

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЁВА»

В.В.Уваров, В.С. Уварова, Е.А.Носова

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
И ИНСТРУМЕНТОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2008

УДК 621. 78:621.8(075)

ББК 34.651

У18

Рецензенты: проф. А.П. А м о с о в, проф. В.Р. К а р г и н

**Уваров В.В.**

У18 **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ:** учеб. пособие – 2-е изд., перераб. и доп. / В.В.Уваров, В.С. Уварова, Е.А.Носова. – Самара: Изд-во Самар.гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 120 с.

**ISBN 978-5-7883-0594-3**

Изложены содержание, объем и последовательность разработки комплекса вопросов при выполнении курсовой работы по дисциплинам «Материаловедение» и «Термическая обработка металлов и сплавов». Описывается методика выбора материалов с требуемыми свойствами и заданными условиями эксплуатации конкретных деталей машин и инструментов, даются указания по составлению общего технологического маршрута их изготовления и описанию процессов формирования структуры и свойств на отдельных операциях, в том числе обработки давлением. Главное внимание уделено разработке вопросов, связанных с выбором и обоснованием технологических режимов операций термической обработки, с выбором необходимого оборудования, оснастки и средств контроля для их выполнения. Даются также указания по выбору и описанию вспомогательных и дополнительных операций, связанных с термической обработкой. В приложениях приведены данные, необходимые для разработки конкретных технологических процессов термической и химико-термической обработки.

Предназначено в качестве учебного пособия по специальности 150106, может быть также использовано при выполнении дипломных проектов по специальностям 150106 и 150201. Подготовлено на кафедре технологии металлов и авиаматериаловедения.

УДК 621. 78:621.8(075)

ББК 34.651

**ISBN 978-5-7883-0594-3**

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2008.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ПО ЗАДАНЫМ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ И СВОЙСТВАМ.....	6
2. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА	13
3. ВЫБОР ТИПА ЗАГОТОВКИ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ И ИНСТРУМЕНТА.....	15
4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛУФАБРИКАТОВ (ЗАГОТОВОК) МЕТОДАМИ КОВКИ И ШТАМПОВКИ.....	21
4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	21
4.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИНТЕРВАЛ КОВКИ И ШТАМПОВКИ.....	21
4.3. ВЫБОР И КРАТКАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ОСНОВНЫХ ОПЕРАЦИЙ ОМД.....	22
4.3.1 Ковка.....	22
4.3.2 Объемная штамповка.....	24
4.3.3 Штамповка на молотах.....	25
4.3.4 Штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах (КШГП).....	25
4.4.5. Штамповка на горизонтально- ковочных машинах (ГКМ).....	26
5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОКОВОК.....	28
6. ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТЛИВОК.....	30
7. УПРОЧНЯЮЩАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ.....	34
7.1. ЗАКАЛКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ.....	34
7.2. ОТПУСК ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ.....	46
7.3. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА ДЕТАЛЕЙ.....	52
8. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ.....	59
8.1. ЦЕМЕНТАЦИЯ (НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ) ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ.....	59
8.2. АЗОТИРОВАНИЕ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ЦИАНИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ.....	69

9. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ, СВЯЗАННЫЕ С ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ.....	79
10. ДЕФЕКТЫ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....	82
10.1. КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ.....	83
10.2. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТОВ.....	85
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	93
Приложение 1.....	95
Приложение 2.....	102
Приложение 3.....	106

## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей целью современной системы обучения в высшей школе является повышение качества профессиональной подготовки специалистов. Достойные знания, полученные в области материаловедения и термической обработки, должны обеспечивать в производственных процессах рациональное, эффективное использование деталей и заготовок из разных материалов при соблюдении требований надёжности в эксплуатации, экономике, экологии и безопасности труда. В связи с этим выполнение практической курсовой работы, как завершающего звена в материаловедческой подготовке специалистов в области металлургического производства, приобретает важное значение. Настоящее учебное пособие поможет будущим инженерно-техническим работникам увязать свои теоретические знания с практическими навыками разработки и проектирования процессов термического воздействия на готовые детали или полуфабрикаты, а также облегчит понимание и выбор специальной литературы по материаловедению и термической обработке.

Авторы, не претендуя на исчерпывающую полноту изложения всех разделов курсовой работы, стремились последовательно на современном научном уровне в доступной форме изложить методику выбора материалов и процессов формирования структуры и свойств на всём цикле операций термообработки, а также дать обоснование выбора необходимого оборудования и средств контроля. Данное учебное пособие является вторым изданием. Десятилетний опыт использования первого издания показал его эффективность и в то же время необходимость переработки и дополнения отдельных разделов.

Следует отметить инициатора создания пособия Н.П. Морозова, внесшего значительный методический и научный вклад в содержание первого издания.

## 1. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ПО ЗАДАНЫМ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ И СВОЙСТВАМ

Под термином «выбор материала» понимается выбор марки стали или сплава и назначение вида его термической обработки. Выбранный материал должен:

обеспечить необходимую прочность, надежность и стойкость (долговечность) изделия в конкретных условиях эксплуатации;

обладать оптимальными технологическими свойствами, позволяющими изготовить деталь наиболее экономичными способами;

быть по возможности наиболее дешевым и недефицитным.

Основой для правильного выбора материала являются его физико-механические свойства. К числу основных свойств относятся следующие:

1. Характеристики прочности (сопротивления деформации) – модуль упругости  $E$ , предел прочности  $\sigma_b$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ . Характеристики пластичности – относительное сужение  $\psi$  и относительное удлинение при разрыве  $\delta$ . Учитывая прямую связь между прочностью и твердостью, а также простоту определения последней, иногда вместо  $\sigma_b$  используют твердость по Бринеллю  $HB$ .

2. Характеристики надежности (сопротивления хрупкому разрушению) – ударная вязкость  $KCU$  ( $a_n$ ), порог хладноломкости  $T_{50}$ , вязкость разрушения  $K_{Ic}$  и др.

3. Характеристики долговечности – предел усталости  $\sigma_{-1}$ , скорость роста трещин усталости (СРТУ или  $dI / dN$ ), износостойкость (чаще всего оценивается по твердости  $HRC$ ), коррозионная стойкость и жаростойкость, теплостойкость и предел длительной прочности  $\sigma_d$  или время до разрушения  $\tau_p$  при заданных температуре и напряжении и др.

Количество и номенклатура заданных свойств определяются конкретным назначением и степенью ответственности детали. Они могут задаваться количественно, а иногда для некоторых свойств и качественно. Последний вариант характерен для задания технологических свойств и экономических показателей. В большинстве случаев количественно задают  $HB(HRC)$ ,  $\sigma_b$  или  $\sigma_{0,2}$ ,  $\psi$  или  $\delta$ ,  $KCU$ .

Уровень свойств материалов зависит от химического состава (в частности уровня легирования сталей) и их структурного состояния (режима термической обработки). Общая тенденция их измене-

ния такова: с повышением прочности характеристики пластичности и вязкости падают. Наибольшую прочность, твердость и износостойкость стали имеют после закалки и низкого отпуска со структурой мартенсита отпуска, а наибольшую вязкость — после улучшения (закалка + высокий отпуск) со структурой сорбита отпуска.

Наилучшее сочетание прочности и вязкости при любом уровне  $\sigma_b$  или *HRC* достигается только при сквозной прокаливаемости на мартенсит. Прокаливаемость характеризуется критическим диаметром  $d_k$ , зависящим от уровня и характера легирования. Поэтому выбор марки стали для достаточно ответственных деталей, которые имеют сквозную прокаливаемость, определяется размером их сечения, а уровень прочностных и пластических свойств - температурой отпуска.

Сведения о свойствах сталей и сплавов в зависимости от вида и режима термической обработки приводятся в справочной литературе [1 – 3] и методических разработках [4 – 6]. В большинстве случаев они определены на стандартных образцах небольшого сечения с однородной структурой. В некоторых источниках [8] эти сведения приведены с учетом несквозной прокаливаемости и размера сечения (масштабный фактор) или способа получения заготовки (полуфабриката).

Для обоснованного выбора стали или сплава и их термической обработки рекомендуется следующая последовательность.

1. Провести анализ условий работы детали (инструмента). Для этого следует по эскизу или чертежу детали представить схему ее работы в узле, определить характер и условия нагружения. Затем на основе этого анализа описать возможные виды разрушения и другие причины выхода из строя. Для многих типовых деталей и инструментов они приведены в литературе [9].

2. Четко сформулировать требования к свойствам материала в качественном и, где это возможно, количественном виде, ранжировав их по важности.

3. Определить группу сплавов, которые обладают свойствами, близкими к требуемым.

Вид материала (сталь, бронза, алюминиевый сплав и т.д.) указан в задании на курсовую работу.

По функциональному назначению изделия и условиям его работы не представляет большой сложности установить название общей группы, к которой принадлежит искомый сплав. К таким

большим группам (разновидностям) можно отнести, например, стали: конструкционные общего назначения, пружинно-рессорные, быстрорежущие, штамповые для холодного деформирования, штамповые для горячего деформирования, коррозионно-стойкие и т.д., сплавы жаропрочные на никелевой основе и т.д.

Далее необходимо продвигаться по классификационной схеме от старших уровней иерархии к младшим, постепенно ограничивая число рассматриваемых марок до малых групп. При этом следует ориентироваться на одно — два наиболее важных требования (в качественной или количественной формулировке), которые прямо или косвенно присутствуют в названии группы. Например, стали для штампов холодного деформирования высокой износостойкости, стали для штампов горячего деформирования повышенной теплостойкости и вязкости, высокопрочные конструкционные стали и пр.

При отнесении конструкционных сталей общего назначения к числу среднеуглеродистых улучшаемых или низкоуглеродистых цементуемых производится сопоставление свойств по прочности, вязкости и износостойкости (твердости поверхности *HRC*) с требуемыми по заданию. Искомая малая группа по уровню легирования улучшаемых сталей устанавливается по прокаливаемости, которая определяется размерами сечения или глубиной упрочненного слоя, а цементуемых сталей — по прочностным свойствам сердцевины (или твердости *HB*).

4. В выбранной группе сталей или сплавов необходимо остановиться на одной марке, которая после соответствующей термообработки может наиболее полно удовлетворить все ранее сформулированные требования и заданные свойства. При этом следует использовать выработанные практикой рекомендации по назначению (области рационального использования) отдельных марок сталей и сплавов [1 – 9].

5. Установить оптимальный вид упрочняющей термической или химико-термической обработки на заданный уровень свойств. При этом следует отдавать предпочтение наиболее экономичным и производительным процессам в соответствующем типе производства, например газовой цементации (вместо твердой), закалке с цементационного нагрева, поверхностной закалке с нагрева ТВЧ в условиях крупносерийного или массового производства. Классификация операций термической и химико-термической обработки стали приведена ниже в табл. 1.

