением, ориентированные на повышение и стабилизацию механических свойств деформируемого металла. В [8] приведены сведения о системе управления скоростью прессования профилей из алюминиевых сплавов на базе ЦВМ (М-6000) с обратной связью по температуре. Поддержание с помощью системы стабильной температуры профиля на выходе из формоизменяющей матрицы путем соответствующего изменения скорости прессования позволяет повысить производительность процесса и стабилизировать механические свойства профилей.

2.4. КАЧЕСТВО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Обеспечение оптимального качества сварных соединений зависит от комплекса показателей, главными из которых являются технологичность свариваемой конструкции, выбор материала, его свариваемость, применяемый способ сварки, соблюдение заданных параметров технологии, вероятности появления дефектов, а также возможность применения достоверных методов контроля.

2.4.1. Технологичность сварной конструкции

Технологичность сварной конструкции обеспечивается оптимальным выбором исходных элементов, типов сварных соединений и форм подгонки кромок, позволяющих обеспечить простоту изготовления изделия при максимальной степени автоматизации и механизации сборочно-сварочных операций.

В качестве исходных элементов сварной конструкции рекомендуется применять помимо стандартных прокатных профилей (листов, труб, фасонных профилей, уголков, швеллеров) гнутые профили, литые, штампованные и кованные элементы (рис. 27). Их применение снижает трудоемкость изготовления, массу изделия и способствует повышению надежности конструкции, позволяя располагать сварные швы в наименее нагруженных ее частях. Применяя гнутые профили, следует избегать наложения швов на пластически деформированные зоны заготовок.

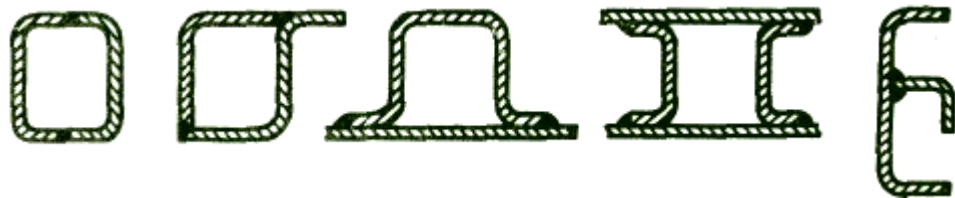


Рис. 27. Жесткие сварные элементы из гнутых профилей

Основные типы сварных соединений (стыковые, внахлестку, тавровые, угловые и прорезные) выбирают исходя из конструктивных соображений и условий эксплуатации конструкции (табл.62). Наиболее распространенными являются стыковые соединения, так как они обеспечивают высокую прочность при статических и динамических нагрузках. Однако в этом случае для получения швов высокого качества требуется большая точность при сборке, особенно листовых конструкций малой толщины. Зазор между свариваемыми элементами в этих случаях не должен превышать десятых долей миллиметра. Сварку соединений рекомендуется проводить на медных подкладках или на флюсовых подушках, обеспечивающих при полном проваре формирование обратной стороны шва.

Соединение внахлестку так же, как и стыковое, применяют для конструкций листового или стержневого типа. Оно не предъявляет высоких требований к сборке, однако не рекомендуется для конструкций, работающих в условиях динамических нагрузок. Возникающий при этом изгибающий момент приводит к существенному снижению усталостной прочности. Разновидностью нахлесточных соединений являются прорезные, выполняемые либо по прорези в верхнем листе, либо с полным проплавлением его с поверхности.

Тавровые соединения так же, как и угловые, применяют для изготовления пространственных конструкций. При сварке двумя швами с обеих сторон они могут воспринимать существенные изгибающие моменты в поперечном сечении. Тавровых соединений с одним швом следует избегать. При сварке элементов большой толщины необходимо подготавливать кромки. Форма подготовки зависит от толщины свариваемых заготовок и типа сварного соединения. В табл. 62 приведены наиболее характерные виды подготовки кромок для стыковых, тавровых и угловых соединений в зависимости от толщины свариваемых элементов.

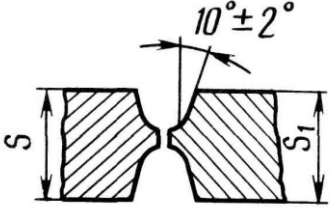
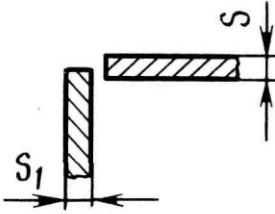
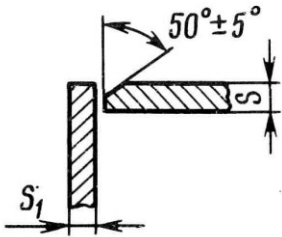
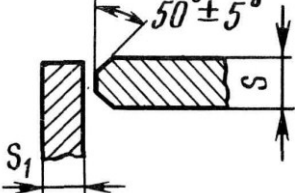
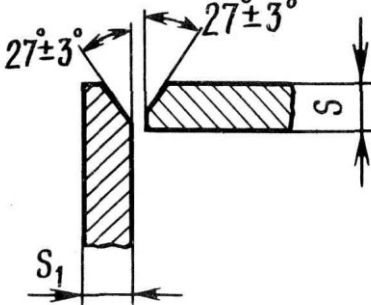
Таблица 62

Типы сварных соединений		
Вид соединения	S, мм	Эскиз
1	2	3
Стыковые соединения		

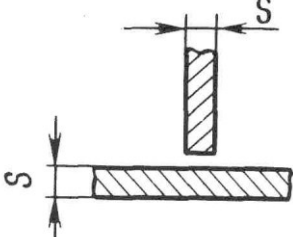
С отбортовкой двух кромок	1—3	
Без скоса кромок	1—6	
Со скосом одной кромки	4—26	
С двумя симметричными скосами одной кромки	12—60	
Со скосом двух кромок	8—50	
Со скосом двух кромок	3—50	

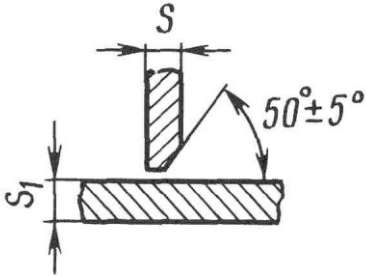
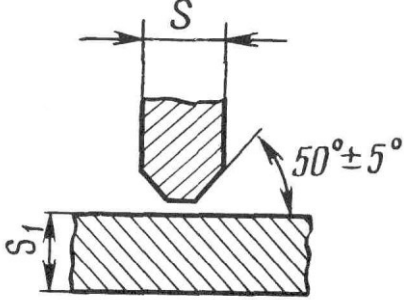
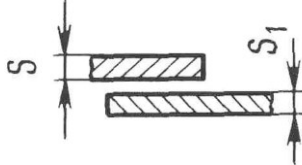
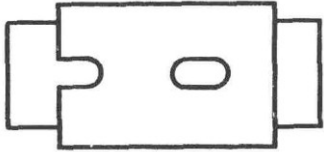
Продолжение табл. 62

1	2	3
С криволинейным скосом двух кромок	15—100	
С двумя симметричными скосами кромок	12—60	

С двумя симметричными криволинейными скосами двух кромок	30—100	
Угловые соединения		
Без скоса кромок	1—6	
Со скосом одной кромки	4—26	
С двумя скосами одной кромки	12—60	
Со скосом двух кромок	12—50	

Окончание табл. 62

1	2	3
Тавровые соединения		
Без скоса кромок	2—20	

Со скосом одной кромки	4—30	
С двумя скосами одной кромки	12—60	
Соединения внахлестку		
Без скоса кромок	2—60	
С удлиненным отверстием	2—60	

При сварке встык элементов различной толщины (рис. 28) наибольшая допустимая разность ($S_1 - S_2$) ГОСТ 5264-80 зависит от толщины S тонкого элемента:

S , мм...	До 3	4—8	9—11	12—25	25
$S_1 - S$, мм...	0,7	1,64	5		7

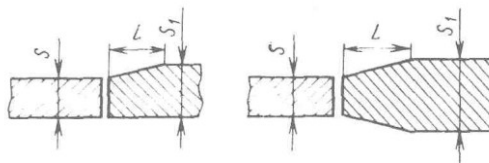


Рис. 28. Подготовка кромок при сварке элементов различной толщины

При разности толщины, превышающей указанные пределы, на толстом элементе должен быть сделан пологий скос с одной или обеих сторон длиной $L = 5(S_1 - S)$ при одностороннем скосе и $L = 2,5(S_1 - S)$ при двустороннем.

При сборке допускаются смещения свариваемых кромок в зависимости от толщины свариваемых элементов: 0,5 мм — для $S \leq 4$ мм; 1,0 мм — для $S = 4 \dots 10$ мм; 0,15 для $S > 10$ мм. Для обеспечения технологичности конструкции большое значение имеет пространственное положение швов в процессе их сварки (рис. 29).

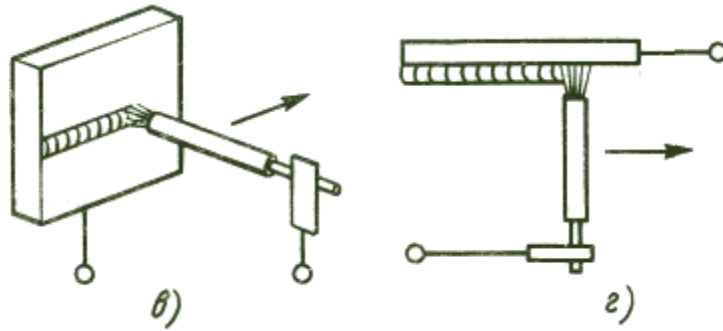


Рис. 29. Пространственные положения швов:

a — нижнее; *b* — вертикальное; *c* — горизонтальное; *d* — потолочное

При равных условиях при сварке в нижнем положении можно получить качественные швы с большей производительностью, меньшей вероятностью дефектов. При этом обеспечивается устойчивость процесса, хорошее формирование шва, стабильность качества. Для обеспечения сварки в нижнем положении транспортабельную конструкцию кантуют, применяя специальные установки. Сварку конструкций в положениях, отличных от нижнего, должен выполнять сварщик высокой квалификации. При этом режимы сварки выбирают таким образом, чтобы исключить вытекание расплавленного металла из ванны. Для обеспечения качества сварного изделия необходимо предусматривать конструктивные элементы, уменьшающие его деформацию в процессе сварки, а также возможность осуществления технологических мероприятий с целью уменьшения напряжения в сварных соединениях.

В общем случае, сварные швы непосредственно после сварки находятся под действием растягивающих напряжений, в то время, как прилегающая к ним зона находится в сжатом состоянии. Фазовые превращения, проходящие с увеличением объема, например, в сталях превращения $F_{ey} > F_{ca}$, приводят к некоторому снижению уровня напряжений. Учитывая, что поле напряжений в конструкции после сварки всегда остается взаимоуравновешенным, любая механическая обработка, связанная со снятием металла шва или околошовной зоны, может привести к заметному изменению формы конструкции.

Во избежание этого перед механической обработкой в конструкции целесообразно снизить уровень сварочных напряжений, подвергнув ее высокотемпературной термообработке.

Сварочные деформации и вызванные ими напряжения, являющиеся следствием неравномерного нагрева при сварке, приводят к перемещениям элементов конструкции, искажают ее форму и размеры. Различают следующие виды перемещений и деформаций в зоне сварных соединений (рис. 30).

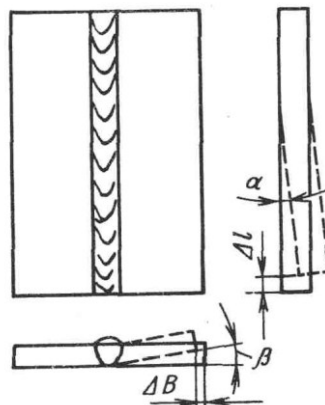


Рис. 30. Перемещения в сварных соединениях

1 Продольные остаточные пластические деформации, создающие усадочную силу $P_{УС}$ и приводящие к продольному укорочению Δl зоны сварного соединения и изгибу α конструкции в случае неравномерного по толщине сечения шва.

2. Поперечные перемещения ΔB и угловые перемещения β в случае неравномерного по толщине сечения шва.

Примеры искажения формы конструкции в процессе сварки приведены на рис. 31.

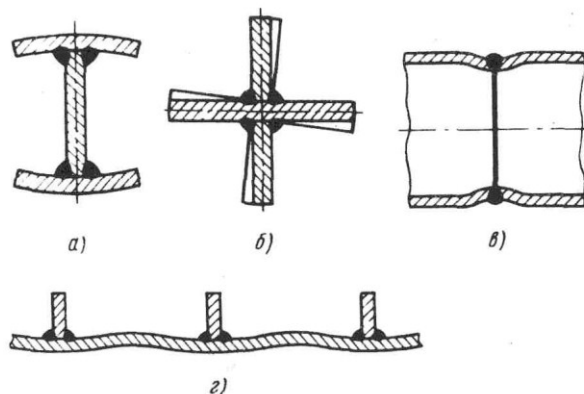


Рис. 31 Искажения формы конструкций при сварке:

а — изгиб полок двутавра; б — закручивание; в — утяжка кольцевого шва обечайки; г — искривление оси

Перемещения в сварных конструкциях можно существенно уменьшить или полностью исключить не только конструктивными мероприятиями, сводящимися в основном к увеличению жесткости конструкции, но и технологическими способами. Наиболее распространенными из них являются выбор последовательности наложения швов, симметричное расположение швов или применение двусторонней подготовки кромок, сборка с предварительным перед сваркой обратным изгибом, использование гофрированных элементов, применение для сварки высококонцентрированных источников нагрева.

Для снятия сварочных напряжений следует применять термическую обработку (отжиг) либо способы, связанные с пластическим деформированием сварных швов (прокатку, ковку), которые одновременно могут уменьшить и перемещения.

Для исправления формы конструкции после сварки применяют механическую правку или правку нагревом с целью вызвать перемещения обратного знака. Эти способы, как правило, приводят к увеличению напряжений в конструкциях.

Качество сварных соединений во многом зависит от точности изготовления заготовок под сварку и качества их сборки, обеспечивающего требуемые размеры конструкции, постоянство зазоров по всей длине швов. Для сборки и сварки следует применять стандартные сборочно-сварочные приспособления, позволяющие исключить трудоемкие операции по установке и фиксированию деталей при сборке, исключить разметку, обеспечить проведение сварки в удобном положении путем поворота изделия в пространстве. В результате применения специальной оснастки появляется возможность использования менее квалифицированных операторов при обеспечении высокого качества сварных соединений.

2.4.2. Свариваемость

Свариваемость — технологическое свойство однородных или разнородных материалов образовывать соединения с помощью тех или иных способов сварки, отвечающие заданным конструктивным или эксплуатационным требованиям. Чаще всего эти требования близки или полностью соответствуют прочностным и эксплуатационным свойствам свариваемых материалов. Свариваемость материалов — это комплексная характеристика, зависящая в первую очередь от природы материала, его физических и химических свойств, от способа сварки, технологии и режимов. Она тем выше, чем большее количество способов сварки обеспечивает заданный уровень свойств, шире область параметров режимов, проще технология.

Свариваемость определяется прочностными и пластическими характеристиками сварного шва и зоны термического влияния, степенью их соответствия свариваемому материалу, склонностью к образованию горячих и холодных трещин, пор, наличием в шве неметаллических включений.

К факторам, наиболее сильно влияющим на свариваемость, относятся:

Химический состав материала, определяющий температурные интервалы кристаллизации, фазовых и структурных превращений и активность взаимодействия с окружающей средой во всем интервале температур сварочного цикла нагрева и охлаждения;

теплофизические свойства, определяющие степень развития термомодеформационных процессов, характер и скорость протекания фазовых превращений в зависимости от температуры и скорости нагрева и охлаждения при сварочных циклах, характерных для выбранного способа;

механические свойства, определяющие способность сварного соединения выдерживать эксплуатационные нагрузки;

физико-химические свойства при высоких температурах, определяющие характер металлургических процессов в сварочной ванне и фазовые превращения;

уровень и характер внутренних напряжений, вызванных неравномерностью нагрева.

2.4.3. Строение сварного соединения

Сварное соединение, полученное сваркой плавлением можно разделить на несколько зон (рис.32), отличающихся распределением химических элементов и примесей, макро- и микро-структурой. Степень этого отличия зависит как от свойств свариваемого материала, так и от характера теплового воздействия на него при сварке. Кривая $T=(y)$ характеризует область максимальных температур, T_l — температура ликвидуса сплава; T_c — температура солидуса сплава.

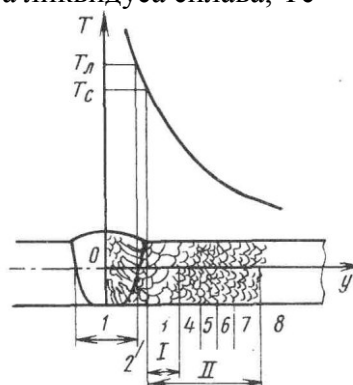


Рис. 32. Строение (зоны) сварного соединения: 1 — зона сварного шва; 2 — зона полуоплавленных зерен; 3 — зона перегрева; 4 — зона полной перекристаллизации; 5 — зона частичной перекристаллизации; 6 — зона высокотемпературного отпуска; 7 — зона низкотемпературного отпуска; 8 — зона основного металла (углеродистая сталь); I — околосшовная зона; II — зона термического влияния

Сварной шов характеризуется литой макроструктурой металла. Обычно это дендритная структура, направленная к центру. В средней части шва может появляться участок равноосных дезориентированных зерен. Поскольку в зоне сварного шва металл нагревается до температуры выше ликвидуса, то в нем получают интенсивное развитие химические и металлургические процессы между расплавленным основным металлом и шлаками, присадочным материалом, окружающей средой или защитными газами. Шов обладает выраженной химической неоднородностью — зональной, межзеренной, внутризеренной. Структура различных зон шва, размеры и форма дендритов, их направленность, степень химической неоднородности зависит от режима сварки и свойств основного материала.

В металлах, не претерпевающих фазовых превращений, структура, образовавшаяся в процессе кристаллизации (первичная структура), остается неизменной после полного охлаждения. Структура металлов, имеющих фазовые превращения, претерпевает существенные изменения. Соответственно с ними изменяются и свойства шва. Однако и при этом влияние образовавшейся при кристаллизации первичной структуры остается заметным.

Зоной термического влияния (ЗТВ) называют участок основного металла, примыкающий к сварному шву, в котором нагрев вызывает структурные или фазовые превращения. Непосредственно к металлу шва примыкает узкая зона 2 полуоплавленных зерен основного металла, нагретого при сварке до температуры солидуса, т.е. находящаяся в твердожидком состоянии. В этой зоне наблюдается существенное изменение химического состава, особенно по границам зерен. Химический состав зависит от применяемых присадочных материалов, электродных покрытий и флюсов, интенсивности протекания процессов.

Зона фазовых превращений начинается с участка 3 перегрева, непосредственно примыкающего к полуоплавленным зернам. Она характеризуется крупнозернистым строением и химической неоднородностью.

Ширина зон оплавления и перегрева зависит от режима сварки. Чем жестче режим (большие скорости нагрева и охлаждения), тем меньше протяженность зон оплавления и перегрева. Зона оплавления и участок перегрева — это места наиболее вероятного образования трещин. Далее следует зона 4 полной перекристаллизации, характеризующаяся мелкозернистым строением, затем — зоны частичной перекристаллизации 5, высокотемпературного 6 и низкотемпературного 7 отпуска. На участках сварного соединения, нагреваемых до температур фазовых превращений, после сварки могут образовываться закалочные структуры. Это приводит к снижению пластических свойств металла и при неблагоприятных условиях (жесткая конструкция, сложная схема напряженного состояния, сварка во влажной окружающей среде и т.п.) к образованию хрупких разрушений как в процессе сварки и охлаждения (холодные трещины), так и в процессе эксплуатации. При этом значительно затрудняется дальнейшая обрабатываемость.

2.4.4. Характерные дефекты, снижающие свариваемость материалов

Горячие трещины (ГТ), образующиеся при сварке, представляют собой хрупкие межкристаллические разрушения в шве и в околошовной зоне (зоны неполного расплавления и перегрева), возникающие в процессе кристаллизации. Горячие трещины образуются в температурном интервале хрупкости, расположенном вблизи солидуса сплава. Пластические свойства сплавов в этом интервале температур могут быть настолько малы (доли процента), что деформации, вызванные усадкой при кристаллизации и охлаждении, а также короблением конструкции в результате неравномерного нагрева, приводят к их исчерпанию. Схема расположения ГТ приведена на рис. 33.

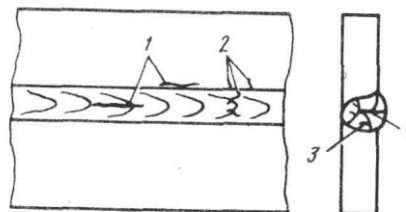


Рис. 33. Расположение горячих трещин в сварном соединении:

1 — продольные в шве и околошовной зоне; 2 — поперечные, выходящие на поверхность; 3 — внутренние при многослойной сварке и в переходной зоне

На склонность к образованию ГТ существенное отрицательное влияние оказывает химический состав металла шва, в особенности содержание таких элементов, как углерод, сера, фосфор. Для уменьшения вероятности образования ГТ рекомендуется нежесткие конструкции сваривать в закрепляющих кондукторах в целях снижения коробления, увеличивать жесткость введением прихваточных швов, ребер жесткости и т.п. При сварке жестких конструкций рекомендуется устранять закрепления, собирать конструкции с предварительным натягом, сжимающим свариваемые кромки, предварительно подогревать свариваемые детали, применять режимы сварки, уменьшающие деформации в температурном интервале хрупкости. Существенное влияние оказывает схема кристаллизации в шве. Режимы, обеспечивающие образование в центре шва зону, равновесных кристаллитов, являются предпочтительными.

При сварке применяют специально разработанные методы определения сопротивляемости материалов образованию трещин при сварке, позволяющие получить количественные или качественные оценки. Горячие трещины — дефект, недопустимый в сварных соединениях.

Холодные трещины (ХТ) представляют собой локальное хрупкое разрушение металла сварных соединений, которое образуется при сварке материалов, претерпевающих фазовые превращения. ХТ характерны для соединения деталей из углеродистых и легированных сталей, подверженных при сварке частичной или полной закалке. Они образуются в том случае, если уровень собственных напряжений в сварном соединении в результате фазовых превращений,

концентрации диффузионно-подвижного водорода и растягивающих напряжений первого рода превысит предел прочности.

Холодные трещины образуются в процессе или после окончания фазовых превращений, иногда через несколько суток после сварки и носят межкристаллический характер. На рис. 34 показаны характерные места расположения холодных трещин в сварном соединении. Ниже перечислены способы предотвращения образования холодных трещин при сварке, связанные со снижением воздействия вызывающих их причин:

применение режимов, обеспечивающих получение пластичных структур; медленное охлаждение после сварки, предварительный или последующий нагрев;

последующая термообработка, проводимая непосредственно после сварки;

применение для сварки материалов, образующих металл шва, с более низкими, чем основной, температурами кристаллизации и превращения аустенита;

устранение из окружающей среды источников, насыщающих сварное соединение водородом (очистка свариваемых кромок, предварительная прокалка сварочных электродов, флюсов, сварка в сухой окружающей среде);

уменьшение жесткости сварных конструкций.

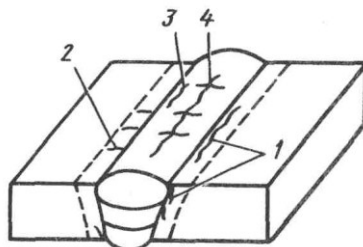


Рис. 34. Характерные места расположения холодных трещин в сварном соединении:

1 — продольные трещины в основном металле («подколы»); 2 — поперечные трещины в основном металле («частокол»); 3, 4 — соответственно продольные и поперечные трещины в металле шва

На рис. 34 указаны характерные места расположения холодных трещин. Методы оценки сопротивляемости сталей образованию холодных трещин подразделяют на прямые и косвенные. Прямые методы испытания связаны с проведением сварки опытных технологических проб, имитирующих жесткое сварное соединение, или с проведением испытаний основного металла с имитацией сварочного термомеханического цикла. Косвенные методы основаны на расчетах склонности стали к образованию трещин по химическому составу, подсчетом эквивалентного содержания углерода или проведении более сложных расчетов, учитывающих химический состав и жесткость соединения. Полученные данные сопоставляют с критическими значениями. Наибольшее распространение получила оценка по определению эквивалентного содержания углерода:

$$C_{\text{экв}} = C + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Ni}/10 + \text{Cu}/5 + \text{mo}/4 + \text{V}/14,$$

где — в числителе содержание соответствующего компонента, %.

Стали с $C_{\text{экв}} \leq 0,45$ не склонны к холодным трещинам при сварке; если $C_{\text{экв}}$ существенно выше 0,45, рекомендуется проводить сварку с предварительным подогревом. При наличии холодных трещин в сварных соединениях конструкцию бракуют.

Порами называют заполненные газом полости в швах, имеющие округлую, вытянутую и другие формы. Основной причиной появления пор является способность расплавленного металла растворять большое количество газов (водорода, азота и окиси углерода). При кристаллизации и охлаждении шва растворимость их в металле резко уменьшается; пузырьки выделившегося газа не успевают всплыть к поверхности и остаются в металле.

Поры оксида углерода возникают при недостаточной раскисленности металла сварочной ванны. Растворенные в металле углерод и кислород при высокой температуре в сварочной ванне вступают во взаимодействие, образуя CO. Водород поступает в сварочную ванну из корродированных поверхностей, влаги, краски и других загрязнений, находящихся на кромках металла, на сварочной проволоке, в не прокаленных покрытиях электродов, флюсе, во влажной

окружающей среде. Азот поступает в зону сварки из окружающей среды и из сварочных материалов.

При сварке в защитных газах неправильно выбранный режим может также привести к образованию пор. Газовые поры, расположенные цепочкой, снижают несущую способность конструкции и, кроме того, могут привести к потере плотности сварных швов. Отдельно расположенные газовые поры небольшого размера в большинстве конструкций допускаются.

Неметаллические включения существенно влияют на качество сварного соединения. Оксидные включения в виде FeO, SiO₂, MnO, Al₂O₃ и др. в шве могут находиться в виде округлых прозрачных включений размерами до 0,02 мм или в виде силикатных пленок. Они снижают ударную вязкость и хладостойкость шва в деталях из углеродистых и низколегированных сталей. В швах с аустенитной структурой силикатные пленки уменьшают пластичность металла шва при работе его на растяжение и изгиб, не снижая ударной вязкости.

Сульфидные включения FeS, MnS, встречающиеся в сварных швах деталей из сталей с содержанием серы больше 0,02%, имеют неправильную форму и расположены в возрастающем количестве от края к центру шва. Сульфидные включения, являясь легкоплавкими соединениями, способствуют образованию горячих трещин.

Фосфорсодержащие включения наиболее характерны для аустенитных сталей. Низкая растворимость фосфора в аустените приводит к образованию в швах фосфидов, фосфидных эвтектик и фосфатов, имеющих низкую температуру плавления и расположенных по границам зерен. Они снижают температурные характеристики металла шва, ухудшают механические свойства при нормальных и низких температурах, а также способствуют образованию горячих трещин. Для легированных сталей вредное влияние фосфора объясняется тем, что места расположения фосфидных и сульфидных эвтектик совпадают, что увеличивает вероятность образования трещин.

По степени свариваемости материалы подразделяют на удовлетворительно, ограниченно и плохо свариваемые. Удовлетворительно свариваемые материалы обеспечивают получение качественных сварных соединений практически всеми способами сварки без применения специальных приемов, при условии соблюдения правильно назначенного режима. Материалы ограниченно свариваемые могут образовывать качественные соединения при применении отдельных способов сварки и специальных технологических мероприятий. Плохую свариваемость имеют материалы, которые могут образовывать соединения существенно более низких свойств, чем основной металл, даже при применении сложных технологических мероприятий и специальных способах сварки.

2.4.5. Процессы сварки, обеспечивающие качество соединений

По состоянию материала в момент образования сварного соединения все способы сварки могут быть отнесены к сварке плавлением или сварке в твердом состоянии.

При сварке плавлением и пайке сближение атомов на расстояния, при которых действуют силы взаимодействия, осуществляется вследствие смачивания поверхностей жидким металлом, а активация поверхности твердого металла обеспечивается сообщением ей тепловой энергии. При затвердевании адгезионные связи заменяются химическими в соответствии с типом образующейся при кристаллизации решетки. Нагрев, кристаллизация и последующее охлаждение сопровождаются диффузионными процессами, приводящими к перераспределению примесей, а также образованием химических соединений между компонентами свариваемого материала.

При сварке в твердом состоянии сближение свариваемых поверхностей, разрушение оксидных поверхностных пленок и плотный контакт достигаются в результате совместного пластического деформирования в месте соединения. Для ускорения протекания этих процессов при сварке малопластичных материалов с большим сопротивлением пластическому деформированию применяют сопутствующий подогрев. Процесс соединения в твердом состоянии проходит в три стадии: схватывание, т.е. образование металлической связи между частицами двух соединяемых поверхностей, возникновение химических связей и протекание процессов диффузии, рекристаллизационные процессы в стыке.

Процесс соединения твердых поверхностей с помощью расплава (припоя) называют пайкой. Пайку выполняют с использованием тех же, что и при сварке, энергетических воздействий. Для нее характерны те же процессы, что и для сварки.

По агрегатному состоянию металла в месте соединения при сварке все способы могут быть разделены на сварку плавлением (дуговые способы, газовая сварка, электрошлаковая, плазменная и электронно-лучевая, лазерная и др.) и сварку давлением (контактные электрические способы, диффузионная сварка трением, холодная, ультразвуковая, взрывом и др.).

Дуговые способы сварки. Ручная дуговая сварка (РДС) — один из самых универсальных и широко применяемых сварочных процессов (рис.4.35, а). Электрическая дуга, образующаяся между электродом и заготовкой, обладая высокой температурой (в столбе дуги 6000 К, на электроде и поверхности ванны 2500 К), расплавляет металл заготовки и электрода.

Электродное покрытие, расплавляясь, образует газовую и шлаковую защиту металла сварного соединения от воздействия окружающей среды и обеспечивает протекание металлургических процессов (раскисление и легирование) в сварочной ванне. Подача электрода в дугу по мере его расплавления и перемещение вдоль шва производят вручную. В качестве источника тока применяют сварочные трансформаторы или выпрямители со специальными внешними падающими характеристиками.

Параметры режима сварки (сила тока $I_{св}$, диаметр электрода $d_э$, скорость сварки $V_{св}$) выбирают в соответствии с толщиной S свариваемой заготовки:

S , мм	1—2	3—5	4—10	12—24	30—60
$d_э$, мм	2—3	3—4	4—5	5—6	5—8

Для электродов диаметром 3—6 мм сила тока, А, выбирается по формуле:

$$I_{св} = (20 + 6d_э)d_э.$$

Сварочные электроды подразделяют на типы и марки. Тип электрода обозначают буквой Э и цифрой, указывающей предел прочности наплавленного металла: Э-42, Э-55. Марки электрода отличаются по химическому составу металлических стержней и покрытия.

РДС можно использовать в труднодоступных местах, на монтаже во всех пространственных положениях. Сварку швов на вертикальной плоскости и в потолочном положении выполняют электродами диаметром не более 4 мм. При этом силу тока следует уменьшать на 20%.

РДС можно применять при сварке деталей из углеродистых и легированных сталей, цветных металлов и сплавов. При автоматической дуговой сварке под флюсом (АДФ) дуговой промежутки и металл шва защищены слоем шлака и порошкообразного флюса (рис. 35,б).

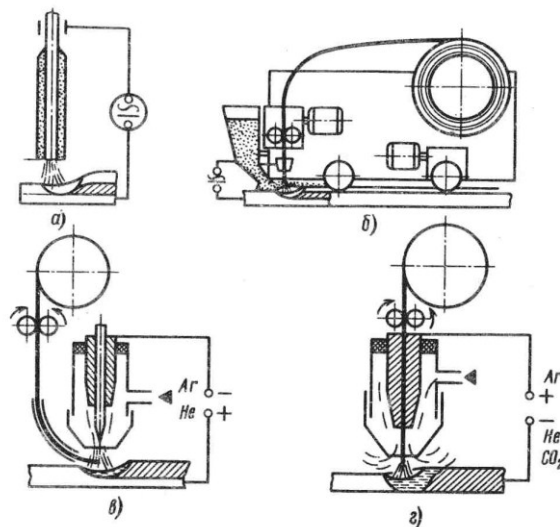


Рис. 35. Дуговая сварка: а — ручная; б — автоматическая под флюсом; в — в защитных газах неплавящимся электродом; г — в защитных газах плавящимся электродом

В качестве электрода применяют сварочную проволоку, по составу близкую к металлу свариваемых заготовок. Подача проволоки в дугу и перемещение ее вдоль шва осуществляются автоматически. Дуга находится в заполненном парами и газами пузыре, ограниченном снизу

сварочной ванны, сверху — жидким шлаком. Газы и пары образуются при плавлении металла и флюса и участвуют в формировании структуры и свойств шва. Газовый пузырь хорошо изолирует сварочную ванну от контакта с окружающей средой, но не устраняет возможность попадания в нее азота, водорода и кислорода из проволоки, флюса и основного металла.

Химический состав металла шва может формироваться не только составом основного и присадочного материала, но и специальными добавками, вводимыми в хвостовую часть ванны в виде порошка, металлической крупки, дополнительной присадочной проволоки.

АДФ по сравнению с РДС обеспечивает большую производительность в связи с возможностью увеличить силу тока, лучшую защиту металла шва от окружающей среды, более равномерное качество, ее может производить менее квалифицированный оператор.

Диапазон режимов АДФ очень широк, что позволяет использовать одну установку для сварки заготовок различных толщин и из различных материалов:

Диаметр проволоки, мм.....	1—6
Вылет электрода, мм.....	12—80
Сила тока, А.....	100—2000
Напряжение, В.....	18—55
Скорость сварки, м/ч.....	5—105
Количество наплавленного металла, кг/ч.....	1—20

АДФ целесообразно применять для сварки длинных заготовок определенной 101 далее 101 и 101ческой конфигурации, цилиндрических заготовок. Сваривают заготовки толщиной от 2 до 100 мм из стали, меди, титана, алюминия и сплавов на их основе. Для сварки применяют сварочную проволоку стальную (ГОСТ 2246—70), алюминиевую (ГОСТ 7871—75) и на медной основе (ГОСТ 16130—85).

Недостатком, существенно ограничивающим область применения АДФ, является возможность проведения сварки только в нижнем положении.

АДФ так же, как и РДС часто используют для восстановления изношенных поверхностей машиностроительных деталей путем наплавки слоев металла соответствующего состава с использованием специальной наплавочной проволоки (ГОСТ 10543—82), а также холоднокатаных лент из коррозионно- или жаростойкой стали (ГОСТ 4986—79).

При дуговой сварке в защитных газах (рис. 35, в, г) неплавящимся вольфрамовым электродом без присадки или с присадкой, а также плавящимся электродом создается локальная защита плавильного пространства инертными, активными (CO_2) газами либо их смесью, истекающей из сопла специальной горелки. Сварку неплавящимся электродом применяют для соединения заготовок небольших толщин (до 2 мм) без присадочного материала, а заготовок толщиной до 6 мм — с присадкой. Состав присадки должен соответствовать основному металлу. В качестве защитного газа в этом случае применяют аргон или гелий.

Для сварки заготовок толщиной свыше 4 мм целесообразно применять плавящийся электрод. В этом случае в качестве защитного газа используют также CO_2 и применяют специальную проволоку с увеличенным содержанием Si и Mn. Применение при относительно малых диаметрах электродов большой силы тока позволяет резко увеличить проплавливающую способность дуги и поднять производительность.

Сварку в защитных газах осуществляют во всех пространственных положениях вручную, полуавтоматически (подача электрода автоматическая, перемещение вручную) и автоматически.

Разновидностью этого способа является сварка в контролируемой среде (атмосфере). Заготовки помещают в специальные камеры, которые вакуумируют и затем заполняют инертным газом. Сварку выполняют вручную или автоматами с дистанционным управлением.

Сварку в инертных газах рекомендуется применять для заготовок из цветных металлов и сплавов, аустенитных, высокопрочных и жаростойких металлов, а также тугоплавких и активных материалов.