Таблица 1. Классификация операций термической и химико-термической обработки стали

Название операций	Содержание операций	Назначение операций
Полный отжиг	Нагревание доэвтектоидной стали до температуры выше критической точки $A_{c3}$ (линия GS), выдержка и последующее медленное охлаждение	Создание мелкозернистой структуры, понижение твердости и повышение пластичности, снятие внутренних напряжений
Неполный отжиг	Нагревание стали до температуры выше критической точки $A_{c1}$ (линия PSK), но ниже $A_{s1n}$ (SE), выдержка и последующее медленное охлаждение	Для улучшения обрабатываемости резанием проката и поковок. Применяется вместо полного отжига для заэвтектоидной стали
Отжиг на зернистый цементит	Нагревание стали до температуры на несколько градусов выше критической точки $A_{c1}$ , длительная выдержка, медленное охлаждение до $650^{\circ}\text{C}$ и последующее охлаждение на воздухе	Понижение твердости и улучшение обрабатываемости инструментальных и подшипниковых сталей
Изотермический отжиг	Нагревание стали до температуры выше критической точки $A_{c3}$ (или $A_{c1}$ ), выдержка, ускоренное охлаждение до температуры немного ниже точки $A_{r1}$ , выдержка при температуре для завершения перлитного превращения и охлаждение на воздухе	Для улучшения обрабатываемости резанием легированной стали, сокращения длительности отжига и устранения внутренних напряжений
Низкотемпературный отжиг	Нагревание стали ниже критической температуры, выдержка и последующее охлаждение	Снятие внутренних напряжений, снижение твердости
Диффузионный отжиг	Нагревание стали значительно выше критической температуры $A_{c3}$ ( $1050\text{—}1150^{\circ}\text{C}$ ), длительная выдержка и охлаждение в печи до заданной температуры	Устранение химической неоднородности (ликвации) у легированной стали
Рекристаллизационный отжиг	Нагревание подвергшейся холодной пластической деформации стали выше температуры рекристаллизации (ниже критической температуры), выдержка и последующее охлаждение	Снижение твердости и увеличение пластичности холоднообработанной (тянутой, катаной или штампованной) стали

Название операций	Содержание операций	Назначение операций
Нормализация	Нагревание стали до температуры выше критической точки $A_{c3}$ ( $A_{cm}$ ), выдержка и последующее охлаждение на воздухе	Измельчение зерна, разрушение карбидной сетки и подготовка к дальнейшим операциям термической обработки
Закалка при непрерывном охлаждении (обычная закалка)	Нагревание до температуры выше критической точки $A_{c3}$ (доэвтектоидные стали) или $A_{c1}$ (заэвтектоидные стали), выдержка и охлаждение со скоростью не менее критической	Повышение твердости и прочности
Закалка местная	Закалка части изделия, где необходима высокая твердость и износостойкость	Создание высокой твердости, где это требуется (как правило, на поверхности), и сохранение вязкости в остальной части изделия
Закалка с подстуживанием	Подстуживание изделий перед погружением в закалочную среду с целью уменьшения разницы между температурой изделия и охлаждающей средой	Повышение твердости и прочности и снижение внутренних термических напряжений (по сравнению с получаемыми при обычной закалке)
Закалка в двух средах	Охлаждение изделий в воде с последующей переброской в масло или выдачей на воздух, чтобы мартенситное превращение протекало в условиях медленного охлаждения	Повышение твердости и прочности и снижение структурных напряжений
Закалка ступенчатая	Быстрое охлаждение в зоне температур перлитного и промежуточного превращений в расплавленной соли, кратко временная выдержка при температуре несколько выше (ниже) мартенситной точки $M_n$ в течение времени, не вызывающего распада аустенита, и последующее охлаждение на воздухе	Повышение твердости и прочности, снижение внутренних напряжений и предупреждение образования закалочных трещин и напряжений
Закалка изотермическая	Быстрое охлаждение через зону перлитного превращения в расплавленной соли, выдержка в этой среде в зоне температур промежуточного превращения для возможно полного распада аустенита и охлаждение на воздухе	Повышение твердости и прочности и уменьшение термических и структурных напряжений, предупреждение образования трещин, деформаций

Продолжение табл. 1

Название операций	Содержание операций	Назначение операций
Закалка с самоотпуском	Кратковременное погружение изделий в закалочную среду с последующим медленным охлаждением на воздухе, во время которого закалившаяся зона отпускается за счет тепла сердцевины или той части, которая не погружалась в закалочную среду	Повышение твердости, прочности и уменьшение внутренних напряжений и замена последующего низкого отпуска
Закалка светлая	Нагревание в защитной атмосфере и охлаждение в расплавленной щелочи	Повышение твердости и прочности и предупреждение обезуглероживания, окисления, сохранение чистоты поверхности
Закалка поверхностная	Нагревание электротокком или газовым пламенем только поверхности изделия; сердцевина изделия после охлаждения остается незакаленной	Создание твердой, износостойчивой поверхности при сохранении прочной и вязкой сердцевины
Отпуск	Нагревание закаленной стали ниже нижней критической точки $A_{c1}$ (линии <i>PSK</i> ), выдержка и охлаждение	Снижение внутренних напряжений, увеличение пластичности и уменьшение твердости, получение заданной структуры
Низкотемпературный отпуск	Нагревание закаленной стали до 150—220°C, выдержка и охлаждение. Отпуск при 100—120°C называется старением	Снижение внутренних напряжений при сохранении высокой твердости и износоустойчивости
Высокотемпературный отпуск	Нагревание закаленной стали до 550—650°C, выдержка и охлаждение. Закалку и высокотемпературный отпуск называют улучшением	Получение высокой пластичности при достаточной прочности
Обработка холодом	Охлаждение закаленной стали до температуры ниже (или несколько выше) точки <i>M<sub>k</sub></i> , выдержка и медленное повышение температуры до комнатной	Устранение остаточного аустенита для стабилизации размеров, повышения твердости и износоустойчивости

Название операций	Содержание операций	Назначение операций
Цементация	Нагревание стали в твердом, газообразном или жидком карбюризаторе до температуры в интервале превращений или выше, выдержка при этой температуре, последующее быстрое или медленное охлаждение	Насыщение поверхностного слоя стали углеродом. Придание путем дальнейшей термической обработки высокой твердости поверхностному слою при сохранении прочной и пластичной сердцевины
Азотирование	Нагревание стали в газообразном аммиаке до температуры не ниже 450°С, выдержка (обычно длительная) и последующее быстрое или медленное охлаждение	Насыщение поверхностного слоя стали азотом. Повышение твердости, износоустойчивости и антикоррозионных свойств
Цианирование	Нагревание стали в жидком газообразном или твердом цианизаторе до температуры не ниже 500°С, выдержка и последующее быстрое или медленное охлаждение	Насыщение поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом. Повышение твердости, износоустойчивости и улучшение режущих свойств
Диффузионная металлизация	Нагревание стали в контакте с металлосодержащей средой до высокой температуры, насыщение поверхности стали алюминием (алитирование), хромом (диффузионное хромирование), кремнием (силицирование) и другими металлами, выдержка и последующее охлаждение	Придание стали специальных физических и химических свойств (жаростойкости, кислотоупорности, антикоррозионных свойств и др.)

## 2. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

Описание выбранной или заданной марки стали или сплава включает химический состав, критические точки, фазовый состав или структуру в различных состояниях (в том числе в равновесном), влияние легирующих элементов на структуру и свойства, механические и технологические свойства и другие необходимые данные.

В начале описания указывается принадлежность стали или сплава к той или иной группе по назначению и системе элементов (например, конструкционная улучшаемая хромоникелевая сталь; высокопрочный, алюминиевый сплав системы Al – Zn–Cu – Mn и т.д.).

Химический состав приводится в таблице по всем элементам, включая примеси, в соответствии с ГОСТом, номер которого указывается в заголовке таблицы. Содержание легирующих добавок ограничивается верхним и нижним пределами, а примесей — только верхним. Некоторые марки поставляются по отраслевым стандартам (ОСТ) или техническим условиям (ТУ), номера которых также должны быть указаны.

Температуры критических точек  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ,  $A_{cm}$ ,  $A_{r1}$ ,  $A_{r3}$  и  $M_n$  для сталей приводятся также в виде таблички и выбираются из литературных данных [10].

Классификация сталей по равновесной структуре производится с учетом уровня и характера легирования. При отсутствии прямых указаний на структуру данной марки низко- и среднелегированных сталей, она устанавливается ориентировочно путем определения положения смещенных точек  $S$  и  $E$  на диаграмме железо — углерод в зависимости от суммарного содержания легирующих элементов, указанных в марке. Равновесную структуру необходимо представить на рисунке с соблюдением соотношения площадей, занятых отдельными структурными составляющими. При наличии в классификации операций термической и химико-термической обработки стали карбидов легирующих элементов или интерметаллидов необходимо их указать.

Структурный класс (структура в нормализованном состоянии) этих сталей находится по данным [11] или ориентировочно определяется по сумме легирующих элементов в марке. Структурный класс высоколегированных сталей ряда марок приводится также в марочнике сталей [1] или устанавливается по диаграмме Шеффлера

по эквиваленту хрома и никеля [9]. Кроме этого, указывается структура стали после окончательной термообработки.

При описании влияния легирующих элементов следует исходить из целей легирования данной стали или сплава и конкретного уровня (содержания) только тех из них, которые обозначены в марке. Нужно указать также влияние вредных примесей. Влияние легирующих элементов в стали на прокаливаемость должно быть оценено критическим диаметром.

В конструкционных сталях, кроме того, следует указать влияние каждого легирующего элемента или их комплекса на размер зерна, порог хладноломкости, прочность и вязкость стали в различных состояниях, отпускочупорность, отпускную хрупкость, флокеночувствительность и пр.

При описании легирования в инструментальных сталях указывается назначение элемента и его влияние на фазовый состав (специальные карбиды), равновесную структуру, температуру закалки, закаливаемость и прокаливаемость, эффект вторичного твердения и теплостойкость, износостойкость, вязкость, склонность к ликвации карбидов и отпускной хрупкости и пр.

Из технологических свойств литейных сталей и сплавов приводятся: температурный интервал кристаллизации, жидкотекучесть, объемная и линейная усадка, герметичность, горячеломкость, а также свариваемость, обрабатываемость резанием, коррозионная стойкость. Для деформируемых сталей и сплавов указывается свариваемость, обрабатываемость резанием, температурный интервал горячей обработки давлением, а также основные виды сортамента продукции, поставляемой металлургическими заводами.

Механические свойства стали приводятся в состоянии поставки и после заданной упрочняющей термообработки.