Для сваривания конструкций с элементами толщиной свыше 25 мм и с протяженными швами широко применяют *электрошлаковую сварку* (ЭШС) (рис. 36). Сущность ее заключается

в том, что тепловую энергию, необходимую для расплавления основного и присадочного металлов, дает теплота, выделяемая в объеме шлаковой ванны при прохождении через нее тока. Свариваемые заготовки устанавливают в вертикальном положении, снизу к ним приваривают вводную планку 2, а сверху — выводные планки 3. С двух сторон подводят водоохлаждаемые медные ползуны 4. Затем на вводную планку насыпают флюс, подводят электрод 7 и зажигают дугу. Электрод 7 подают специальным механизмом подачи 6. В результате расплавления флюса образуется шлаковая ванна 5. После достижения определенной высоты шлаковой ванны дуга вследствие шунтирования тока гаснет, а проходящий ток нагревает ее до температуры, превосходящей температуру плавления основного и присадочного металлов.

В результате металл электрода и кромки основного металла оплавляются и расплав стекает на дно, образуя сварочную ванну 8. Металл электрода, проходя через шлак, раскисляется и легируется. Благодаря относительно малой скорости затвердевания происходит более полное удаление газовых пузырей, шлака и других примесей, чем при сварке под флюсом. Практически заготовки любой толщины могут быть сварены за один рабочий ход. Сварной шов в основном формируется из присадочного металла, поэтому при сварке заготовок большой толщины процесс ведут не одним, а сразу двумя или тремя электродами, кроме того, в сварочную ванну дополнительно вводят стальную крупку или рубленую проволоку.

Электрошлаковая сварка является высокопроизводительным легкоавтоматизируемым процессом, ее применяют преимущественно при сваривании заготовок из стали, чугуна, меди, алюминия, титана. Недостатком способа является сильный перегрев околошовной зоны, рост зерна, снижение пластических свойств.

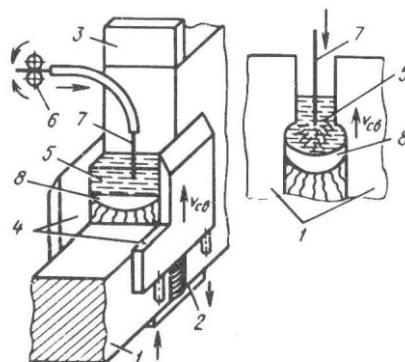


Рис. 36. Электрошлаковая сварка

Разновидность электрошлакового процесса — электрошлаковая наплавка достаточно толстых слоев на плоскую заготовку с целью получения плакированного проката.

При плазменной сварке в качестве источника нагрева используют сжатую дугу (плазму) или поток газов, пропускаемый через столб электрической дуги (рис. 37). В плазмотроне электрическую дугу возбуждают в узком канале с охлаждаемыми стенками; через канал подают плазмообразующий газ — Ar, He, N₂, Co₂ и их смеси. Обжатие наружной поверхности дуги вызывает повышение ее температуры до 10000—20000 К. Направляя такой источник теплоты на материал, производят сварку термообработку, напыление, наплавку, резку. Для сварки применяют плазмтроны прямого действия, в которых дуга возбуждается между заготовкой и электродом / и косвенного, в которых дуга находится в плазмтроне между электродом / и охлаждаемым соплом 3, а плазменная струя 2 выдувается потоком газа из сопла. В последнем случае появляется возможность обработки заготовок из неэлектропроводных материалов, например, керамик. Сварка плазменной дугой характеризуется глубоким проплавлением основного металла. Состав плазмообразующего газа оказывает влияние на глубину проплавления. Добавление к аргону небольшого количества водорода (до 7%) дает оптимальные результаты. Этим пользуются при сварке заготовок из легированной стали, меди, никеля и сплавов на их основе. При сварке заготовок из титана, ниобия, циркония водород не добавляют.

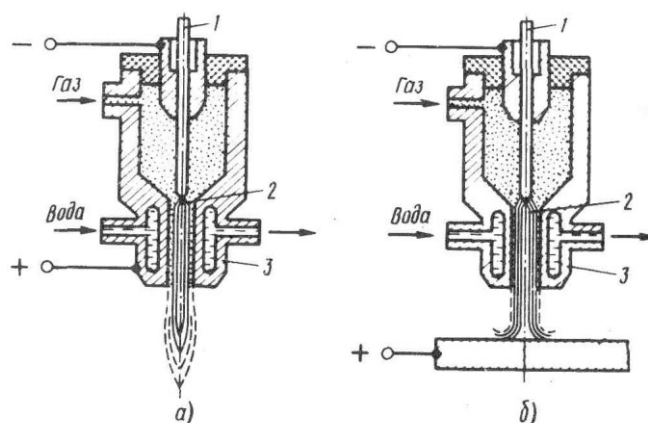


Рис. 37. Плазменная сварка: *а* — плазматрон косвенного действия; *б* — плазматрон прямого действия.

Плазменной сваркой сваривают заготовки толщиной до 9 мм встык без разделки кромок и применения присадочного металла. При сварке заготовок большой толщины (до 25 мм) применяют V- или U-образную разделку кромок, причем глубина и угол разделки меньше, чем при дуговых способах сварки. Плазменную сварку можно выполнять в любых пространственных положениях. В радиоэлектронике и приборостроении широко применяют сварку микроплазменной дугой. Горелки специальной конструкции позволяют получать устойчивые дуги при силе тока от 0,1 до 10 А, что позволяет сваривать листы толщиной 0,025—0,8 мм из углеродистой и коррозионно-стойкой стали, меди, инконеля, хастеллоя, ковара, титана, тантала, молибдена, вольфрама и других материалов.

Применение плазменной струи для сварки металлов ограничено вследствие относительно малой доли энергии, вводимой в обрабатываемый металл. Эту разновидность способа чаще используют для нанесения на поверхность изделия металлических покрытий, обладающих специальными свойствами. Для этого в плазменную струю вводят напыляемый материал. Под действием плазменной струи он расплавляется и в виде распыленных мелких частичек наносится на предварительно подготовленную обрабатываемую поверхность, покрывая ее относительно ровным слоем. При правильно подобранном режиме образуется прочное сцепление с поверхностью заготовки.

При газовой сварке в качестве источника теплоты используют пламя, образующееся при сгорании горючего газа (ацетилен, водорода, природного газа, пропана, паров бензина) в кислороде. Ацетилено-кислородное пламя имеет самую высокую температуру (3200°C) и может быть использовано как для сварки, так и для других целей (напыления, наплавки, кислородной резки). Пламя с использованием других газов чаще используют для резки металлов.

Газовое пламя — один из наименее сосредоточенных источников нагрева. При его использовании образуется широкий шов и обширная зона термического влияния. Его рекомендуется применять для сварки заготовок из сталей и сплавов из цветных металлов малой толщины, а также заготовок из чугуна.

При электронно-лучевой сварке (сварке плавлением) (ЭЛС) для нагрева и расплавления свариваемых кромок используют кинетическую энергию электронов, движущихся с высокой скоростью в вакууме. В месте соударения электронов со свариваемыми заготовками почти 99% кинетической энергии переходит в тепловую, что сопровождается повышением температуры до 5000—6000°C. Кромки заготовок расплавляются, и после кристаллизации образуется сварной шов. Для сварки заготовок таким способом применяют электронную пушку (рис. 38,а). В вакуумной камере 1 в формирующем электроде 2 расположен вольфрамовый катод 3, обладающий эмиссионной способностью при подогреве до 2000—2500°C. Под катодом находится анод 4 с центральным отверстием для пропускания луча к заготовке. Электроны, сформированные в пучок электродом 2, под действием высокой разности потенциалов между катодом и анодом перемещаются с ускорением по направлению к заготовке. Диафрагма 5 отсекает краевые зоны луча 6, а магнитные линзы 7 фокусируют луч на поверхности заготовки 9. Скорость сварки зависит от скорости перемещения заготовки под неподвижным пятном луча или отклонения

104дмого луча с помощью отклоняющей системы 8. Основными параметрами режима являются ускоряющее напряжение (25—120 кВ), сила тока (35 —1000 мА), диаметр сфокусированного луча (0,02—1,2 мм) и скорость сварки (до 100 м/ч). Электронно-лучевая пушка позволяет получать луч с плотностью теплового потока до 5- 10 Вт/см. При воздействии такого луча материал расплавляется и частично испаряется, причем в первую очередь испаряются неметаллические включения, имеющие меньшую теплопроводность, чем основной материал.

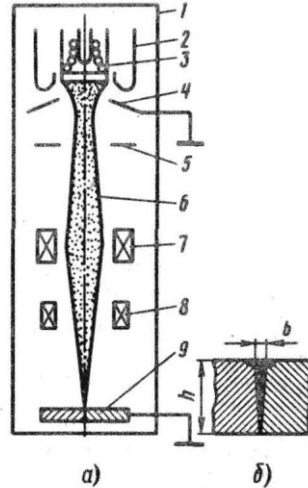


Рис. 38. Электронно-лучевая сварка

Сварной шов получается плотным, с минимальным содержанием вредных примесей и газов и имеет характерное «кинжальное» проплавление. Сварку можно производить в нижнем и в вертикальном положении. Высокая концентрация энергии на поверхности детали позволяет проплавливать заготовки толщиной до 200 мм. Идеальная защита от влияния внешней среды — вакуум, а также малое количество теплоты, вводимой в заготовку, снижает вероятность структурных превращений в больших объемах и деформацию конструкции. Электронно-лучевую сварку можно применять для заготовок из всех материалов, чаще всего из разнородных, например, для заготовок из металла с керамикой, и для соединений заготовок из тугоплавких и 104далечеки активных металлов Nb, Mo, W, Ti, Zr.

Сварка лазерным лучом (ЛС) производится при плотности теплового потока до 10» кВт/см². Применяемые для сварки лазерные установки (квантовые генераторы) подразделяют на твердотельные (рабочий элемент — стекло с неодимом, длина волны 1,06 мкм, мощность до 0,5 кВт) и газовые (чаще СО₂-лазеры с длиной волны 10,6 мкм и мощностью до 15 кВт).

Необходимая для сварки энергия получается при столкновении острофокусированного пучка фотонов с поверхностью свариваемой заготовки. Плотность потока фотонов, создаваемого лазерами при фокусировке луча в пятно диаметром до нескольких сотых долей миллиметра, позволяет нагревать практически все металлы до расплавления и даже до кипения. Лазеры большой мощности позволяют сваривать заготовки из металла толщиной до нескольких миллиметров. Большим достоинством лазерной сварки является возможность ведения процесса в любой среде, однако она может неблагоприятно влиять на качество шва. Для лучевой сварки характерно «ножевое проплавление», т.е. форма шва, при которой отношение глубины шва к ширине нередко достигает 20 и более (рис. 38, б).

Лазерный луч применяют также для резки, которая может производиться либо прямым испарением и вплавлением материала, либо продувкой в нагретую зону кислорода и сжиганием в нем разогретого металла. Лазерная резка обеспечивает хорошее, качество получаемой поверхности (параметр ее шероховатости Rz=30...40 мкм), высокую точность размеров и может проводиться в любых пространственных положениях. Эти достоинства позволяют широко применять ее в сочетании с системами ЧПУ или управлением от ЭВМ для производства заготовок сложной геометрической конфигурации. При лазерной сварке предъявляют очень высокие требования к подготовке кромок под сварку и к сборке изделий: не допускается депланация кромок и изменение зазоров. При соблюдении этих требований процесс можно применять при сборке,

позволяющей получать неразъемные соединения деталей после окончательной их обработки, обеспечивая большую точность изделия, как по размерам, так и по геометрии.

Контактная электрическая сварка, при которой подогревают соединяемые поверхности проходящим электрическим током и затем их сдавливают, является одним из самых распространенных способов сварки давлением. Сварку производят на машинах, состоящих из источников тока, прерывателя тока, приспособления для закрепления заготовок и механизма нагрузки. В качестве источника тока в контактных машинах применяют понижающий трансформатор. Большой коэффициент трансформации обеспечивает вторичное рабочее напряжение 1,5—12 В и силу проходящего тока от 10000 до 500000 А. Прерыватель тока электромагнитного или электронного типа служит для регулирования времени пропускания тока через нагреваемое сечение. Сила и время протекания тока являются основными регулируемыми характеристиками, определяющими интенсивность нагревания и охлаждения, а следовательно, и производительность.

Приспособление для закрепления заготовок и механизм нагрузки (пневматический или гидравлический) служат для закрепления свариваемых заготовок и их сдавливания после нагрева. По виду получаемого соединения контактную сварку подразделяют на стыковую, точечную и шовную. Стыковую контактную сварку (рис. 39, а) применяют для соединения встык деталей типа стержней, толстостенных труб, рельсов и т.п. Свариваемые заготовки 1 плотно зажимают в неподвижном 2 и подвижном 3 токоподводах, подключенных ко вторичной обмотке сварочного трансформатора 4.

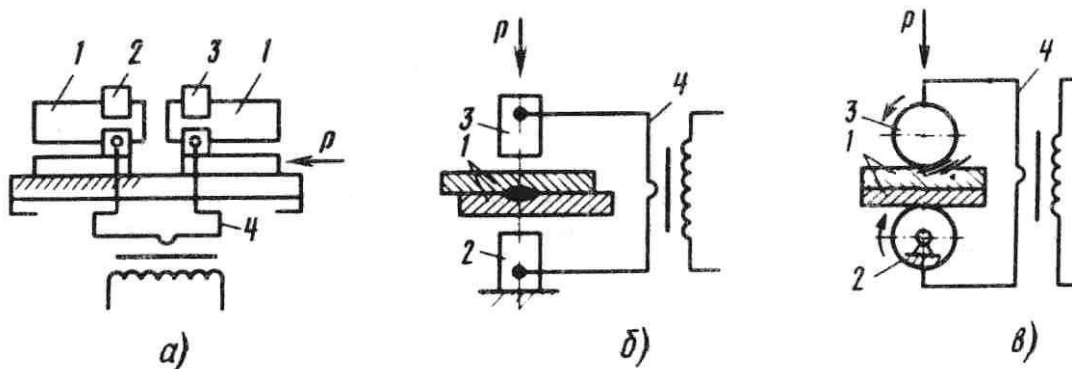


Рис. 39. Способы контактной сварки: а — стыковая; б — точечная; в — шовная

Для обеспечения плотного электрического контакта свариваемые поверхности приводят в соприкосновение и сжимают. Затем включают ток. Общее количество теплоты, выделяемое при прохождении тока по вторичной цепи, определяют по закону Джоуля — Ленца: $Q=I^2RT$, где I — сила тока при сварке, А; R — полное сопротивление цепи, Ом; $R = 2R_э + R_з + R_к$; $R_э$ — сопротивление контакта токоподвод—заготовка; $R_з$ — сопротивление заготовок; $R_к$ — сопротивление контакта между заготовками; t — время протекания тока, с.

Так как $R_к$ значительно превосходит сопротивление любого другого участка, то максимальный нагрев будет именно в месте контакта между заготовками. При достижении необходимой температуры ток отключают и заготовки сдавливают.

Точечную сварку (рис. 39, б) применяют для листовых или стержневых конструкций, она обеспечивает прочные соединения в отдельных точках. Свариваемые заготовки 1, собранные внахлест, помещают между неподвижным 2 и подвижным 3 электродами, подключенными к вторичной обмотке трансформатора 4. После предварительного сдавливания подают ток, который пропускают в течение времени, необходимого для разогревания места контакта до нужной температуры. Затем ток отключают и заготовки сдавливают. Этот способ широко применяют в авто- и вагоностроении, строительстве, при сборке электрических схем и др. Шовную сварку (рис. 39, в) применяют при изготовлении листовых конструкций для получения прочного и герметичного соединения. Свариваемые заготовки 1 помещают между двумя роликами-электродами; один из электродов 2 может иметь вращательное движение, а другой 3 — вращательное движение и перемещение в вертикальном направлении. Электроды подключают ко вторичной обмотке трансформатора 4. Заготовки сдавливают с силой, обеспечивающей

надежный контакт, а затем одновременно с включением тока роликам задается вращательное движение со скоростью, необходимой для создания нужного нагрева в месте контакта. Скорость сварки зависит от силы тока, толщины листов и может составлять несколько метров в 1 мин. Шовная сварка обеспечивает получение прочных и герметичных соединений из листового материала толщиной до 5 мм.

Конденсаторная сварка (рис. 40) является одной из разновидностей контактной сварки. Энергия, необходимая для подогревания места сварки, накапливается в конденсаторах, а затем в процессе разряда преобразуется в теплоту. Количество накопленной энергии можно регулировать изменением емкости конденсаторов и напряжения зарядки.

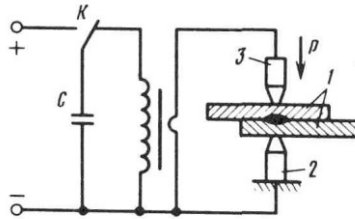


Рис. 40. Установка для конденсаторной сварки: 1 — свариваемые заготовки; 2 — подвижный электрод; 3 — неподвижный электрод.

При замыкании ключа К влево происходит зарядка конденсатора С от источника постоянного тока. В момент подачи давления на свариваемые заготовки 1 ключ К автоматически перебрасывается в правое положение. Конденсатор разряжается через первичную обмотку понижающего трансформатора, вторичная обмотка которого соединена с неподвижным 2 и подвижным 3 электродами. При разрядке конденсатора продолжительность протекания тока составляет $0,6—0,8 \cdot 10^{-4}$ с. Кратковременность процесса при достаточно большой мощности разряда обеспечивает локальное выделение теплоты, что позволяет сваривать между собой заготовки из материалов, различных по теплофизическим свойствам. Кроме того, возможность весьма точной дозировки энергии подбором емкости конденсаторов позволяет применить этот способ для соединения заготовок очень малых толщин (несколько десятков микрон).

Диффузионной сваркой (рис. 41) соединяют заготовки в твердом состоянии в вакууме приложением сдвигающих сил при повышенной температуре. Тщательно зачищенные свариваемые заготовки 1 собирают, помещают в вакуумную камеру 2 [давление $133 \cdot (10^{-3} \dots 10^{-5})$ Па], сдвигают и затем нагревают специальным источником теплоты до температуры рекристаллизации, равной $0,41T_{пл}$, где $T_{пл}$ — температура плавления свариваемого материала. В начальной стадии процесса создаются условия для образования металлических связей между соединяемыми поверхностями. Низкое давление в камере способствует удалению (испарению) поверхностных пленок, а высокая температура нагрева и давление приводят к смятию неровностей и сближению поверхностей до нужного расстояния ($4 \cdot 10^{-8}$ см).

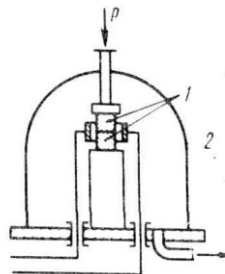


Рис. 41. Установка для диффузионной сварки: 1 — свариваемые заготовки; 2 — вакуумная камера

Последующая выдержка вызывает диффузию атомов материалов свариваемых заготовок и образование промежуточных слоев, увеличивающих прочность соединения. Время диффузионной сварки зависит от химического состава соединяемых заготовок, степени их очистки, температуры нагрева и составляет 10—30 мин. Достоинством этого способа является возможность соединения заготовок из разнородных материалов.

Сварка трением образует соединение в результате пластического деформирования заготовок, предварительно нагретых в месте контакта теплотой, выделившейся в результате их трения (рис. 42). Основным отличием этого вида сварки от других видов сварки давлением является способ нагревания свариваемых поверхностей. Свариваемые заготовки 1 (рис. 4.42, а) устанавливают соосно в зажимах машины, один из которых 2 неподвижен, а второй 3 может совершать вращательное и поступательное (вдоль оси заготовок) движения. Заготовки сжимаются силой P , и включается механизм вращения. На соединяемых поверхностях возникают силы трения; работа на преодоление этих сил превращается в теплоту, выделяющуюся на поверхностях трения. При достижении температуры поверхностей $980\text{—}1300^\circ\text{C}$ вращение заготовок прекращают и дополнительно сжимают.

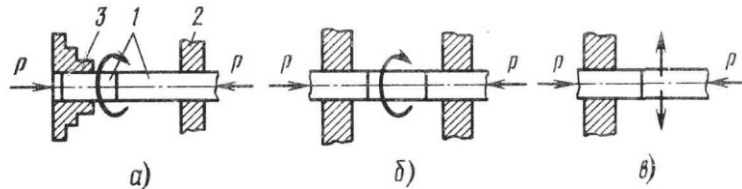


Рис. 42. Сварка трением:

а — при вращении одной из заготовок; б — при вращении промежуточного элемента; в — при вибрации одной из заготовок

Иногда сварку трением производят через промежуточный вращаемый элемент (рис. 42, б) или заменяют вращательное движение вибрацией (рис. 42, в). Сваркой трением можно сваривать заготовки диаметром $0,75\text{—}140$ мм. Основные ее достоинства — высокая производительность, малая энергоемкость процесса, возможность сварки заготовок из различных материалов, стабильность качества и отсутствие таких вредных факторов, как ультрафиолетовое излучение, газовые выделения, брызги.

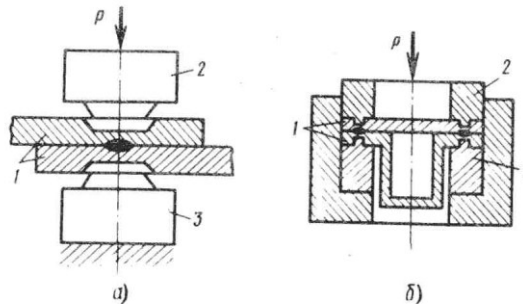


Рис. 43. Холодная сварка: а — точечная; б — по контуру

Холодная сварка — один из способов сварки давлением без подогрева (рис. 43). Для ее осуществления с соединяемых поверхностей тщательно удаляют оксиды и загрязнения. Детали 1, подлежащие сварке, помещают между неподвижным 3 и подвижным 2 пуансонами. Оба пуансона имеют выступы, которые при сварке должны быть полностью вдавлены в поверхность металла. Это необходимо для создания интенсивного пластического течения металла и 107дальнейшего из зоны контакта загрязненного слоя.

Необходимое для качественной сварки пластическое деформирование зависит от свойств металла, толщины заготовки и способа подготовки поверхности. Холодную сварку применяют для соединения заготовок из цветных металлов и сплавов, для заварки оболочек, в электромонтажном производстве, для сварки проводов, шин, троллейных токопроводов.

При сварке ультразвуком неразъемное соединение металлов образуется при совместном воздействии механических колебаний высокой частоты и сдавливающих сил. Установка для сварки состоит из источника питания, аппаратуры управления, механической колебательной системы и механизма давления. Свариваемые заготовки 1 (рис. 44) перемещаются между волноводом 2 и жесткой опорой 3. Трансформатор ультразвуковых упругих колебаний 4 охлаждается проточной водой. Вырабатываемые генератором 5 электрические колебания ультразвуковой частоты преобразуются в механические колебания инструмента-волновода и вводятся в свариваемый материал. Зона контакта нагревается до вязко-текучего состояния и под действием

нормально приложенной силы образуется соединение. При сварке пластмасс механические колебания прикладывают по нормали к поверхности, а при сварке металлов — в плоскости соединения. В настоящее время этот способ широко используют для сварки различного рода полимерных материалов.

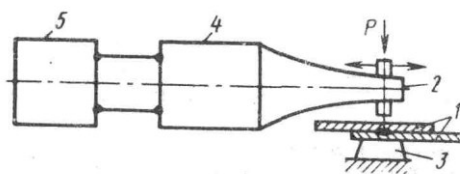


Рис. 44. Сварка ультразвуком:

1 — свариваемые заготовки; 2 — волновод; 3 — опора; 4 — генератор механических колебаний; 5 — генератор электрических колебаний

Сварка взрывом относится к группе прессово-механических способов. При сварке (рис. 45, а) свариваемые пластины размещают так: одну на жестком основании 4, а вторую 2 на некотором расстоянии h над ней. На ее внешней поверхности расположен заряд 3 с детонатором 5. При инициировании взрыва по нему распространяется фронт детонационной волны со скоростью 2000—8000 м/с, зависящей от состава заряда, сообщая находящемуся под зарядом участку металла импульс ускоренного движения. При установившемся процессе верхняя пластина дважды перегибается (рис. 45, б). Ее наклонный участок движется со скоростью волны. Кинетическая энергия движущейся пластины при встрече с неподвижной затрачивается на работу пластического деформирования поверхностей в месте контакта, которая переходит в теплоту, способную разогреть металл в зоне соединения вплоть до его оплавления.

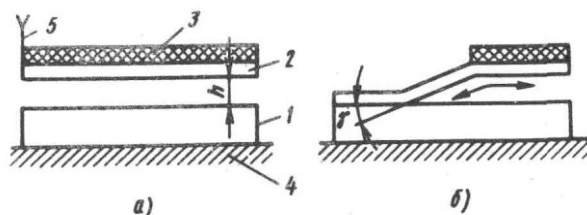


Рис. 45. Сварка взрывом: 1, 2 — свариваемые пластины; 3 — заряд В.В.; 4 — основание; 5 — детонатор

Вызванное соударением всестороннее неравномерное сжатие заставляет металл в поверхностных слоях обеих соударяющихся частей совместно деформироваться. При этом оксидные пленки и другие поверхностные загрязнения дробятся и выносятся из вершины угла γ . В этот момент образуются металлические связи. Под действием нагрева и пластического деформирования обеспечивается необходимая степень активации поверхности. Диффузионные процессы практически не проходят.

В зоне соединения могут возникнуть физическая и химическая неоднородность, участки образовавшихся мартенситных и рекристаллизованных структур, интерметаллидов.

При сварке взрывом образуются прочные соединения однородных и разнородных материалов по практически неограниченной площади (15 — 20 м²), что используют для получения биметаллических листов, композиционных заготовок, образования покрытий и т.д.

2.4.6. Особенности сварки конструкционных материалов

Конструкционные низкоуглеродистые и низколегированные стали обладают хорошей свариваемостью. При соблюдении правильной технологии и отсутствии дефектов (непроваров, пор, шлаковых включений) обеспечивается равнопрочность сварного соединения с основным металлом. Механические свойства зависят от структуры сварного соединения, определяемой режимом. Химический состав шва может отличаться от основного уменьшенным содержанием С, которое компенсируется добавкой легирующих элементов через флюс и присадку. Возможно образование закалочных структур в зоне термического влияния (ЗТВ). В термоупрочненных материалах появляются участки разупрочнения. Для восстановления свойств рекомендуется последующая термообработка. Стойкость против образования трещин удовлетворительная, но ухудшается по мере возрастания содержания С. Иногда требуется предварительный подогрев

свариваемых заготовок до 120—200°C. При ручной дуговой сварке (РДС) марку электродов выбирают по химическому составу материала, а сварочный ток, род и полярность назначают по паспорту. При сварке первого шва на заготовках большой толщины иногда применяют подогрев. При сварке термоупрочненного металла силу тока уменьшают.

При автоматической сварке под флюсом (АДФ) равнопрочность достигается подбором флюса, проволоки и режимом сварки. Рекомендуют флюсы АН-348-А, ОСЦ-45 и проволоку Св-08ГА, Св-08Г2А. Свойства ЗТВ зависят от режима и изменяются в широких пределах. При сварке в СО₂ применяют те же проволоки, что и при АДФ.

При электрошлаковой сварке (ЭШС) применяют флюсы АН-8, АН-8М, ФЦ-1, ФЦ-7, АН-22 и проволоки Св-08А, Св-08ГА, Св-08ГС. Ударная вязкость при таком виде сварки снижается. Равнопрочность обеспечивается последующей термообработкой (нормализацией).

При стыковой контактной сварке увеличивается зерно в ЗТВ. Структура и прочность сварного соединения зависят от режима. Наблюдается обезуглероживание в зоне стыка и снижение ударной вязкости. Точечная и шовная сварка обеспечивают высокое качество соединений.

Среднеуглеродистые стали содержат 0,26—0,45% С. Для сварки их применяют в нормализованном состоянии, характеризуются удовлетворительной свариваемостью. Высокоуглеродистые стали содержат 0,46—0,75% С, их свариваемость плохая. Сварку применяют только для ремонтных работ. В сталях ограничивают содержание серы, фосфора и водорода, ухудшающих свариваемость.

В легированных сталях сумма легирующих элементов 2,5—10%. Эти стали предназначены для работы при температурах до 500°C. Для легированных сталей характерно образование закалочных структур, повышающих вероятность хрупкого разрушения. Они чувствительны к наличию концентраторов напряжений. Поэтому непровары, подрезы, большие усиления швов не допускаются. Склонность к трещинам оценивается по содержанию С_{экв}. При С_{экв} > 0,45 требуется предварительный подогрев.

При подготовке кромок нужно придерживаться следующих рекомендаций: не применять кислородную резку, тщательно очищать свариваемые и прилегающие к ним поверхности, не допускать смещения кромок при сборке и сварке, обеспечивать минимальные зазоры. Сборочные прихватки в процессе сварки необходимо переплавлять полностью. В швах рекомендуется снижать содержание углерода. При сварке обеспечивать малую ЗТВ. Предусматривать возможность последующей термообработки.

В зависимости от прочности стали при РДС следует применять электроды УОНИ-13/55, УОНИ-13/65, УОНИ-13/85, а в целях избежания трещин — электроды с аустенитной структурой наплавленного металла. Заготовки из сталей типа ЗОХГСНА в жестких конструкциях сваривать по промежуточным наплавленным слоям. Сварку производят при температуре подогрева 150°C. Не допускается сварка на сквозняках.

АДФ проводят на флюсовых подушках легированными проволоками Св-08ГА, Св-08ХМА, Св-10Х16Н25М6, Св-20ХСНВФА и др., под флюсами ОСЦ-45, АН-15, АН-398А. Для увеличения сопротивляемости образованию горячих трещин рекомендуется применять флюсы АН-26, АН-20, 480Ф-Ю. Сварочные материалы предварительно необходимо прокалить в течение 2—3 ч при 350°C. После сварки рекомендуется общий отпуск при 600°C.

При сварке в защитных газах (с предварительным подогревом в Ar и He) неплавящимся электродом рекомендуется применять присадки из проволоки Св-08Г2С, Св-08ГСМТ и другие с повышенным содержанием раскислителей. Заготовки из легированных сталей малой толщины лучше сваривать без присадки. При сварке плавящимся электродом применяют проволоку Св-08Г2СМ, Св-08ХЗГ2СМ. Во избежание пористости применяют смеси газов Ar и He. Для получения благоприятного формирования шва рекомендуется даже малые толщины сваривать в два и более прохода. ЭЛС обеспечивает хорошие результаты даже при сварке заготовок толщиной 30—35 мм без подогрева. Зона разупрочнения не превышает 0,2—0,5 мм, что практически не снижает прочность соединения. Возможно применение точечной и шовной контактной сварки для заготовок толщиной 3 мм. *Стали с большим содержанием хрома* при обычных температу-

рах в зависимости от соотношения содержания углерода и хрома могут иметь ферритную (ХФ), ферритно-мартенситную (ХФМ) или мартенситную (ХМ) структуру, которая образуется при превращении $F_{cy} \rightarrow F_{ca}$ даже при малых скоростях охлаждения. Эти стали при дополнительном легировании Mo, W, Nb, V, Ni используют как жаропрочные для работы при температуре до 600°C. Длительное пребывание при температуре 650—850°C вызывает появление σ -фазы, которая охрупчивает материал при 475°C, понижает коррозионную стойкость, ползучесть. При сварке следует ограничивать время пребывания сварного соединения в области 1150°C, увеличивая скорость охлаждения, так как при температурах выше 1150°C наблюдается интенсивный рост зерна, снижается пластичность, повышается склонность к межкристаллитной коррозии, связанной с обеднением границ зерен хромом.

При сварке следует стремиться к получению химического состава шва, аналогично-го основному; это возможно без опасения возникновения трещин только при условии предварительного подогрева. Более простая технология связана с применением сварочных материалов, образующих аустенитную или аустенитно-ферритную структуру в шве. Водород, проникающий в зону расплава, резко повышает склонность сварных соединений к образованию холодных трещин.

При РДС, АДФ и сварке в защитных газах сталей структуры ХФ рекомендуют применять жесткие режимы ввиду склонности этих сталей к росту зерна, потере пластических свойств как в шве, так и в околошовной зоне. Для уменьшения хрупкости применяют сварочные материалы, обеспечивающие аустенитно-ферритную структуру в шве: электроды Э-ЮХ25Н13Г2, ЦЛ-10, НЗЛ-Х17, сварочную проволоку Св-13Х25Н18, Св-10Х17Т и флюсы АЙ-26. Сварные соединения имеют пониженную вязкость, которая не полностью восстанавливается даже последующей термообработкой.

Стали со структурой ХМ и ХМФ в условиях сварочного термического цикла в ЗТВ закаляются на мартенсит с высокой твердостью и малой пластичностью, способствующей образованию холодных трещин при температурах ниже 100°C. Особенно отрицательно влияет крупное зерно. При сварке тонколистовых и мало жестких конструкций обычно трещин не возникает.

Рекомендуется РДС, АДФ и сварку в защитных газах проводить с предварительным подогревом и медленным охлаждением. При сварке крупногабаритных конструкций общий подогрев может быть заменен местным.

Для улучшения структуры и свойств соединения необходим высокий отпуск, который рекомендуется проводить, когда температура в соединении после сварки находится в пределах 100—150°C. Рекомендуется применять электроды УОНИ-13/1Х13, КТИ-9, КТИ 10, ЭА-898-21.

При сварке в CO_2 или в аргоне используют проволоки Св-08Х14ГЕНТ, Св-15Х12ГНМВФБ, Св-08Х18Н2ГТ; при АДФ применяют те же проволоки и флюсы АН-30, АН-17, АН-18. Все сварочные материалы, дающие в шве аустенитную или аустенитно-ферритную структуру, не обеспечивают равнопрочности сварного соединения.

Стали аустенитного класса подразделяют на коррозионно-стойкие (содержание углерода $\leq 0,12\%$), жаростойкие легированные алюминием и кремнием, создающими прочные и плотные оксиды на поверхности, и жаропрочные сплавы, обладающие высокими механическими свойствами при повышенных температурах благодаря легированию $\wedge U$ и Мо (до 7% каждого) и модифицированные бором. По структуре спали этой группы подразделяют на аустенитные (А), аустенитно-ферритные (АФ) и аустенитно-мартенситные (АМ). В отличие от углеродистых они при закалке приобретают повышенные пластические свойства, так как при быстром охлаждении не успевают произойти переход твердого раствора углерода в аустенит и не образуются карбиды. В следствие этого ускоренное охлаждение приводит к повышению сопротивляемости образованию горячих трещин. Главная особенность сварки этих сталей заключается в предотвращении образования горячих трещин в шве и в околошовной зоне, вызванных укрупнением зерен и выделением на их границах легкоплавких фаз. Жестко ограничивают содержание S и P, добавляют элементы, измельчающие структуру. При эксплуатации при повышенных температурах неравновесные структуры, образовавшиеся в процессе сварки, распадаются, образуются

карбиды, приводящие к хрупкости области температуры 475°C. При сварке высокопрочных АМ сталей возможно образование холодных трещин.

Образование карбидов хрома может привести к межкристаллитной коррозии. В зоне, нагреваемой до температур выше 1250°C, при эксплуатации конструкции в агрессивных средах возможна коррозия в основном металле.

Широкий комплекс технологических свойств позволяет использовать стали аустенитного класса по различному назначению. Это и определяет требования к сварным соединениям. Однако в любых случаях не допускаются горячие трещины. В этой связи при сварке применяют жесткие режимы, обеспечивающие малую зону разогрева.

При РДС с целью сохранения жаропрочности и предупреждения трещин применяют электроды, обеспечивающие сварку короткой дугой, ниточными швами без поперечных колебаний. Предварительно электроды прокаливают. Диаметр электродов уменьшают по сравнению с диаметром электродов для сварки заготовок из углеродистых сталей.

Для коррозионно-стойких сталей применяют электроды ЦА-11, ОЗЛ-7, Л-38М, НЖ-13, для жаростойких ОЗЛ-5, ОЗЛ-6, ОЗЛ-9-1.

АДФ применяют для сваривания заготовок толщиной 3—50 мм. Сваривают многопроходной сваркой, ограничивая сечения каждого шва. Для сваривания заготовок из коррозионно-стойких сталей применяют проволоку Св-01Х18Н9Т, Св-06Х19Н9Т, Св-04Х19М902, Св-08Х25, М13БТЮ диаметром 2—3 мм, а для заготовок из жаропрочных сталей — проволоку Св-08Х18Н8Г2Б, Св-04Х19Н9, для заготовок из жаростойких сталей, работающих при 900—1100°C, проволоку Св-07Х25Н13, Св-06Х25Н12ТЮ, Св-08Н50. Сварку проводят под флюсом АНФ-14, АНФ-16.

При ЭШС применяют те же проволоки и флюсы АНФ-1, АНФ-6, АНФ-29. Применение ЭШС снижает прочностные и пластические свойства в околошовной зоне. Для их восстановления необходима термообработка.

Сварку в инертных газах (Ar и He) применяют в различных положениях как плавящимся, так и неплавящимся электродом. Сварку в CO₂ применяют редко вследствие выгорания легирующих элементов. Кроме того, процесс сопровождается разбрызгиванием и снижаются коррозионные свойства соединения. Хорошие результаты получают при ЭЛС и диффузионной сварке.

Для всех разновидностей сталей аустенитного класса можно применять стыковую, точечную и шовную сварку и сварку трением. Соединения после сварки несколько утрачивают антикоррозионные свойства, которые могут быть восстановлены термообработкой.

Алюминиевые сплавы разделяют на литейные (Л) и деформируемые (Д). Особенности сварки определяются взаимодействием Al с газами, шлаками, испарением легирующих элементов и особенностями кристаллизации. Оксидная пленка на поверхности заготовок способна адсорбировать газы. Не расплавляясь при сварке, она затрудняет образование сварного соединения и является источником пор в металле. Для уменьшения ее влияния используют флюсы, растворяющие или смывающие пленку. Адсорбированный в пленке и находящийся в окружающей среде водород растворяется в расплавленном металле и при кристаллизации образует поры. Перед сваркой пленку удаляют механическим либо химическим способом. При сварке образуется преимущественно крупнозернистая дендритная структура; между дендритами располагается эвтектика, снижающая пластичность шва и являющаяся главной причиной образования горячих трещин. Возможно образование интерметаллидов, снижающих прочность. Сварка с присадкой, содержащей модификаторы, улучшает свариваемость и структуру. В ОШЗ преобладают укрупненные зерна, происходит разупрочнение нагартованного металла. В зоне частичного оплавления также возможно образование горячих трещин. Высокие тепло- и электропроводности определяют необходимость применения большой силы тока, что вызывает сильное коробление.

РДС могут быть выполнены соединения любых типов, хотя предпочтительнее стыковые на подкладках. Применяют электроды с покрытием из смеси хлористых и фтористых солей:

ОЗА-1 для сварки, ОЗА-2 для заварки дефектов. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности.

АДФ применяют для сварки заготовок толщиной 4 мм и выше. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности. Проволоку выбирают по ГОСТ 7871—75, флюсы МАТИ-1а, МАТИ-10, ЖА-64.

Для заготовок малой толщины применяют сварку неплавящимся электродом с присадкой или без нее в аргоне, смеси аргона с гелием, при толщине свыше 3 мм применяют плавящийся электрод. Сварка возможна во всех положениях. Рекомендуется сварка импульсно-дуговая.

Перспективна плазменная сварка, обеспечивающая высокую производительность, малую ЗТВ, глубокое проплавление, следовательно, меньшую долю присадочного материала в шве.

Контактную сварку применяют в основном для точечных и шовных нахлесточных соединений для заготовок из сплавов АМЦ, Д16, АМг6. Для этого требуются машины повышенной мощности, обеспечивающие плотность тока до 2000 А/мм². Стыковую контактную сварку проводят методом оплавления с большими скоростями нагрева и осадки. Прочностные характеристики соединения при этом приближаются к прочностным характеристикам материала заготовок.

Газовую сварку ведут с применением нейтрального пламени. В качестве флюса рекомендуют смесь хлористых и фтористых солей АФ-4А. Флюс наносят на свариваемые кромки и присадочный пруток.

Магниевые сплавы подразделяют на литые и деформируемые. По системе легирования различают сплавы системы Mg—Mn: МА1, МА8 — хорошо свариваемые; Мд—Al—Zn: МА-2, МА-2-1, МА5 — удовлетворительно свариваемые; Mg—Zn—Zr: МА-14, ВМД — ограниченно свариваемые. Сложности при сварке объясняются высоким сродством к кислороду, наличием оксидной пленки, активным взаимодействием с газами (СО, СО₂, пары воды, N₂, Н₂), образованием карбидов, нитридов, оксидов. Резко меняющаяся с понижением температуры растворимость газов вызывает пористость. Сплавы склонны к росту зерна и образованию легкоплавких эвтектик. Разупрочняется ЗТВ. Высокий коэффициент линейного расширения при охлаждении шва вызывает коробление сварной конструкции.

При всех способах сварки особое внимание следует уделять удалению поверхностных загрязнений и оксидной пленки механической или химической обработкой непосредственно перед сваркой. Ввиду повышенной хрупкости сплавов отбортовку не применяют.

Рекомендуется применять сварку в аргоне повышенной частоты ручную или автоматическую. Заготовки толщиной до 6 мм могут быть сварены без присадки неплавящимся электродом за один проход; с увеличением толщины применяют V- или X-образную разделку швов и присадочную проволоку диаметром 2—4 мм. При толщине заготовки выше 5 мм можно применять сварку плавящимся электродом в аргоне. Для тонких заготовок применяют сварку прерывистой дугой на постоянном токе прямой полярности.

Для сваривания заготовок из магниевых сплавов можно применять точечную и шовную контактную сварку. Для стержневых конструкций применяют стыковую сварку сопротивлением.

Бронзы и латуни. При нагреве медь соединяется с О₂, Н₂, S, P, галогенами и практически не растворяет газы, образующиеся в результате этих реакций. Сосредоточившись по границам зерен, продукты реакций приводят к охрупчиванию сварного соединения. Водород вызывает пористость и приводит к образованию трещин. При сварке латуней сложность заключается в испарении цинка и его ликвиации. Свариваются латуни удовлетворительно.

Оловянные бронзы свариваются удовлетворительно. Наличие в них Р и приводит к образованию горячих трещин. Бронзы оловянные, алюминиевые свариваются ограниченно из-за образования Al₂O₃. Бронзы безоловянные, марганцовистые относятся к удовлетворительно свариваемым. Бронзы безоловянные кремниевые, хромистые, бериллиевые свариваются хорошо.

При сварке меди и ее сплавов следует применять мощные источники нагрева. Малое время пребывания в расплавленном состоянии не позволяет проводить металлургические процессы в ванне, поэтому присадка по химическому составу должна соответствовать основному

металлу. РДС для сварки заготовок из меди и латуни применяют редко, так как трудно получить необходимое качество соединений. Бронзы свариваются удовлетворительно, однако рекомендуется предварительный подогрев. Характерный дефект — образование пор.

При АДФ применяют угольный неплавящийся электрод с закладкой присадки встык, флюс ОСЦ-45, ток постоянный. Применение плавящегося электрода и флюса АН-М1 позволяет увеличить производительность. При сварке применяют графитовую подкладку. Для сварки заготовок из латуни рекомендуют флюсы МАТИ-5, АНФ-5, ЖМ-1.

Сварку в инертных газах применяют во всех разновидностях: неплавящимся электродом без присадки, с присадкой, плавящимся электродом. В качестве присадки применяют проволоки, по химическому составу близкие к основному металлу.

ЭШС с применением специальных флюсов можно получать сварные соединения, не уступающие по прочностным характеристикам металлу заготовок.

Газовую сварку проводят с предварительным и сопутствующим подогревом. Применяют флюсы на основе буры, борной кислоты, борного ангидрида. Состав присадки аналогичен составу металла заготовок.

Чугуны отличаются плохой свариваемостью. Низкие прочностные и пластические свойства приводят к образованию трещин, большое количество углерода при быстром охлаждении способствует охрупчиванию в результате появления отбеленной зоны. Трещины в чугуне развиваются мгновенно. Для устранения трещин, отбеливания, т.е. для сохранения структуры серого чугуна со свободным, не связанным в Fe_3C углеродом при сварке необходимо создать условия для графитизации при охлаждении. Это достигается предварительным подогревом и соответствующим химическим составом чугуна: увеличенным содержанием углерода и кремния, отчасти марганца (до 1,2%) и медленным охлаждением. Улучшают свариваемость чугуна модифицирующие добавки, измельчающие графитовые включения и структуру, а также никель и титан. Температуры подогрева зависят от размера детали и равны 300—400°C для мелких деталей и 600—700°C для крупных. РДС с подогревом осуществляют, применяя в качестве электродов чугунные литые прутки с покрытием ОМЧ-1, ВЧ-3, СТЧ-4, ЭПЧ. Полуавтоматическую сварку применяют для заварки дефектов, используя порошковые проволоки СТЧ-6, ППСВ-7. Применяют также полуавтоматическую сварку с совместным применением порошковой проволоки и керамических стержней, играющих роль электродных покрытий. После заварки дефектов на высокопрочных чугунах рекомендуется отжиг. Удовлетворительные результаты дает стыковая сварка сопротивлением.

При РДС без подогрева применяют электроды из цветных металлов на медной основе. На границе с наплавкой появляется прослойка белого чугуна, препятствующая дальнейшей обработке. Лучшую обрабатываемость переходной зоны получают при сварке электродами на основе никеля. Для заварки крупных дефектов применяют полуавтоматическую сварку. Газовую сварку проводят с применением науглероживающего пламени, ее можно проводить как с предварительным подогревом, так и без нагрева, но при увеличенной мощности пламени и последующем подогреве с целью снижения скорости охлаждения. В качестве присадки применяют чугунные прутки и флюсы на основе буры.

Удовлетворительные результаты получаются при сварке по облицовочному слою с применением шпилек-вставок.

2.5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТЕРМООБРАБОТКОЙ

Качество деталей машин в значительной степени зависит от твердости и структуры их материалов. Основными методами обеспечения необходимой твердости и структуры материалов готовых заготовок являются термообработка (ТО), термомеханическая обработка (ТМО) и химико-термическая обработка (ХТО). Области применения и режимы данных методов обработки, получаемые при этом структура и твердость приведены в табл. 63 [34,51].

Твердость и структура материала заготовок при различных методах термообработки

Материал заготовки	Режимы обработки (ТО, ТМО, ХТО)				Вид обработки	Твердость по Бринеллю, НВ	Твердость по Роквеллу, HRC ₃ , HRB	Твердость по Виккерсу, HV	Структура материала
	Закалка		Отпуск						
	Температура нагрева	Охлаждающая среда	Температура нагрева	Охлаждающая среда					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сталь 45 (диаметр до 30 мм)	830	Вода	—	—	Закалка	632—670	62—64	832	Мартенсит закалки
	830	“	600	Воздух	Улучшение	272—285	28—30	274—285	Сорбит
	830	“	450 (350)	“	Закалка + среднетемпературный отпуск	378—425	40—45	395—450	Тростит
	830	“	250	“	Закалка + низкотемпературный отпуск	611—632	60—62	773—832	Мартенсит отпуска
В поверхностном слое									
Сталь 45	850—890	Водный душ	—	—	Закалка ТВЧ				Мелко пластинчатый перлит + мелкозернистый феррит (нормализация)
	880—920	То же	—	—	То же	485—611	50—60	549—773	Пластинчатый перлит + мелкозернистый феррит (нормализация)
	930—1000	“	—	—	“				То же
	880—920	Водный душ	—	—	Закалка ТВЧ				Пластинчатый перлит (отжиг без обработки)

Продолжение табл. 63

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сталь 30	1—2	На воздухе	—		Нормализация	207—170	18	206—169	Феррит + перлит
	850— 900	Вода	680— 700	Воздух	Закалка + высокотемпературный отпуск	217—187	20	217—186	Сорбит + феррит
	870	“	250	“	Закалка + низкотемпературный отпуск	502—611	58—60	704—773	Мартенсит отпуска
Сталь 40	830— 860	Воздух	—	—	Нормализация	229—179	22	229—179	Феррит + перлит
	830— 860	Вода	680— 700	Воздух	Улучшение	241—229	24—22	242—229	Сорбит
	840— 910	“	250	“	Закалка + низкотемпературный отпуск	502—611	58	704—773	Мартенсит отпуска
					В поверхностном слое				
Сталь 40	860 — 910	Водный душ	—	—	Закалка ТВЧ				Мартенсит отпуска
	890— 940	То же	—	—	То же				Мелкопластинчатый перлит + мелкозернистый феррит
	950— 1020	“	—	—	“				То же
	890— 940	Воздушный душ	—	—	Закалка ТВЧ	485—611	50—60	549—773	Пластинчатый перлит + феррит (отжиг без обработки)
	910— 960	“	—	—	“				То же
	960— 1040	“	—	—	“				Сорбит (улучшение)
	840— 890	“	—	—	“				То же
	870— 920	“	—	—	“				“

	830—840	Вода	—	—	ВТМО				Мартенсит (следы старения)
Сталь 50	810—840	Воздух	—		Нормализация	255—179	50—60	259—179	Феррит + перлит
	810—840	Вода	620—660	Воздух	Закалка + высокотемпературный отпуск (улучшение)	241—207	26	244—206	Сорбит
	810—840	“	500	”	Закалка + среднетемпературный отпуск	378—425	24—26	395—455	Тростит отпуска
	850—890	Водный душ	—	—	Закалка ТВЧ	485—611	40—45	549—733	Мелкозернистый перлит + мелкозернистый феррит
	880—920	То же	—	—	ТО же	485—611	50—60	549—773	Мелкопластинчатый перлит + мелкозернистый феррит (нормализация)
					В поверхностном слое				
	930—1000	Водный душ	—	—	Закалка ТВЧ				То же
	880—920	“	—	—	То же				Пластинчатый перлит (отжиг без обработки)
	900—940	“	—	—	“	485—611	50—60	549—773	То же
	950—1020	“	—	—	“				“
	830—870	“	—	—	“				Сорбит (улучшение)
	860—900	“	—	—	“				То же
	920—	“	—	—	“				“

	980								
Сталь 10	900— 940	Воздух	—	—	Нормализация	243—111	—	143	Феррит + перлит
	В поверхностном слое								
	Цементация 900— 950	—	—	—	Цементация + нормализация + закалка + низкотемпературный отпуск	502—621	58—61	704—800	Перлит пластинчатый + феррит
	ТО после цементации 890— 910	Воздух	—	—					
	Нормализация 760— 780	Масло	150— 170	Воздух					
Сталь 15X	870— 900	Воздух	—	—	Нормализация	159—131	—	159	Феррит + перлит
	860— 870	С печью	—	—	Отжиг	180—131	—	179	То же
	770— 820 (после нормализации)	Вода или масло	180	Воздух или масло	Нормализация + низкотемпературный отпуск	200	—	199	Сорбит
	Цементация 910— 930	—	—	—	Цементация в твердом карбюризаторе + нормализация + вторая закалка + отпуск	В200 сердцевине			
	ТО после цементации 900— 940	Воздух	—	—					—
	850— 870 (предварительно)	Масло	150— 170	Воздух					
	780— 810 (окончательно)	“	150— 170	“					Мартенсит

Сталь 40X	850— 860	Воздух	—	—	Нормализа- ция	—	—	—	Феррит + перлит
	830— 850	С печью	—	—	Отжиг	229—187	22	229—185	Феррит + перлит
	860	Масло	500	Вода или масло	Закалка + отпуск (Улучшение)	285	30	183	Сорбит
	Предвари- тельное улучшение 830— 850	Водный душ	—	—	Поверхност- ная закалка ТВЧ	285	30	280	Сорбит
							Сердцевина 58	—	
							В поверх- ностном слое 60—62		
Сталь 50X	830— 850	Воздух	—	—	Нормализа- ция	241—187	24	242—185	Феррит + перлит
	830— 850	Вода	620—680	Воздух	Улучшение	272	28	274	Сорбит
	830— 850	Масло	520	Вода или масло	Закалка + среднетемпе- ратурный отпуск	415—393	44—42	449—413	Тростит
	820— 830	С печью	—	—	Отжиг	170—229	22	171—229	Феррит + перлит
30XГСА	860— 880	С печью	—	—	Отжиг	170—229	22	171—229	Феррит + перлит
	860— 880	Масло	640—670	Воздух	Улучшение	217—241	20—24	219—242	Сорбит
	880	“	540	Вода или масло	Закалка + среднетемпе- ратурный отпуск	378—425	40—45	395—450	Тростит
	1150 под- стуживание до 900	“	555	То же	ВТМО	325	35.5	332	“
	1150 под- стуживание до 900	“	550	“	То же	329	36	337	“
36Г2С	870	Масло или	650	Воздух	Нормализа-	172—168	8,5	171—168	Феррит +

(трубы)		воздух			ция				перлит
	Закалка при прокате затем скоростной нагрев до 840—850	Промежуточный отпуск при 500 ⁰ С	—						
	840—850	Вода	100	“	ВТМО	538	55	636	Мелкоигльчатый мартенсит
	840—850	“	200	“	То же	507	52	570	Мелкоигльчатый тростит
	840—850	“	300	“	“	478	49,5	531	То же
	840—850	“	400	“	“	400	42,5	421	“
	840—850	“	500	“	“	329	36	337	сорбит
38ХНМ	850—880	Масло	640—670	Воздух	Улучшение	229	22	220	Сорбит
	Закалка при прокатке+промежуточный отпуск при 500	—	—	—	—	525	53,5	597	Мелкозернистый мартенсит
	840—850	Вода	300	“	ВТМО	341	37	351	Тростит
	840—850	“	500	“	“	341	37	351	Сорбит
30ХН3А (37ХН3А)	820	Масло	530	Вода	Улучшение	249—272	25—29	250—274	Сорбит
	930	“	100	Вода или масло	ВТМО	507	52	570	Мартенсит
	930	“	200	То же	То же	538	55	626	Мартенсит
	930 Подстуживание	“	100	“	“	55	56	653	“
	470—930	“	200	“	“	537	57	693	“
	Подстуживание 470								
	“	“	100	“	“	537	57	693	“
	“	“	200	“	“	611	60	773	“

40X1HBA	870	Масло	600	Масло или вода	Улучшение	325	35	332	Сорбит
	930	“	100	То же	BTMO	538—555	55—56	625—653	Мартенсит
	930	“	200	“	То же	573—592	57—58	693—704	“
	930	“	100	“	“	573—592	57—58	693—704	“
	930	“	100	“	“		57—58	693—704	“
	Подстуживание до 550	“							
	То же	”	200	“	“	507—530	52—54	570—610	“
	“	“	100	Вода	“	470—485	49—50	521—542	“
	“	“	200	“	“	438—464	4646—48—48	477—514	Тростит
110Г13Л	1100	Вода	—	—	Закалка	177	10	176	Аустенит
	1100	“	350	Масло	BTMO	202	17	201	Деформированный аустенит
	1050	Свинец	—	—	То же	325	35	332	То же
38ХМЮА	750—770	С печью	—	—	Отжиг	—	8—9	—	Феррит + перлит
	В сердцевине								
	930—950	Масло	600—670	Масло	Азотирование после ТО	341—302	37—33	351—307	Сорбит
	В поверхностном слое								
						—	67	До 1200	—
	В сердцевине								
	930—950	“	600—670	Вода при 30—40	То же	285—321	30—35	288—328	Сорбит
	В поверхностном слое								
						67	До 1200	—	

2.6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Основными факторами, определяющими качество изготовления деталей, являются строгое соблюдение технологической дисциплины, т.е. строжайшее исполнение разработанных технологических процессов, и оперативный контроль и подналадка технологических систем при возможных отклонениях от допустимых значений. В станке эти отклонения обусловлены уменьшением его жесткости и точности из-за износа в узлах трения, процессов схватывания в этих узлах из-за нарушения подачи смазочного материала, ослабления затяжных компенсирующих элементов. В приспособлениях — износом базирующих элементов, уменьшением сил закрепления и т.д. в инструменте — износом и ослаблением его крепления. В заготовке — отклонением твердости материала и размера больше допустимого значения.

Строгое соблюдение технологической дисциплины при механической обработке обеспечивается на автоматических и роторных линиях, автоматах и полуавтоматах — наладчиками; на станках с ЧПУ и многоцелевых станках — программистами и наладчиками; на универсальных станках — станочниками. Контроль за соблюдением технологической дисциплины осуществляют технолог, контролер, мастер.

2.6.1. Управление качеством деталей машин за счет изменения условий обработки

При соблюдении технологической дисциплины и необеспеченности требуемого качества детали на одной из операций должно быть осуществлено оперативное изменение технологического процесса, которое, как правило, заключается в корректировке условий обработки. Для этого с успехом могут быть использованы данные, приведенные в табл. 64 - 65 [48, 59].

Таблица 64

Взаимосвязь показателей качества деталей машин с параметрами, влияющими на условия их лезвийной обработки

Параметр	Точность	$H_{ма}$ _x	W_z	S_{mw}	Ra	Rp	S_m	S	$\pm\sigma_{ог}$	h_0	U_H	h_H
Подача 5, мм/об, мм/зуб: <0,07 ≥0,07	0 —	0 +	0 +	0 +	0 +*	— +*	+ +*	+ +*	+ +*	+ +*	+ +*	+ +*
Скорость резания, v, м/мин: <30 ≥30	0 0	0 0	+ —	— —	+ —	+ —	0 0	— +	— —	— —	— —	— —
Глубина резания t	—*	+*	+*	+*	+ +	+ +	0 0	0 0	+* +*	+* +*	+* +*	+* +*
Углы в плане φ и φ ₁ <arcsin S/2r ≥arcsin S/2r	— 0	+ 0	— 0	0 0	+* 0	+* 0	0 0	+ +	— 0	— 0	— 0	— 0
Передний угол у: >0 <0	—* —*	+* +*	—* +*	0 +	+ +	+ +	0 0	— +	— +*	— +*	— +*	— +*
Радиус вершины r	—	+ +*	+* 0	0	—* —	— 0	0	— —	+* +*	+* +*	+* +*	+* +*
Радиус округления режущей кромки p	—	+ +*	+ 0	0	+ +	+ 0	0	— —	+* +*	+* +*	+* +*	+* +*
Шероховатость режущей кромки RZ _{p.кр.}	0	0	0	0	+* —	+* —	— +	—* +	— +	— +	— +	— +
	+*	—*	—*	—*	—	—	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0
	+*	—*	—*	—*	—	—	0	0	0	0	0	0
	—	+ +*	+ +	+ +	+ +	+ +	0	0	0	0	0	0

	—	+	+*	+*	—	—	0	—	—	—	—	—
Молекулярное сродство материала режущей части инструмента с материалом заготовки τ_a	—*	+*	+	0	—	—	—	—	+	+	+	+
СОЖ	+	—	—	0	—	—	—	—	+*	+*	+*	+*
Исходная точность	+*	—*	—	—	0	0	0	0	0	0	0	0
Исходная волнистость $Wz_{исх}$	—	+	+*	+*	0	0	0	0	0	0	0	0
Исходная шероховатость $Rz_{исх}$	0	0	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0
Исходная степень наклепа U_H	—*	+*	+	+	+	+	0	0	+	+	+	+

Примечания: 1. Знак «+» означает, что увеличение или уменьшение данного параметра способствует увеличению или уменьшению соответствующего параметра качества детали.

2. Знак «—» означает, что увеличение или уменьшение данного параметра способствует уменьшению или увеличению соответствующего параметра качества детали.

3. Знак «0» означает, что изменение данного параметра практически не влияет на соответствующий параметр качества детали.

4. Знак «*» означает, что данный параметр оказывает основное влияние на соответствующий параметр качества детали.

5. Значение параметра t_p практически не зависит от изменения параметров условий обработки резанием.

Таблица 65

Взаимосвязь показателей качества деталей машиностроения с параметрами, влияющими на условия их алмазно-абразивной обработки

Параметр	Точность	H_{max}	W_z	S_{mw}	Ra	Rp	S_m	S	$\pm\sigma_{ост}$	h_0	U_H	h_H
Круговая или линейная скорость детали V_L	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Подача S	—	+	+	+	+*	+*	+*	+*	+	+	+	+
Глубина резания t	—*	+*	+*	+*	+*	+*	+	+	+*	+*	+*	+*
Число выхаживаний N	+*	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—	—	—	—
Зернистость z	+	—	—	+	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+*
Концентрация K	+	—	+	—	—*	—*	—*	—*	+	+	+	+
Молекулярное сродство зерен с материалом заготовки τ_a	—	+	+	+	—	—	—	—	+	+	+	+
Правка круга	+	—	—*	—*	—*	—*	—*	—*	—	—	—	—
Жесткость технологической системы j_T	+*	—*	—*	—*	—	—	0	0	+	+	+	+
Предел текучести материала заготовки σ_T	—	+	+	+	—	—	0	—	—	—	—	—
Неравномерность твердости заготовки ΔHB	—	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0
СОЖ	+	—	—	—	0	—	—	—	+*	+*	+*	+*
Точность станка	+*	—*	—*	—*	—	—	—	—	0	0	0	0
Исходная точность	+*	—*	—	—	0	0	0	0	0	0	0	0
Исходная волнистость $Wz_{исх}$	—	+	+*	+*	0	0	0	0	0	0	0	0
Исходная шероховатость $Rz_{исх}$	0	0	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0
Исходная степень наклепа U_H	—*	+*	+	0	0	0	0	0	+*	+*	+*	+*

Примечание. См. табл. 64.

Как видно из таблиц, точно в наилучшей степени можно управлять при обработке резанием, волнистостью — при алмазно-абразивной и отделочно-упрочняющей обработках, па-

При отделочно-упрочняющей обработке ППД на точность влияет исходная точность и рабочая нагрузка; на волнистость — рабочая нагрузка, геометрия рабочей части инструмента и исходная волнистость; на параметры шероховатости — рабочая нагрузка, исходные параметры шероховатости и подача; на физико-механические свойства — рабочая нагрузка и геометрия инструмента. Это говорит о том, что основное влияние на качество детали при отделочно-упрочняющей обработке ППД оказывает рабочее давление.

Примеры общих закономерностей изменения показателей качества деталей при изменении условий их обработки приведены на рис. 46 и 47 и в табл. 67—69.

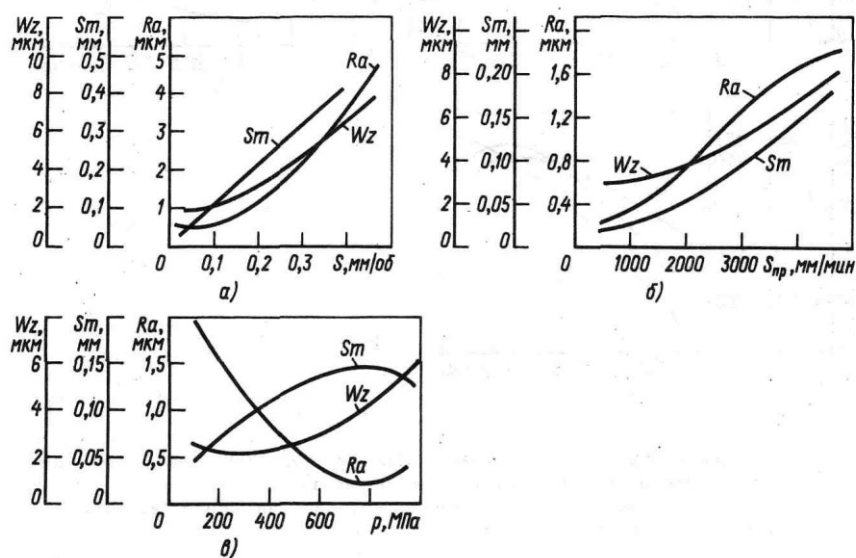


Рис. 46. Изменение геометрических параметров поверхности детали в зависимости от изменения условий обработки:

a — от подачи при точении; *б* — продольной подачи при шлифовании; *в* — рабочего давления при ППД

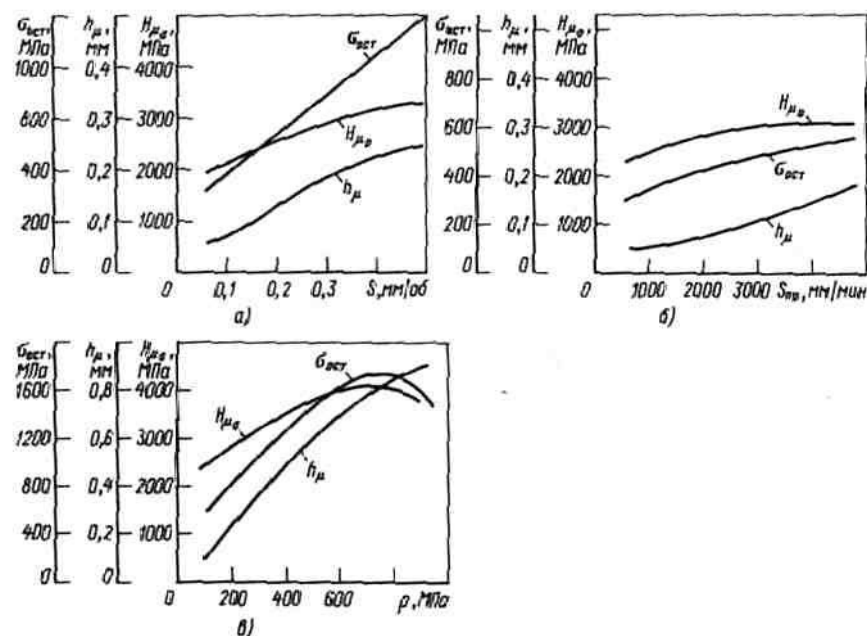


Рис. 47. Изменение физико-механических свойств поверхностного слоя детали в зависимости от изменения условий обработки:

a — подачи при точении; *б* — продольной подачи при шлифовании; *в* — рабочего давления при ППД

Приведенные данные убедительно показывают, что важнейшим фактором, определяющим качество изготовления детали, является соблюдение технологической дисциплины. Так, изменение марки алмазно-абразивного инструмента или режимов механической обработки может привести к десятикратному изменению параметров состояния обработанной поверхности. Причем, наряду с резким изменением нормированных и контролируемых параметров качества

деталей, нарушение технологической дисциплины приводит и к скрытому ухудшению их надежности и долговечности (остаточные напряжения, скрытые прижоги и микротрещины). Эти скрытые ухудшения зачастую приводят к недопониманию со стороны станочников необходимости соблюдения технологической дисциплины.

Все это говорит о том, что одной из основных задач в обеспечении качества деталей при механической обработке является строжайший контроль за соблюдением технологической дисциплины. Для устранения влияния случайных отклонений условий механической обработки на качество изготавливаемых деталей с успехом используют различные системы адаптивного управления технологическими процессами [1]. Все эти системы базируются на получении информации, характеризующей истинное состояние процесса (контроль сил резания, температуры, силы тока и мощности двигателей, давления в гидроцилиндрах, точности обрабатываемого размера и параметров шероховатости и др.), и соответствующих оперативных, как правило, автоматических изменений режимов резания.

Таблица 67

Зависимость параметров шероховатости обработанной поверхности гильз из чугуна СЧ21 от марки хонинговального инструмента

Марка хонинговального инструмента	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм	Rp, мкм	Sm, мм
К312	2,10	8,40	12,60	5,45	0,08
АС15.400/315	5,25	21,00	31,60	13,70	0,50
К38	1,05	4,20	6,30	2,75	0,05
АС15.250/200	3,0	12,80	13,20	8,30	0,10
К36	0,75	3,75	4,50	1,95	0,04
АС6.1 25/100	1,15	5,75	9,10	3,00	0,05
КЗМ20	0,22	1,10	1,32	0,57	0,02
АС2.80/63	0,20	0,95	1,14	0,49	0,08

Таблица 68

Зависимость параметров шероховатости < обработанной поверхности деталей из стали ШХ15 (НКСэ 58...62) от марки шлифовальной ленты

Марка ленты	Ra, мкм	Rz, мкм	Rmax, мкм	Rp, мкм	Sm, мм
АСО 80/63-Р14	0,30	2,00	2,80	1,12	0,036
АСО 80/63- Р9	0,28	1,60	2,00	0,90	0,036
АСО 80/63- Р1	0,14	0,75	1,00	0,40	0,028
АСО 63/50-Р9	0,14	0,80	1,00	0,42	0,030
АСМ 40/28- Р9	0,10	0,40	0,55	0,20	0,025
КО 80/63-Р14	0,52	2,50	3,00	1,40	0,040
КО 80/63- Р9	0,46	2,40	3,10	1,25	0,032
КО 80/63- Р1	0,30	2,10	2,80	1,40	0,030
Э9 (водостойкая)	0,45	2,20	2,60	1,20	0,050
АСО 80/63-Р9	0,28	1,50	1,85	0,90	0,036
АСМ 40/28-Р9	0,03	0,14	0,18	0,07	0,022
АСМ Ю/7-Р9	0,01	0,05	0,06	0,03	0,010

Для повышения точности размера детали при обработке Б.С. Балакшин и его ученики разработали два принципиально различных направления. Первое направление заключается в автоматическом (программном); управлении размером статической настройки станка, второе— в автоматическом управлении размером динамической настройки.

Так, на рис. 48 показана структурная схема системы автоматического управления (САУ) статической настройки для токарного станка. Основными элементами этой системы являются динамометрический узел ДУ, предназначенный для измерения; размера в процессе резания; датчик обратной связи ДДс, с помощью которого измеряют поднастроечное перемещение суппорта в радиальном направлении; за датчик про- граммы ЗДПр изменения размера статической настройки; датчик Д координат продольного перемещения суппорта; суммирующее 1 и сравнивающее 2 устройства1 исполнительный механизм ИМ, обеспечивающий необходимое перемещение суппорта.

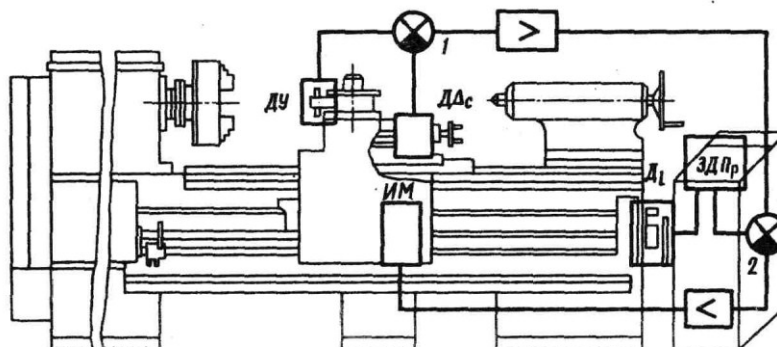


Рис. 48. Система программного управления статической настройкой для токарного станка

Таблица 69

Зависимость параметров шероховатости поверхностей детали из стали 30X12 от условий суперфиниширования

Связка	СОЖ	Зернистость	Время обработки, мин	Ra, мкм	Rz, мкм	Rma X, мкм	Rp, мкм	Sm, мм
Неметаллическая	Керосин 80% и веретенное масло 20%	50/40	5	0,32	1,40	1,50	0,80	0,016
		M28/20	2	0,07	0,38	0,52	0,18	0,010
		M28/20	5	0,09	0,52	0,80	0,24	0,022
Бакелитовая	Керосин 80% и веретенное масло 20%	50/40	5	0,06	0,32	0,40	0,16	0,010
		M28/20	5	0,06	0,30	0,40	0,15	0,012
Металлическая	Жидкость ПТОБ	50/40	5	0,34	3,2	1,00	1,00	0,022
		M28/20	2	0,06	0,50	0,18	0,18	0,015
		M25/20	5	0,03	0,30	0,08	0,08	0,015
Бакелитовая	Жидкость ПТОБ	50/40	5	0,05	0,25	0,14	0,14	0,09
		M28/20	2	0,05	0,25	0,12	0,12	0,06
		M28/20	2	0,04	0,20	0,10	0,10	0,06

Общая схема САУ размером динамической настройки приведена на рис. 49 [1]. Во время обработки контролируется какая-либо физическая величина μ (упругое перемещение звеньев технологической системы, сила резания или ее составляющая, крутящий момент и др.), изменение которой пропорционально изменению динамического размера. Измеренное значение этой физической величины, преобразованное в электрический сигнал μ_1 , подается на сравнивающее устройство СУ, где сравнивается с сигналом μ_2 поступающим с задатчика ЗУ и

пропорциональным заданному упругому перемещению. Если сигналы μ_1 и μ_2 отличаются один от другого, то на выходе сравнивающего устройства появляется сигнал рассогласования μ_3 , который подается на исполнительный механизм *ИМ* и заставляет его изменять продольную подачу до тех пор, пока рассогласование не уменьшится до допустимого значения.