### 3. ВЫБОР ТИПА ЗАГОТОВКИ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ И ИНСТРУМЕНТА

Процесс изготовления заданной детали или инструмента состоит из комплекса последовательно выполняемых и взаимосвязанных между собой операций. Как правило, он включает получение заготовки, ее предварительную термическую обработку, механическую обработку резанием, упрочняющую термическую обработку, шлифование и ряд других отделочных операций. Правильно разработанная их последовательность (технологический маршрут) должна обеспечить высокое качество по свойствам и геометрии детали, наименьший расход материала (высокий коэффициент использования металла — КИМ), высокую производительность и экономичность производства продукции.

Проектирование технологии начинается с выбора типа (метода получения) заготовки. Перечислим основные типы заготовок, используемые на машиностроительных заводах для изготовления различных по форме и размерам изделий:

1) поковки и штамповки, получаемые из сортового проката методами горячей обработки давлением, используются для изготовления разнообразных деталей машин и инструментов сравнительно сложной формы со значительными перепадами сечений, а также достаточно крупных деталей сравнительно простой формы;

2) крупные поковки, получаемые из кузнечных слитков, используют для получения крупных и особо крупных деталей машин (роторы турбин, прокатные валки, штоки гидравлических прессов, крупные коленчатые валы и т.п.) на заводах с собственным металлургическим циклом производства (тяжелое, транспортное и энергетическое машиностроение), а также крупных инструментов из высоколегированных инструментальных сталей; вес слитков может колебаться от сотен килограммов до 250 — 300 тонн;

3) сортовой прокат простого профиля (прутки круглого, квадратного, шестигранного и прямоугольного сечений) — для деталей простой формы, не требующих обработки давлением или с минимальным объемом ее (оси, валы, крепеж, протяжки, развертки и т.п.);

4) фасонные отливки — для сложных по форме деталей (крыльчатки, лопатки газовых турбин, картеры и блоки цилиндров

двигателей внутреннего сгорания) и крупных корпусных деталей (корпуса редукторов, коробок передач, станины станков и пр.), получать которые обработкой давлением невозможно или слишком дорого;

5) листы, лента, проволока и т.п. — для деталей, изготавливаемых методами холодной пластической деформации (вырубка, пробивка, гибка, вытяжка, формовка, навивка пружин и т.п.);

6) сварные (листочварные, сварнолитые, сварнокованные) заготовки — для изделий особо сложной формы или достаточно сложной формы с наиболее высоким КИМ.

Детали из сортового и листового проката и проволоки, предварительно термически обработанные на металлургических заводах, позволяют осуществлять обработку резанием или холодную обработку давлением, поэтому на машиностроительных заводах не применяют предварительную термическую обработку (ПТО).

Поковки (штамповки), отливки и сварные заготовки подвергают ПТО для повышения обрабатываемости резанием, для улучшения свойств готовых изделий за счет устранения дефектов литой и деформированной структуры и для подготовки ее к окончательной термической обработке. В качестве ПТО используют различные виды отжига и нормализации [10]. Если заданные свойства готовых изделий характеризуются невысокой прочностью и твердостью (не более 240...300 НВ), то указанная термическая обработка является одновременно и окончательной. В этом случае стальные заготовки обычно подвергают нормализации или улучшению (закалка + высокий отпуск на НВ 220...300). Улучшение дает повышенную вязкость и применяется для поковок ответственных деталей машин.

Механическая обработка резанием предназначена для получения заданной чертежом формы и размеров детали (инструмента) заданной точности. Она состоит из ряда операций: обточки, сверления, расточки, фрезерования, нарезания резьбы и зубьев шестерен, шлифования и т.д. Ее проходит подавляющее большинство деталей машин и инструментов. При значительном съеме металла с заготовки она подразделяется на черновую и чистовую и может производиться в один цикл или с разрывом другими разнородными операциями. В частности, в связи с короблением деталей при окончательной термообработке шлифование поверхностей, изготавливаемых с высокой чистотой и точностью, производят после отпуска. Иногда при изготовлении сложных и точных деталей с большим объемом

обработки резанием (например крупные коленчатые валы) сначала поковку подвергают нормализации для улучшения обрабатываемости резанием, затем делают черновую обработку резанием, далее закалку с высоким отпуском (улучшение) для объемного упрочнения детали, далее чистовую обработку резанием, правку и термическую стабилизацию — для устранения поволоков, наконец, окончательную термообработку (для коленчатого вала — азотирование) и чистовое шлифование в размер (коренные и шатунные шейки коленвала). Чистовая механическая обработка чаще всего предназначается для повышения чистоты обработки (уменьшения шероховатости) и получения размеров высокого класса точности. Кроме шлифования к таким операциям относятся: шевингование зубьев шестерен (соскабливание неровностей в виде очень тонких стружек), протягивание отверстий после сверления, хонингование, притирка, полирование и т.д.

Упрочняющая термическая обработка в простейшем случае состоит из закалки и отпуска на заданные свойства. Если деталь должна иметь высокую поверхностную твердость и вязкую сердцевину, то производят либо поверхностную закалку с нагрева в том числе (среднеуглеродистые стали), либо сначала цементацию или нитроцементацию, а затем закалку и низкий отпуск (малоуглеродистые стали). При требовании очень высокой твердости и износостойкости ( $HV > 650$ ) применяют азотирование при  $520 \div 580^\circ\text{C}$ , которое производится на окончательно готовых деталях после шлифования, прошедших до этого закалку с отпуском, температура которого должна быть не ниже температуры азотирования. Для штампов из теплостойких сталей и режущих инструментов из быстрорежущих сталей с небольшой глубиной упрочненного слоя (не более 0,2 мм) применяют цианирование при той же последовательности операций. При использовании борирования и хромирования ( $t = 900 \div 1000^\circ\text{C}$ ) эти операции проводят (как и цементацию) перед закалкой.

В качестве завершающей операции термообработки инструментов часто используют дополнительный отпуск для снятия напряжений, образовавшихся при шлифовании и заточке. Температура его должна быть ниже температуры основного отпуска.

При составлении маршрутной технологии следует учесть и выполнение некоторых вспомогательных операций: очистку от окалины или остатков солей после закалочных ванн, антикоррозионную

обработку (пассивирование, оксидирование (воронение)), а также операции контроля качества продукции.

Описание пункта 3 должно быть лаконичным и включать только последовательность (технологическую схему) операций с указанием их номеров, наименования и назначения (с какой целью они производятся). В качестве примера ниже приведен ряд технологических схем изготовления деталей.

**Пример 1. Технологическая схема изготовления матрицы (рис.1)**

1. Изготовление поковки.

2. Предварительная термическая обработка (отжиг) — для устранения дефектов горячей обработки давлением, снижения твердости для улучшения обрабатываемости резанием и подготовки структуры к окончательной термообработке.

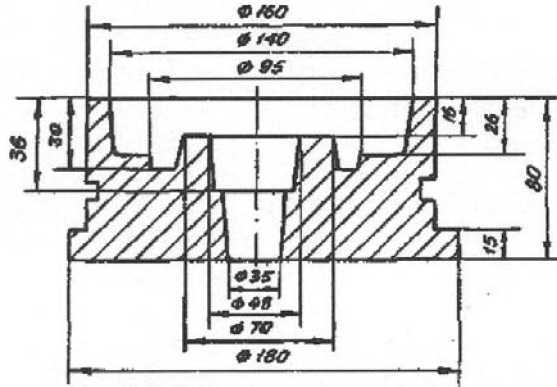


Рис. 1. Матрица последнего перехода штампа для выдавливания стальных штамповок на кривошипном прессе.  
Материал: сталь 4X4BMФС, твердость 47 — 50 HRC, рабочую поверхность цианировать на глубину 0,2 мм и твердость 750 — 850 HV

3. Контроль твердости.
4. Черновая механическая обработка.
5. Низкий отжиг (высокий отпуск) — для снятия наклепа и внутренних напряжений от обработки резанием.
6. Чистовая механическая обработка.
7. Окончательная термообработка: а) закалка и б) отпуск — для получения заданных эксплуатационных свойств материала.
8. Контроль твердости.
9. Очистка от окалины.

10. Шлифование и доводка размеров фигуры матрицы.
11. Обезжиривание и нанесение слоя жидкого стекла на поверхности, не подлежащие цианированию.
12. Низкотемпературное цианирование рабочих поверхностей на глубину 0,2 мм для повышения износостойкости.
13. Промывка от солей и сушки.
14. Окончательный контроль.

**Пример 2. Технологическая схема изготовления втулки (рис.2)**

1. Отрезка заготовки из прутка  $\varnothing 40$  мм.
2. Механическая обработка резанием.

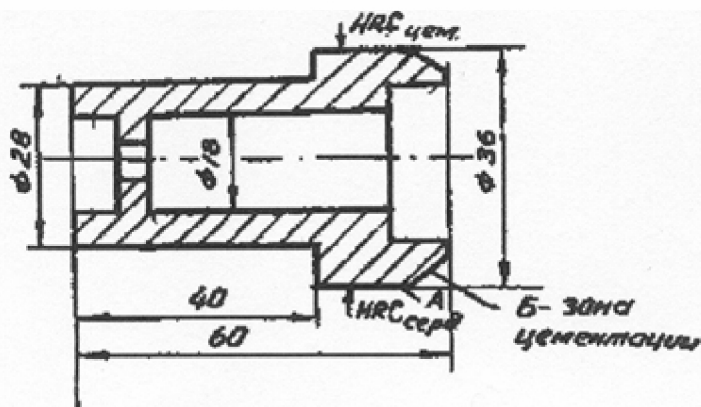


Рис. 2. Втулка из стали 12ХНЗА.

Поверхность Б цементировать на глубину 0,8—1,2 мм, твердость цементированного слоя 56 — 62 HRC, твердость сердцевины 30 — 40 HRC

3. Гальваническое меднение поверхностей (кроме зоны «Б») для защиты от цементации и зачистка от меди площадки 10x10 мм на поверхности «А» для замера HRC<sub>цем</sub>.
4. Цементация.
5. Контроль глубины цементованного слоя на образцах-свидетелях.
6. Высокий отпуск — с целью снижения остаточного аустенита при последующей закалке.
7. Очистка от окалины.
8. Нормализация для устранения крупнозернистости и растворения крупных включений цементита.

9. Закалка — для упрочнения поверхностного слоя и сердцевины.
10. Промывка — для удаления остатков соли.
11. Отпуск — для получения заданных свойств.
12. Контроль твердости.
13. Очистка от окалины.
14. Шлифовка всех поверхностей.
15. Стабилизирующий отпуск — для снятия остаточных шлифовочных напряжений.

## **4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛУФАБРИКАТОВ (ЗАГОТОВОК) МЕТОДАМИ КОВКИ И ШТАМПОВКИ**

### **4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Ковка и штамповка — способы обработки металлов давлением, при которых заготовка подвергается формообразованию и приобретает заданную форму под воздействием бойков молота или в результате деформации в штампе. К основным преимуществам ковки и штамповки следует отнести:

- получение высокого качества металла поковки с улучшенными пластическими и прочностными характеристиками в сравнении с отливками или сортовыми заготовками;
- возможность изготавливать на стандартном оборудовании поковки и штамповки самой различной массы (от 0,1 кг до 100 т);
- сравнительно высокая производительность, особенно в процессах горячей штамповки.

Оборудованием для ковки и штамповки служат различной конструкции молоты, механические и гидравлические прессы. В меньшей степени применяются горизонтально-ковочные машины, ковочные вальцы и другое специализированное оборудование [12].

Ковке и штамповке подвергаются в основном нагретые заготовки, а их деформация называется горячей. В ряде случаев формоизменение производят без нагрева, такой вид штамповки называется холодным деформированием. В результате нагрева до определенных температур сталь и другие деформируемые металлы и сплавы обладают высокой пластичностью и низким сопротивлением деформации. Эти температуры имеют нижний и верхний пределы, между которыми лежит температурный интервал ковки или горячей штамповки.

### **4.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИНТЕРВАЛ КОВКИ И ШТАМПОВКИ**

Оптимальный температурный интервал определяется температурами начала и конца ковки или штамповки, которые устанавливают на основании конкретных данных о поведении материала заготовок при нагреве на разные температуры. Температурный интервал ковки (штамповки) зависит от целого ряда факторов, главными из которых являются:

- химический состав металла или сплава;

вид деформируемой заготовки (слиток, прутковая катаная заготовка, прессованный профиль и т.д.);  
механические свойства, определяемые данным химическим составом;  
фазовая структура сплавов при нагреве и охлаждении;  
величина зерна при нагреве и деформации. Температурный интервалковки и штамповки различных металлов и сплавов приводится в справочно-технической литературе [12, 13].

#### **4.3. ВЫБОР И КРАТКАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ОСНОВНЫХ ОПЕРАЦИЙ ОМД**

##### **4.3.1 Ковка**

Ковка применяется при изготовлении изделий несложной формы, часто довольно крупных размеров, в условиях единичного или мелкосерийного производства. При ковке получают заготовки (полуфабрикаты) для последующей механической обработки, имеющие невысокие классы точности и шероховатости поверхности. В процессе осуществления операцийковки решаются различные технологические задачи. К числу главных из них относятся следующие:

- придание поковке заданной формы и требуемых размеров;
- исправление дефектов и уменьшение структурной неоднородности литой стали;
- преобразование литой макро- и микроструктуры металла в деформированную по всему объему заготовки;
- обеспечение высокого уровня свойств после термообработки.

Технологическая схемаковки включает в общем случае следующие операции:

- резку заготовок на мерные длины (разрубка слитка);
- нагрев перед деформацией;
- ковку на молотах или прессах;
- обсечку (удаление) отходов;
- термическую обработку поковок;
- контроль в соответствии с техническими условиями геометрических размеров, механических свойств, структуры, а при изготовлении поковок ответственного назначения — контроль по обнаружению внутренних дефектов.

Заготовками дляковки являются слитки, блюмсы (предварительно прокатанные слитки), прутки круглого и квадратного сечения. Технологический процессковки состоит из ряда элементов, представляющих собой простые или сложные операции. Операцииковки достаточно подробно изложены в учебниках и справочниках и при описании данного раздела можно воспользоваться источниками [12, 13].

Комбинируя приемы и операцииковки, применяя разнообразные инструменты (в том числе и подкладные), можно не только получать разнообразные формыпоковок, но и в значительной мере управлять качествомкованых изделий.

В качестве примера разработки схематичных процессовковки для получения полуфабрикатов (заготовок) деталей в табл. 2 приведен типовой технологический процессковки стального вала.

Таблица 2. Типовой технологический процессковки стального вала

Эскизы переходов	Операция	Оборудование, форма бойков
	Резка заготовки из прутка Нагрев до 1200°C	Камерная газопламенная печь
	Наметка	Ковочный молот 2т, плоские бойки
	Протяжка	Ковочный молот Фигурные бойки
	Резка заготовки от слитка-столба	Дисковая пила
	Нагрев до 480°C	Камерная электропечь
	Протяжка на прямоугольник	Ковочный молот 3 т Бойки гладкие
	Наметка	Ковочный молот 3 т Бойки гладкие
	Оттяжка (протяжка) конца	Ковочный молот 3 т Бойки гладкие

#### 4.3.2 Объемная штамповка

Объемная штамповка или ковка в штампах представляет собой закрытую ковку, при которой течение металла принудительно ограничивается поверхностями полостей и выступов, изготовленных в штампе. Штамповкой изготавливают детали сложной конфигурации ответственного назначения для различных отраслей машиностроения. Штамповка является одним из самых высокопроизводительных процессов с довольно низкой себестоимостью изготовления детали.

Основным деформирующим инструментом является штамп, состоящий из двух разъемных частей, в собранном виде образующих полость, называемую ручьем.

В штампе может быть один или несколько ручьев.

В зависимости от формы поковки и применяемого оборудования используют следующие виды объемной штамповки: открытую с облоем, закрытую безоблойную и выдавливанием.

Обычно нижняя часть штампа устанавливается на неподвижной плите кузнечно-штамповочной машины, а верхняя — на подвижной части оборудования. Для объемной штамповки по сравнению с ковкой характерны более высокие точность размеров изделия, качество поверхности и коэффициент использования металла.

Исходными материалами для горячей штамповки являются сортовой прокат, профили периодического сечения.

Типовой технологический процесс горячей штамповки состоит из следующих операций:

- резка мерной заготовки (заготовки, обладающей нужной массой);
- нагрев заготовки перед деформацией;
- штамповка в один или несколько переходов;
- обрезка и удаление облоя;
- термическая обработка полученных штамповок;
- отделочные операции и контроль качества.

В большинстве случаев для штамповки применяют универсальное оборудование: молоты, прессы и горизонтально-ковочные машины. В зависимости от особенностей работы каждого типа машин выбирают технологию, способ и вид штамповки. Для изучения и описания этого раздела следует обратиться к литературным источникам [12, 13].

### 4.3.3 Штамповка на молотах

Для простых по форме поковок (шестерен, маховичков, прямых рычагов) в штампе имеется один (чистовой) или два (черновой и чистовой) штамповочных ручья.

Поковки сложной формы последовательно обрабатывают в заготовительных ручьях: протяжном, подкатном, пережимном, формовочном, гибочном, на отрубном ноже и в штамповочных ручьях (черновом и чистовом).

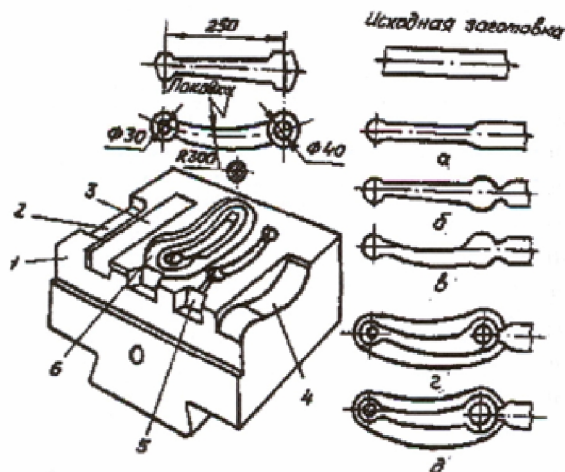


Рис. 3. Многоручьевого штамп: 1 – штамп, 2 – протяжной ручей, 3 – подкатной, 4 – гибочный, 5 – предварительный, 6 – окончательный; переходы: а – протяжка, б – подкатка, в – гибка, г, д – предварительная и окончательная штамповка

В качестве примера на рис. 3 показан многоручьевого молотовой штамп, предназначенный для штамповки изогнутого рычага. Рычаг штампуют из катаной заготовки.

### 4.3.4 Штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах (КШГП)

Условия деформирования металла на прессах отличаются от условий деформирования металла на молотах: скорость деформирования на прессах (0,5 — 0,6 м/с) значительно меньше, чем на моло-

тах (5 — 8 м/с). Кроме того, прессы имеют определенную величину хода ползуна.

Точность штамповки на кривошипном прессе выше, чем на молоте. Наличие на прессах выталкивателей позволяет уменьшить штамповочные уклоны и применить штамповку выдавливанием и закрытую штамповку.

Отсутствие ударных нагрузок при работе кривошипного горячештамповочного прессы позволяет применять на нем сборные штампы, где вмонтированы необходимые ручьевые вставки (рис. 4).

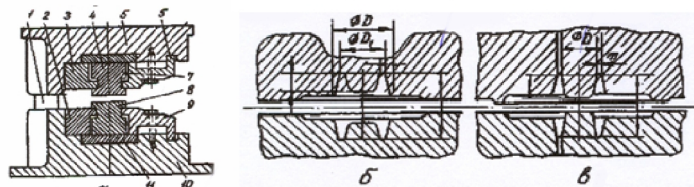


Рис. 4. Сборочный штамп для штамповки на КГШП:  
 а – общий вид; 1 – направляющие колонки; 2, 3 – клиновые планки;  
 4, 11 – подкладные плиты; 5, 10 – обоймы; 6, 9 – прижимные колонки;  
 7, 8 – ручьевые вставки; б – предварительная и в – окончательная  
 ручьевые вставки для круглых в плане поковок

В литературе [13, 14] даются более подробные сведения, которые могут быть использованы при разработке данного раздела.

#### 4.3.5. Штамповка на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ)

Осесимметричные поковки в виде стержней с утолщениями (головками), сквозными и глухими отверстиями, боковыми выступами, фланцами экономически целесообразно штамповать на горизонтально-ковочных машинах. Основными достоинствами ГКМ являются высокая производительность (400 — 900 поковок в час), возможность штамповки без облоя и штамповочных уклонов, хорошая макроструктура поковок, возможность полной автоматизации процесса и др.

Штамповка на ГКМ применяется в условиях крупносерийного и массового производства. Исходной заготовкой является прокат в виде мерных заготовок или прутков.