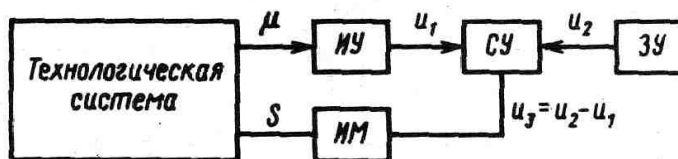


Рис. 49. Схема САУ размером динамической настройки:

ИУ — измерительное устройство; *СУ* — сравнивающее устройство; *ЗУ* — задающее устройство; *ИМ* — исполнительный механизм

Разработана комплексная САУ размерами статической и динамической настройки станков, структурная схема которой приведена на рис. 50 [1]. С помощью динамометрического узла, состоящего из упругого резцедержателя 1 и индуктивного датчика 2, непрерывно измеряется размер динамической настройки. С этого датчика непрерывно поступает информация μ_1 на схемы сравнения *СС1* и *СС2*. На схему *СС1* также поступает сигнал μ_2 от датчика обратной связи 5. Сигнал рассогласования μ_3 усиливается в усилителе *К1* и подается на электродвигатель 3 механизма 4, обеспечивающего регулирование размера статической настройки. На схему *СС2* также поступает сигнал μ_5 от датчика *ЗДУпр*. Сигнал рассогласования μ_6 усиливается усилителем *К2* и подается через ограничитель подачи *ОП* на электромеханический преобразователь следящего золотника *СЗ*. Непрерывное формирование сигнала, соответствующего критерию оптимального значения продольной подачи, происходит в результате наличия двух задатчиков *ЗДУпр*, *ЗДСв* и ограничителя *ОП*.

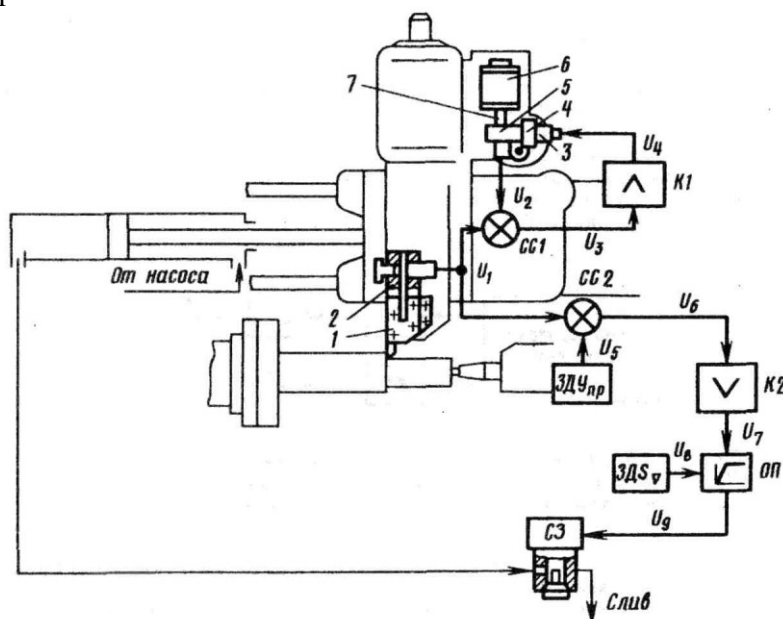


Рис. 50. Структурная схема системы комплексного управления размерами статической и динамической настройки токарного полуавтомата

Перемещения суппорта на малые расстояния осуществляются с помощью реверсивного механизма 4. Датчик обратной связи 5, установленный соосно со следящим гидроусилителем 6, измеряет поднастроечное перемещение суппорта по смещению шупа 7.

Таким образом, система в процессе резания следит за упругим перемещением, внося соответствующие поправки в программу статической настройки, и путем регулирования продольной подачи управляет размером динамической настройки.

А.Д. Макаров [32] и С.С. Силин [50] в качестве критерия регулирования для управления качеством обрабатываемой детали принимают температуру в зоне резания. Исходя из этого, в разработанных САУ процессом обработки в качестве задающего параметра принимают термо-ЭДС, которая может подавать сигнал на изменение условий обработки (рис. 51).

Сигнал, снимаемый с естественной термопары T_e , поступает на вход сравнивающего устройства $СУ$ для сравнения со значением, задаваемым задатчиком 3. Из усилителя $У$ результирующий сигнал (с учетом значения и знака) подается на исполнительный механизм $ИМ$ системы управления и изменяет регулирующие параметры таким образом, чтобы текущее значение термо-ЭДС было равно заданному.

Развитие измерительной и вычислительной техники позволяет перейти к непосредственному измерению параметров качества детали при обработке, что раскрывает новые возможности для САУ процессами резания. Так, на рис. 52 приведено САУ качеством обрабатываемой детали при шлифовании, позволяющая оптимизировать процесс обработки и обеспечить требуемую точность размера и параметры шероховатости поверхности.

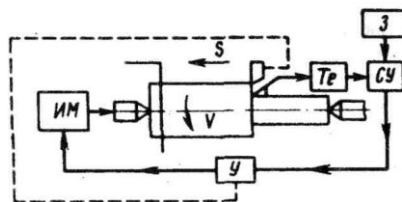


Рис. 51. Схема адаптивной системы управления

Диаметр D , параметр шероховатости R_a заготовки и радиальная составляющая P_y силы резания в виде электрических сигналов поступают в электронные преобразующие устройства ЭПУ, откуда их значения поступают на аналоговый вход вычислительной машины. Сигнал A работы шлифования зависит от скорости изменения измеряемого диаметра заготовки. Вычислительная машина в зависимости от измеренных и вычисленных параметров (R_a , P_y , D и A) оптимизирует значение поперечной подачи $S_{\text{поп}}$, передаваемый в управляющее устройство $УУ$, где она кодируется и поступает в виде электрического сигнала на дискретный электродвигатель $ДЭ$. Сигнал P_y радиальной составляющей силы шлифования также поступает на управляющее устройство для своевременного переключения быстрого подвода круга на рабочую подачу при соприкосновении круга с заготовкой и ее остановки, если радиальная сила шлифования превысит допустимую.

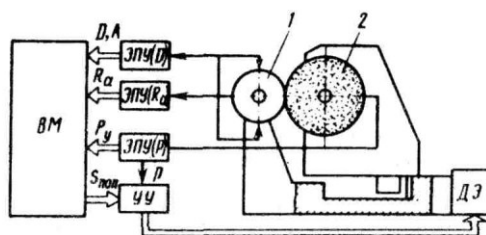


Рис. 52. Система адаптивного управления качеством обрабатываемой детали при шлифовании: 1 — деталь; 2 — шлифовальный круг

2.6.2. Обеспечение качества деталей из труднообрабатываемых материалов

Для обеспечения качества деталей из труднообрабатываемых материалов применяют различные методы, в частности, наложение вибраций, резание с дополнительным механическим или тепловым воздействием, или в специальных технологических средах. Так, наложение вибраций в зависимости от условий обработки обеспечивает повышение стойкости инструмента, точности обработки и уменьшение высотных параметров шероховатости поверхности. Для создания вибраций можно применять различные типы приводов: механический (частота 20—100 Гц); гидромеханический, электрогидравлический и электромагнитный (частота 20—200 Гц); ультразвуковой (частота 20—50 Гц). Принципиальная схема суппорта с механическими колебаниями приведена на рис. 53.

Устройство для создания колебаний монтируют в корпусе, размещенном на резцедержателе. Резец 14 закреплен в резцедержателе 12, вертикальная ось которого размещена в вилке 1, имеющей возможность поворачиваться вокруг своей горизонтальной оси. При рабочем ходе

под воздействием составляющих сил резания P_z и P_x резцедержатель стремится повернуться в горизонтальном и вертикальном направлениях. Эти движения через хвостовик резцедержателя 11 передаются штоку 6 гидроцилиндра 8.

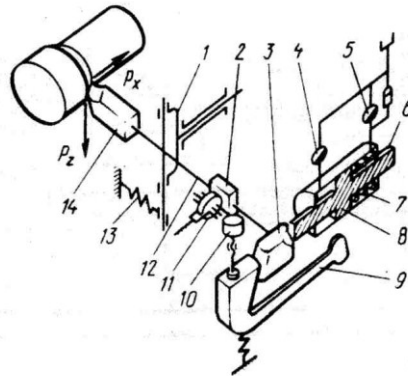


Рис. 53. Суппорт для дробления стружки

Перемещения заканчиваются при расцеплении упора 3 с собачкой 9. С этого момента под действием пружины 7 резец поворачивается вокруг вертикальной оси до соприкосновения планки 2 с роликом 11, а под действием пружины растяжения, резец поворачивается вокруг горизонтальной оси и занимает исходное положение. При этом штоки перемещаются обратно (холостой ход) до контакта с упором 3. Устройство имеет регулировочный винт 10, определяющий положение собачки 9, от которого зависит вибрация резца. Настройкой дросселей 5 и 4 обеспечивается то или иное значение вибрационных перемещений.

Общие показатели эффективности механической обработки с воздействием ультразвуковых колебаний приведены в табл. 4.75. Установка для наружного шлифования с радиальными ультразвуковыми колебаниями, представленные на рис. 54, состоит из пустотелого шпинделя, установленного в подшипниках 10 и 13 и закрепленного гайкой 11.

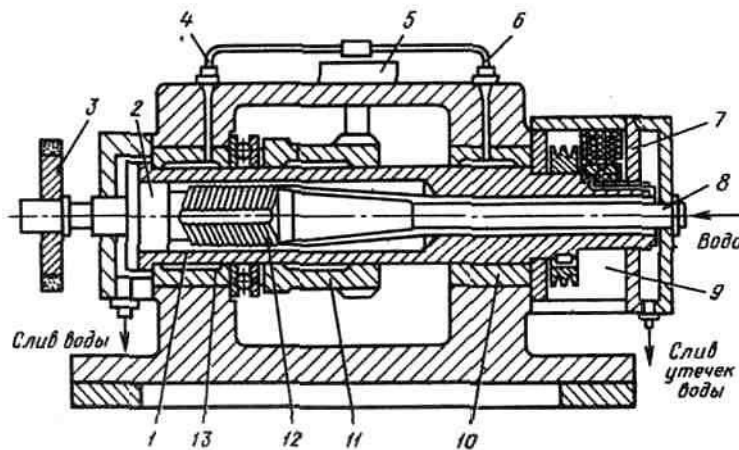


Рис. 54. Устройство для наружного шлифования с ультразвуковыми колебаниями шлифовального круга в радиальном направлении

Шпиндель имеет акустическую систему, состоящую из магнестрикционного преобразователя 12, концентратора 2, на одном конце которого закреплен шлифовальный круг 3, узел электрического питания 7, 9, 8 на охлаждении 5, 4, 6 магнестрикционного преобразователя. Данная установка позволяет обеспечить амплитуду колебаний шлифовального круга 5—6 мкм с частотой 20 Гц. Использование этой установки позволяет избежать прижогов и уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a с 0,32—0,63 до 0,16—0,32 мкм,

Схемы обработки резанием с дополнительным механическим воздействием в виде опережающего пластического деформирования приведены на рис. 55 [42]. Причем, механическое воздействие может передаваться как на обрабатываемую поверхность (рис. 55, а и б), так и на поверхность резания (рис. 55, в). Этот процесс позволяет, в значительной мере, повысить стой-

кость инструмента (табл. 69) и улучшить качество поверхности. Конструкция применяемого при этом инструмента приведена на рис. 56.

Тороидальный ролик 3, опережая резец 1, вращается с помощью обрабатываемой заготовки 2. Сила прижатия ролика к обрабатываемой детали регулируется за счет сжатия пружины 4 гайкой 5. Державку 6 вместе с роликом устанавливают в оправке 8 и крепят в резцедержателе 7 станка. При обработке заготовок из титановых сплавов резание совмещают с тепловым воздействием, которое может осуществляться с помощью плазмы (рис.57) или электрического тока (рис.58).

Таблица 70

Эффективность механической обработки с воздействием ультразвуковых колебаний

Вид обработки	Материал заготовки	Повышение точности обработки, квалитет	Уменьшение параметра шероховатости Ra	Повышение стойкости инструмента
Сверление отверстий диаметром 10 мм	Сталь ШХ15, 12Х18Н9Т	С 12 до 10	В 1,5 раза	В 2,5—3 раза
Зенкерование отверстий диаметром 20 мм	Медь М1, чугун СЧ В2, КЧ38-8, сталь Ст3 и 45	С 11 до 9	В 2—3 раза	В 1,6—1,7 раза
Развертывание отверстий диаметром 20 мм	Сталь 45, 12Х18Н9Т, 18Х24А	С 8 до 6	В 1,5 раза	В 1,5—1,6 раза
Резьбонарезание в отверстиях диаметром 16 мм	Медь М1, чугун СЧ 15, КЧ 38-8, сталь ШХ15	В пределах одного квалитета	В 2—3 раза	В 1,5—3,0 раза
Сверление и развертывание отверстий диаметром 2,3 мм	ЗОХГСА (НКС 36—39)	С 11 до 8	В 3—4 раза	В 2,0—2,8 раза
Зубодолбление $z=22$, $m=0,3$ мм	ЗОХГСА	На два квалитета	В 3—4 раза	В 2,0—2,8 раза

Таблица 71

Повышение стойкости резца при обработке с опережающим пластическим деформированием по сравнению со стойкостью резца при обычной обработке ($T = 0,25$ мм)

Материал заготовки	V м/мин	S, мм/об	Сила накатывания, Н	Повышение стойкости
12Х18НЮТ	20	0,15	1500	В 4,5—5 раз
40ХСШ	30	0,26	1500	В 2,5—3 раза
ЖС6-К	10,5	0,15	2000	В 2—2,5 раза

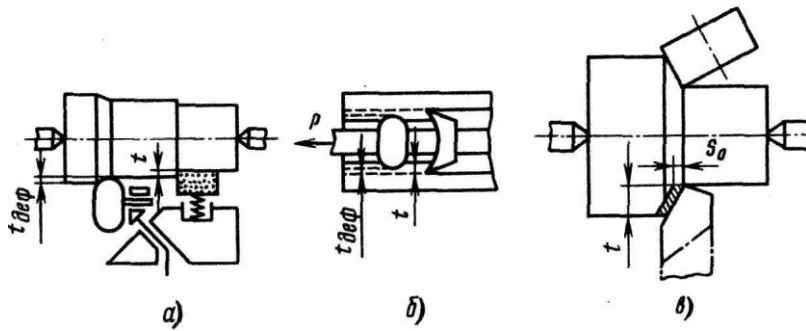


Рис. 55. Комбинированный процесс резания с опережающим пластически рованием: а — шлифование; б — протягивание; в — точение

При плазменном подогреве заготовки 1 (см. рис. 57) используют горелку 4, что значительно облегчает процесс резанья резцом 2 или абразивным кругом 3. Снятый металл попадает в ванну 5. Для электрического нагрева заготовки 2 (см. рис. 58) применяют ток промышленной частоты напряжением 220 В, который через шаговый понижающий трансформатор 5 и резистор 3 с помощью щеток специального устройства 4 пропускают через обрабатываемую заготовку. Сила тока регулируется в пределах 50 — 1000 А с помощью автотрансформатора 6.

Рекомендуемые температуры нагрева и скорость резания при обработке заготовок из титановых сплавов приведены в табл. 72

Для улучшения качества заготовок из труднообрабатываемых материалов при резании быстрорежущими резцами применяют различные СОЖ, эффективность действия которых зависит от состава и способа подачи в зону резания. СОЖ должны обладать охлаждающими, смазочными, диспергирующими и моющими свойствами. В производстве такие среды обычно приготавливают из нескольких жидкостей, обладающих перечисленными свойствами. Вода обладает необходимыми охлаждающими свойствами; масла, жиры — наибольшими смазывающими способностями; керосин, дизельное топливо, четыреххлористый углерод обладает наибольшими смачивающими свойствами; жирные кислоты способствуют созданию наиболее прочных пленок. Если в масла и жиры ввести в виде добавки такие вещества, как хлор, серу, фосфор, графит, парафин, олеиновую или стеариновую кислоту или порошки меди, свинца, дисульфида молибдена, то их свойства будут значительно улучшены.

При подборе состава СОЖ следует учитывать специфические особенности операций, например, при протягивании и развертывании добавка в СОЖ небольшого количества жидкого стекла значительно улучшает процесс резания и уменьшает высотные параметры шероховатости поверхности. При хонинговании значительно улучшается качество обработки, если в СОЖ добавить керосин и парафин.

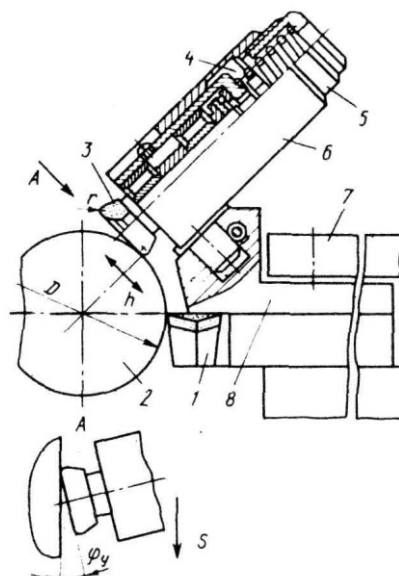


Рис. 56. Ротационный комбинированный инструмент для обработки вала

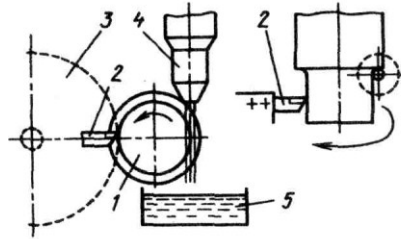


Рис. 57. Точение с плазменным нагревом

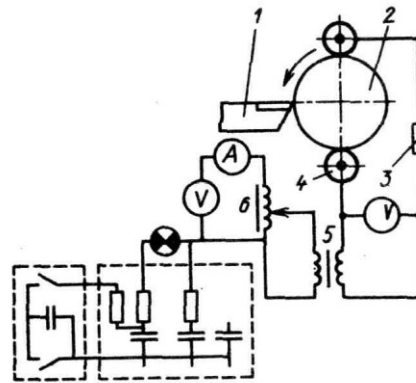


Рис. 58. Точение с пропусканием электрического тока через зону резания

Таблица 72

Оптимальная температура нагрева и скорость резания при чистовом точении заготовок из титановых сплавов

Материал заготовки	Твердость HRC	Температура предварительного нагрева заготовки, °C	Скорость резания, м/мин
BT5	28	300	125
BT20	30	350	125
BT14	37	450	100
BT22	38	500	100

При резании используют различные способы применения СОЖ: свободный полив, обильный полив, полив под давлением, обильный полив под давлением, распыление, резцы с внутренним охлаждением, подача через поры шлифовальных кругов, обработка в среде СОЖ и газовых средах. Эффективность применения СОЖ в зависимости от статического давления при резании различных материалов в баровакуумных камерах наглядно видна из табл. 73 и 74.

Влияние газовой среды на параметры шероховатости и поверхностную микротвердость обрабатываемых заготовок приведено на рис. 59.

Таблица 73

Стойкость резцов при точении в баровакуумной камере

СОЖ	Материал инструмента материал заготовки	Скорость резания, м/мин	Стойкость, мин	
			При давлении 0,1, МПа	при давлении 5 МПа
Масло индустриальное 20	P18—40X	67	10,8	67
	P18—12X18H9T	27	4,0	31
	P18—XH60BT 13	13	1,8	9

Сульфозфрезол	P18—12X18H9T	27	4,6	36
	P18—40X	67	8,5	5,7
	P18—XH60BT	12,2	1,2	11,8
Вода	P18-40X	5	150	5
	P18—40X	67	8	3,2
5%-й ЭТ-2	P18-40X	67	11,2	6,8
	P18—XH60BT	11,6	3,6	13
	T15K6—40X	250	56	99
	BK8—XH60BT	60	34,5	95,5

Таблица 74

Стойкость сверл при обработке в баровакуумной камере

Материал заготовки	Диаметр сверла, мм	Глубина отверстия, мм	СОЖ	V, м/мин	S, мм/об	Увеличение стойкости* при давлении, МПа		
						0,5	3	5
12X18H9T	3,0	5	Сульфозфрезол	9,4	0,1	5,3	9,7	13
12X18H9T	3,0	5	НГЛ-205	9,4	0,1	3,9	7	9,6
12X18H9T	5,2	5	Сульфозфрезол	11,6	0,1	3,1	6,6	9,2
12X18H9T	8,8	5	“	11,7	0,14	2,15	3,6	7,0
40X (HRC ₃ 24...28)	3,7	7,5	“	8,25	0,1	—	—	7,0
25X2H4BA	2,9	3,5	“	9,1	0,1	—	—	5,5
Сталь 45	3,0	5	Э-2	18,8	0,1	2,5	4,25	5,2
35X3HM (HRC ₃ 30)	9,0	5	НГЛ-205	9,9	0,28	—	—	4

*Увеличение стойкости дано в сравнении со стойкостью, получаемой при подаче СОЖ поливом

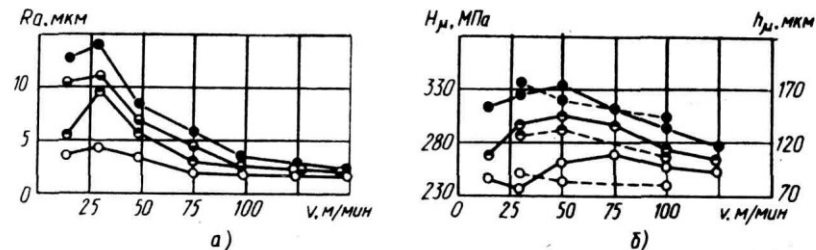


Рис. 59. Влияние газовой среды на параметр шероховатости (а) и микротвердость (б) поверхности заготовки из стали 20; материал инструмента Т5К10: О—кислород; б — воздух; в — азот; • — аргон; сплошные линии — H μ , штриховые - - h μ

2.6.3. Обеспечение качества при обработке резанием ответственных деталей

Поскольку существует бесчисленное множество различных деталей, разрабатывать методы повышения качества в ходе технологического процесса для каждой из них невозможно. Проблема технологического обеспечения показателей качества решается на базе разработки типовых технологических процессов. Такой подход оказывается правомерным и полезным, поскольку можно выбрать единые технологические решения для деталей каждого типа вне их связи с конкретной отраслью производства. Возникает понятие о типовой детали и типовом технологическом процессе. Типовой процесс является той основой повышения качества деталей, на которой можно реализовывать различные методы обработки с учетом эксплуатационных особенностей деталей. Валы, работающие на кручение, и валы, работающие в условиях изгиба знакопеременной нагрузкой, могут иметь одинаковые технологические маршруты обработки. Вместе с тем, должны быть учтены наследственные явления и особенности проведения финишных операций, которые могут весьма существенно отличаться в обоих случаях друг от друга. Так

валы, работающие на выносливость, должны иметь специфическую шероховатость поверхности, термообработку и пр.

Задача повышения качества машин должна решаться путем повышения качества всех деталей, однако это требование не может быть распространено на все детали в равной степени. Существуют детали, которые в наибольшей степени определяют качество всей машины. Для основных деталей достигнуты весьма высокие показатели геометрической точности.

Широко распространены детали типа валов. Становится вполне возможным в производственных условиях достигать отклонения от круглости порядка 1 мкм, отклонения от цилиндричности 0,5—1,0 мкм, точности размера по диаметру 10 мкм, отклонения от соосности отдельных шеек 2—3 мкм. Параметры шероховатости поверхности по среднему арифметическому отклонению профиля составляет порядка 0,08 мкм. Такие значения достигаются применением жестких и точных станков с использованием специфических методов обработки и высокоточных измерительных устройств.

Параметры качества деталей типа валов тесно связаны с качеством заготовок. Даже для типового технологического процесса необходимо учитывать, что пространственные отклонения, например, валов после чернового прохода составляют 0,06 отклонения заготовки, а после чистового прохода — 0,04 отклонения, возникшего после чернового прохода. Эти данные могут несколько меняться в зависимости от жесткости технологических систем. Нельзя пространственные погрешности исправлять исключительно на финишных операциях. Более того, при многопроходном шлифовании валов с постоянной подачей исходная погрешность, оставшаяся после обработки лезвийным инструментом, постоянно увеличивается, так как постоянно увеличивается разность между заданной и фактической глубиной резания. Для постоянного уменьшения погрешностей следует при каждом последующем ходе уменьшать подачу на глубину.

При бесцентровом шлифовании наиболее часто приходится исправлять отклонения формы в виде наследственных трех- и пятигранников, что обеспечивается рациональной наладкой станков. Поэтому для обеспечения высоких требований по отклонениям формы нельзя при одной и той же наладке станка шлифовать заготовки овальной и пятигранной исходной формы поверхности (отклонения формы устанавливаются с помощью кругломеров). Анализ наладок станков очень удобно проводить с помощью рядов Фурье.

Как правило, валы обрабатывают в центрах. При этом на отклонение формы обрабатываемой поверхности существенное влияние оказывает состояние контакта «центр—центровое отверстие» и изменение жесткости по углу поворота. Возникающая при этом погрешность формы является устойчивой. Мерами борьбы с такой погрешностью является использование центровых отверстий с криволинейными образующими и специальных центров (рис. 4.60), обеспечение необходимого соотношения углов центровых отверстий и центров, повышение точности формы центровых отверстий. Хорошие результаты дает шлифование центровых отверстий, а также их правка гранеными твердосплавными центрами с числом граней 3 или 5. Указанные на рис. 60 соединения также могут компенсировать некоторую несоосность центров металлорежущих станков.

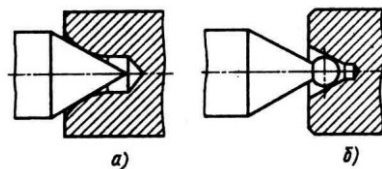


Рис. 60. Соединение «центр—центровое отверстие»:

а — с криволинейными образующими центрового отверстия; б — со сферическим центром

Проблема уменьшения отклонений формы оказывается очень сложной. Финишные операции не всегда могут уменьшить погрешности, возникшие на предшествующих операциях и переходах. При суперфинишировании, например, одновременно тремя абразивами отклонение формы заготовки, предварительно обработанной на бесцентровошлифовальном станке и имевшей 18 выступов, через 20 с работы уменьшается в несколько раз, а имевший три выступа через

то же время в несколько раз увеличивается. Решить задачу уменьшения погрешностей помогает гармонический анализ.

Большую группу составляют детали типа колец, втулок и гильз. Для деталей в виде гильз отклонение от цилиндричности наружной поверхности может достигать 2—3 мкм, а внутренней под подшипники 2 мкм. Важное значение имеет биение двух указанных поверхностей. Оно может достигать 2—3 мкм. Отклонение от соосности отверстий под подшипники в гильзах может быть обеспечено в пределах 3 мкм. И в этом случае достижение в производственных условиях высоких показателей качества может быть рассмотрено как своеобразная технологическая надстройка над основой в виде типового процесса обработки деталей.

Типовые технологические процессы изготовления колец, втулок и гильз схожи между собой. Указанные детали отличаются друг от друга соотношением размеров, но основной технологической трудностью изготовления всех этих деталей является обеспечение малых отклонений формы наружных и внутренних поверхностей, малых отклонений от цилиндричности, биению поверхностей. Преодоление этих трудностей на фоне типовой технологии представляет собой основу повышения качества деталей.

Конструктивные элементы деталей в виде лысок, отверстий, пазов и т.д. в ходе обработки порождают отклонения формы на ответственных поверхностях. Если например, обрабатывают гальзу, на цилиндрической поверхности которой имеется шейка или лыска, то при вращении гильзы и постоянной радиальной силе P_y резания (рис. 61, а) упругие перемещения ее в каждый момент (фазы I—IV) окажутся различными (рис. 61, б). Этот эффект будет действовать вне зависимости от качества станка и инструмента. На заготовке возникнут отклонения формы определенным образом связанные с расположением шейки. Такие отклонения следует преодолевать на основе расчета возникающих упругих перемещений обрабатываемой заготовки под действием силы резания. Последние выбирают исходя из того, что перемещения должны быть меньше допуска на отклонение формы [12].

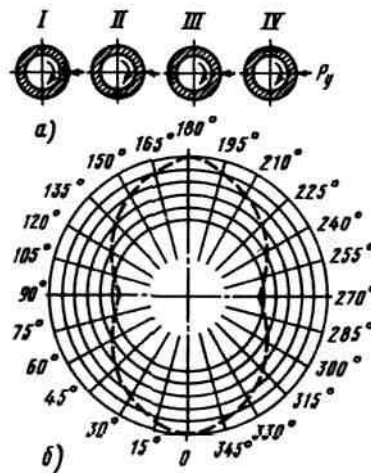


Рис. 61. Схема возникновения погрешностей при обработке гильз:

а — фазы обработки; б — круглограмма наружной поверхности обработанной гальзы

При изготовлении деталей типа тонкостенных колец необходимо учитывать эффект технологического наследования. Заготовки колец, как правило, имеют отклонения формы наружной поверхности в виде овала. Закрепление по овальной поверхности колец в патронах токарных полуавтоматов приводит к переносу овальности на отверстие упругих колец. Стремление обработать отверстия колец с высокой точностью в итоге оказывается безрезультатным, так как при раскреплении колец их отверстия снова получают овальность. Указанная погрешность оказывается исключительно устойчивой, и для высокоточных колец необходимо ограничивать отклонения формы заготовок, а также использовать зажимные устройства с приложением сил закрепления по торцам, а не в радиальном направлении.

Проблема обеспечения качества деталей типа колец, втулок и гильз непосредственно связана с особенностями закрепления их при обработке резанием. Наружная установочная поверхность всегда имеет отклонения формы. Даже при закреплении заготовок распределенными

нагрузками передача погрешностей с наружной поверхности на внутреннюю оказывается ощутимой. Например, у втулок с диаметром наружной поверхности 30 мм, диаметром отверстия 16 мм и длиной 25 мм, установленных в зажимном приспособлении для растачивания, погрешности наружной поверхности переносятся на отверстие с коэффициентом (в среднем) 0,5, а число граней установочной поверхности переносится полностью. Поэтому крайне важно обеспечить расчетные отклонения формы установочных поверхностей, в том числе для торцовых поверхностей гильз, так как закрепление по торцам, имеющим отклонение от плоскостности, приводит к искажениям цилиндрических наружных поверхностей.

Разнообразие методов обработки заготовок указанных деталей, различные сочетания силовых и тепловых факторов воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность, приводят к возникновению остаточных тангенциальных напряжений различных по значению и знаку. Даже в рамках одного метода обработки напряжения существенно изменяются. Так, при тонком точении они изменяются до 3,3 раза, при тонком шлифовании до 6 раз, при суперфинишировании до 2 раз, при виброобкатывании также до 2 раз, что следует учитывать при технологическом формировании качества деталей.

Вопрос о напряжениях непосредственно связан с отклонениями формы поверхностей колец, втулок и гильз. Реальные поверхности всегда имеют волнистость (гранность). После токарной обработки заготовок диаметром 50—80 мм под такой поверхностью возникает слой со структурой, отличной от структуры основного материала. Глубина этого слоя составляет 25—50 мкм. После термической обработки на операции шлифования можно добиться очень малых отклонений формы. Однако на глубине 10—12 мкм от поверхности шлифованного образца располагается пояс аустенитных зерен. Толщина этого пояса оказывается различной и периодически повторяющейся в соответствии с расположениями тех волн, которые имелись на заготовке до шлифования. С течением времени нестабильный по структуре слой аустенита превращается в мартенсит. При этом, естественно, изменяется (увеличивается) объем материала. В тех местах, где слой аустенита был шире, происходит большее изменение объема (увеличение) и наоборот. Поэтому деталь, имевшая после шлифования весьма малые отклонения формы, получает наследственную волнистость с числом волн, равным их числу после токарной обработки.

Для уменьшения технологическими методами отклонений формы необходимо рассматриваемую поверхность обработать дополнительно методами, создающими сжимающие напряжения, так как они замедляют процесс превращения аустенита в мартенсит. Одним из таких методов является алмазное выглаживание. В результате такой обработки отклонение формы за один и тот же промежуток времени оказывается почти в 3 раза меньшим, чем после шлифования эльбором. Одновременно следует уменьшить волнистость поверхностей после токарной обработки, а если этого допускает деталь — применить стабилизацию, т.е. выдержку в нагретом состоянии в течение заданного времени. Мероприятия указанного типа способствуют стабилизации выгодных параметров качества при изготовлении деталей и сохранению этих качеств во времени.

Корпусные детали имеют две группы ответственных поверхностей, определяющих качественные показатели: отверстия под подшипники и плоские направляющие поверхности. Отклонение от параллельности осей главных отверстий и направляющих поверхностей может составлять около 3 мкм. Отклонение от прямолинейности и параллельности направляющих поверхностей (средняя длина до 1000 мм) 3 мкм, отклонение от цилиндричности главных отверстий корпусов может быть достигнуто порядка 3 мкм. Такое же значение характерно и для отклонения от прямолинейности осей отверстий.

Типовой технологический процесс изготовления ответственных корпусных деталей предусматривает проведение фрезерных операций только для обдирки перед старением, а на последующих операциях — строгание. Отверстия растачивают на базе предварительно обработанных направляющих поверхностей. Главные отверстия обрабатывают хонингованием или доводкой несколькими притирами. Часто эти операции производят после сборки корпусных деталей с некоторыми сопряженными деталями для создания реальной деформационной картины функционирования готового изделия. Алмазное растачивание и хонингование проводят при

вертикальном расположении оси главного отверстия. На базе указанных типовых технологических приемов возможно дальнейшее повышение качества корпусных деталей.

Конструктивные формы корпусных деталей непосредственно влияют на теплоотвод при растачивании основных отверстий. Он, как правило, приводит к отклонению от соосности. Местный нагрев корпусных деталей вызывает упругий поворот их отдельных элементов и формирование погрешностей. Последовательное растачивание дает более низкие показатели качества, чем одновременное. Наилучшие результаты получены при одновременном растачивании симметричных частей корпусов.

Особенно ощутимо технологическое воздействие на материал корпусных деталей. Установлены количественные соотношения показателей качества деталей и физико-механических, а также химических характеристик материала. Изнашивание корпусов из чугунов одного и того же химического состава, но с различными расстояниями между графитовыми включениями, существенно отличается друг от друга. Следовательно, износом можно управлять, назначая способ получения заготовок и последующую, термическую обработку.

Процессом коробления следует управлять на начальных стадиях технологического процесса за счет изменения химического состава чугунов и рационального конструирования литых деталей. Равновесное состояние отливок в свою очередь нарушается при обработке резанием, вследствие чего возникают дополнительные деформации. Например, после черновой обработки одной из корпусных деталей длиной 400 мм возникает прогиб в 0,1 мм. Наиболее эффективный способ борьбы с короблением — регулирование процесса охлаждения отливок, а также процесс низкотемпературного отжига в печах в течение заданного времени. Из сказанного следует, что в современном производстве не удастся выделить чисто механосборочный передел. Его надо рассматривать в совокупности со всеми этапами производства.

В ходе обработки корпусных деталей возникает опасность искажения формы главных отверстий при закреплении заготовок на металлорежущих станках. Искажения непосредственно связаны с конструкцией детали, но могут быть так велики, что на финишных операциях не поддаются исправлению. Для технологического обеспечения качества корпусных деталей в связи с использованием технологической оснастки необходима экспериментальная отработка в условиях заводских лабораторий схемы закрепления с указанием сил закрепления и координат их приложения. Существенной ошибкой при закреплении корпусных деталей являются последовательный ввод в работу нескольких зажимов. В этом случае возникает неблагоприятная деформационная картина закрепления, несмотря на кажущееся обеспечение заданных сил и координат их приложения. Необходимо одновременное закрепление во многих местах, предназначенных для приложения сил. Примером может быть зажимное устройство, у которого при вращении рукоятки перемещается поршень гидравлического устройства и давление рабочей жидкости одновременно передается по трубопроводам к зонам закрепления корпусной детали.