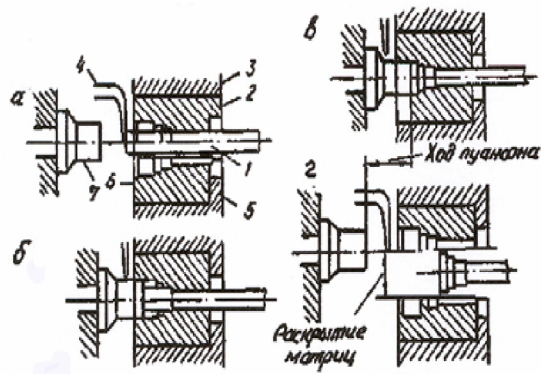


Рис. 5. Процесс штамповки на горизонтально – ковочной машине

Штамповка на ГКМ производится за один переход или несколько переходов в отдельных ручьях (рис.5). Пруток 1 с нагретым концом укладывают в неподвижную матрицу 2, закрепленную в щеке 3. Положение прутка фиксирует упор 4. При включении кривошипного механизма начинают двигаться подвижная щека 5 с матрицей 6 и пуансон 7. Матрицы зажимают пруток, а упор 4 автоматически отходит в сторону. Пуансон 7 сначала производит высадку конца прутка (поз. а, б), затем заполняет металлом (поз. в) формирующую полость штампов. Далее (поз. г) начинается обратный ход пуансона 7, матрицы 2, 6 разжимаются, заготовка удаляется или передается в следующий ручей ГКМ. Кроме высадки, на ГКМ применяют закрытую прошивку, выдавливание сплошных и пустотелых стержней, гибку, отрезку прутка и заусенца и т.п.

Наиболее целесообразна штамповка из прутка, причем используется прокат повышенной точности или калиброванный металл.

## 5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОКОВОК

Она предназначена для улучшения свойств готовых изделий за счет устранения дефектов горячедеформированной структуры и подготовки их к окончательной упрочняющей термообработке, для улучшения обрабатываемости резанием при механической обработке, или того и другого вместе.

В зависимости от режимов деформирования, последующего охлаждения и марки стали в поковках могут образовываться следующие дефекты:

- крупнозернистость, связанная с развитием процессов собирательной рекристаллизации при высокой температуре окончанияковки;

- разнотекстурность, обусловленная различной степенью деформации поверхностных слоев и центральной зоны;

- повышенная твердость поверхностного слоя из-за частичного сохранения горячего наклепа, особенно в высокоуглеродистых легированных сталях;

- карбидная сетка по границам зерен в высокоуглеродистых сталях, выделяющаяся из аустенита при медленном охлаждении крупных поволоков от высоких температур окончанияковки;

- образование неравновесных структур (тросита, бейнита) с повышенной твердостью при ускоренном охлаждении послековки мелких поволоков из высоколегированных сталей.

В качестве предварительной термической обработки поволоков из конструкционной стали обычно используют либо нормализацию, либо нормализацию с высоким отпуском, либо изотермический отжиг на твердость от 179 до 255 *НВ*, обеспечивающие хорошую обрабатываемость резанием. Поволки из инструментальных и подшипниковых сталей обычно подвергают сфероидизирующему отжигу на зернистый перлит, выполняемому по изотермическому режиму или с непрерывным охлаждением в печи. Твердость таких поволоков не должна превосходить 285 *НВ*, что обеспечивает удовлетворительную обрабатываемость резанием инструментами из быстрорежущей стали.

При выборе вида предварительной термообработки и ее режимов следует руководствоваться конкретными задачами такой обработки (какие дефекты необходимо устранить, какова должна быть

структура и твердость и пр.), составом стали по углероду и легирующим элементам, определяющим устойчивость аустенита при охлаждении с температуры обработки и температуру критических точек, размером (массой) заготовки, который определяет способ нагрева (ступенчатый, непрерывный) и продолжительность выдержки. Подробные режимы предварительной термообработки сталей приводятся в учебном пособии [10].

В курсовой работе по данному вопросу следует привести краткое обоснование выбора вида и режимов предварительной термообработки поковок, краткое описание сущности фазовых и структурных превращений и зарисовку микроструктуры после такой обработки.

Режим предварительной термообработки изображается на графике температура – время процесса.

При отсутствии предварительной термической обработки в общей схеме изготовления изделия следует привести виды (параметры) и нормы входного контроля стали, устанавливающие ее пригодность для изготовления деталей конкретного назначения. При несоблюдении этих норм может назначаться исправительная предварительная термообработка (отжиг).

Если поковки и заготовки из сортового проката конструкционных сталей проходят улучшение, формирующее окончательно свойства изделия (или сердцевины его), то такую обработку следует рассматривать как окончательную.

## 6. ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТЛИВОК

Термическую обработку стальных отливок и отливок из цветных сплавов обычно не расчленяют на предварительную и окончательную, а рассматривают как единую. Она предназначена для устранения дефектов литой структуры и получения заданных свойств отливок.

К особенностям литого металла по сравнению с деформированным относятся:

химическая неоднородность или дендритная ликвация, т.е. различие химического состава в осях и междендритных пространствах кристаллов — дендритов и образование в ряде сплавов неравновесных выделений вторых хрупких фаз (карбидов, интерметаллидов) на границах дендритов, что обуславливает пониженный уровень свойств;

структурная неоднородность, проявляющаяся в неодинаковости размеров и формы зерен закристаллизовавшегося металла в поверхностной зоне и центральной зоне отливки;

наличие значительных внутренних напряжений, обусловленных неодновременностью затвердевания металла в отдельных частях и зонах отливки и неоднородностью распределения температуры, способных привести к образованию горячих и холодных трещин.

Степень проявления этих дефектов зависит от состава сплава, массы отливки, ее формы и способа литья.

Виды и режимы термической обработки отливок назначаются с учетом структурного типа материала, назначения отливок, требуемого уровня ее свойств и технологии дальнейшей обработки. Малоответственные отливки общего назначения, механические свойства которых не нормируются, подвергают только низкому отжигу для уменьшения остаточных напряжений.

Отливки ответственного назначения из углеродистых и легированных сталей подвергают отжигу, нормализации, нормализации с отпуском или улучшению. Большинство отливок сравнительно небольшой массы проходят только одну из указанных операций (однофазовая фазовая перекристаллизация), выбор которой определяется уровнем свойств готовой отливки. Поскольку различия исходной структуры в отливках больше, чем в деформированном металле, то и режимы нагрева при термообработке отливок могут изменяться в

достаточно широких пределах. При этом температуру нагрева и длительность выдержки выбирают таким образом, чтобы устранить следы литой структуры и в то же время не вызвать интенсивного роста зерна. Для отливок с достаточно развитой химической и структурной неоднородностью температура нагрева и длительность выдержки могут существенно превышать критические режимы для деформируемых сталей того же состава. Двойную фазовую перекристаллизацию отливок иногда используют для измельчения зерна и повышения комплекса механических свойств. В этом случае, например, отливки из стали 45Л сначала подвергают нормализации при 960°C, а затем закалке с 860°C в воде и отпуску при 600°C (улучшение).

Достаточно крупные отливки из умеренно легированных сталей с грубозернистой структурой и развитой химической и структурной неоднородностью также подвергают двойной фазовой перекристаллизации: высокотемпературной нормализации или отжигу в сочетании с последующей обычной нормализацией или закалкой при нагреве немного выше  $A_{c3}$  ( $A_{cm}$ ) и высоким отпуском. В крупных массивных отливках из легированных сталей возможна очень сильная дендритная ликвация, уменьшить которую можно только гомогенизирующим отжигом с нагревом до 1100 — 1150°C и длительной выдержкой (10—15 ч). Так как при таком отжиге происходит сильный рост зерна, то для его измельчения необходима дополнительная обычная обработка (отжиг или нормализация с отпуском).

Термическая обработка отливок из высоколегированных сталей характеризуется разнообразием видов и режимов, которые должны быть согласованы прежде всего с особенностями фазовых превращений стали данного структурного класса. Отливки из мартенситных, мартенситно-ферритных и аустенитно-ферритных сталей проходят закалку (нормализацию) с высоким отпуском (старением), а аустенитно-мартенситные — с промежуточной обработкой холодом. Аустенитные коррозионно-стойкие стали подвергаются высокотемпературной закалке, а жаропрочные — закалке с последующим старением. Режимы нагрева под закалку отливок из этих сталей по сравнению с деформируемыми отличаются повышенными температурами и длительными выдержками для уменьшения химической и структурной неоднородности. Массивные отливки и отливки из сложно-легированных сталей этих классов с сильно выраженной

дендритной ликвацией часто перед закалкой подвергают гомогенизирующему отжигу.

Виды и режимы термической обработки стальных отливок приводятся в справочной литературе [1, 17], а фазовые превращения в высоколегированных сталях в [9].

Термическая обработка отливок из алюминиевых и магниевых сплавов весьма разнообразна и определяется природой данного сплава и требуемым уровнем механических свойств, что указано в задании буквенно-цифровой символикой в конце маркировки (Т1, Т2, ..., Т8). Все виды термообработки (кроме отжига) связаны с закалкой и старением по различным режимам. В отличие от сталей, температуры нагрева под закалку для большинства алюминиевых и магниевых сплавов характеризуются весьма узким интервалом, обусловленным особенностями фазового равновесия в них. Поэтому растворение неравновесных эвтектических выделений вторых фаз и повышение гомогенности твердого раствора в отливках из этих сплавов, весьма склонных к дендритной ликвации, возможно только за счет увеличения длительности выдержки при температурах нагрева под закалку, которая для них, по существу, является одновременно и гомогенизацией. Ряд алюминиевых и магниевых сплавов используются в закаленном состоянии без старения, а большинство проходят старение по заданным режимам на различный комплекс механических свойств. Режимы термообработки отливок из цветных сплавов подробно приведены в технической литературе [1, 15].

При выполнении этого раздела особое внимание следует уделить вопросам технологии выполнения термической обработки отливок. В индивидуальном и серийном производстве для термической обработки отливок используют обычно камерные печи периодического действия. Для проведения отжига и нормализации крупных корпусных стальных отливок рекомендуются печи с выдвижным подом. В массовом производстве целесообразно применять печи и агрегаты непрерывного действия различных типов. При нагреве под закалку отливок из алюминиевых и магниевых сплавов нужны печи с циркулирующей атмосферой, позволяющие создавать однородную температуру во всех зонах печного пространства и поддерживать ее с высокой точностью.

При размещении отливок на под печи или поддоны их необходимо располагать так, чтобы обеспечить равномерный прогрев и отсутствие коробления под действием собственной массы или сум-

марной массы других отливок (многорядная укладка). Для отливок сложной формы, склонных к короблению, необходимо для его предотвращения предусмотреть подставки, распорные и стяжные планки и другие приспособления.

Массивные отливки и отливки сложной формы имеют высокий уровень внутренних напряжений перед термообработкой. Поэтому важно продумать и способ нагрева их под термообработку, обеспечивающий сохранение целостности и отсутствие трещин. Сравнительно простые отливки из углеродистых и низколегированных сталей можно загружать в предварительно нагретую до заданной температуры печь. Отливки сложной формы из этих сталей, а также отливки из высоколегированных сталей, обладающих низкой теплопроводностью и высоким коэффициентом линейного расширения, способствующих возникновению больших температурных перепадов в сечении, следует помещать в холодную печь и нагревать с регламентированной скоростью или подвергать ступенчатому нагреву, режимы которых следует установить, сообразуясь с формой и толщиной стенок отливки и маркой материала [15].

Условия охлаждения и закалочные среды выбирают в зависимости от марки стали и сложности формы отливок. Отливки не очень сложной формы из углеродистых сталей закалывают в воде, более сложной формы — в подогретой воде (30 — 50°C); отливки из легированных сталей закалывают обычно в масле, а из высоколегированных — в масле, воде или же на воздухе в зависимости от структурного класса стали. Отливки из алюминиевых и магниевых сплавов закалывают в воде, подогретой до 50 — 80°C, во избежание их коробления и образования трещин. Более подробно требования к проведению процесса приведены в разд. 7.

## 7. УПРОЧНЯЮЩАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ

Разработка окончательной упрочняющей термической обработки деталей машин и инструментов является основным содержанием курсовой работы и включает в себя рассмотрение ряда взаимосвязанных между собой металлургических и технологических вопросов.

В начале этого раздела рекомендуется в соответствии с заданными свойствами и выбранной маркой стали четко установить требуемую микроструктуру и ее распределение по сечению и длине готового изделия, наметить термические операции и их последовательность для достижения поставленной задачи, кратко описав сущность фазовых и структурных превращений при осуществлении намеченных операций. Далее производится выбор и обоснование температурных и временных режимов каждой операции, определение сред и способов ведения нагревов и охлаждений, выбор оборудования и приспособлений для осуществления установленных режимов, описание видов и методов контроля изделий, видов возможных дефектов и др.

Рассмотрим содержание металлургических и технологических вопросов для типовых операций упрочняющей термообработки деталей и инструментов, которые должны быть освещены в записке курсовой работы.

### *7.1. ЗАКАЛКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ*

Закалка является основной операцией упрочняющей термической обработки. В результате ее сталь получает структуру с высокой прочностью и твердостью (мартенсит, реже — нижний бейнит и троостит). Ей подвергаются самые различные детали машин из конструкционных доэвтектоидных сталей и инструменты заэвтектоидных и ледебуритных сталей. Для деталей и инструментов из среднеуглеродистых и высокоуглеродистых сталей закалка с последующим отпуском является в большинстве случаев единственной операцией упрочняющей термической обработки.

При проектировании технологии закалки должны быть проработаны и освещены следующие вопросы.

**1. Выбор температуры нагрева под закалку.** Температура нагрева под закалку должна быть на 30—50°С выше критических точек  $A_{c3}$ ,  $A_{c1}$  соответственно для доэвтектоидной и заэвтектоидной

углеродистых или малолегированных сталей. Для умеренно- и высоколегированных сталей, особенно содержащих сильные карбидообразователи, она превышает соответствующие критические точки на большую величину ( $50 \div 100^\circ\text{C}$  и более). Данные о температурах нагрева под закалку приводятся в справочной литературе [1, 2, 16]. В работе она должна быть обоснована исходя из требований получения необходимой твердости и износостойкости, достаточно высокой легированности аустенита и сохранения мелкого зерна. При таком обосновании температуры закалки высоколегированных инструментальных сталей следует использовать данные о зависимости теплостойкости, твердости, количества остаточного аустенита, размера зерна и других свойств от температуры закалки. Выбор температур закалки малоуглеродистых цементованных сталей рассматривается далее отдельно.

**2. Выбор способа нагрева под закалку** производится исходя из предотвращения образования трещин от внутренних напряжений. Чем крупнее деталь, выше температура ее нагрева и ниже теплопроводность стали, тем больше температурный перепад в сечении и выше величина внутренних напряжений. Склонность к образованию трещин от этих напряжений определяется исходной структурой стали перед закалкой, зависящей от химического состава стали и особенно от содержания углерода. Скорость нагрева деталей машин из мало- и среднеуглеродистых сталей не ограничивается по условию образования трещин из-за их достаточно высокой пластичности, способствующей снятию части внутренних напряжений. Поэтому садку деталей производят в заранее разогретую до закалочной температуры печь, температура которой для них сравнительно невысока ( $800 - 900^\circ\text{C}$ ). Исключение составляют особо крупные детали с возможными дефектами металлургического происхождения, которые нагревают ступенчато.

Для инструментов из малопластичных заэвтектоидных и ледебуритных сталей, особенно сложной формы, рекомендуется ступенчатый нагрев под закалку с остановками при температурах ниже закалочной для выравнивания температуры в сечении. Например, все инструменты из быстрорежущей стали проходят двухступенчатый подогрев и окончательный нагрев до закалочной температуры. Данные о числе ступеней и их температурах для различных сталей и изделий приводятся в справочной литературе [6, 9, 16].

**3. Выбор среды нагрева под закалку.** При нагреве под закалку до высоких температур происходит химическое взаимодействие поверхности металла с окружающей средой. При этом особое значение имеют два процесса: 1) обезуглероживание стали, т.е. выгорание углерода в поверхностных слоях ( $C + O_2 \rightarrow CO_2$ ); 2) окисление стали, т.е. образование на поверхности окислов железа и окарины ( $2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$ ). Интенсивность этих процессов зависит от температуры, состава стали и состава окружающей среды. В атмосфере печи, в зависимости от ее типа, топлива и условий его сжигания, образуются различные газы, в том числе  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $C_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ , и пары воды  $H_2O$ . Они различно влияют на сталь:  $CO_2$  — окисляет,  $O_2$  — окисляет и обезуглероживает,  $CO$  и  $CH_4$  — науглероживают и восстанавливают,  $H_2$  — восстанавливает и обезуглероживает,  $NH_3$  — азотирует, наличие соединений серы и паров воды резко увеличивает скорость окисления. Для получения в печи нейтральной атмосферы, в которой при данной температуре и составе стали указанные реакции протекают с одинаковой скоростью в обе стороны, необходимо иметь определенное соотношение  $CO_2/CO$ ,  $H_2O/H_2$ ,  $CH_4/H_2$ , что возможно лишь при нагреве в печах с контролируемой атмосферой.

При нагреве под закалку в открытой атмосфере окисление начинается с  $600 - 650^\circ C$ , а обезуглероживание — выше  $700^\circ C$ . При  $700 - 1000^\circ C$  наиболее интенсивно происходит обезуглероживание, а выше  $1000^\circ C$  — окаринообразование, так как образование окисной пленки на поверхности снижает темпы температуры нарастания скорости обезуглероживания. При нагреве сталей, имеющих температуру закалки  $800 - 900^\circ C$ , глубина дефектного (обезуглероженного) слоя обычно составляет несколько сотых долей мм, а при легировании их  $Si$ ,  $Al$  и  $Cr$  может достигать до  $0,2 - 0,3$  мм при  $900^\circ C$ . В индивидуальном и серийном производстве дефектные слои такой толщины удаляют последующим шлифованием, а на поверхностях с пониженным классом точности и чистоты обработки — пескоструйной и дробеструйной обработкой [8, 16]. При затрудненной окончательной обработке таких поверхностей (точные резьбы, малодоступные участки поверхности и пр.) принимается минимальный припуск на ее обработку, либо защитная атмосфера печи (особенно в массовом и крупносерийном производстве).

При нагреве в открытой атмосфере деталей и инструментов, имеющих высокие температуры закалки (более  $1000^\circ C$ ), глубина

дефектного (окисленного и обезуглероженного) слоя колеблется от 0,5 до 2 — 3 мм в зависимости от состава стали, температуры нагрева и продолжительности выдержки. Это приводит к резкому снижению твердости и предела выносливости. Сошлифовывание такого глубокого слоя экономически нецелесообразно. Поэтому нагрев под высокотемпературную закалку рекомендуется производить в печах с контролируемой (защитной) атмосферой, которая приготавливается в отдельной установке и подается в рабочее пространство печи. К ним относятся эндотермические и экзотермические атмосферы, получаемые неполным сжиганием метана  $\text{CH}_4$  (природного газа), а также диссоциированный аммиак  $\text{NH}_3$ . В ряде случаев применяют нейтральные среды — технические азот, аргон и водород. Более подробное описание этих сред приводится в технической литературе [11, 16].

Режущие и штамповые инструменты, а также некоторые детали машин небольших размеров нагревают под закалку в печах—ваннах в расплаве солей, состав которых приводится в табл. П 1.10 (см. прил. 1). Они сравнительно дешевы, обеспечивают быстрый нагрев на последней ступени, сохраняя мелкое зерно, уменьшают коробление и хорошо защищают от окисления и обезуглероживания.

Ответственные изделия из нержавеющей и особенно жаропрочных сталей и сплавов нагревают под закалку в вакуумных печах.

**4. Выбор нагревательных устройств и размещение (укладка) в них изделий** производятся с учетом пп. 1, 2 и 3. Нагрев под закалку большинства деталей машин и крупных инструментов производится в камерных электропечах периодического действия с окислительной или защитной атмосферой типа СНО или СНЗ, а также в универсальных газовых печах конструкции НИАТ. Длинномерные детали под закалку нагревают в шахтных электропечах широкого назначения типа СШО и СШЗ. Сведения об этих печах периодического действия приводятся в табл. П1.1 — П1.3 и справочниках [16, 21]. Для нагрева особо крупных деталей (роторы турбин, валки прокатных станков и т.п.) используются газовые печи с выдвижным подом. Размеры рабочего пространства печей выбирают по максимальным размерам изделий, обрабатываемых в цехе, или с учетом нагрева под закалку достаточно крупной партии (садки) менее габаритных деталей. Размещение деталей в печи должно быть таким, чтобы обеспечить свободное омывание всех деталей атмо-

сферой печи и отсутствие экранирования одних деталей другими. Крупные детали размещают обычно на подду печи, а мелкие — в связке или на поддонах (противнях). Детали сложной формы с малой жесткостью во избежание коробления под собственным весом нагревают с использованием различных приспособлений (подставки, стяжки, распорки и т.п.), а длинномерные тонкие детали в шахтных печах размещают в подвешенном состоянии. При нагреве инструментов в соляных ваннах их подвешивают в специальных приспособлениях. Схемы конструкции некоторых приспособлений для нагрева под закалку приведены на рис. П 2.1. Схему печи и размещения в них деталей следует привести в записке.

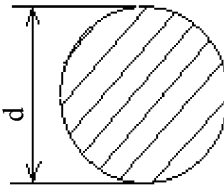
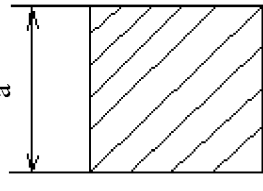
**5. Общая продолжительность нагрева под закалку ( $\tau_{\text{общ}}$ )** состоит из продолжительности сквозного прогрева ( $\tau_{\text{с.п}}$ ) до заданной температуры и из продолжительности изотермической выдержки ( $\tau_{\text{и.в}}$ ) при данной температуре, которая необходима для завершения фазовых превращений.  $\tau_{\text{с.п}}$  зависит от температуры и способа нагрева, размера и формы деталей, их размещения, типа печи, состава и теплофизических свойств стали.