Наивысшую точность обеспечивает схема закрепления, соответствующая схеме закрепления корпуса после сборки его в готовой машине. При этом указанную схему нужно применять не только на финишных операциях, но и на многих предшествующих.

Наиболее ответственной является операция растачивания. Причинами возникновения погрешностей следует считать переменную глубину резания из-за наследственных погрешностей формы, смещение оси расточной оправки относительно оси растачиваемого отверстия и переменную жесткость по углу поворота и вылету шпиндельного узла расточного станка. В настоящее время разработаны специальные устройства, позволяющие сравнивать жесткость технологических систем, а также производить более точную настройку станков. Требования же наименьших отклонений формы должны быть указаны для всех технологических операций, а не только для финишных. Отклонения от прямолинейности образующих, а также отклонения формы (отклонения от цилиндричности) можно прогнозировать расчетом.

2.7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Применение пластического деформирования материала позволяет снизить материалоемкость и повысить надежность и долговечность изделий наряду с получением заготовок пластическим деформированием (ковка, штамповка, прокатка, выдавливание) (рис. 62). В зависимости от назначения метода и пластических деформаций все эти методы можно разделить на три класса:

- 1) отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием;
- 2) формообразующая обработка пластическим деформированием;
- 3) отделочно-упрочняющая обработка пластическим деформированием.

К первому классу относятся все методы обработки заготовок, связанные с пластическим деформированием только их поверхностных слоев и практически не изменяющие исходную точность размеров.

Это накатывание, обкатывание, раскатывание, выглаживание, виброобработка, динамическое упрочнение, электромеханическая и комбинированная обработка различных поверхностей деталей машин. Причем, в зависимости от функционального назначения изделия за счет изменения рабочего давления обработку можно производить на отделочных, упрочняющих и промежуточных отделочно-упрочняющих режимах.

Отделочная обработка осуществляется при небольших рабочих давлениях $p \leq 1,5\sigma_T$ и позволяет улучшить несущую способность исходной шероховатости поверхности (увеличить t_{10} с 1 — 2 до 15 — 20%). При этом особенно ярко проявляется технологическая наследственность [60]. Упрочняющую обработку производят при $p \geq \sigma_T$, при этом значительно повышается степень ($U_n = 180\%$) и глубина упрочнения.

Обработка на промежуточных отделочно-упрочняющих режимах ($1,5\sigma_T < p < 3\sigma_T$) позволяет улучшить несущую способность параметров шероховатости и волнистости и повысить исходную поверхностную микротвердость на небольшую глубину, т.е. комплексно повысить несущую способность поверхностного слоя (уменьшить комплексный параметр C_x в 10 — 20 раз).

Во втором классе предусмотрены методы обработки заготовок, формирующие форму и размеры отдельных их элементов пластическим деформированием (накатывание зубьев, шлицев, резьб, фасонных поверхностей). Дальнейшим их развитием является создание так называемых гладкорезьбовых соединений (резьбовая шпилька вворачивается в гладкое отверстие). Эта обработка осуществляется при $p \geq 3\sigma_T$ и ее можно применять для заготовок из материалов, обладающих достаточной пластичностью.

К третьему классу относятся методы, осуществляющие отделочно-упрочняющую обработку поверхности без изменения ее формы при пластическом деформировании практически всей заготовки (калибрование наружных и внутренних поверхностей вращения и дорнование). Дальнейшим развитием этих методов является одновременная обработка с запрессовкой. Достоинством этих методов обработки является то, что они наряду с улучшением состояния поверхностного слоя позволяют повысить точность размера.

Все методы обработки заготовок пластическим деформированием имеют широкие возможности в управлении параметрами состояния поверхностного слоя деталей машин, а следовательно и их эксплуатационными свойствами. Однако их применение для этих целей требует грамотного и правильного подхода, так как каждый из этих методов имеет вполне определенные экономически целесообразные области применения (табл. 75) [54,57].

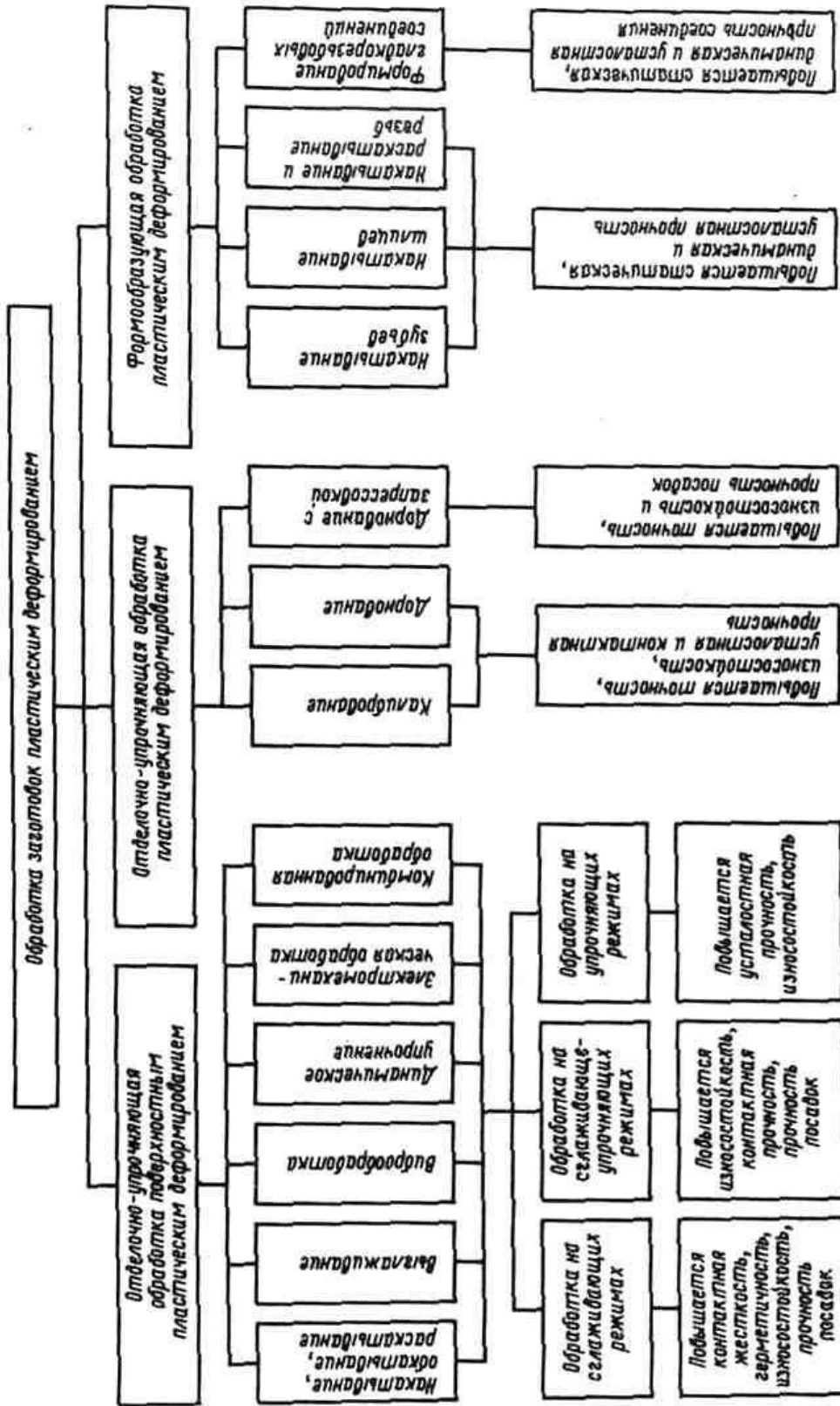


Рис. 62. Классификация методов обработки заготовок пластическим деформированием.

4.80. Области применения методов обработки заготовок пластическим деформированием

Метод обработки	Область применения	Назначение	Улучшающие эксплуатационные свойства
1	2	3	4
Плоские поверхности			
Накатывание роликами и шариками	Прямолинейные направляющие и торцовые поверхности (направляющие тяжелых станков и металлургического оборудования, медные плиты кристаллизаторов установок непрерывной разливки стали)	Отделка	Износостойкость, контактная жесткость
Обкатывание многошариковыми торцовыми жесткими и упругими головками	Прямолинейные направляющие тяжелых станков и металлургического оборудования; накладные отделочные рейки в строительстве	Отделка	Износостойкость, контактная жесткость, внешний вид
Вибронакатывание одно- и многошариковыми головками	Прямолинейные направляющие станков и оборудования; накладные отделочные планки в строительстве; торцовые поверхности дисков, подпятников	Отделка	Износостойкость, контактная жесткость, внешний вид
Дробеструйная	Направляющие станков и оборудования, рессоры	Предварительная обработка	Износостойкость, коробление, усталостная прочность
Инструментом центробежно-ударного действия	Прямолинейные и торцовые поверхности станков, оборудования, авиационной техники, рессоры и др.	Упрочнение	Износостойкость, усталостная прочность
Алмазное выглаживание и вибровыглаживание	Торцовые поверхности фланцев, распределителей и блоков гидромашин, дисков компрессора ГТД, деталей запорной арматуры и др.	Отделка, упрочнение	Износостойкость, герметичность, контактная жесткость и прочность, фреттинг-стойкость
Электромеханическая роликами и многошариковыми и роликовыми торцовыми головками	Прямолинейные направляющие качения, станков и оборудования, торцовые рабочие поверхности фланцев, вырубных пуансонов, матриц, колец упорных конических подшипников	То же	То же
Формообразование обкатыванием жестким многошариковым обкат-	Прямолинейные направляющие станков и оборудования, платформы швейных машин и др.	Отделка, упрочнение, калибрование	Износостойкость, герметичность, контактная жест-

ником			кость
Комбинированная фрезами и накатками	Прямолинейные направляющие станков и оборудования, платформы швейных машин и др.	Отделка	Износостойкость, внешний вид
Наружные поверхности вращения			
Обкатывание однороликовым обкатником	Жесткие оси, валы гладкие и ступенчатые, штоки, шейки коленчатых валов судовых дизелей, вал дробящего конуса конусной дробилки, опасная зона штока штамповочного молота, рабочие поверхности осей вагонных и локомотивных колесных пар и др.	Отделка упрочнение	Износостойкость, прочность посадок, усталостная прочность
Обкатывание двухроликовым обкатником	Маложесткие оси, валы и штоки (вытяжной инструмент, шток гидроамортизатора, вал ротора нагнетателя, ось центрифуги, шестерня привода, крестовина карданного вала, кулачковые валы)	То же	Износостойкость, усталостная прочность
Обкатывание трехроликовыми упругими обкатками	Жесткие и маложесткие оси, валы, трубы и штоки гладкие и ступенчатые (торсионные и фланцевые валы автомобилей, штоки гидроцилиндров дорожных машин, оси колесных пар вагонов и локомотивов, трансмиссионные валы прокатных станов)	“	Износостойкость, усталостная прочность, прочность посадок
Обкатывание многошариковыми обкатниками	Нежесткие гладкие оси, валы, штоки и трубы, ось центрифуги	Отделка , упрочнение, калибрование	Износостойкость, усталостная прочность
Обкатывание жесткими и дифференциальными многороликовыми обкатниками	Нежесткие оси, штоки, валы гладкие и ступенчатые, длинные штоки гидроцилиндров	Упрочнение, калибрование	Усталостная прочность, износостойкость, контактная прочность
Обкатывание между роликами	Небольшие маложесткие оси и валики	Калибрование, упрочнение	Износостойкость, фреттинг-стойкость, контактная и усталостная прочность
Виброобкатывание	Оси, штоки, валы и трубы гладкие и ступенчатые (шток гидроцилиндра, прецизионные цилиндрические направляющие, плунжер, направляющая барабана видеомэганитофона, прокатные валки, каретка направляющая, калибр-пробка, поверхности валов под уплотнения, поршни, шарниры, вальцы и др.)	Отделка, в том числе декоративная, упрочнение	Износостойкость, контактная и усталостная прочность, внешний вид, отражательная способность
Алмазное выгла-	Маложесткие оси, валы, штоки и трубы	Отделка, в	Износостой-

живание и вибровыглаживание	гладкие и ступенчатые (штоки гидроцилиндров и амортизаторов, поверхности валов под уплотнения, золотники распределительных устройств, плунжеры гидросистем, кулачковый вал, поршневые кольца, поршни, прокатные валки, ролики подшипников качения, шаровые опоры и крестовины карданных валов, вал водяного насоса и ротора нагнетателя, шарнирные пальцы, пробки, штоки бурового насоса и др.)	том числе декоративная, упрочнение	кость, контактная прочность, фреттинг-стойкость, внешний вид, отражательная способность
Дробеструйная	Крупногабаритные оси и валы	Предварительная обработка, снятие остаточных напряжений	Износостойкость, коробление, усталостная прочность
Инструментом центробежно-ударного действия	Жесткие оси, валы гладкие и ступенчатые (крестовины, пальцы траков, штоки амортизаторов и оси шасси самолетов и вертолетов, крупногабаритные поршневые кольца)	Отделка, упрочнение и снятие остаточных напряжений	Усталостная прочность
Электро механическая	Маложесткие оси, валы, трубы и штоки, штоки гидроцилиндров, поворотные кулаки автомобиля, вытяжные пуансоны, поршневые пальцы, опорные шейки валов под подшипники, крестовина, валики ресорных подвесок, втулки и пальцы траков, поршневые кольца	Отделка, упрочнение	Износостойкость
Формообразующая калибрующая	Малобагабаритные цилиндрические детали (поршневые пальцы)	Упрочнение, калибрование	Износостойкость, усталостная прочность
Комбинированная	Оси, валы и штоки (поршни тормозного цилиндра и валов комбайнов, штоки гидроцилиндров, плунжер, оси колесных пар)	Отделка, упрочнение	Износостойкость, усталостная прочность посадок

Внутренние поверхности вращения

Раскатывание одношариковым раскатным устройством	Для отверстий большого диаметра, малой и средней длины (втулки подшипников скольжения, корпус пневмопривода)	Отделка упрочнение	Износостойкость
Раскатывание многошариковым раскатником упругого действия	Для отверстий среднего диаметра и длины (цилиндры поршневых насосов и гидрозажимов)	То же	“
Раскатывание многошариковым жестким раскатником	Для отверстий $d > 20$ мм средней длины (гидравлические цилиндры автопогрузчиков)	Упрочнение, калибрование	Износостойкость, герметичность
Раскатывание одно-	Для отверстий большого диаметра, сред-	Отделка	Износостой-

роликовым раскатным устройством	ней и большой длины (станина, рабочей клетки промывочного стана трубопрокатного агрегата)		кость
Раскатывание многороликовым раскатником упругого действия	Для отверстий среднего диаметра и неограниченной длины (гидроцилиндры, гильзы двигателей)	“	“
Раскатывание многороликовым жестким раскатником	Для отверстий $d > 20$ мм и неограниченной длины (гидроцилиндры, гильзы)	Отделка, упрочнение	Износостойкость, герметичность
Раскатывание с запрессовкой	Для тонкостенных втулок	Упрочнение, запрессовка, калибрование	Износостойкость, прочность посадок
Калибрование шариками	Для отверстий малого диаметра и малой длины (отверстия проушин)	Упрочнение, калибрование	Износостойкость, контактная прочность
Прошивка выглаживающими прошивками	Для отверстий $d < 100$ мм и малой длины ($l < 50$ мм) (втулки подшипников скольжения, поршневые пальцы, корпус распылителя, гильза плунжера, седло нагнетательного клапана)	То же	Износостойкость
Дорнование	Для отверстий $d < 200$ мм и неограниченной длины (гильзы гидроцилиндров, пневмоцилиндров и двигателей, втулки накатных роликов, вариаторов и траков, цилиндры грязевых насосов, амортизаторов, волноводы, несущая труба трактора К-70, крышка чугунного корпуса шприца и т.д.)	Отделка, упрочнение, калибрование	Износостойкость, герметичность
Дорнование с запрессовкой	Для запрессованных втулок подшипников скольжения	Упрочнение, запрессовка, калибрование	Износостойкость, герметичность, прочность посадок
Алмазное выглаживание и вибровыглаживание	Для отверстий различных диаметров и небольшой длины (втулки и вкладыши подшипников скольжения, крышка маслососа, шестерня промежуточная, крышка лабиринта корпуса подшипника, отверстие шатуна, передний гидроцилиндр, диск компрессора)	Отделка, упрочнение	То же
Виброраскатывание	Для отверстий $d > 20$ мм и неограниченной длины (гильзы двигателей МЧ12, ЗИЛ-130, МЗ-236, корпус пневмопривода, станок арматуры, втулки гидropередач, втулки шарнирных соединений)	То же	“
Инструментом центробежно-ударного действия	Для отверстий $d > 70$ мм и неограниченной длины (барабаны, гидроцилиндры летательных аппаратов, втулки	Упрочнение	Износостойкость, контактная и

	лонжеронов)		усталостная прочность
Электромеханическое раскатывание	Для отверстий $d > 50$ мм и неограниченной длины (цилиндры двигателей внутреннего сгорания УД-2, гильзы гидроцилиндров, блок цилиндров автомобиля ГАЗ-51)	Отделка, упрочнение	Износостойкость
Комбинированная протяжками - дорнами	Для отверстий $d < 200$ мм и неограниченной длины (гидроцилиндры, волноводы втулки траков, цилиндрические гильзы и кольца, шестерни, звездочки, ступицы)	Формообразование, отделка, упрочнение	“
Комбинированная (растачивание+ раскатывание)	Для отверстий $d > 50$ мм и неограниченной длины (корпус редуктора, цилиндры, гидроцилиндры, отверстия под поворотный кулак)	То же	“
Комбинированная ротационным инструментом	Для отверстий $d > 100$ мм и неограниченной длины (гидроцилиндры)	“	“

Фасонные поверхности

Обкатывание, выглаживание, ЭМО галтелей и сферических канавок	Галтели $r > 1$ мм (валы, штоки, плунжеры, торсионы, оси колесных пар)	Отделка, упрочнение	Усталостная прочность, износостойкость
Дробеструйная центробежно-ударная обработка галтелей и сферических канавок	Галтели валов $r > 2$ мм (валы, плунжеры, лонжероны, ось шасси вертолетов и самолетов)	Упрочнение	Усталостная прочность
Обкатывание, виброобкачивание, выглаживание, дробеструйная и центробежно-ударная обработка, ЭМО: сферических и фасонных поверхностей вращения	Сферические и фасонные поверхности тел вращения $d > 10$ мм и неограниченной длины (сфера шарнирного пальца и дифференциалы, сферическая опора гироскопов, стабилизаторов, пружины)	Отделка, упрочнение	Износостойкость, контактная прочность
неосесимметричных фасонных поверхностей	Лопатки и сопла турбин, лопасти вертолетов, самолетов, траки	Отделка, упрочнение, снятие остаточных напряжений	Износостойкость, усталостная прочность
Формообразующее обкатывание	Сферические и фасонные поверхности вращения $d < 50$ мм и $l < 80$ мм	Формообразование, упрочнение, отделка	То же
Формообразующее	Детали типа тонкостенных втулок $d < 200$	То же	“

раскатывание	мм и $l < 100$ мм		
Комбинированная обработка	Шаровой палец, чашка дифференциала	“	Износостойкость

Червяки и наружные резьбы

Обкатывание и ЭМО роликом	Крупномодульные червяки	Отделка, упрочнение	Износостойкость и уменьшение трения
Обдувка дробью и обработка инструментом центробежно-ударного действия	Червяки и наружная резьба авиационной техники	Упрочнение	Прочность
Формообразующее накатывание плоскими плашками	Мелкие резьбы на деталях $d < 20$ мм (шпильки, болты)	Формообразование, упрочнение	Статическая, динамическая и усталостная прочность
Формообразующее радиальное накатывание резьбовыми роликами	Резьбы шагом $P < 2$ мм на деталях $d > 10$ мм и $l < 20$ мм	То же	То же
Формообразующее продольное накатывание резьб	Резьбы шага $P < 2$ мм на деталях $d > 5$ мм и неограниченной длины	“	“

Внутренние резьбы

Раскатывание резьб	Крупные резьбы и гайки ходовых механизмов	Калибрование, отделка, упрочнение	Статическая, динамическая и усталостная прочность, износостойкость
Формообразующее раскатывание резьб раскатниками	Отверстия $d < 50$ мм в деталях из алюминиевых, латунных и медных сплавов, титана, пластичных сталей ковкого чугуна	Формообразование, упрочнение, отделка	То же

Зубья зубчатых колес

Накатывание роликами	Впадины зубьев тяжело нагруженных зубчатых колес	Упрочнение	Усталостная прочность
Обкатывание и ЭМО червячно-роликовыми обкатниками	Боковые поверхности крупномодульных $m > 3$ мм зубчатых колес	Отделка, упрочнение	Износостойкость, контактная прочность
Обкатывание и ЭМО червяками	Боковые поверхности мелко- и среднемодульных зубчатых колес	Отделка	Износостойкость
Обдувка дробью и обработка инструментом центробежно-ударного действия	Впадины и боковые поверхности средне- и крупномодульных зубчатых колес	Упрочнение, снятие остаточных напряжений	Усталостная и контактная прочность
Формообразующее радиальное накатывание	Для накатывания зубьев мелкомодульных зубчатых колес ($m < 3$ мм) (цапфа трам-	Формообразование	Усталостная и контактная

вание зубьев зубчатыми роликами: радиальное	вайного вагона)	упрочнение	прочность, износостойкость
продольное	Для накатывания зубьев с $m > 2$ мм	То же	То же

Шлицы

Обдувка дробью и обработка инструментом центробежно-ударного действия	Шлицевые валы авиационной техники	Упрочнение, снятие остаточных напряжений	Усталостная прочность
Формообразующее накатывание шлицов	Шлицы небольших размеров	Формообразование, упрочнение	То же
Формообразующее раскатывание резьб роликовыми резьбораскатными головками	Отверстия $d > 50$ мм в деталях из алюминиевых, медных и титановых сплавов	Формообразование, упрочнение, отделка	Статическая, динамическая и усталостная прочность, износостойкость
Комбинированная обработка резьб	Отверстия $d < 50$ мм и резьбой шагом $P=1$ мм в деталях из материалов с невысокой пластичностью	“	“
Сборка гладко резьбовых соединений	Шпильки $d < 20$ мм и гладкие отверстия в деталях из алюминиевых и медных сплавов	Сборка	Прочность соединения

2.7.1. Сущность методов обработки пластическим деформированием

Накатывание, обкатывание и раскатывание осуществляют специальным инструментом, рабочими элементами которого являются шарик (шарики) или ролик (ролики) от подшипников или специально изготовленный. При давлении рабочего элемента на обрабатываемую поверхность детали происходит ее локальное пластическое деформирование в месте контакта. Наличие различных вращательных и поступательных движений позволяет обрабатывать различные поверхности (плоские, цилиндрические, фасонные). Инструменты бывают упругими, когда сила, действующая на рабочий элемент, передается упруго (пружина, торсион), или жесткими, когда сила, действующая на рабочий элемент, передается жестко.

Обработку ведут на универсальных и специальных станках, станках с ЧПУ, полуавтоматах и автоматах.

Выглаживание производят инструментом, рабочим элементом которого является твердосплавный или алмазный индентор, скользящий по обрабатываемой поверхности. Этим методом можно обрабатывать все виды поверхностей от плоской до фасонной, так как и при накатывании инструмент может быть упругим или жестким [42].

Виброобработка — это процесс накатывания, обкатывания, раскатывания шариком (шариками) или алмазное выглаживание при наличии дополнительного осциллирующего движения рабочего элемента параллельно обрабатываемой поверхности. Варьирование амплитуды и частоты осцилляций рабочего элемента, наряду с изменением других режимов обработки, позволяет создавать на поверхности различные регулярные микрорельефы или системы канавок. Систему канавок на обрабатываемой поверхности, как правило, создают при необходимости увеличения объема масла на поверхностях трения, склонных к схватыванию [67].

Динамическое упрочнение можно производить рабочими элементами в свободном состоянии или при их фиксированном положении. В качестве рабочих элементов при свободной обработке применяют дробь и шарики стальные или стеклянные, при фиксированном положении

шарики и ролики подшипников или специальные, в зависимости от обрабатываемой поверхности. ")

При свободной динамической обработке рабочие элементы направляются на обрабатываемую поверхность воздушной струей с помощью специальных устройств под действием центробежных сил или в вибробункерах. Фиксированное динамическое упрочнение осуществляют специальными инструментами центробежно-ударного действия. При этом рабочие элементы находятся на периферии вращающегося инструмента и удерживаются специальными сепараторами (рис. 63). Выбор рабочих элементов определенной массы, их взаимного расположения в сепараторе, диаметра инструмента и скорости его вращения позволяет обеспечить необходимое количество ударов, заданной силы на 1 мм^2 . Это позволяет в широких пределах надежно управлять качеством обрабатываемой поверхности. Данный метод применяют для обработки ППД всех поверхностей, в том числе и резьбы.

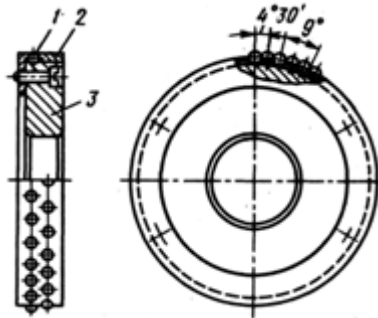


Рис. 63. Инструмент центробежно-ударного действия для динамического упрочнения: 1 — рабочий шарик; 2 — корпус; 3 — сепаратор

Электрохимическая обработка — это процесс накатывания, обкатывания, раскатывания, выглаживания с наложением электрического тока большой силы и низкого напряжения [67]. Повышенное сопротивление в месте контакта рабочего элемента обрабатываемого инструмента и детали создает локальный нагрев и облегчает деформирование металла поверхностного слоя и его структурные изменения. При этом требуются значительно меньшие рабочие силы. Обработку производят на универсальных, специально оборудованных станках.

Комбинированная обработка совмещает резание и ППД. Это совмещение осуществляется с помощью специального комбинированного инструмента, объединяющего режущие и деформирующие рабочие элементы (рис. 64). Благодаря такому совмещению она переходит в разряд размерных обработок, так как позволяет повысить исходную точность.

Калибрование применяют для обработки наружных и внутренних поверхностей вращения заготовок; оно позволяет повысить исходную точность за счет объемных пластических деформаций материала. При небольших натягах пластические деформации могут носить локальный характер, т.е. распространяться только в поверхностном слое.

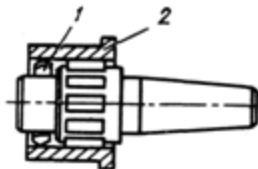


Рис. 64. Комбинированный инструмент для обработки отверстия: 1 — режущий элемент (резец); 2 — деформирующий элемент (ролик)

Рабочим инструментом является шарик, деформирующая прошивка или пуансон, калибрующие фильтры или вогнутые эллипсообразные ролики. Процесс осуществляется на оборудовании для обработки давлением.

Дорнование применяют для обработки различных отверстий, в том числе и шлицевых [47]. Процесс дорнования заключается в том, что инструмент (дорн) определенной формы протягивается через обрабатываемое отверстие, имеющее меньшие размеры по сравнению с размерами дорна. При этом вследствие пластического деформирования диаметр отверстия увеличи-

вается, поверхностный слой металла в отверстиях упрочняется, а неровности поверхности сглаживаются. Причем, в зависимости от натяга пластические деформации могут носить локальный поверхностный характер или распространяться на весь объем заготовки, изменяя ее диаметральные и линейные размеры. Дорны могут быть комбинированными с режущими и деформирующими рабочими элементами. Для уменьшения трения при дорновании применяют различные смазочные материалы и СОЖ. Процесс осуществляется на протяжных станках.

Дорнование с запрессовкой осуществляется при натягах, обеспечивающих распространение пластического деформирования на весь объем запрессовываемой и обрабатываемой втулки. Это приводит к увеличению ее наружного диаметра, ликвидации зазора и созданию натяга в соединении для обеспечения требуемой прочности.

Накатывание зубьев модулем до 2 мм может осуществляться в холодном состоянии. Все основные схемы накатывания зубьев основаны на принципе обкатывания. Обработка может осуществляться одним или несколькими зубчатыми роликами при радиальной или осевой подаче. При этом может происходить накатывание с одновременным калиброванием. Кроме того, накатывать можно и зубчатыми рейками. Для этого используют специальные гидравлические зубонакатные станки, работающие в автоматическом режиме.

Накатывание зубьев роликами, как правило, осуществляют на универсальных токарных, револьверных, горизонтально-фрезерных, резбонакатных и других станках с использованием специальных приспособлений. Схема накатывания зубьев двумя роликами с радиальной подачей приведена на рис. 65.

Накатывание шлицев можно производить как методом обкатки (мелкие шлицы), так и методом копирования (средние и крупные шлицы) с продольным перемещением роликов относительно оси обрабатываемой заготовки (рис. 66). Такое продольное накатывание шлицев может осуществляться путем накатывания двух (или трех) противоположных впадин шлица или одновременного действия всех накатных роликов, образующих впадины всех шлицев (шлицы средних размеров). Накатывание может производиться за один или несколько рабочих ходов. Методом обкатки шлицы формуют плоскими и круглыми зубчатыми рейками, круглыми профильными роликами, червяками и т.д.

Шлицы накатывают на универсальных станках, прессах и специальных шлиценкатных станках.

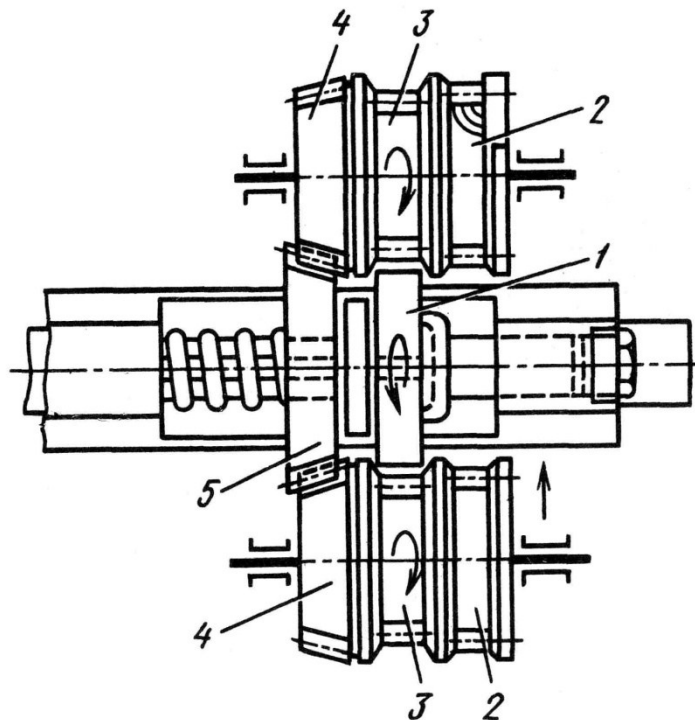


Рис. 65. Накатывание зубьев двумя накатными роликами с радиальной подачей:

1 — заготовка; 2 — накатные ролики; 3 — калибрующие ролики; 4 — ведомая шестерня; 5 — ведущая шестерня

Накатывание и раскатывание резьб осуществляют методом пластического выдавливания материала заготовки, имеющей определенный диаметр, с помощью специального резьбового инструмента. Наружные резьбы накатывают резьбовыми рейками или роликами. Накатывание рейками (рис. 67) производят на специальных резьбонакатных станках, работающих в автоматическом режиме.

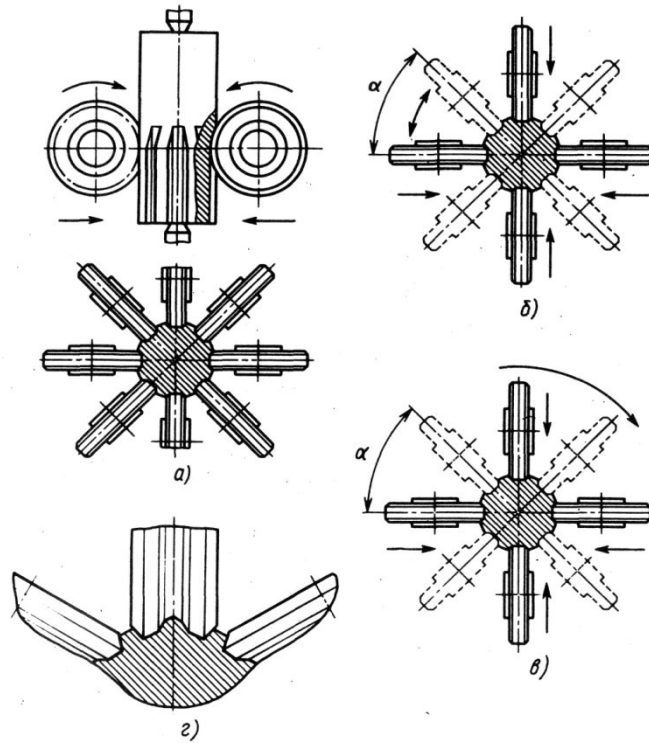


Рис. 66. Продольное накатывание шлицев:

a — без деления; *б* — с маятниковым делением; *в* — с круговым делением; *г* — охватывающими роликами;

Резьбу роликами (одним или несколькими) накатывают как на универсальных токарных станках, так и на специальных резьбонакатных станках. Внутренние резьбы раскатывают, как правило, бесстружечными метчиками-раскатниками на обычных универсальных станках (токарных, токарно-револьверных, сверлильных, станках с ЧПУ, болторезных и резьбонарезных автоматах и др.).

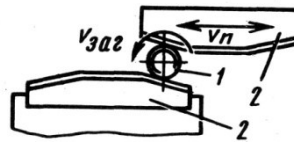


Рис. 67. Накатывание резьб рейками:

1 — заготовка; 2 — резьбонакатные рейки

Крупные резьбы в отверстиях деталей из малопластичных материалов можно обрабатывать комбинированными метчиками-раскатниками.

Формирование гладкорезьбовых соединений осуществляют путем вворачивания резьбовой шпильки в гладкое отверстие определенного диаметра. Пластически выдавливаемый материал заполняет впадины резьбы шпильки, формируя достаточно прочное резьбовое соединение. Для улучшения пластического течения материала и уменьшения момента ввинчивания, как правило, применяют шпильки специальной конструкции. Процесс осуществляют на универсальных токарных и сверлильных станках, станках с ЧПУ, а также с использованием шпильковертов (при малых диаметрах).

2.8. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ

2.8.1. Гальванические способы нанесения покрытий

Для улучшения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин в основном износостойкости, коррозионной и эрозионной стойкости, применяют различные способы нанесения металлических и неметаллических покрытий. Основные способы нанесения гальванических покрытий приведены в табл. 76 [15].

Таблица 76

Основные виды гальванических покрытий и области их применения

Способ нанесения покрытия	Толщина покрытия, мкм	Область применения
1	2	3
Хромирование	Многослойное: 15 в легких условиях, 30 в средних условиях, 45 в тяжелых условиях	Хромовое покрытие стойко против действия окружающей среды, азотной и щелочной кислот, большинства газов и органических кислот; горячая концентрированная серная кислота и галоидные кислоты растворяют хром; хромовое покрытие хорошо выдерживает равномерно распределенную Динамическую нагрузку, но разрушается при сосредоточенном ударе
Цинкование	7—12 в легких условиях, 13—20 в средних условиях, 25—30 в тяжелых условиях	Для защиты от коррозии деталей, работающих во влажной окружающей среде, главным образом деталей из стали и чугуна; детали машин, стальные листы, детали ширпотреба, работающие на открытом воздухе, для повышения защитных свойств подвергают фосфатированию
Кадмирование	7—10 в легких условиях, 10—15 в средних условиях, 20—50 в тяжелых условиях, 35—45 в специальных условиях	Для защиты от коррозии конструкций, работающих в контакте с морской водой; защита от коррозии пружин, резьбовых и крепежных деталей, работающих в легких условиях
Меднение	5 — 35	Медное покрытие не может служить защитой от коррозии для железа, поэтому применяют как подслой при никелевом и хромовом покрытиях
Свинцевание	75—100 в средних условиях, 100—200 и даже 400 в тяжелых условиях	Защита от коррозии металлических конструкций, работающих в условиях контакта с серной кислотой, растворами солей серной кислоты и сернистыми газами. Свинцеванию подвергают детали из

		стали, чугуна, меди, медных сплавов, алюминия и его сплавов. Для надежности защиты не должно быть пор
Никелирование	Никель без подслоя: 12 в легких условиях, 24 в средних условиях, 36 в тяжелых условиях	Для защиты от коррозии и для получения декоративной поверхности; как подслоя при хромировании; никелем покрывают также детали приборов, аппаратов, автомобилей
Лужение	3—5 консервная тара, 20—25 пищевые котлы и посуда, 1—2 контакты приборов	Лужению подвергают детали из железа, стали, чугуна, меди, латуни; широко применяют в пищевой промышленности для покрытия контактов приборов; для защиты медных кабелей от серы, находящейся в резине, для защиты деталей специальной аппаратуры. Защитные свойства покрытия на деталях из стали, железа, чугуна надежны только при отсутствии пор; беспористость достигается увеличением толщины покрытия
Латунирование	3—5	Латунные покрытия хорошо сцепляются с различными покрытиями, обладают хорошей сцепляемостью с каучуком; применяют как подслоя при серебрении, никелировании, лужении и других покрытиях

Гальваническое хромирование может быть декоративным или служить средством повышения коррозионной стойкости и износостойкости деталей. Если хромирование применяют для защиты от коррозии, то остальные детали предварительно покрывают слоем меди толщиной 0,03—0,04 мм и слоем никеля толщиной 0,015—0,02 мм или только слоем никеля, после чего наносят слой хрома толщиной 0,01—0,2 мм. Подслои необходимы также, когда детали работают на износ в коррозионных средах.