Время выдержки при температуре закалки составляет  $\frac{1}{3} \div \frac{1}{4}$

времени нагрева. Оно дается для завершения фазовых превращений в металле, начавшихся при температуре  $A_1$  (превращение феррита и цементита в аустенит). За указанное время, вследствие диффузии атомов, происходит выравнивание концентрации углерода и других элементов во вновь образовавшейся кристаллической решетке аустенита. Очевидно, что если время выдержки будет недостаточно, то в структуре закаленной стали сохранятся фазы, присущие незакаленному состоянию, и эффект закалки понизится, например феррит в структуре закаленной стали понизит ее твердость.

Расчет продолжительности нагрева выполняют по различным методикам [10, 16]. При грубой оценке при нагреве от 800 до 900°C принимают следующую продолжительность и выдержку в муфельной электропечи (табл. 3).

Таблица 3. Продолжительность и выдержка нагрева в зависимости от формы и размеров заготовки

Температура печи в градусах	Форма нагреваемых изделий		
			
	продолжительность в мин нагрева и выдержки на 1 мм размера d или a		
300	1,3	1,6	
400	1,1	1,3	
500	1,0	1,2	
600	0,9	1,1	
700	0,7	0,9	
800	1,5	2,0	
900	1,3	1,8	

Примечания. 1. Продолжительность нагрева до температур 300 — 700° указана без учета времени выдержки.

2. Время нагревания пластин увеличить в 1,3 раза против соответствующих норм для квадратного профиля.

3. При нагревании в расплавленных солях или свинце продолжительность нагрева и выдержки (табл. 3) следует соответственно уменьшить в два и три раза.

Более точный расчет общей длительности выдержки при непрерывном (одноступенчатом) нагреве под различные операции термообработки производится по условной толщине детали, определяемой как произведение минимальной фактической толщины в наиболее толстом сечении и коэффициента формы детали, с учетом способа укладки деталей в печи, вида нагревающей среды и температуры нагрева. Эти данные приводятся в табл. П2.1 — П2.3 и применительно к конструкционным сталям. Для инструментальных легированных сталей (за исключением быстрорежущих) эти нормы увеличиваются ориентировочно на 15 — 20%.

Нормы времени нагрева, в том числе ступенчатого, для инструментов приводятся в табл. П1.4 — П1.6, а также в справочной литературе [9].

**6. Охлаждение при закалке** является наиболее ответственной и сложной операцией термической обработки. При закалке недопустимо превращение аустенита в перлит или выделение избыточных карбидов, поэтому, как правило, стремятся получить наибольшую закаливаемость и прокаливаемость на мартенсит. Это в свою очередь требует применения высоких скоростей охлаждения. Однако высокие скорости охлаждения вызывают большие градиенты температуры и неодновременность процесса превращения аустенита в структуру мартенсита с большим удельным объемом, что приводит к образованию больших температурных и структурных внутренних напряжений и деформаций, которые могут вызвать искажение формы (поводку, коробление) и даже образование трещин и разрушение детали.

Прокаливаемость зависит не только от скорости охлаждения (охлаждающей среды), но и от уровня и характера легирования и размера сечения детали. Трещины образуются в конце закалочного охлаждения при прохождении мартенситного превращения. Склонность к их образованию возрастает с увеличением содержания углерода в стали, так как при этом увеличиваются объемные изменения при переходе аустенита в мартенсит, и он становится все более хрупким. Не меньшее влияние на склонность к образованию трещин оказывает усложнение формы деталей и инструментов — наличие резьбы, сверлений, выточек, перепадов сечений и т.п. К короблению наиболее склонны длинномерные детали малой жесткости с переменными по длине сечениями.

Выбор охлаждающих сред, способов и режимов охлаждения производится с учетом указанных положений, марки стали, размеров и формы изделий и требований к нему по глубине прокаливания, распределения твердости по длине и сечению, точности геометрических размеров. Важнейшим документом при этом выборе является диаграмма распада переохлажденного аустенита данной стали, а также данные об охлаждающей способности различных сред [11].

Охлаждающая способность наиболее распространенных сред приведена в табл. 4.

Таблица 4. Скорость охлаждения стали в различных закалочных средах

Закалочная среда	Скорость охлаждения (в °С/с) в интервале температур	
	550 — 650°С	200 — 300°С
Вода при 18°С	600	270
» » 50°С	100	270
» » 74°С	30	200
10%-ный раствор поваренной соли в воде	1100	300
10%-ный раствор соды в воде	800	270
10%-ный раствор серной кислоты в воде	750	300
Эмульсия (смесь масла и воды)	70	200
Мыльная вода	30	200
Минеральное масло	150	30
Керосин	170	50
Воздух (обдув сжатым воздухом)	30	10
Воздух	3	1

Детали сравнительно простой формы обычно подвергают непрерывной закалке в воде с температурой 20 – 30°С (углеродистые стали) или в масле с температурой 30 – 60°С (легированные стали). При закалке в масле применяют масло индустриальное И12А, И20А, И50А, ИЗОА (ГОСТ 20799–75) или трансформаторное (ГОСТ 982 – 80). Допускается смесь этих масел. Один раз в три месяца контролируют содержание воды (< 0,1%), механических примесей (< 0,15%), кинетическую вязкость при 50°С (33 сантистокса). Для светлой закалки коррозионно-стойких сталей используют вакуумные насосные масла ВМ-1 или ВМ-4 (ГОСТ 23013–78). При закалке сложных по форме деталей во избежание трещинообразования и сильного коробления следует использовать прерывистую закалку в двух средах или закалку с многократным кратковременным погружением в охлаждающую среду (крупные детали и некоторые штамповые инструменты) и ступенчатую закалку с промежуточной изотермической выдержкой в расплавах нитратов и щелочей с температурами 200 – 300°С, 400 – 500°С или расплаве солей с температурой 600 – 650°С в зависимости от вида диаграммы распада аустенита

(детали машин, штампов и режущие инструменты сечением до 20 — 40 мм, имеющие сложную форму — острые надрезы, выточки, резьбу, пазы, канавки и т.п.). При требуемой твердости HRC = 47÷52 вместо закалки на мартенсит и отпуска на эту твердость для ряда деталей используют закалку на нижний бейнит (без отпуска), которая технологически сходна со ступенчатой закалкой на мартенсит. Составы ванн с горячими закалочными средами приводятся в табл. П1.10.

Уменьшению трещинообразования способствует также подсуживание на воздухе до 800-900°C, рекомендуемое при закалке инструментов, имеющих высокие температуры нагрева. С этой же целью необходимо стремиться к более равномерному охлаждению, не допуская погружения деталей в закалочную среду «плашмя» и перемещая их относительно воды и масла. При закалке труднодоступных поверхностей с застойными участками (отверстия небольшого размера во втулках, матрицах, волоках и т.п.) следует предусмотреть искусственную направленную циркуляцию охладителя или струйчатую подачу воды через отверстие детали с установкой ее в специальное приспособление. Весьма перспективным при закалке сложных и крупных деталей является регулируемое водо-воздушное охлаждение через систему мелких отверстий форсунки. При переменной твердости по длине детали или инструмента их погружают в жидкость частично или постепенно, а в инструментах с приварными хвостовиками из других марок стали закачивают порознь режущую часть и хвостовик.

Для снижения коробления сложных по форме или высокоточных деталей и инструментов (шестерни дифференциала автомобиля, валы шестерни и пр.) при закалке используют так называемые закалочные штампы и специальные приспособления, в которых охлаждаемое изделие находится в фиксированном состоянии. В ряде случаев (длинные детали малой жесткости) допускается правка покоробленных деталей на прессе, которую следует производить в горячем (не полностью охлажденном) состоянии. Указанные приемы и особенности закалочного охлаждения более подробно описаны в книге [11] и других источниках [9, 16] на примере типовых деталей.

Охлаждение аустенита от температуры ниже критической сопровождается его превращением в иные структуры.

Установлено, что продолжительность изотермического превращения и характер образующихся при этом структур зависят от

степени переохлаждения аустенита. Указанная зависимость для каждой марки стали изображается графически в виде диаграммы изотермического превращения аустенита.

Диаграмма строится для каждой марки выбранной стали в координатах температура превращения аустенита - время превращения, горизонтальные прямые линии, отмеченные символами  $A_{r3}$ ,  $A_{r1}$ , указывают положение соответствующих критических точек данной марки стали. В некоторых случаях на кривых линиях диаграммы указывается процент распавшегося аустенита, которому они соответствуют.

Если диффузионное превращение аустенита сопровождается образованием избыточных фаз (феррита в доэвтектоидной и вторичного цементита в заэвтектоидной стали), то на диаграмме ниже линии  $A_{r3}$  наносится еще одна кривая, соответствующая началу диффузионного выделения избыточной фазы из аустенита.

Диаграмма позволяет: а) научно обосновать элементы режима термической обработки (скорость охлаждения, температуру и время изотермической выдержки), обеспечивающего получение требуемой структуры и свойств изделия; б) судить о режиме охлаждения изделия, если его структура известна, т. е. объяснить происхождение структуры; в) установить влияние температуры превращения аустенита на свойства стали.

В записке выбор способов и режимов охлаждения должен быть соответствующим образом обоснован и хотя бы схематично иллюстрирован наложением кривых охлаждения поверхности и сердцевины на термокинетическую или изотермическую диаграмму данной или близкой по составу типовой стали (рис. 6, 7). При этом кривая охлаждения поверхности от температуры закалки до  $100^\circ\text{C}$  может быть приближенно построена по известной скорости охлаждения в данной среде [11], а сердцевины — косвенно по соотношению действительного диаметра (толщины) детали и критического диаметра сечения, закаливаемого насквозь на мартенсит в данной среде. При сквозной прокаливаемости данной детали (рис. 7, сплошные линии) кривая охлаждения сердцевины не пересекает S-образных кривых, а при несквозной — пересекает эти кривые (рис. 4, пунктирные линии).

При необходимости следует также привести схематические рисунки используемых при закалке приспособлений и приемов ее выполнения. Обязательно надо указать структурные составляющие

закаленной стали и зарисовать ее структуру. Диаграммы изотермического превращения ряда стали приведены на рис. 8 – 10.