Для повышения износостойкости деталей слой хрома толщиной до 0,1—0,2 мм наносят непосредственно на стальную поверхность. В этих случаях часто применяют электролитическое хромирование. Электролитический хром обладает высокой коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения, высокой твердостью (HV 1000-1100) и жаростойкостью. Хромовые покрытия снижают коэффициент трения сопряженных пар, что уменьшает тепловыделение при трении. Износостойкость хромированных деталей возрастает в 5-15 раз. При тщательной подготовке поверхности прочность сцепления хрома со сталью, чугуном, никелем, медью и латунью при испытании на сдвиг достигает 300 МПа. Однако стали с высоким содержанием вольфрама и кобальта, а также высокоуглеродистые стали и высококремнистые чугуны хромировать нельзя. Трудно получить хорошее сцепление хрома с поверхностью деталей, испытывающих значительные внутренние напряжения (например, в результате неправильной закалки).

В качестве электролита для хромирования обычно применяют хромовый ангидрид с добавками серной кислоты (табл. 77). Нерастворимые аноды изготовляют из свинца или сплава с сурьмой. Электролиты с более низкой концентрацией хромового ангидрида позволяют получить повышенную твердость хромового слоя. Однако при работе с ними нужно чаще корректировать состав ванны и применять более высокое напряжение.

Физико-механические свойства электролитических осадков хрома зависят от режима хромирования и толщины покрытия. Различают три основных типа хромовых покрытий: молочные, блестящие и матовые. Для декоративных целей применяют хромирование при плотности тока $10\text{—}50\text{ А/дм}^2$ и температуре электролита $45\text{—}50^\circ\text{С}$. При этом получают гладкие блестящие поверхности.

Молочные хромовые покрытия получают при температуре электролита $65\text{—}72^\circ\text{С}$ и плотности тока более 15 А/дм^2 . Их применяют главным образом для защиты деталей от коррозии. Для повышения износостойкости деталей используют матово-блестящие, молочно-блестящие осадки хрома, имеющие высокую твердость. Их получают при плотностях тока $30\text{—}100\text{ А/дм}^2$ и температуре электролита $55\text{—}65^\circ\text{С}$.

Для повышения износостойкости деталей применяют также пористое хромирование, отличающееся от твердого введением операций травления (анодной обработки) после наращивания блестящего, матово-блестящего или молочно-блестящего хрома, дающего сетку тончайших трещин. Травление ведут в той же ванне, что и хромирование, причем анодом служат обрабатываемые детали, а катодом — свинец. Глубина пор может быть $0,5\text{—}1,0\text{ мм}$, а их площадь — $20\text{—}50\%$.

Таблица 77

Состав хромовых электролитов

Концентрация хромового ангидрида	Содержание, г/л		Основное назначение
	CrO ₃	H ₂ SO ₄	
Низкая	150	1,5	Повышение износостойкости деталей
Высокая	300—400	3,0 — 4,0	Декоративные цели
Средняя	200—250	2,0 — 2,5	Повышение износостойкости и декоративные цели

Оптимальная плотность тока для получения покрытий с тончайшими первичными трещинами $40\text{—}60\text{ А/дм}^2$ при температуре электролита $50\text{—}75^\circ\text{С}$. С повышением температуры пористость уменьшается, а ширина каналов (пор) увеличивается (сетка пор становится редкой).

В зависимости от режимов обработки пористость может быть канальчатой (с сечением каналов примерно $0,05 \times 0,05\text{ мм}$) или точечной. При плотности тока 40 А/дм^2 и температуре электролита $45\text{—}60^\circ\text{С}$ для получения канальчатого пористого покрытия анодную обработку ведут в течение $7\text{—}8\text{ мин.}$, для получения точечного покрытия— $11\text{—}12\text{ мин.}$ В первом случае травят молочные и молочно-блестящие осадки, во втором — матовые и матово-блестящие с последующей притиркой. Точечная пористость обладает большей маслостойкостью, поэтому ее применяют для упрочнения деталей, работающих в особо тяжелых условиях, например для верхних компрессионных поршневых колец двигателей. Точечная пористость характеризуется быстрой прирабатываемостью, но износостойкость покрытия с точечной пористостью несколько ниже износостойкости канальчатого покрытия. Канальчатое покрытие применяют для гильз цилиндров. Износ пористохромированных гильз и поршневых колец меньше не хромированных в $4\text{—}7$ раз, причем износ сопряженных стальных деталей уменьшается в $3\text{—}5$ раз.

Наряду с пористыми покрытиями для повышения износостойкости деталей применяют плотные покрытия, наносимые по накатке. Срок службы их в $1,5\text{—}2$ раза больше пористых покрытий, а расход хрома меньше ($30\text{—}50\%$ от расхода при канальчатом хромировании).

После хромирования детали часто подвергают шлифованию и доводке. При снятии большого слоя хрома для сохранения пористости после механической обработки шлифование иногда выполняют в два этапа: предварительное после хромирования и окончательное после анодной обработки. Шлифование хромированных деталей рекомендуется выполнять шлифовальными кругами СМ1-С2 зернистостью $36\text{—}46$ или СМ1-С1 зернистостью $60\text{—}80$ при скоро-

сти вращения круга 20—35 м/с, скорости вращения детали не менее 10 м/мин., глубине резания 0,005—0,015 мм на 1 дв. ход, подаче 0,2—0,5 (в долях круга) и расходе охлаждающей жидкости 15 л/мин. При обработке, особенно анодной, у выхода из каналов появляются бугорки высотой до 0,8 мкм, поэтому отделочное шлифование, хонингование или доводку рекомендуется выполнять после анодной обработки.

Качество хромового покрытия контролируют дважды: после хромирования и после шлифования. При предварительном контроле наружным осмотром выявляют наросты, непокрытые места, отслаивание, чешуйчатость, раковины, следы шелушения и другие дефекты.

Упрочнение хромированием широко применяют в машиностроении и приборостроении для повышения износостойкости цилиндров и двигателей, поршневых колец, плунжерных пар топливных насосов дизелей и других деталей, а также при изготовлении и ремонте режущего, измерительного инструмента и штампов.

При хромировании калибров, пробок, скоб, крепежных деталей, арматуры толщина слоя хрома 3—10 мкм; деталей, работающих при давлении выше 2,5 МПа с динамическими нагрузками и нагревом [пресс-форм для литья под давлением, пуансонов, матриц для алюминия, режущего инструмента (развертки, фрезы, прошивки, зенкеры)] — 15 мкм; деталей, у которых хромированная поверхность соприкасается с металлом, парами и газами под давлением и покрытие подвергается нагреву (пресс-форм для пластмассы, формовочных штампов, сопел) — 30—50 мкм; деталей, работающих при средних давлениях (0,5—2,5 МПа), например, шеек роторов, шпинделей, пальцев и валиков в шарнирах, соединительных пальцев, поверхностей шеек и кулис, 50—60 мкм; деталей, работающих на изнашивание поверхности при давлении 0,5 МПа, например, измерительных инструментов (калибров, пробок, скоб, направляющих валиков и втулок) — до 80 мкм; деталей, работающих без динамических нагрузок и без перемещений хромированной поверхности (гнезд подшипников, деталей, требующих доводки) — до 100 мкм; трущихся деталей станков, машин и механизмов (шеек валов и зубчатых колес, соединительных пальцев, валиков, щек кулис, шпинделей, шеек осей, реек, червяков)—10—15 мкм; деталей, требующих восстановления размеров, прессовых и плотных соединений, гнезд шарикоподшипников — до 1000 мкм; цилиндров двигателей внутреннего сгорания — 20—50 мкм; вытяжных и обрубных штампов — 3—10 мкм; пресс-форм для пластмасс, резины и стекла — 40—60 мкм; пресс-форм для литья металла под давлением — 10—20 мкм.

Качество хромирования зависит от выбора подвесного устройства, расположения анодов по отношению к покрываемой поверхности и защиты мест, не подлежащих покрытию. Подвесные устройства нужно конструировать так, чтобы между анодом и катодом (покрываемой поверхностью) было одинаковое расстояние по всему объему ванны, а электролит был ограничен не проводящими ток поверхностями, предотвращающими отклонение силовых линий. Утечка устраняется полной изоляцией одного из электродов. Для выхода газов, образующихся между анодом и катодом, можно делать отверстия в аноде. Равномерности отложения хрома, особенно при размерном хромировании, способствует установка в ванне экранов. Нехромируемые места обычно изолируют листовым целлулоидом, целлулоидными лаками (цапонлак, эмалит), олихлорвиниловым пластикатом.

Для покрытия небольших участков крупных деталей (например, шеек длиной до 200 мм трансмиссионных и других валов длиной 5—10 м) целесообразно применять местное хромирование, без погружения в ванну всей детали.

Большой интерес представляет хромирование деталей, работающих в условиях кавитационного разрушения. Стойкость молочного хромового осадка к кавитационному разрушению не зависит от основного материала детали. Кавитационное разрушение молочного хрома в 13 раз меньше износа стали 45; в этом отношении он не уступает высокохромистым сталям 9Х13, Х9С2, а также сталям У8, ШХ15, ХВГ, обработанным на высокую твердость.

2.8.2. Твердое никелирование

Для повышения износостойкости трущихся поверхностей деталей и восстановления их размеров часто применяют твердое никелирование. Никелевые покрытия имеют меньшую твердость, чем хромовые, и обладают следующими преимуществами: они сравнительно легко

обрабатываются, имеют большую вязкость при толщине слоя до 2 мм; коэффициент линейного расширения никеля близок к коэффициенту линейного расширения стали, в то время как у хрома он несколько раз выше.

При твердом никелировании требуется в 3—4 раза меньше мощность источников постоянного тока, чем при хромировании, а расход энергии примерно в 20 раз меньше.

Электролиты твердого никелирования имеют различные составы. На приборостроительных заводах рекомендуется использовать электролит следующего состава: 140 г/л серно-кислого никеля и 300 г/л щавелево-кислого аммония с кислотностью Н 7,5—8 при плотности тока 10 А/дм² и температуре электролита 75—80°С. Скорость осаждения никеля в таком электролите 50—60 мкм/ч; получаемые осадки имеют микротвердость 5500—6500 МПа.

Для повышения твердости и улучшения сцепляемости с основным металлом детали, покрытые твердым никелем, желательнее в течение 1 ч подвергать термической обработке в муфельных печах при температуре 300—400°С. Это на 2000—2500 МПа увеличивает микротвердость покрытия и повышает коррозионную стойкость деталей.

Технологический процесс твердого никелирования обычно включает следующие операции: механическую обработку для придания точности форме; устранение дефектов с поверхности, подлежащей покрытию, и получение необходимой чистоты; изоляцию мест, не подлежащих покрытию, обезжиривание деталей венской известью; промывку в холодной воде; электролитическое травление в серно-фосфорном электролите; промывку в горячей воде; осаждение на рабочую поверхность сплава никель—фосфор; термическую обработку при температуре 400°С в течение 1 ч (она увеличивает твердость слоя и прочность его сцепления с основанием на 20—30%); механическую обработку и окончательный контроль.

Травление ведут в электролите, состоящем из одной части Н₂О₄ и четырех частей Н₃Р₀₄ при плотности тока 20 А/дм² в течение 2,0—2,5 мин. При выборе твердого 208 никелирования как способа восстановления размеров и повышения износостойкости деталей следует учитывать, что в зависимости от состава электролита и режимов обработки физико-механические свойства осажденного сплава никель—фосфор резко изменяются. Так, с увеличением содержания фосфора в покрытии его твердость возрастает: при отсутствии фосфора она составляет НРСэ 32, а при содержании 1,5% фосфора НРСэ 57. Количество фосфора в сплаве регулируют путем изменения концентрации гипофосфита в электролите; увеличение концентрации от 0,08 до 10 г/л повышает содержание фосфора в покрытии.

Коррозионная стойкость фосфористо-никелевых покрытий в условиях окружающей среды и в водопроводной воде выше хромовых и обычных никелевых покрытий. Прочность сцепления с мало- и среднеуглеродистыми сталями 120—140 МПа, с легированными 70—90 МПа. Коэффициент трения стали по чугуна на 30% ниже коэффициента трения стали по хрому; коэффициент трения хрома по бронзе несколько выше. При трении без смазочного материала износостойкость покрытия в 2,5—3 раза выше, чем износостойкость закаленной стали 45, и на 10—20% ниже, чем износостойкость хрома. Покрытия из фосфористого никеля меньше снижают усталостную прочность, чем хромовые и обычные никелевые. Изнашиваемость сопряженных деталей из различных металлов при работе по фосфористо-никелевым покрытиям в 4—5 раз меньше, чем при работе по стали, и на 20-40% меньше, чем при работе по хрому.

Упрочнять и восстанавливать твердым никелированием можно детали типа коленчатых валов, шпинделей металлорежущих станков, поршневых пальцев, гильз цилиндров, поршней гидравлических машин, направляющих втулок. Твердое никелирование можно применять также при ремонте неподвижных посадок и деталей приборов. При восстановлении таких деталей, как шпиндели металлорежущих станков, шейки коленчатых валов, гильзы цилиндров, осаждают слой твердого никеля толщиной 0,75—1,25 мм.

2.8.3. Борирование

Электролитическое борирование заключается в том, что в результате электролиза расплавленной буры Ма₂В₄О₇ создается элементарный бор, который в момент выделения диффундирует в металл, образуя на его поверхности бориды железа, а при наличии углерода — карбиды бора. При электролитическом борировании плотность тока 0,20—0,25 А/дм. Температуру

электролита регулируют с помощью реле и контактного терморегулятора. Питается установка постоянным током.

Основные технологические факторы, влияющие на физико-механические и эксплуатационные свойства борированного слоя: температура электролита, время выдержки и химический состав материала обрабатываемых деталей.

Толщина борированного слоя на низколегированных сталях при температуре до 950°C составляет около 0,3 мм. При дальнейшем повышении температуры она увеличивается мало, но значительно возрастает хрупкость слоя. С увеличением времени выдержки t толщина слоя возрастает по параболическому закону:

$Y^2=2Pt$, где $2P$ — параметр, характеризующий скорость роста слоя.

Среднее значение параметра $2P$ можно определить как тангенс угла наклона параболических кривых, построенных в координатах $y^2=t$. При выдержке более 8 ч сильно увеличивается хрупкость слоя. Твердость борированного слоя HV 2000—2500. Наибольшую твердость имеет борированная поверхность деталей из стали типа 55С2А и 30ХГСА, несколько меньшую — из стали 12ХН2А и 12ХН3А, еще меньшую — из сталей 40Х и 35.

При любой температуре (прочие условия одинаковые) максимальная толщина борированного слоя получается на деталях из стали 30ХГСА и последовательно уменьшается на деталях, изготовленных из сталей 50С2А, 12ХН3А, 12ХН2А, 35 и 40Х. Рекомендуется детали из указанных сталей борировать при температуре 950°C и выдержке 6 ч. При этих условиях получается слой наилучшего качества и достигается высокая износостойкость борированных деталей. Из сталей, подвергнутых сравнительным испытаниям, после борирования наиболее износостойкой оказалась сталь 12ХН2А, а затем стали 12ХН3А и 40Х.

Слой бора не изменяет своих свойств при нагреве до температуры 950°C и обладает повышенными кислотостойкостью и жаростойкостью при температуре до 800°C. Прочность его сцепления с основным металлом такая же, как и прочность цемента-ванного слоя. Высокая твердость слоя бора сообщает поверхности деталей хорошую износостойкость. Вот почему борированием упрочняют детали машин, работающие в тяжелых условиях (при наличии абразивной среды и ударных нагрузок); к таким деталям можно отнести втулки буровых насосов. Как показал опыт, борирование рабочей поверхности втулок позволяет увеличить их износостойкость почти в 4 раза по сравнению с износостойкостью втулок, закаленных ТВЧ.

2.8.4. Оксидирование и фосфатирование

Все металлы на воздухе покрыты оксидной пленкой, которая защищает их от воздействия окружающей среды, но толщина пленки очень мала. Для получения оксидных пленок значительной толщины прибегают к специальной химической, термической или электрохимической обработке поверхности заготовки. Наиболее широкое применение получили глубокое оксидирование и эматалирование.

Глубокое оксидирование—процесс получения оксидных пленок толщиной более 60 мкм с высокими микротвердостью (4000—4500 МПа), износостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами. Этот процесс применяют для повышения износостойкости зубчатых колес, деталей двигателей, текстильных машин и других деталей из алюминия и его сплавов с содержанием не более 4,5% Cu и не более 7% Si.

Износостойкость перечисленных деталей после оксидирования при работе со смазочным материалом повышается в 5—10 раз. Для глубокого оксидирования используют электролит, содержащий 180—200 г/л химически чистой или аккумуляторной серной кислоты, не более 30 г/л алюминия и 0,5 г/л меди. При упрочнении сплавов АМг, АМц, АЛ2 и АЛ4 анодная плотность тока поддерживается равной 2,5—5 А/дм², а температура электролита 5—0°C. Начальное напряжение обычно составляет 20—24 В. При обработке вторичных сплавов температуру электролита рекомендуется снижать до —10°C. Образование толстых оксидных пленок связано с выделением большого количества теплоты в зоне оксида, разогревающего электролит у анода (покрываемой детали). Это приводит к разрыхлению пленки и травлению обрабатываемой поверхности. Для устранения местного разогрева поверхность стали непрерывно охлаждают или интенсивно перемешивают электролит. Применяют различные способы охлаждения. Можно

охлаждать внутренние поверхности льдом или пропускать охлаждающие жидкости через отверстия или полости деталей с такой скоростью, чтобы разница температуры жидкости на входе и выходе не превышала 1°С. Часто для охлаждения используют специальные приспособления.

Процесс глубокого оксидирования имеет некоторые технологические трудности, вызываемые нарушением режима охлаждения, отклонением состава электролита от нормы, недостаточной подготовкой поверхности, наличием на деталях острых углов и граней. Для повышения стойкости деталей против коррозии их после оксидирования и тщательной промывки в воде подвергают специальной обработке для уплотнения оксидной пленки, чтобы предотвратить влияние окружающей среды на металл через поры пленки. Это делают пропиткой деталей в расплавленном парафине или воске, покрытием их олифой, лаками, осаждением в парах нерастворимых солей, наполнением пор хроматами.

Эматалирование заключается в получении электролитическим путем непрозрачных эмалевидных пленок толщиной 10—12 мкм с микротвердостью 6000—7000 МПа, обладающих красивым декоративным видом, а при использовании щавелевокислых электролитов — хорошими износостойкостью и диэлектрическими свойствами. Пленки могут быть блестящими, матовыми, окрашенными. По внешнему виду они напоминают фарфор, пластмассу, мрамор, эмаль. Эматалевый слой стоек в органических растворителях, минеральных и животных маслах, мылах, пищевых продуктах, органических кислотах, не трескается при ударных и сжимающих нагрузках, выдерживает нагрев до 300°С. Эти качества пленки используют для защиты от коррозии 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 % Fe, 1 % Ni, 8% Zn, 8% Mg и 1 % Mn. Для уплотнения эматалевой пленки детали после обработки кипятят в дистиллированной воде.

В результате фосфатирования на поверхности деталей из углеродистых и низколегированных сталей, чугуна и некоторых цветных металлов (алюминий, магний, цинк, кадмий) получают пленки нерастворимых солей марганца, железа и цинка толщиной 2—15 мкм. Фосфатный слой устойчив в воздухе, 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.

Фосфатирование применяют главным образом для защиты деталей от коррозии. Защитная способность пленок значительно повышается после пропитки их смазочными материалами или маслами.

2.8.5. Химические способы нанесения покрытий

В промышленности применяют различные химические способы нанесения никелевых, хромовых, кобальтовых, никель-кобальтовых и других упрочняющих покрытий. Процесс химического нанесения покрытий включает следующие операции: подготовку деталей к покрытию, нанесение покрытия на рабочие поверхности; термическую обработку, механическую обработку для придания деталям необходимых размеров и чистоты поверхности. Готовят детали к химическому покрытию так же, как и к гальваническому.

Примерный состав ванн и режимы нанесения покрытия химическим способом приведены в табл. 78.

После термической обработки покрытий при температуре 350—400°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 свыше 300 МПа. Слой, наносимый химическим путем, сцепляется с углеродистыми сталями прочнее, чем с легированными или быстрорежущими.

Таблица 78

Состав ванны и режимы нанесения химических покрытий

	Покрытие
--	----------

Состав ванны и режим обработки	нике- левое	хромо- вое	кобаль- товое	никель- кобаль- товое
Состав ванны, г/л:				
хлористый никель	21—30	—	—	30
хлористый кобальт	—	—	30	30
гипофосфит натрия	10—30	8,5	20	20
соль Рошеля	—	—	—	200
оксиацетат натрия	15—20	—	—	—
хлористый алюминий	—	—	50	50
фтористый хром	—	—	50	50
хлористый хром	—	17	—	—
уксусная кислота (ледяная)	—	$11 \cdot 10^{-3}$	—	—
Скорость осаждения, мкм/ч	15—25	2,5—3	15	15
Оптимальная температура, °С	90—93	71—78	90—99	90—100
Количество щелочи для нейтрализации, г/л	4—6	10—11	9—10	8—10

никелирование рекомендуется использовать для защиты деталей, работающих в условиях среднего и повышенного коррозионного воздействия, вместо многослойных гальванических покрытий никель—хром и медь—никель—хром; это экономит цветные металлы. Химический способ успешно применяют. Скорость осаждения упрочняющего металла зависит в основном от температуры ванны: с повышением температуры никелевой ванны от 50 до 90°С скорость осаждения никеля возрастает примерно в 7 раз.

Химическое хромирование возможно только по подслою никеля толщиной более 1 мкм. Для нормальной работы в ванну через каждый час добавляют до 3 г/л гипофосфита и до 3 мг/л уксусной кислоты и едкого натра. Катализаторами служат пластинки из железа, алюминия или других металлов, которые контактируют с обрабатываемыми деталями. Для придания слою хрома более высокой твердости детали нагревают до температуры 600—800°С, а затем механически обрабатывают (обычно полируют).

Усталостная прочность деталей, покрытых никелем и прошедших отпуск при температуре 400°С, снижается на 30—45%, а износостойкость их повышается в 2—3 раза. Несмотря на значительно больший расход реактивов, чем при гальваническом способе, химическое упрочнение никелем применяют для деталей топливной аппаратуры, силуминовых корпусов гидравлических насосов, золотников и поршней гидравлических агрегатов из дуралюмина Д1. Химическое при покрытии никелем керамики, пластмассы и других диэлектриков для создания металлически проводящей поверхности. Такое никелирование применяют также для деталей из алюминия и его сплавов, титана и керамики, чтобы получить возможность паять их мягкими припоями.

На некоторых предприятиях химическое никелирование позволило заменить дорогие высоколегированные стали, работающие при температуре до 600°С, менее легированными. Термически обработанные никелевые покрытия вследствие их большой твердости, хорошей прирабатываемости, высокой износостойкости, возможности нанесения на различные детали сложного профиля должны найти широкое применение в машиностроении для повышения надежности и долговечности деталей машин.

Химическое хромирование применяют для упрочнения деталей машин и инструментов. Таким путем целесообразно упрочнять режущие инструменты, предназначенные для работы с малыми стружками и повышенными скоростями резания, а также измерительные инструменты сложного профиля. Последние перед хромированием обезжиривают и декапируют в 50%-м рас-

творе соляной кислоты. Хромированные химическим способом и затем нитроцементованные резцы не уступают по качеству алмазным расточным резцам. Химическое упрочнение особенно эффективно для деталей сложных форм, так как стоимость его не зависит от формы деталей.

2.8.6. Лакокрасочные покрытия

Применяют разнообразные лакокрасочные материалы, различающиеся по химическому составу, назначению и свойствам. Надежная и длительная защита металла от коррозии и дерева от гниения достигается в том случае, если покрытие сплошное, газо- и водонепроницаемое, обладает хорошей сцепляемостью с покрываемой поверхностью, достаточной сопротивляемостью к механическим деформациям и химическим воздействиям, сопротивляемостью истиранию, действию тепла, холода, солнечного света; часто к лакокрасочным покрытиям предъявляются требования повышенной стойкости против действия кислот, масла, бензина.

Для удовлетворения всех этих требований в машиностроении применяют многослойные покрытия, каждый слой которых имеет свое назначение. Непосредственно на поверхность заготовки наносят слой грунта толщиной 15—25 мкм. Он хорошо сцепляется с поверхностью и защищает ее от коррозии. На грунт наносят до четырех слоев шпаклевки, которая выравнивает дефекты поверхности (поры, царапины, углубления). Шпаклевка должна быть твердой, хорошо сцепляться с грунтом и поддаваться механической обработке (обычно шлифованию). На шпаклевку наносят краску или слой эмали, которые улучшают внешний вид изделий, а также повышают его твердость и сопротивляемость различным воздействиям. При отсутствии дефектов поверхности краску или эмаль можно наносить непосредственно на грунт. Число слоев краски или эмали от двух до шести, толщина слоя 30—80 мкм.

Технологический процесс окраски включает операции подготовки поверхности, нанесения грунта, шпаклевки, краски или эмали, сушки и обработки покрытия. Все операции, связанные с подготовкой к окраске и окраской детали, механизированы или автоматизированы. Трудоемкий и длительный процесс естественной или конвекционной сушки заменяют терморadiационной сушкой. Окраску кистью, окунанием или механическим распылением заменяют окраской распылением в электростатическом поле. Все это позволяет получать прочные слои краски, хорошо защищающие рабочие поверхности деталей от внешних воздействий, повышает срок службы деталей, особенно из тонколистовых материалов. Испытания показывают, что при окраске в электрическом поле и сушке в терморadiационной камере детали и узлы более коррозионностойки, чем при обычных окраске и сушке.

Лакокрасочные покрытия постоянно совершенствуют, и область их применения расширяется. Например, в машиностроении их используют для защиты материалов, изделий и оборудования, эксплуатируемых в условиях тропического климата. НИИ тракторсельхозмаш установил, что лучшими защитными свойствами для сельскохозяйственных машин, работающих в этих условиях, обладают алкидно-меламиновые эмали, синтетические автоэмали и эмали ОТФ-МЛ-4-2 зеленого цвета. Применение фосфатирующего грунта ВЛ-08 в сочетании с грунтом В-329 значительно улучшает стойкость покрытий. Внедрение указанных эмалей и грунтов позволяет улучшить товарный вид машин, повысить их защитные свойства и в 2 раза удлинить срок службы покрытий по сравнению с глифталиевыми эмалями.

2.8.7. Покрытие деталей пластмассами

Пластмассовые покрытия применяют для защиты от коррозии химической аппаратуры и других изделий, а также для выравнивания неровностей их поверхностей. По химической стойкости к действию самых агрессивных сред, таких, как концентрированные кислоты и окислители, многие пластмассы превосходят даже благородные металлы (золото и платину). Пленки пластмассы наносят на поверхности деталей машин вихревым или газопламенным напылением или облицовкой листовыми материалами. Для покрытия деталей газопламенным и вихревым методами пригодны только термопластичные материалы в виде мелкодисперсного морощка, который при нагреве переходит в вязкотекучее состояние без существенного разложения, а необходимые физико-механические и химические свойства приобретает после охлаждения.

Ниже указаны материалы, применяемые для покрытия деталей и температура, °С, заготовки перед напылением. Полиэтилен:

высокого давления	180 - 200
низкого давления	200 — 220
Полипропилен	220 — 240
Фторопласт-3	260 — 270
Фторопласт-4	280 — 300

Процесс нанесения напылением пластмасс аналогичен процессу металлизации напылением, отличаясь от него лишь нагревом заготовок до указанной температуры.

Таблица 79

Пластмассы для покрытия деталей вихревым и эжекционным способами

Пластмасса	Температура, °С		Область применения
	плавле- ния	растекания	
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
Поливинилбутираль (бутвар)	160—167	260—270	То же
Ацетобутират целлюлоза	120—125	—	
Полиуретан	180	190	Антифрикционное покрытие
Полипропилен	140—150	160—170	Антикоррозионное покрытие

Защитные покрытия обычно делают многослойными. Толщина покрытия зависит от назначения детали и напыляемого материала. При использовании полиэтилена хорошую защиту от коррозии дает покрытие толщиной 0,25—0,35 мм, при использовании фторопласта-3 — покрытие толщиной 0,18—0,25 мм. Чтобы придать поверхности шероховатость, необходимую для лучшего сцепления с покрытием, и очистить ее от окалины, поверхность подвергают дробеструйной обработке, после чего очищают от пыли, масляных пятен и других загрязнений, а затем фосфатируют. Поверхности заготовки, не подлежащие покрытию, защищают металлической фольгой, жостью и другими материалами, а отверстия закрывают пробками. Перед напылением заготовки нагревают (до температуры на 30—50°С выше температуры плавления пластмассы) в шкафу, обогреваемом газом или электричеством, до температуры 400°С. Сильный перегрев заготовки приводит к разрушению пластмасс.

Влажность порошка для напыления должна быть не более 0,3%, размер зерна не более 0,2 мм. Для окраски порошком полиэтилена в него добавляют 1—1,5% пигмента и 1,5—4,0% двуокиси титана и перемешивают в шаровой мельнице до получения однородного цвета (в течение 40—60 мин.). 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 обычные.

Вихревым и эжекционным напылением можно покрывать детали из различных металлов и их сплавов (сталь, чугун, алюминий), из керамики и других материалов, выдерживающих нагрев до температуры 300—500°С.

2.8.8. Наплавка материала

В последнее время для повышения надежности и долговечности деталей машин все более широко применяют наплавку на рабочие поверхности деталей из металла с высокими эксплуатационными свойствами.

Газовой наплавкой упрочняют детали автомобилей, тракторов и других машин, изготовленные из сталей 35, 40 и 45 (стартерные шестерни маховика, распределительные валики). Рекомендуется также упрочнять и восстанавливать этим способом детали из низко- и среднелегированных сталей 20X, 20X3, 18XГТ, 30X, 35X, 40X (хромистых), 20XH, 40XH, 12XH3 (хромоникелевых) и 15XF (хромованадиевой): зубчатые колеса, валы коробок передач и трансмиссий, детали рулевого механизма. Детали из этих сталей в процессе изготовления, как правило, проходят полную термическую обработку и при ремонте теряют начальные свойства в результате нагрева при наплавке. Если повторная, после наплавки термическая обработка невозможна или нежелательна, наплавку металла на такие детали проводят с охлаждением, опуская всю деталь, за исключением места, подвергаемого наплавке, в ванну с водой. При упрочнении наплавкой присадочный материал выбирают более износостойкий, чем основной, для повышения износостойкости деталей.

Наиболее широко применяют газовую наплавку на рабочие поверхности инструментов из твердого сплава сормайт, дающего возможность получать наплавленные слои толщиной 0,5 мм и более. Сормайт часто наплавляют с помощью ацетилено-кислородного пламени. В качестве основного металла для наплавки сормайта рекомендуются углеродистые стали, особенно У8А. Его можно наплавлять на легированные инструментальные (5XHM, 3XB8, 4XBC) и низколегированные конструкционные (40XH, 40X) стали.

При наплавке деталей углеродистыми и низколегированными сталями допускается значительное проплавление основного металла детали, а при наплавке сормайтом допустимо расплавление лишь на глубину в несколько десятых долей миллиметра, иначе происходит смешение основного и наплавляемого металлов, изменение химического состава и ухудшение свойств наплавленного слоя.

Толщину наплавленного слоя устанавливают в зависимости от условий работы детали и глубины износа поверхности. По данным отдела сварки ЦНИИТМАШа, для деталей, работающих на истирание, толщина слоя не должна превышать 2,5—4 мм, для режущих кромок инструмента 1,5—3 мм, для деталей инструмента, испытывающих небольшую ударную нагрузку, 2 мм. При ручной наплавке колебание толщины слоя может быть в пределах 0,25—0,5 мм.

Сормайтом № 1 чаще наплавляют слой толщиной 0,5—5 мм и лишь иногда (например, для ножей бесщетрово-шлифовальных станков и линеек прокатных станов при ширине поверхности не менее 10 мм) толщиной 12—16 мм. Толщина слоя сормайта № 2 обычно 1,5—3,5 мм, а в отдельных случаях 7—10 мм. Покрытие толщиной больше 1,5 мм обычно получают из нескольких слоев, так как при покрытии в один слой сплав перемешивается основным металлом. Если износ детали больше допустимой толщины наплавки сормайтом, на поверхность предварительно наплавляют присадочный материал, близкий по свойствам к основному металлу детали, и только после этого — слой сормайта.

Для уменьшения деформирования детали при наплавке применяют различные приспособления, в частности пластины из красной меди, подкладываемые под деталь для отвода тепла. Для получения наплавленной поверхности с ровной кромкой по бокам детали устанавливают угольные или графитовые пластины, а для предохранения отверстий от затекания сплава вставляют графитовые или угольные стержни. Чтобы сохранить основные размеры детали, часто приходится снимать с поверхности, подлежащей наплавке, по всей ее ширине фаски толщиной, равной толщине слоя наносимого сплава. При наплавке металла на режущие кромки нельзя делать выточку или снимать фаску под углом 45°, так как это приводит к непровару в прямых и острых углах, а также к выкрашиванию.

Наплавку сормайтом деталей строительных и дорожных машин, где требуется высокая износостойкость, можно производить электродуговым способом на постоянном и переменном токе. В этом случае производительность выше, но качество покрытия хуже. Кроме того, приса-

дочный материал (пруток сплава диаметром 5—6 мм) должен быть покрыт обмазкой толщиной 1,4—1,9 мм. Обычный состав обмазки: 46% мрамора, 33% плавикового шпата, 4% металлического марганца, 10% алюминия, 2% серебристого графита, 5% феррохрома, 3,0—3,5% стекла (от веса сухой смеси), 1,5% бентонита (от веса сухой смеси).

Повышение износостойкости деталей машин в значительной степени зависит от соответствия присадочного материала материалу детали, а также от точного выполнения технологии наплавки.

Повышение износостойкости наплавленных слоев достигается различными способами. Легирование металла, наплавленного под флюсом, можно производить легированной проволокой при обычном флюсе; специальной проволокой (с легирующим порошком внутри); специальным флюсом; покрытием поверхности пастой и порошком.

Электродные материалы и флюсы, наиболее часто применяемые при механизированной наплавке, указаны в табл. 80. Металл с высокой износостойкостью часто наплавляют, используя высоколегированную проволоку, изготовляемую из листовой стали 08, свернутую в трубку и заполненную порошковой шихтой, представляющей собой смесь ферросплавов и других материалов.

Широко распространена полуавтоматическая и автоматическая наплавка с применением порошковой проволоки. Механизированной наплавкой упрочняют детали из мало-, среднеуглеродистых и низколегированных сталей, а также некоторые детали из серого чугуна. Наплавку под слоем флюса применяют для деталей, подвергающихся и не подвергающихся последующей термической обработке. Закаленные детали перед наплавкой не требуют термической обработки.

Износостойкость прокатных валков из стали 60ХГ, покрытых сталью 3Х2 В8, в 2—4 раза выше износостойкости закаленных валков без наплавки. Износостойкость наплавленного под флюсом ЖС-320 металла валков из стали 55Х составляет 180—200% износостойкости основного металла. Стойкость опорных катков, наплавленных проволокой 3ОХГСА под флюсом АН-348-А, в 5 раз выше, чем стойкость катков, наплавленных электродом с меловой обмазкой. Поверхностная закалка позволяет увеличить стойкость еще в 2 раза.

Таблица 80

Электродные материалы и флюсы, применяемые при механизированной наплавке

Назначение наплавки	Материал электрода (марка стали)	Флюс
Защита от коррозии и эрозии деталей гидротехнических сооружений	12Х18Н9Т	АН-26
Облицовка деталей (из закаливаемых сталей) перед наплавкой	08	АН-348
Восстановление изношенных деталей	65Г	АН-60
Восстановление изношенных поверхностей деталей из стали 40Х с твердостью НВ 300—400 до твердости НВ 320—377	3ОХГСА	АН-348-А
Восстановление размеров изношенных валков прокатных станов перед износостойкой наплавкой	68, 08 Г, ЮГ2, 15, 15Г, ЮГС	АН-348-Ш, ОСЦ-45, АН-348-А, ОСЦ-45
Восстановление размеров изношенных валков перед наплавкой износостойкого слоя; наплавка поверхности буртов и менее нагруженных калибров без повышения износо-	18ГСА, 3вХГСА, 40Г, 45; 60, 60Г	АН-348-А, ОСЦ-45

стойкости		
Восстановление размеров, повышение износостойкости и коррозионной стойкости	20X13, X20	АН-20, АН-22
Покрытие деталей подпятников и подшипников крупных турбогенераторов перед заливкой баббитом	Медь 2	АН-20

Электрошлаковая наплавка основана на выделении теплоты в расплавленном флюсе под действием электрического тока. Процесс обычно сочетается с принудительным формированием поверхности металлической ванны кокилем, подкладкой или ползуном. Высоколегированный наплавленный слой получают главным образом за счет присадочного металла (проволоки, проката, отливок, порошковой и электродной проволоки). Электрошлаковая наплавка имеет следующие преимущества перед дуговой: уменьшается (с 30—40 до 10—15%) доля основного металла в наплавленном слое; снижается расход флюса; лучше используется электроэнергия; увеличивается коэффициент наплавки (до 20—25 г/ (А·ч)); не приходится удалять шлаковую корку, так как наплавку обычно ведут в один проход. Принудительное формирование наплавленного слоя позволяет сокращать припуски на механическую обработку; уменьшается вероятность образования пор и шлаковых включений (легче удаляются газы и всплывают примеси). Меньшие скорости охлаждения и лучшие условия кристаллизации способствуют понижению склонности металла к образованию горячих трещин, так что иногда удается наплавлять высококачественные слои при содержании углерода в наплавленном металле до 1,5—2%. В большинстве случаев отпадает надобность в предварительном подогреве металла, так как в процессе наплавки он достаточно нагревается.

Этот способ наплавки целесообразен там, где необходимо наплавлять большое количество металла и при больших партиях деталей. Поверхности деталей могут быть плоские и цилиндрические.

2.8.9. Напыление материала

Металлизация напылением заключается в том, что на заранее подготовленную поверхность любой формы наносят металлическое покрытие путем распыления жидкого металла струей сжатого воздуха. Для этого используют специальные аппараты — металлзаторы. В зависимости от источника теплоты, используемого для расплавления металла, различают газовую, электрическую и плазменную металлизацию. Первая (источник теплоты — газовое пламя) широко распространена за рубежом. В нашей стране чаще применяют электрическую металлизацию (источник теплоты — электрическая дуга). Металл может подаваться в аппарат в виде проволоки, порошка или ленты.

Наряду с газовой металлизацией и электрометаллизацией начинают применять плазменное напыление металлов. Ввиду высокой температуры плазмы становится возможным напыление тугоплавких металлов и керамики. В промышленности используют следующие установки для нанесения материалов на внутренние и наружные поверхности деталей машин: электрометаллизаторы ЭМ-3, ЭМ-6, ЭМ-9 для распыления проволоки; МНП-1-57 — для напыления оксида алюминия в виде специальных стержней; УПН-5-60 — для напыления порошкового материала; УПР-1-59 — для напыления тугоплавких и высокодисперсных материалов (оксида алюминия, дисилицида молибдена); УПМ-1-61 — для плазменного напыления.

Подробно оборудование, технологические процессы и применение металлизации напылением для повышения долговечности и надежности машин описаны во многих работах. При назначении способа металлизации следует учитывать его достоинства и недостатки.

К достоинствам металлизации относят возможность наращивать на шейки валов машин, станины станков и другие детали слои стали толщиной 1,5 мм и более с требуемыми физико-механическими свойствами. Нанося слои металлов со специальными свойствами, можно повы-

силь не только износостойкость деталей, но и другие эксплуатационные свойства, например, жаро- и коррозионную стойкость. Первоначальные свойства основного металла вследствие незначительного нагрева в процессе напыления не изменяются. К достоинствам металлизации следует также отнести сравнительную простоту и малую стоимость этого способа упрочнения.

Основные недостатки металлизации: хрупкость нанесенного слоя; не всегда достаточная прочность сцепления с основным металлом; снижение механической и особенно усталостной прочности деталей из-за уменьшения размеров и нарушения целостности их рабочей поверхности при подготовке к металлизации и трудность последующей механической обработки.

2.9. Способы повышения долговечности ответственных деталей машин.

Каждый класс деталей должен отвечать определенным условиям работы. Исходя из этих условий они, как правило, имеют определенные виды повреждений, для предотвращения которых применяют способы, указанные в табл. 81.

Таблица 81

Способы повышения долговечности ответственных деталей машин

Наименование детали	Характер работы	Основной вид повреждения при эксплуатации	Способ повышения долговечности
1	2	3	4
Болты и шпильки резьбовых соединений, собираемых с предварительной затяжкой и нагружаемых силами, вызывающими переменные напряжения	Статистические напряжения от предварительной затяжки и переменные напряжения от изменяющихся во время работы нагрузок	Усталостные изломы, деформации	Повышение прочности стали, уменьшение концентрации напряжений, уменьшение жесткости болта, уменьшение высотных параметров шероховатости поверхности резьбы болта шпильки роликами
Гайки и крепежные отверстия под болты и шпильки в корпусных деталях	То же	Срез резьбы и самоствинчивание	Раскатывание резьб и создание гладкорезьбовых соединений
Колеса зубчатых передач	Изгиб зубьев, деформирование контактного сжатия и сдвига рабочих поверхностей зубьев, трение и удары торцов зубьев зубчатых колес коробок передач при включение скорости	Излом зуба (усталостный или из-за кратковременной перегрузки), осповидное выкрашивание, изнашивание или пластическое деформирование рабочих поверхностей зубьев, торцовое изнашивание зубьев зубчатых колес коробок передач, заедание зубьев	Корректирование, улучшение, сплошная или поверхностная закалка зубьев, цементация, азотирование, нитроцементация рабочих поверхностей зубьев (стальных зубчатых колес), накатывание, электромеханическая обработка
Червяк и червячное колесо червячной передачи	Скольжение витков червяка по рабочим поверхностям зубьев червячного колеса	Заедание, изнашивание рабочих поверхностей, пластическое деформирование и излом зубьев чер-	Корректирование зубьев червячного колеса, уменьшение шероховатости, закалка или цементация рабочих по-

	са, изгиб червячного колеса	вячного колеса	верхностей витков червяка, накатывание, электромеханическая обработка
Звездочки цепных передач	Удары и трение рабочих поверхностей звездочек об элементы цепи	Изнашивание рабочих поверхностей зубьев	Проектирование звездочек с вогнутым профилем зубьев, уменьшение шероховатости, закалка или цементация рабочих поверхностей зубьев, накатывание
Валы и оси	Деформация изгиба и кручения, трение скольжения между цапфой и опорой	Усталостные изломы, 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 переходных поверхностей, поверхностная закалка, азотирование, накатывание, вибронакатывание
Опоры скольжения (подшипники и подпятники)	Трение скольжения между опорой и цапфой	Изнашивание, заедание, усталостные разрушения поверхности трения	Обеспечение условий жидкостного трения, увеличение жесткости опоры, высокая точность изготовления и малые значения высотных параметров шероховатости рабочей поверхности цапфы, нанесение на поверхности опор специальных покрытий для улучшения приработки, виброраскатывание, создание избирательного переноса
Подшипники качения	Качение шариков (или роликов) по наружному и внутреннему кольцам	Излом кольца, разрушение тел качения, изнашивание тел качения и рабочих поверхностей колец, усталостное выкрашивание (оспвидное изнашивание) рабочих поверхностей элементов подшипника, заедание деталей	Обеспечение податливости корпуса в нагруженной части подшипника, раскатывание шариком, алмазное выглаживание

		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 воздействие охлаждающей жидкости	Изнашивание внутренней поверхности (зеркала), появление рисок, задигов, 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 внутренней поверхности для улучшения прирабатываемости, виброраскатывание, триботехнология. Освинцовывание, оцинковывание лаком наружной поверхности, омываемой водой (для предохранения от коррозии)
Поршень двигателя внутреннего сгорания	Механические нагрузки от переменного давления газов и инерционных сил возвратно-поступательного движения поршня, тепловое воздействие газов на днище, трение боковой поверхности о зеркало гильзы	Изнашивание цилиндрической поверхности, изнашивание и пластическое деформирование кольцевых канавок, изнашивание отверстий в бобышках, прогар головки	Покрытие боковой поверхности легкоплавкими металлами (свинцом или оловом), фосфатирование, травление кислотой, сульфидирование, закалка с последующим старением поршней из алюминиевого сплава
Диски борон и луцильников	Абразивное воздействие почвы, силовые воздействия препятствий	Затупление лезвия в результате изнашивания, разработка квадратных отверстий	Закалка и отпуск до твердости - НВ 321—415, плакирование лезвия износостойкими материалами
Лапы культиваторов	Абразивное воздействие и давление почвы	Затупление режущей кромки лезвия в результате изнашивания сплава	Закалка и отпуск лезвия, наплавка на лезвие твердого сплава
Лопасты рабочего колеса гид-	Кавитационное и коррозионное действие среды, изгиб, действие пульсирующего потока, вызывающего вибрацию	Кавитационное разрушение поверхности детали	Применение материалов или облицовок, стойких против кавитационного разрушения
Пальцы звеньев гусениц гусеничного трактора	Трение без смазочного материала при высоких давлениях и ударных нагруз-	Изнашивание в местах трения о проушины (или втулки звеньев гусениц)	Закалка поверхности при нагреве ТВЧ, борирование

	как при наличии абразивного материала и влаги		
Втулки звеньев гусениц гусеничного трактора	То же	Изнашивание в местах трения о палец	Цементация с последующей закалкой и отпуском, дорнование
Лемехи плугов	Давление пласта почвы, воздействие абразивной среды	Затупление режущей кромки, затупление носка, образование фаски с тыльной стороны лезвия в результате изнашивания	Закалка с последующим отпуском лезвия, наплавка на лезвие твердого сплава (сормайта)
Отвалы плугов	Давление пласта почвы, воздействие абразивной среды	Поломка крыла и его изнашивание в месте схода пласта почвы	Цементация и последующая закалка с самоотпуском
Зубчатые колеса коробки пере передач трактора	Удары торцов зубьев при включении передачи, изгиб зубьев, контактное сжатие и сдвиг объемов металла прилежащих к эвольвентным поверхностям	Торцовое изнашивание зубьев, поломка 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
Звенья гусениц гусеничных тракторов	Контактные нагрузки, трение качения с проскальзыванием о беговую дорожку и боковые поверхности опорных катков, наличие абразивного материала и влаги в зоне трения	Изнашивание проушин, изнашивание цевков в месте зацепления с ведущим колесом, изнашивание беговой дорожки. Усталостные разрушения	Закалка и отпуск, нормализация или закалка в электролите беговых дорожек, наплавка почвозацепа вольфрамовым чугуном
Коленчатый вал	Периодические нагрузки от давления газов и сил инерции движущихся масс, вызывающие переменные напряжения в элементах вала; трение шеек о заливку вкладышей подшипников	Уменьшение диаметра, овальность и конусность шеек в результате изнашивания, прогиб или усталостный излом в результате несоосности или большого износа коренных подшипников	Создание овальной формы, поверхностная закалка, азотирование, полирование коренных и шатунных шеек для повышения износостойкости, накатка роликами или обдувка дробью переходных поверхностей (для увеличения выносливости)
Клапаны двигателя	Динамические	Изнашивание и	Заполнение внутренней

внутреннего сгорания	нагрузки от переменного давления газов и сил упругости пружины; омывание головок выпускных клапанов горячими газами, движущимися с большими скоростями	пригорание фаски тарелки клапана, изнашивание стержня, деформирование	полости головки пустотелого выпускного клапана на 50—60% металлическим натрием (для охлаждения клапана); наплавка фаски и головки выпускного клапана со стороны цилиндра твердым сплавом ВК.3 или сормайтотом (для повышения износостойкости и коррозионной стойкости); объемная закалка и отпуск
Поршневое кольцо двигателя внутреннего сгорания	Нагрев от соприкосновения с горячими газами; трение о внутреннюю поверхность гильзы при возвратно-поступательном движении	Изнашивание по наружной цилиндрической и торцовой поверхностям, снижение упругости, пригорание	Оптимизация формы, пористое хромирование одного или двух верхних компрессионных колец; электролитическое лужение или фосфатирование колец (для улучшения прирабатываемости и повышения коррозионной стойкости)
Вкладыш шатунных и коренных подшипников коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания	Переменные по значению давления газов и давления от сил инерции поступательно движущихся и вращающихся масс	Изнашивание, усталостное выкрашивание или подплавление заливки	Оптимизация формы, покрытие рабочей поверхности оловом или припоем ПОС-18, виброраскатывание
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	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, динами-	Затупление режущей кромки в результате изнашивания	Закалка, наплавка твердого сплава (сормайтота)

	ческие на- грузки при ударах о грунт		
--	--	--	--

3. Обеспечение качества при сборке изделий.

При ручной сборке качество изделий в полной мере зависит от качества поступающих на сборку деталей и квалификации исполнителей. При автоматизированной сборке качество изделий зависит не только от качества деталей, но и качества действующей во время работы всей технологической системы, включающей также оборудование и технологическую оснастку.

Отказы и появление брака в процессе сборки, простои оборудования — это результат действия всех перечисленных выше факторов. Поэтому все детали, предназначенные для автоматической сборки, подвергают 100%-ному контролю по всем ответственным поверхностям и всем или большинству вспомогательных поверхностей. Так, на некоторых фирмах резьбовые крепежные детали подвергают сплошному контролю по всем параметрам на сортировочных автоматах, причем допустимый брак не должен превышать одной детали на 100 тыс. штук. Иначе велики будут простои оборудования. Потребуется время на обнаружение брака и его устранение. По причине малой надежности велики отказы и простои сборочного оборудования, особенно промышленных роботов, коэффициент использования которых стремятся увеличить хотя бы до 0,8.

В условиях серийного производства изделий, когда требуется установка одинаковых или подобных деталей в разные собираемые изделия, а также при подаче деталей или укладке готовых изделий в кассеты в условиях массового производства, появляется потребность в использовании промышленных роботов (ПР). В условиях массового и крупносерийного производства целесообразно использовать автоматические сборочные системы.

Из общего числа соединений в изделиях машиностроения 30 — 40% приходится на соединения деталей с зазором, 10 — 19,3% — на соединения с натягом и 20 — 32% — на резьбовые.

При ручной сборке при установке в собираемые изделия деталей с зазором необходимо обеспечить на заключительном этапе относительное положение соединяемых деталей собираемых изделий и на предшествующих исключить повреждение сопрягаемых поверхностей деталей. Контроль выполнения работы, как правило, производят визуально, либо посредством контрольно-измерительных средств.

При использовании автоматических средств для обеспечения установки присоединяемых деталей с зазором помимо достижения качества соединения, как это имеет место и при ручной сборке, потребуется еще обеспечить соединение деталей и исключить их повреждение при ударе. Для этого автоматические средства и их технологическая оснастка должны обладать точностью и жесткостью и обеспечивать перемещение по требуемой траектории с заданной скоростью и ускорениями.

Для обеспечения установки присоединяемых деталей следует иметь в виду, что обычно сила сборки для деталей, соединяемых с гарантированным зазором, не превышает 100 — 150 Н. Так, сила сборки, необходимая для соединения деталей (вала и втулки) по цилиндрическим поверхностям при отверстии втулки диаметром $D_4 = 10...30$ мм с гарантированным зазором 0,03 — 0,05 мм при вертикальном положении оси посадочной ступени базовой детали, не превышает 50 — 80 Н при скорости установки детали 0,7 м/с. При горизонтальном и наклонном положении оси и тех же условиях сила сборки равна 98 — 147 Н. Если сила сборки превышает указанные значения, то это, как правило, связано с заклиниванием соединяемых деталей.

Нормальные реакции в местах контакта соединяемых деталей (менее 80 Н) не вызывают нарушения поверхностного слоя, если детали изготовлены из стали и сопрягаются по цилиндрическим поверхностям диаметром 25 мм с зазором 0,075—0,225 мм и их относительный перекос в процессе сборки $\gamma = 3...6^\circ$, а коэффициент трения $\mu = 0,12$. Причем его значения возрастают от 0,12 до 0,22 с увеличением угла γ от 3 до 6° .

По данным профессора Г. Я. Андреева, при сборке цилиндрических соединений деталей диаметром 100 мм с зазором 0,37 мм и относительным перекосом $\gamma=4^\circ, 2^\circ45'$ и $1^\circ30'$ контактные напряжения в соединяемых деталях при угловых фасках и нормальных реакциях в местах их контакта, равных 14 кН, достигают допустимых значений, вследствие этого при нагрузках, превышающих указанное значение, детали имеют повреждения на посадочных поверхностях в виде вмятин, глубина которых превышает параметр шероховатости.

В ряде случаев деформации деталей превышают допустимые значения, а поэтому необходимо либо ужесточение условий автоматической сборки соединений (т.е. допустимых относительных смещений и перекосов соединяемых деталей, уменьшаемых по мере вхождения одной детали в другую), либо изменение конструктивного выполнения заходных фасок (уменьшение угла и увеличение ее ширины) и других направляющих элементов на сопрягаемых поверхностях деталей. Об обеспечении качества соединения деталей с гарантированным зазором можно судить по изменению силы Р сборки, значение которой зависит от относительного положения соединяемых деталей — координаты 2, диаметральных размеров и формы посадочных поверхностей (рис. 68).

Для поддержания требуемого для выполнения сборочного процесса значения силы Р необходимо обеспечивать относительное положение соединяемых деталей либо непосредственно по их положению, либо по модулю и направлению действия сил реакций в местах контакта соединяемых деталей. Впервые адаптивные системы для сборки были предложены в Мос-станкине в 1966 г.

Точность совпадения осей посадочных поверхностей вращения соединяемых деталей будет обеспечена тогда, когда будут совпадать их оси. Положение каждой оси (линии в пространстве) определяют либо по показаниям двух пар датчиков, размещенных по двум образующим в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 69, а), либо при коротких посадочных поверхностях — по ним и торцу (плоскости), т.е. с помощью двух датчиков, размещенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и трех датчиков, упирающихся в торец (рис. 69, б). Последний случай обеспечивает худшие условия для сборки, поскольку результат зависит от относительного положения поверхностей, а также от диаметральных размеров поверхностей вращения соединяемых деталей.

Влияние диаметральных размеров соединяемых деталей на их относительное положение можно исключить, если навстречу имеющимся датчикам с каждой противоположной стороны соединяемых деталей предусмотреть еще по одному датчику. Тогда для обеспечения соединения деталей по поверхностям вращения потребуется совершить два поворота и два перемещения. Условия соединения деталей при размещении датчиков по двойной направляющей базы будут следующие:

$$\begin{aligned}(y_B + y_{B1})k_1 &= y_B'' + y_{B1}''; \\(x_A + x_{A1})k_2 &= x_A'' + x_{A1}''; \\(z_B + z_{B1})k_3 &= (z_B'' + z_{B1}'') - (x_A'' + x_{A1}''); \\(z_\Gamma + z_{\Gamma1})k_4 &= (z_\Gamma'' + z_{\Gamma1}'') - (y_B'' + y_{B1}'');\end{aligned}$$

где K_1 — K_4 — коэффициенты, учитывающие относительное положение датчиков А, А₁, А', А₁, Б, Б₁ и др. (рис. 69, в) при подаче ими сигналов.

Несколько иначе будут выглядеть условия равновесия для деталей, соединяемых по поверхностям вращения по двойной опорной базе (рис. 69, б):

$$\begin{aligned}(y_B + y_{B1})k_1 &= y_B'' + y_{B1}'' \\(x_A + x_{A1})k_2 &= x_A'' + x_{A1}'' \\(z_B - z_{B1})k_6 &= z_B'' - z_{B1}'' \\(z_\Gamma - z_{\Gamma1})k_5 &= z_\Gamma'' - z_{\Gamma1}''\end{aligned}$$

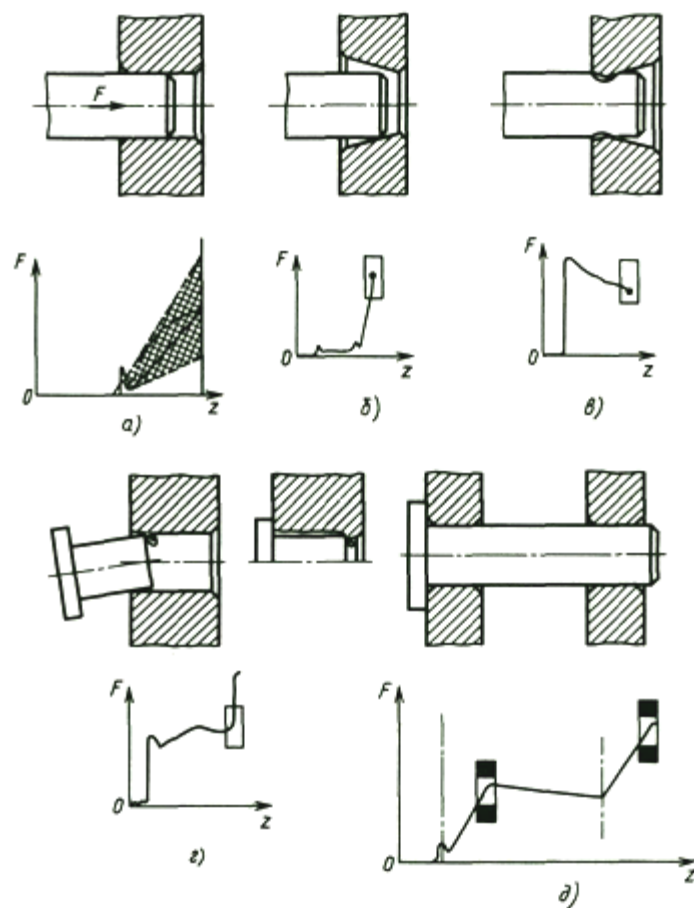


Рис. 68. Зависимость сборочной силы от формы и положения посадочных поверхностей соединяемых деталей: *a* — цилиндрическое соединение деталей; *б, в* — соединение деталей с коническим отверстием втулки; *г* — соединение деталей с перекосом; *д* — многоступенчатое соединение деталей

Для получения сигналов об относительном положении соединяемых деталей нужны размещенные соответствующим образом преобразователи (датчики Д1—Д8), сумматоры 2, усиленные устройства для подачи сигналов на исполнительные устройства ИУ1—ИУ4.

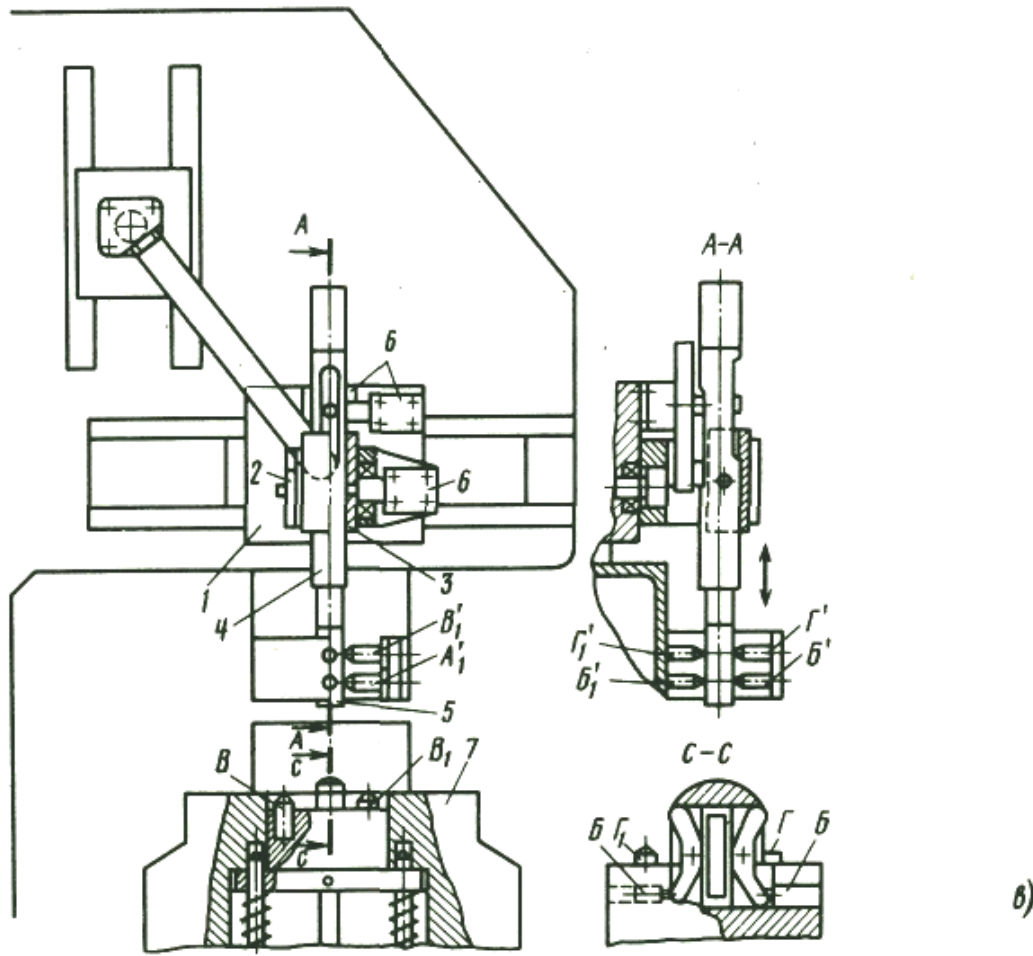
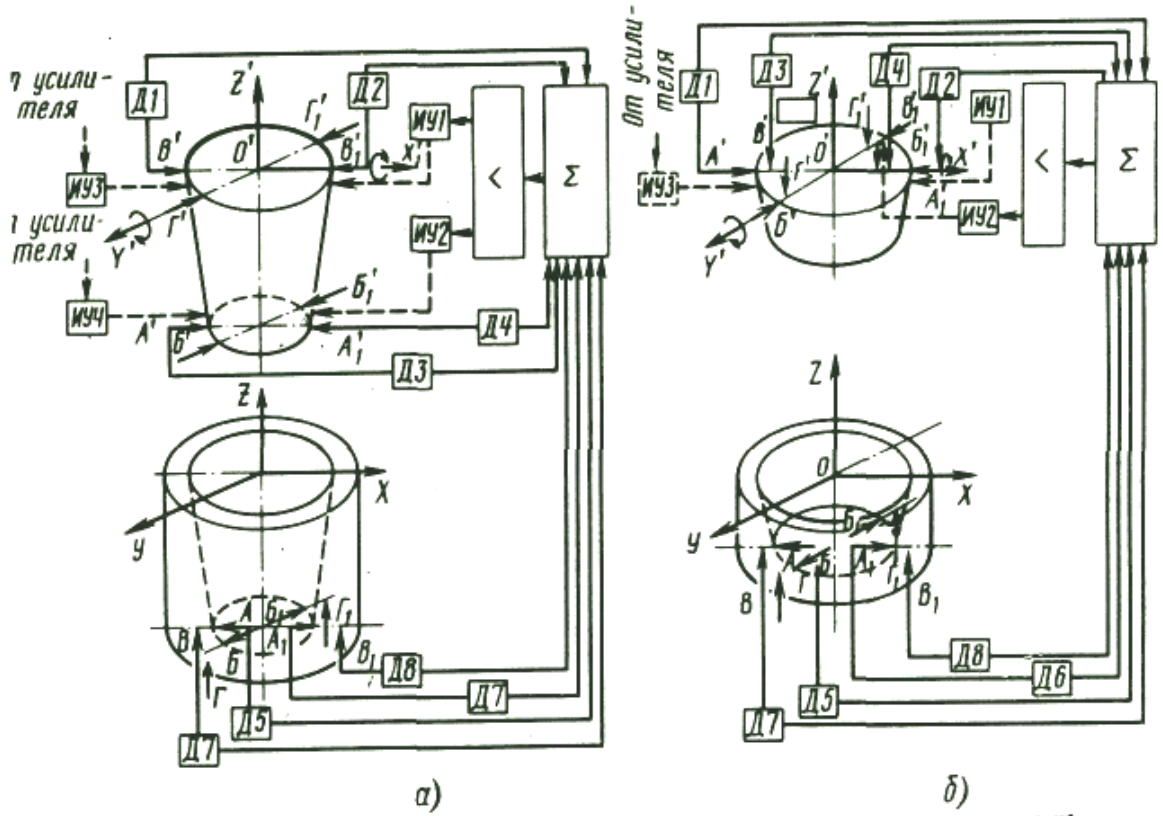


Рис.69. Размещение датчиков САУ в сборочной машине

Необходимые для сборки движения могут быть обеспечены при применении сборочной головки, оснащенной кареткой / с шарнирно укрепленной на ней стойкой 2. В стойке размещена

качающаяся пиноль 3, благодаря чему обеспечивается поворот в двух взаимно перпендикулярных направлениях укрепленной в шпинделе 4 сборочной головки с присоединяемой деталью 5. Требуемые регулировочные движения шпинделя 4 с деталью 5 и пиноли 3 сообщают три магнитострикционных устройства 6, а транспортному устройству 7 — серводвигатель по командам датчиков A_1 , A_1' и др.

Для получения необходимых сигналов датчики положения деталей в суммирующем блоке должны быть включены с помощью трансформаторов, предварительную настройку которых согласно уравнениям равновесия удобно производить соответствующими резисторами. Суммарные сигналы этого блока, число которых равно числу движений системы $O'X'Y'Z'$, поочередно поступают на вход усилителя рассогласований с фазоусилительным детектором, обеспечивающим одно из движений посредством исполнительных серводвигателей и магнитострикционных устройств. Очередность подключения сигналов обеспечивается релейной схемой обегания, управляемой конечными выключателями. Задержка переключения сигналов на время, необходимое для отработки рассогласования, достигается введением в схему обегания конденсаторов.

В настоящее время в большинстве случаев используют системы с пассивной адаптацией, при которой о положении присоединяемой детали судят по перемещению, осуществляемому в зависимости от возникающей при контакте деталей реакции.

Для решения задачи — обеспечение соединения деталей при значительных первоначальных относительных их смещениях (до 4 мм) промышленные роботы сборочной машины оснащают системой адаптивного управления (САУ) (рис. 70). В САУ входят датчики 3 для измерения относительного смещения соединяемых деталей в зависимости от значений реакции, возникающих в местах контакта деталей. Для этого две пары датчиков 3 установлены в двух взаимно перпендикулярных направлениях X и Y , а еще один датчик 3 — вдоль оси устанавливаемой детали. В измеряемом датчиками диапазоне от 0 до 4 мм различают 250 уровней выходного сигнала, которые одновременно являются мерой сил реакций, возникающих при взаимодействии соединяемых деталей. Сила реакции может достигать 5 Н.

Захватное устройство 6 с удлиненным шпинделем / соединяется со штангой электромагнитной муфты с плоскими дисками 2. Между дисками 2 муфты нагнетается сжатый воздух из пневмосистемы. Благодаря этому при напряжении тока в цепи 8 В возможно относительное смещение дисков 2 электромагнитной муфты. Смещение захватного устройства 6 в процессе соединения деталей происходит при наличии заходных фасок в отверстии втулки или на валу, при контакте которых возникает радиальная составляющая, обеспечивающая их относительное смещение путем отжатия самоцентрирующих пружин 4. Обычно (без нагрузки) шпиндель / и захватное устройство 6 занимают среднее положение под действием четырех самоцентрирующих пружин 4. При создании напряжения в 24 В в соленоидной катушке 5 диски 2 муфты соединяют в единое целое руку манипулятора, и она работает как жесткая конструкция.

Коррекция положения устанавливаемой детали для осуществления сборки и исключения заклинивания в процессе соединения производится системой управления промышленного робота. Для этой цели автоматическая сборочная машина снабжена управляющим устройством, содержащим блоки управления приводами и электромагнитной муфтой, блоки логики и мини-ЭВМ. Так обеспечивается сохранение качества деталей и их соединение с гарантированным зазором.

Для деталей, соединяемых по цилиндрическим и коническим поверхностям с гарантированным натягом с момента начала запрессовки устанавливаемой детали, сборочная сила

$$F =$$

где l_p — длина запрессовки детали; μ — коэффициент трения по посадочным поверхностям; α — уклон конической посадочной поверхности детали; p_{cp} — среднее давление на посадочных поверхностях соединяемых деталей; v — скорость прямолинейного перемещения устанавливаемой детали, $v=2...75$ мм/с (редко $v=100...110$ мм/с); K_{v1} , K_{v2} , — коэффициенты, учитывающие изменение сборочной силы при изменении соответственно скорости запрес-

совки детали и контактного давления; если $y=2$ мм/с, то K_{V1} , и $K_{V2}=0$; K_{ϕ} — коэффициент, учитывающий влияние угла фв заходной фаски вала на силу запрессовки: фв, °

.....	70	60	45	30	20	10
K_{ϕ}	1	0,8	0,61	0,43	0,4	0,39;

$K_{\text{б}}$ — коэффициент обеспечения базирования деталей.

В завершающий период сборки цилиндрического соединения для обеспечения базирования запрессовываемой детали по установочной базе (торцу бурта) с минимальным относительным перекосом потребуется дополнительная сила на деформирование посадочных поверхностей соединяемых деталей. Это учитывают введением коэффициента $K_{\text{б}}$. Его значения для стальных деталей, соединяемых с натягом 0,022 мм, будут зависеть от соотношения

$L_p > D_A$:	0,2	0,3	0,35	0,4	0,5	0,5
$K_{\text{б}}$:	1,6	1,43	1,35	1,27	1,2	1,1

Для деталей, соединяемых с натягом 0,055 мм:

$L_p > D_A$:	0,2	0,3	0,4	0,5
$K_{\text{б}}$:	1,45	1,3	1,2	1,1

Из формулы видно, что сборочная сила снижается с уменьшением натяга соединении цилиндрических деталей, длины посадочной ступени и угла заходной фаски вала. Поэтому валы целесообразно изготавливать с малым углом заходной фаски.

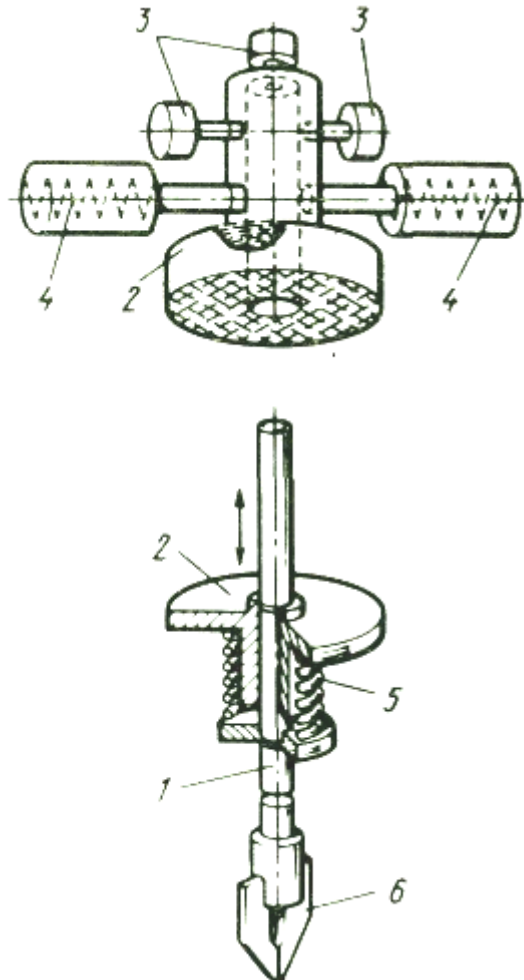


Рис. 70. САУ для соединения деталей с гарантированным зазором

В завершающий период сборки конических соединений необходимую силу сборки можно подсчитать по формуле (4.19), если принять коэффициенты K_{ϕ} , $K_{\text{б}}$ равными единице, а скорость равной 2 мм/с.

Сила для установки присоединяемой детали, а тем более для запрессовки, даже для одной и той же посадки из-за колебания размеров посадочных поверхностей в пределах допуска

может изменяться в десятки раз. Поэтому для ответственных изделий, например, транспортных машин, сила запрессовки ограничивается двумя предельными значениями. Наблюдая за показаниями манометра, измеряющего давление в рабочей полости силового цилиндра, или других датчиков, сигнализирующих о значениях сил реакций в местах контакта соединяемых деталей, и используя усилители системы управления, можно обеспечить требуемое значение силы запрессовки, изменяя скорость перемещения присоединяемой детали.

Запрессовка — технически простейший и часто наиболее экономичный способ соединения деталей, но при этом трудно обеспечить качество соединений. Новые системы запрессовки решают эту проблему. С их помощью можно наблюдать за процессом сборки и контролировать его. Бракованные соединения легко распознаются в процессе запрессовки и могут быть отсортированы.

При запрессовке детали подаются к месту сборки и затем соединяются до тех пор, пока сила воздействия пресса не достигнет установленного значения, при котором отключается пресс. Сила запрессовки обеспечивается гидравлическими, пневматическими или кривошипно-шатунными прессами. Применяют также пресса с электрическим приводом.

В простых случаях такое сборочное оборудование с контрольными средствами обеспечивает решение поставленной задачи — требуемое качество собранных соединений. Если при сборке возможно получение некачественных соединений, необходима специальная технологическая система. Работа этой системы построена на изучении процесса запрессовки детали. Следует учесть, что система с гидравлическими устройствами оказалась бы слишком инерционна из-за использования дроссельных вентилях и не сможет обеспечить точность относительного осевого положения соединяемых деталей в пределах долей миллиметра.

При запрессовке деталей из некоторых неметаллических материалов возможна частичная сварка из-за трения и потому движения запрессовываемой детали будет происходить рывками. При увеличенном натяге возможно образование стружки (кривая 1 на рис. 71), при коническом отверстии во втулке (кривая 3) часто невозможно получить надежное соединение. Соединения из таких деталей могут под воздействием рабочих нагрузок процессе эксплуатации привести к поломкам изделий, если они не будут во время обнаружены и отбракованы. Возможны другие погрешности соединяемых деталей: недостаточная или большая длина запрессовки или некачественное изготовление заходных фасок. Все это может привести к нарушению работы в процессе эксплуатации изделия.

Использование прессов с электрическим приводом облегчает процесс контроля параметров при запрессовке. В систему (рис. 72) входят датчики, размещенные на пуансоне пресса, усилители сигналов, система управления и исполнительный привод. Пуансон снабжен датчиками для контроля изменения силы запрессовки по мере перемещения. По кривой 2 на рис. 71 можно судить о характере изменения силы. Электромеханический привод, оснащенный высокомоментным двигателем с шариковой передачей, позволяет не только выбрать скорость подачи от 0 до 110 мм/с, но и обеспечивает регулирование требуемой скорости в процессе запрессовки. Система управления сравнивает фактические значения показаний датчиков с заданными. Если полученные результаты технологического процесса находятся в пределах запрограммированного поля допуска, соединение годное. Световые диоды показывают, соблюдается точность или нет. Задание осуществляется от обычных вычислительных машин.

Возможно до 13 различных программ запрессовки. В каждой из них указываются параметры для включения, отключения, контроля и тестирования. Пользователь может применять в каждом меню вспомогательные инструкции. Система управления обрабатывает результаты осуществляемого процесса запрессовки в соответствии с выбранной программой, обеспечивая необходимую силу запрессовки на всем пути

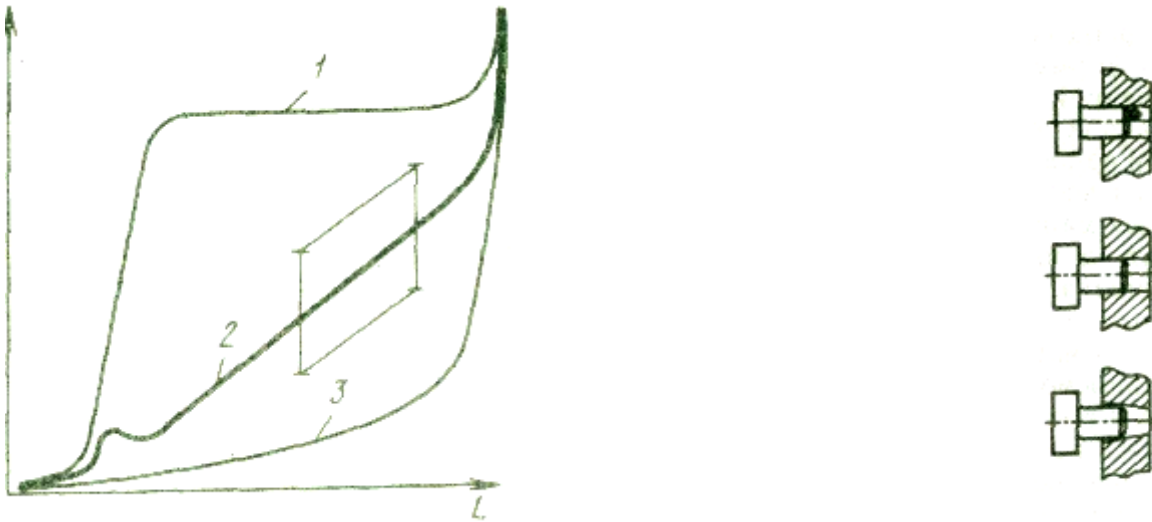


Рис. 71 Характер зависимости силы F запрессовки от формы и относительного положения соединяемых деталей

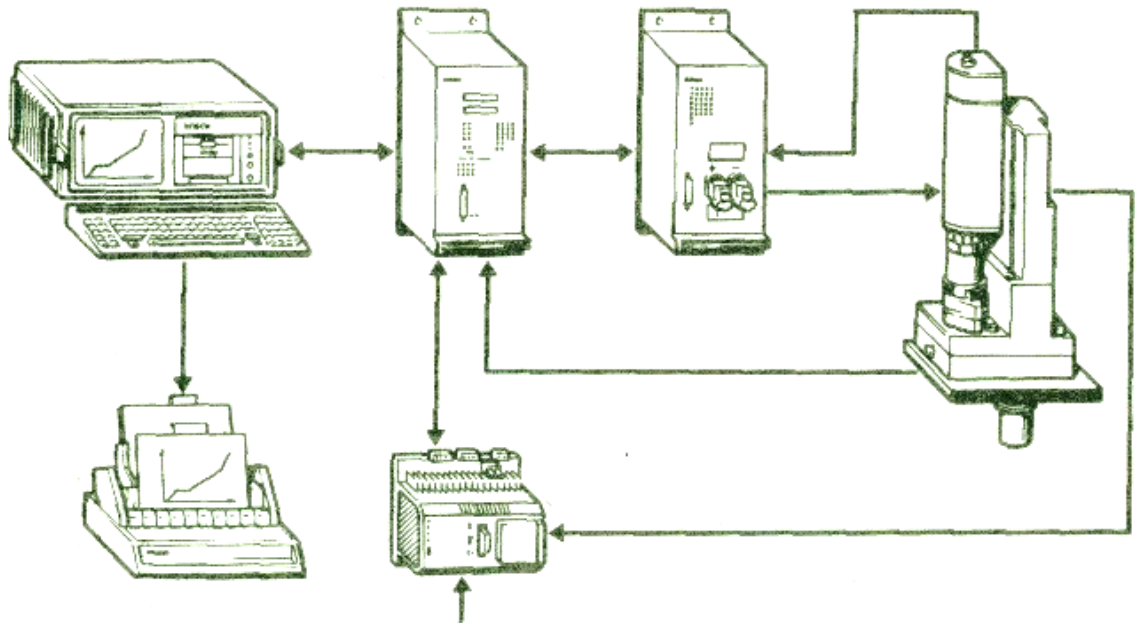


Рис.72. САУ для запрессовки деталей

В реальном масштабе времени. Система также может документировать результаты измерения посредством печатающего устройства. Эти результаты могут быть статически обработаны в компьютере и занесены в память ЭВМ. Результаты можно вывести на экран дисплея в виде графика изменения силы по мере запрессовки детали. На экране дисплея можно показать заданные предельные значения (см. выделенную зону на кривой 2 рис. 71). Можно ввести в память ЭВМ все значения силы запрессовки, а если необходимо, то и вывести на печать.

Система обеспечивает качество соединения деталей, повышает надежность сборочного оборудования и его производительность. Эту систему используют на некоторых предприятиях для таких ответственных операций, как запрессовка подшипниковых узлов в алюминиевые корпуса транспортных машин.

Особого внимания заслуживает обеспечение качества резьбовых соединений. Этот вид соединений по частоте использования занимает третье место. Примерно 75% резьбовых соединений собирают с помощью механизированного инструмента, около 12% вручную, примерно столько же автоматизированными средствами, в том числе 0,6% посредством промышленных роботов. Применение их особенно необходимо при сборке ответственных узлов автомобилей (монтажа колес и затяжки резьбовых соединений деталей).

Для этой цели используют либо универсальные ПР, которые помимо установки деталей, например, колес автомобилей, в определенной последовательности заворачивают и затягивают гайки, либо ПР с кинематической схемой типа «Зсага» со стационарным либо сменным винтоввертом, размещаемым в захватном устройстве ПР и по мере необходимости автоматически заменяемым на нужный инструмент. Винты и гайки подаются из вибробункеров по трубчатым питателям сжатым воздухом со скоростью до 25 м/с.

При сборке резьбовых соединений необходима значительная осевая сила для обеспечения базирования устанавливаемой детали по сопряженной. Однако максимальное значение силы сборки должно быть ограничено, поскольку необходимо исключить возможность повреждения заходных витков резьбы деталей в первоначальный момент их контакта. Обычно при сборке резьбовых соединений М8—М14 осевая сила составляет 150—300 Н.

Для сборки соединения нужно обеспечить определенную угловую скорость ввинчиваемой детали. Для расчета угловой скорости необходимо учесть, что за промежуток времени, соответствующий времени прохождения зазора выступом вала (втулка) при его вращении, последний должен углубиться со скоростью V на величину B , достаточную, чтобы исключить смятие соединяемых деталей (рис. 73):

$$\omega/\delta\tau=1000V/(h+B \sin\gamma+L), \quad (4.20)$$

где $\delta\tau$ — допустимое значение угла относительного поворота деталей; B — необходимое перемещение ввинчиваемой детали вдоль оси 2 для обеспечения сохранения качества соединяемых деталей; L — длина пути подвода шпинделя присоединяемой детали (учитывается только при включении вращения шпинделя до контакта соединяемых деталей).

Полученное значение угловой скорости ω позволяет определить частоту относительного вращения заворачиваемых деталей

В зависимости от шага P и посадки деталей в резьбовом соединении, их относительного положения в процессе сборки, частота вращения n (рис. 73, б), осевая скорость Pn (рис. 73, в) и линейная скорость $V=pd_v n/1000$, где d_v — наружный диаметр резьбы, не должны превышать тех значений, которые можно определить по графикам (рис. 73, б—г). Для гаек и коротких винтов частота вращения и скорости сборочного процесса должны быть на 1/3 меньше, чем указанные на рисунке. В завершающий период сборочного процесса необходимо, чтобы сила затяжки деталей не привела к их разрушению.

При сборке крутящий момент, действующий на заворачиваемую деталь, должен обеспечить требуемую силу затяжки, гарантирующую напряжение в растягиваемом винте, которое превышает напряжение от сил, действующих на соединение в процессе эксплуатации изделия. Значения крутящего момента $M_{кр}$ и силы затяжки деталей не зависят от того, как будет осуществляться затяжка — автоматически или вручную, поэтому их значения известны. Например, для резьбы М6 момент $M_{кр}=4,2...11 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Момент затяжки соединений деталей не должен превышать момент, который может вызвать смятие шлица винта, разрыв стержня или срез резьбы гайки. Следует учитывать также, что при заворачивании гайка подвергается действию крутящего момента, снижающего на 25% ее прочность на растяжение.

Крутящий момент, необходимый для затяжки резьбового соединения, на 90% затрачивается на преодоление трения между деталями соединения: около 40% по резьбе, приблизительно 50% по торцам и другим поверхностям и только 10% на затяжку. Поэтому момент затяжки $M_z \sim 0,1 M_{кр}$.

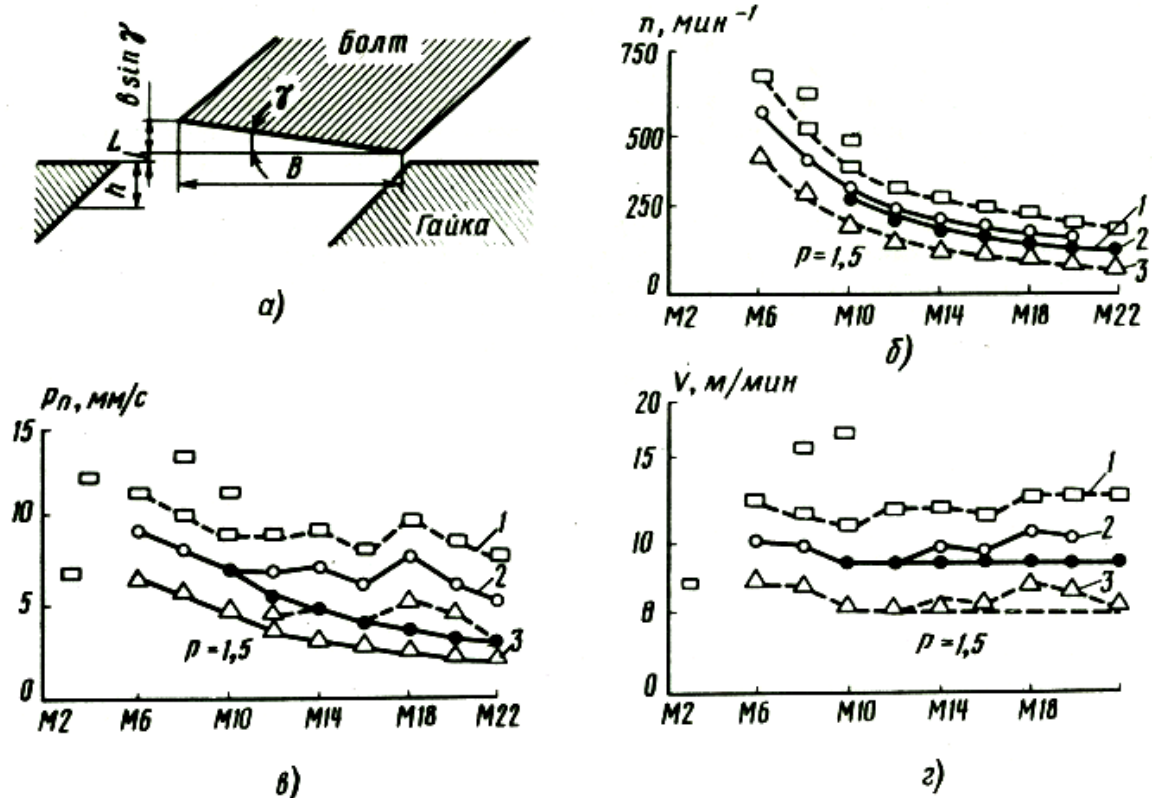


Рис. 73. Схема соединения резьбовых деталей (а) и графики режимов сборочного процесса завинчивания винтов, болтов и шпилек с крупным шагом (б—г): 1—для посадки G/d; 2— для посадки G/e; 3— для посадки G/g; штриховыми линиями показаны значения для резьбы с мелким шагом

Нестабильность свойств смазочного материала и параметров шероховатости сопрягаемых поверхностей соединяемых резьбовых деталей также оказывает существенное влияние на затяжку соединения. Вследствие этого при одном и том же крутящем моменте эффективность затяжки может значительно изменяться. Напряжение в резьбовых деталях будет также различным. Например, отклонения силы трения от номинального значения (кривая 2 на рис. 74, а) на $\pm 30\%$ (кривые 1 и 3) приводят к изменению напряжения а от -23 до $+43\%$. Можно также отметить, что после контакта торцами резьбовых соединяемых деталей угол их относительного поворота будет различным для жестких (рис. 74, б, кривая 1) и упругих соединений при наличии прокладки (рис. 74, б, кривая 2). В первом случае для достижения предела текучести материала винта (болта) достаточно поворота в 30° , а во втором — на угол 720° и более.

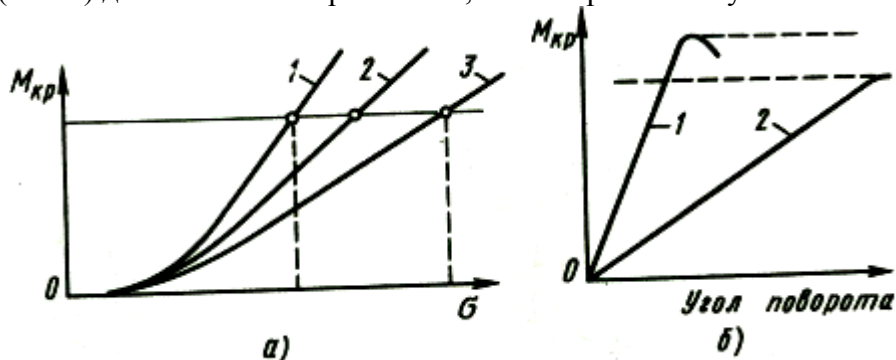


Рис. 74. Влияние крутящего момента на напряжение в соединении (а) и на угол поворота (б)

Для обеспечения качества резьбовых соединений деталей винтовёрты целесообразно снабдить средствами контроля удлинения винта, крутящего момента и угла поворота шпинделя. Значение крутящего момента программируют посредством ЭВМ на основе расчетных или статистических данных для всех этапов сборки соединения, напряжение в соединении контролируют по сжатию патрона или растяжению винта с использованием сигналов датчиков. Резуль-

таты контроля затяжки могут быть отображены на экране дисплея или выданы на печать принтом.

Особую сложность представляет завинчивание резьбовых деталей в нежесткие базовые детали, которые в процессе затяжки могут деформироваться и изменять свою форму. Для решения такой задачи требуется одновременно осуществлять затяжку с заданным крутящим моментом нескольких резьбовых соединений и следить за геометрической формой объекта. Характерный пример — сборка велосипедного колеса.

Для сборки велосипедного колеса нужно закрепить 40 спиц в ступице и ободе колеса и натянуть их ниппелями, завинченными на спицах со стороны обода. При этом необходимо, чтобы было обеспечено вращение колеса без торцового и радиального биения. Важно также, чтобы общее натяжение спиц было достаточным для предотвращения деформирования колеса при эксплуатации и не вызывало их разрушение от рабочей нагрузки. Кроме того, натяжение всех спиц должно быть равномерным, чтобы спицы и ниппели не разрушались из-за неравномерных нагрузок.

Обеспечить комплексное решение этой задачи с помощью обычного сборочного полуавтомата без САУ невозможно даже при использовании деталей повышенной точности по качеству резьбы, отклонениях диаметров отверстий и их межосевых расстояний на ободе до $\pm 0,5$ мм, а также при повышении точности расположения этих отверстий относительно плоскости симметрии обода. Поэтому предпочитают предварительную сборку колеса осуществлять на полуавтомате, на котором затраты времени не превышают 15с, а окончательную регулировку и контроль производить на автоматической сборочной машине с САУ.

Базирование колеса в сборочной машине для качественного его регулирования и контроля должно быть подобным базированию его в велосипеде, т.е. на оси 11, закрепленной в подшипнике пальца 4 (рис. 75). Сила закрепления колеса должна быть минимальной, и ее необходимо приложить там, где деформации обода 5 и ступицы 6 будут ничтожно малыми, т.е. в осевом направлении с торца ступицы 6.

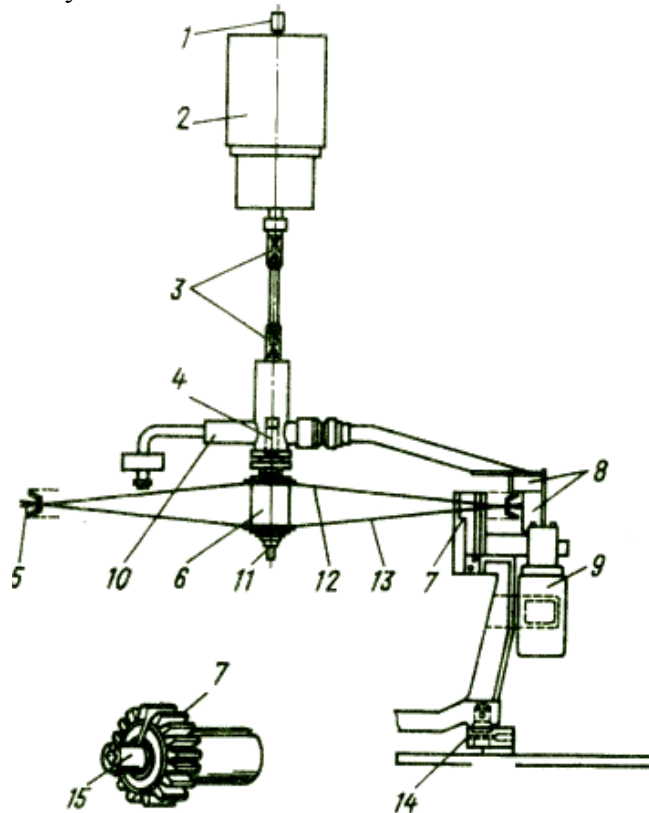


Рис. 75. Сборочная машина с САУ для регулирования и контроля качества велосипедного колеса

При зажиме ступицы 6 перемещается все колесо, при этом каждая спица (12, 13 и др.) попадает через прорезь в торцовый ключ 15, соединенный зубчатой передачей 7 с одним из 40

серводвигателей 9. Торцовые ключи 15 и серводвигатели 9 установлены на шарнирно-упругой опоре 14. Это дает возможность обеспечить такое положение этих устройств в зависимости от положения колеса, при котором их действие на него будет минимальным. Тем самым колесо может легко изменять свое положение в процессе натяжения спиц.

Поскольку ободы 5 колес имеют отклонения от круглости, то для обеспечения заданной их формы потребуется разное натяжение спиц, создаваемое торцовыми ключами 15, снабженными индивидуальными серводвигателями 9 для завинчивания ниппелей. Число серводвигателей 9 должно быть равно числу ниппелей.

Для качественного натяжения спиц нужно знать и учитывать исходную форму, диаметр и ширину обода 5, а также изменения в показаниях торцового и радиальных электромагнитных датчиков 8 вследствие возможного перекоса измерительного устройства 10, служащего для контроля формы колес в процессе его регулировки. Поэтому необходима точная установка начальных условий (базы отсчета). Обеспечивается с помощью двух серводвигателей Ма и Мб (рис. 76), которые воспроизводят до начала регулировки колеса его средние размеры. Для этого используют сигналы измерительного устройства 10 с датчиками, регистрирующими изменения положения обода в осевом и радиальном направлениях. Тем самым серводвигатели устанавливают измерительное устройство 10 на ноль для каждого колеса.

Во время установки нуля переключатель 5_a в канале осевого смещения замкнут 45 разность между базовым значением зазора и фактической его величиной поступает в виде сигнала в серводвигатель Ма, который регулирует отсчетную базу осевого смещения. Фильтр Ра имеет постоянную времени в несколько раз большую, чем постоянная времени измерительного устройства 10 (см. рис. 4.95), вращающегося с частотой около 250 мин. через упругие муфты 3 от электродвигателя 2 с датчиком 1. Следовательно, выходной сигнал является усредненной разностью между Положением колеса и положением отсчетной базы. Когда следящая система "сбалансирует сигналы, серводвигатель Ма отключается, и это положение используется в качестве отсчетной базы для данного колеса в осевом направлении. Следящая система радиальной отсчетной базы также устанавливается по среднему диаметру колеса, но в цепи для натяжения оставляется возможность небольшого изменения по диаметру, когда производится натяжение спиц. Так выставляется система на ноль. После этого во время вращения поворотного измерительного устройства 10 расположенные примерно на расстоянии около 3 мм от обода колеса в осевом и радиальном направлениях электромагнитные датчики 8, выполненные в виде сердечников (из V-образных пластин с бифилярной обмоткой), формируют сигналы об отклонении радиуса обода колеса от идеальной окружности и об осевом отклонении обода от плоскости вращения измерительного устройства 10. Эти сигналы используются для регулировки формы обода, а формируются они во вторичных обмотках датчиков 8, как индуцируемое напряжение, значение которого зависит от зазора a или b , т.е. от Положения обода 5. Питание первичной обмотки осуществляется от генератора частотой 400 Гц. Напряжение вторичной обмотки каждого датчика 8 сравнивается с напряжением базовой установки заданной на панели управления. Измерительное устройство, аналогичное 10 с датчиками 8, производит замеры зазора измерением напряжения во вторичной обмотке. По результатам замеров серводвигатели Ма и Мб производят установку на ноль, чтобы исключить некачественную сборку колеса. Задача регулировки большого количества взаимосвязанных сложных систем представляет большие трудности. Однако решение задачи упрощается, если представить колесо в виде ряда идентичных секций, формы и положение которых можно регулировать более или менее независимо. В данном случае колесо как бы состоит из десяти секций, причем каждая из них содержит две спицы 12, вставленные в верхний фланец ступицы 6, и две спицы 13, вставленные в нижний фланец. Для регулировки секций колеса используют простую систему адаптивного управления по дискретным данным, полученным от датчиков 8. Эта система осуществляет либо включение, либо выключение серводвигателей 9.

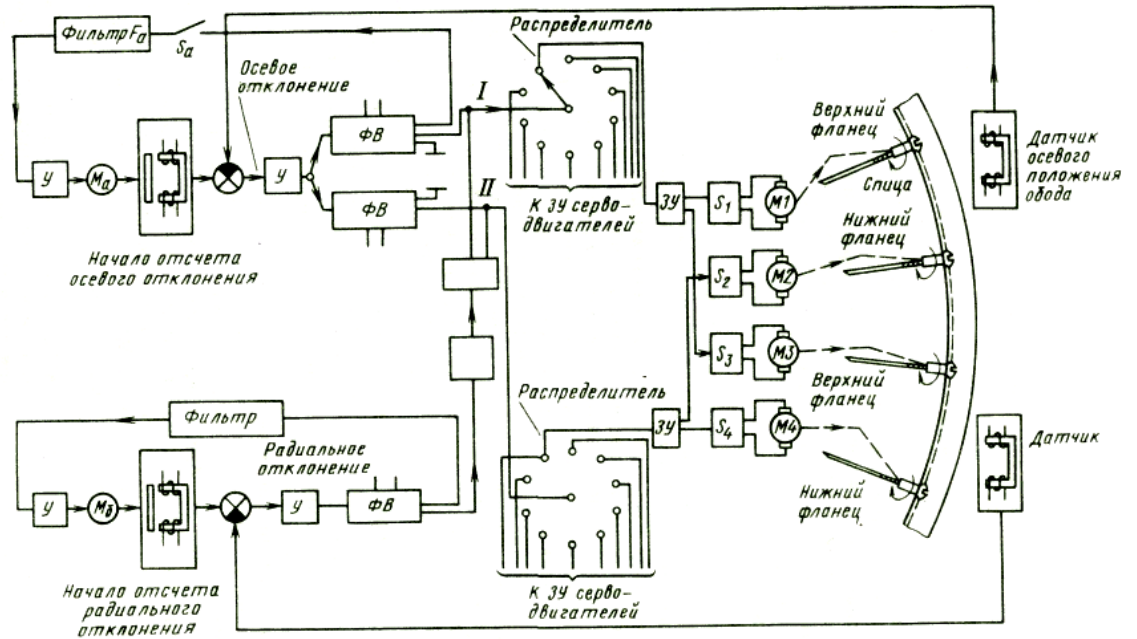


Рис. 76. САУ сборочной машины: У – усилитель; $М_а$ – $М_4$ – серводвигатели; ФВ – фотоэлектрический выпрямитель; ЗУ – запоминающее устройство; К – диодный ключ; I, II – управляющие устройства; S_1 – S_4 – переключатели

Для обеспечения качества колеса его спицы натягивают последовательно в несколько стадий, причем для каждой из них устанавливают свою вставку параметров регулирования.

Натяжение любой спицы на каждой стадии регулирования колеса приводит к смещению обода и уменьшению его радиуса в точке закрепления спицы. Например, натяжение спицы 12 смещает обод 5 вверх, а спицы 13 — вниз. Поскольку обычно необходимо уменьшение радиуса колеса в данном месте без смещения обода в осевом направлении, то роторы серводвигателей 9 должны вращаться одновременно, обеспечивая натяжение спиц 12 и 13.

Положение обода в заданной точке зависит в основном от положения нескольких соседних спиц. В первоначальный момент регулировки, когда натяжение спиц мало, обод практически не подвергается деформированию. С возрастанием натяжения спиц обод начинает деформироваться и необходим постоянный контроль за его изменением. Достигается это тем, что датчики 8 измерительного устройства 10 вращающегося вокруг обода 5 колеса, непрерывно следят за отклонениями формы колеса относительно заданной по чертежу. Во время натяжения сигналы о фактических погрешностях формы усиливаются и подаются к соответствующей группе серводвигателей. Включаются серводвигатели посредством реле, а информация о действительной форме колеса сохраняется с помощью конденсаторов в течение каждого оборота вращающегося измерительного устройства 10. На основе полученной информации осуществляется работа серводвигателя 9 для каждой спицы регулируемого колеса.

Один из контуров САУ для осевой регулировки колеса представлен на рис. 77 (на схеме показано изменение формы колеса от действия на него спиц других секций). Поворот на какой-либо угол ротора серводвигателя $М_1$ вызовет в зоне его действия смещение обода. Аналогично действие всех 39 серводвигателей. Влияние вращения ротора каждого серводвигателя на форму обода колеса зависит от положения ключа с серводвигателем относительно обода, а направление перемещения от того, какую натягивает он спицу — верхнюю или нижнюю.

Важно, чтобы серводвигатели, вращающие торцовые ключи в направлении, обеспечивающем натяжение спиц, не допускали значительного перерегулирования, так как дополнительное натяжение спиц с противоположной стороны обода колеса может компенсировать лишь небольшие ошибки перерегулирования. Если серводвигатели $М_1$ и $М_3$ выключены, а работают только серводвигатели $М_2$ и $М_4$, то натяжение спиц вызывает перемещение обода вниз. Аналогично при выключенных серводвигателях $М_2$ и $М_4$ и работающих серводвигателях $М_1$ и $М_3$

спицы тянут обод вверх. Если работают все четыре серводвигателя, то радиус обода данной секции колеса уменьшается.

После установки начальных отсчетных баз, как было описано выше, включаются все серводвигатели торцовых ключей. Электрический сигнал, воспроизводящий осевое положение колеса в точке под головкой, подается через 10-позиционные поворотные переключатели, которые переключаются вращающимся измерительным устройством 10. Напряжения, соответствующие среднему положению обода каждой из десяти секций, запоминаются конденсаторами до тех пор, пока устройство 10 с датчиками 8 измеряет другие части окружности. Сигналы осевой ошибки появляются в двух каналах I и II (см. рис. 76) противоположной полярности.

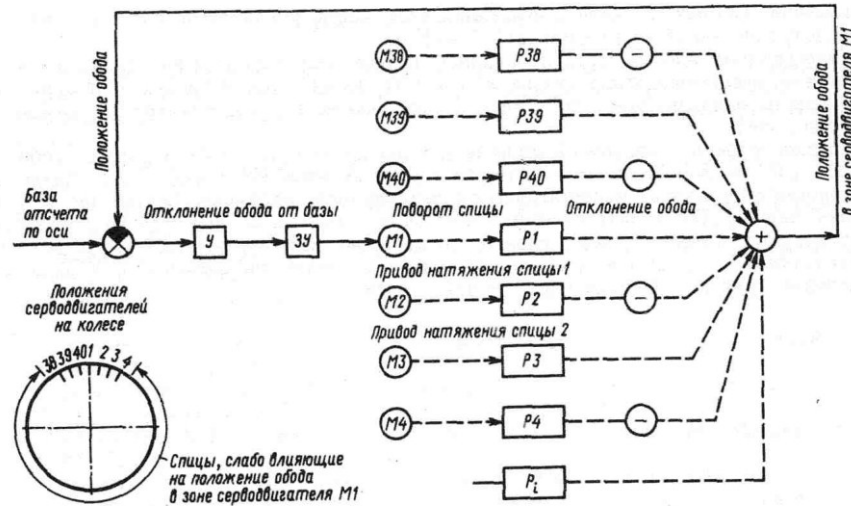


Рис. 77. Контур САУ для осевой регулировки обода велосипедного колеса:

У — усилитель; ЗУ—запоминающее устройство; M1,...,M40—серводвигатели; P1...P40 — редукторы; знаки «+» и «-» означают положительное или отрицательное перемещение отдельных участков обода относительно нулевого положения.

Отрицательный сигнал в канале I, обеспечивающий выключение серводвигателей M1 и M3, соответствует допустимому крайнему верхнему положению обода колеса, а отрицательный сигнал в канале II, обеспечивающий выключение серводвигателей M2 и M4, крайнему нижнему положению обода. Цепь радиального регулирования обода колеса управляет обоими каналами (I и II) осевого его регулирования, причем их сигналы суммируются с сигналом с выхода усилителя У1, ранее прошедшим через диодные ключи.

Во время предварительной сборки ниппели могут быть завинчены на спицы на разное число ниток; кроме того, в процессе натяжения спиц ниппели с большим натягом по резьбе будут завинчиваться медленнее, чем те, которые соединяются с меньшим натягом. Чтобы исключить возможность изготовления колес с недостаточным натяжением спиц, их регулируют посредством каждого серводвигателя в несколько стадий. На первой стадии крутящий момент работающего серводвигателя ограничивается использованием пониженной силы тока в обмотке возбуждения; роторы серводвигателей вращаются с высокой угловой скоростью, но уже при незначительном натяжении спиц обода скорость вращения снижается, при этом осуществляется предварительная регулировка формы колеса. На второй стадии САУ отключаются и включаются все серводвигатели, которые осуществляют натяжение ранее ненатянутых спиц, пока момент сопротивления завинчиванию каждого ниппеля не достигнет заданного значения. На третьей стадии вновь включается САУ и подается ток в обмотки возбуждения серводвигателей. Работа серводвигателей продолжается до тех пор, пока не отключатся муфты приводов вращения ниппелей. Торцовые ключи соскальзывают с ниппелей вдоль спиц, и серводвигатели работают подобно простым следящим системам.

При этом простой секторный переключатель на каждом валу торцового ключа служит для фиксации положения в течение этого периода. Вращающееся измерительное устрой-

ство 10 для снятия колеса перемещается также в безопасное положение. Собранное колесо освобождается через кулачковый вал от привода с предохранительной электромагнитной муфтой.

Качество собранного и отрегулированного колеса зависит от коэффициента усиления усилителя, чувствительности датчиков, передаточного отношения редукторов привода и величины запаздывания, допускаемой при включении или выключении каждого серводвигателя.

На рассмотренной сборочной машине удалось достигнуть точности готового обода колеса $\pm 0,1$ мм до снятия его с автомата и $\pm 0,4$ мм после его снятия. Такая разница в точности обусловлена недостаточным совершенством шарнирно-упругой опоры. На данной машине обеспечивается стабильное количество всех готовых отрегулированных велосипедных колес, причем затраты времени на выполнение этой операции не превышают 60 с и обеспечивается снижение трудоемкости примерно в 2 раза по сравнению с ручным выполнением данной работы.