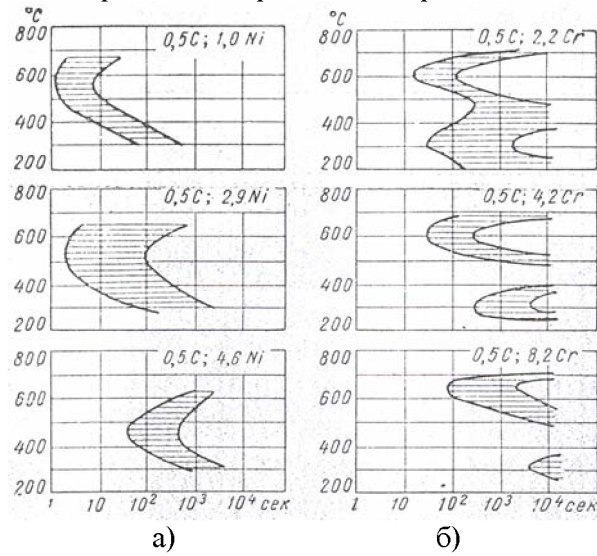


Рис 6. Диаграммы изотермического распада аустенита в сталях с 0,5% С:  
а – легированных никелем; б – легированных хромом

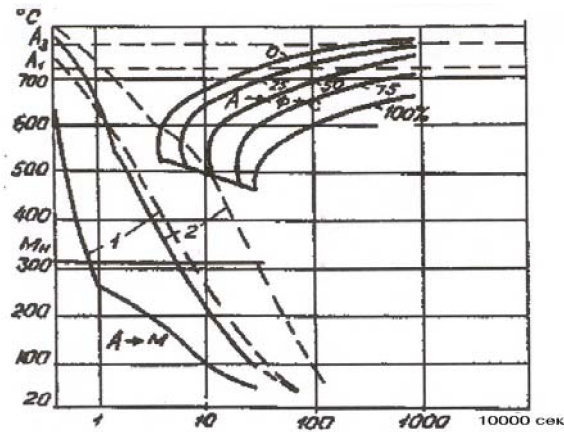


Рис. 7. Кривые охлаждения поверхности (1) и оси (2) вала диаметром 30 мм, наложенные на термокинетическую диаграмму распада аустенита в стали 40Н:  
- - - - - непрерывная закалка в масле;  
- · - · - прерывистая закалка сначала в воде, затем в масле

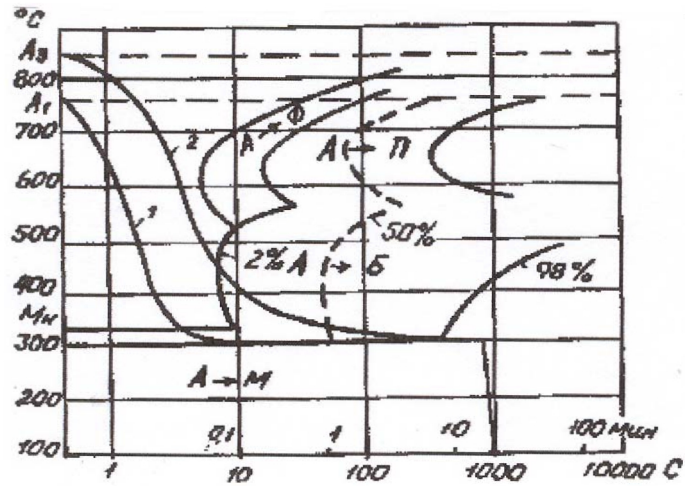


Рис. 8. Кривые охлаждения болта диаметром 22 мм, наложенные на диаграмму изотермического превращения аустенита в стали 30ХГСА при изотермической закалке в селитровой ванне 300°С ;  
1 – поверхность; 2 – ось

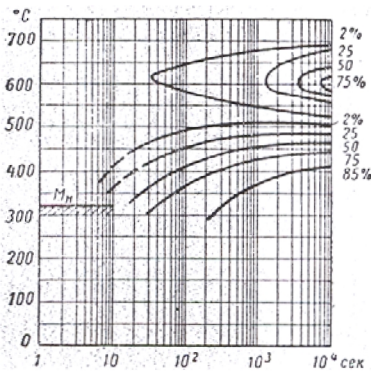


Рис. 9. Диаграмма изотермического превращения аустенита стали 20Х2Н4А, нагрев 900°С

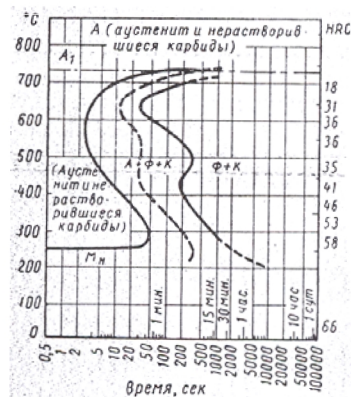


Рис. 10. Диаграмма изотермического превращения стали ШХ15, нагрев 840°С

**7. Обработка холодом** производится для некоторых инструментов и деталей при 50. . . 80°С с целью повышения их твердости и сохранения стабильности размеров в эксплуатации за счет перевода остаточного аустенита после закалки в мартенсит. Ее производят

только при значительном количестве остаточного аустенита (более 20%) и если последующий отпуск производится ниже температурного интервала его превращения. В записке обосновывается необходимость использования обработки холодом для данной стали и сущность процесса, указываются ее режимы (температура, время выдержки и допустимое время разрыва между закалкой и данной обработкой), а также оборудование.

**8. Требования по технике безопасности** при термообработке должны соответствовать ГОСТ 12.3–004–75, в частности:

а) перед закалкой поверхность детали должна быть без ржавчины, следов масла и грязи. Следы отмеднения допускают, если температура окончательного нагрева менее 1000°C;

б) в соляную ванну загружают только сухие детали, без следов алюминия, краски, графита, масел, смазки, ржавчины;

в) при термообработке в вакууме детали должны быть тщательно очищены, промыты и обезжирены.

## **7.2. ОТПУСК ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ**

Отпуск подавляющего большинства закаленных деталей машин и инструментов является завершающей операцией упрочняющей термической обработки, окончательно формирующей их структуру и свойства (прочность, вязкость, твердость, износостойкость, теплостойкость, уровень остаточных напряжений, размерную и структурную стабильность и пр.). При разработке отпуска следует рассмотреть следующие металловедческие и технологические вопросы.

**1. Выбор температурного режима отпуска.** Для обоснования режима отпуска вначале необходимо четко сформулировать его назначение и рассмотреть сущность фазовых превращений в предполагаемом интервале температур с учетом влияния легирования на формирование структуры и свойств данной группы и марки стали.

Выбор конкретной температуры отпуска деталей из конструкционных сталей производится по величине заданных механических свойств  $\sigma_b$  ( $\sigma_{0,2}$ ) и КСЧ или твердости *HRC*. Для этого используется зависимость этих свойств от температуры отпуска по справочным данным [1, 9] и по заданному уровню свойств или группы свойств определяется температурный интервал отпуска (рис. 11-14). Пример такой зависимости, строго говоря, применим для небольших деталей со сквозной прокаливаемостью. Для круп-

ных деталей при построении такого графика следовало бы учесть еще и влияние несковозной прокаливаемости и масштабного фактора, что не всегда осуществимо из-за отсутствия справочных данных.

Желательно, чтобы оценка свойств после отпуска производилась не только по твердости, но и по ударной вязкости, так как ряд конструкционных сталей (особенно типа ХГС, ХС) при отпуске 250 – 450°С имеет пониженное ее значение из-за отпускной хрупкости. В связи с этим для деталей из этих сталей следует повысить температуру отпуска с некоторым снижением заданной твердости или принять альтернативный вариант — изотермическую закалку на нижний бейнит (без отпуска).

Более сложны режимы отпуска инструментов из высоколегированных сталей. Так, в зависимости от условий работы и конструкции инструменты из износостойкой стали типа Х12М могут подвергаться термообработке на максимальную первоначальную твердость, на вторичную твердость и на тепловую доводку размеров, режимы закалки и особенно отпуска которых существенно различаются [8].

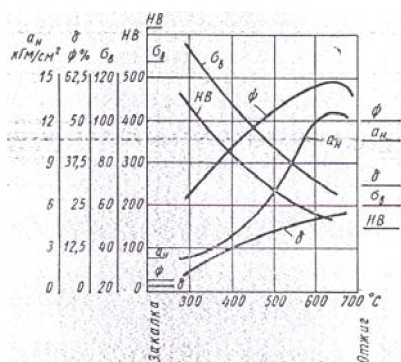


Рис. 11. Изменение механических свойств стали 40 в зависимости от температуры отпуска

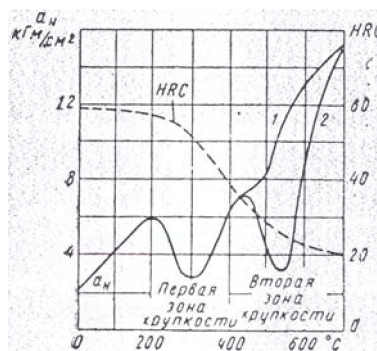


Рис. 12. Кривые изменения твердости и ударной вязкости хромо-никелевой стали в зависимости от температуры отпуска и скорости охлаждения после отпуска:  
1 — охлаждение в воде;  
2 — охлаждение на воздухе

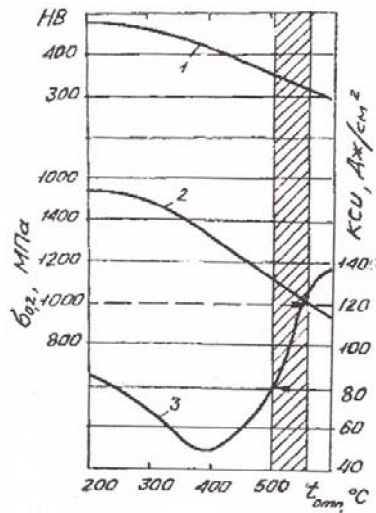


Рис. 13. Выбор температурного интервала отпуска болтов из стали 30XГСА на  $\sigma_{0,2}$  1000МПа и КСУ  $\geq 80$  кДж/см<sup>2</sup>: 1 – твердость НВ; 2 – предел текучести  $\sigma_{0,2}$ ; 3 – ударная вязкость КСУ

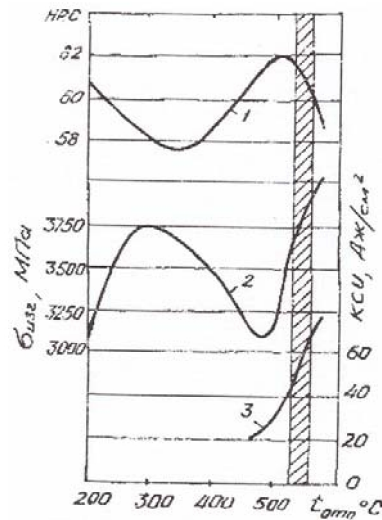


Рис. 14. Схема выбора температуры отпуска стали 13ХВСМФ: 1 – твердость HRC; 2 – предел прочности на изгиб  $\sigma_{изг}$ ; 3 – ударная вязкость КСУ

Для определения режимов отпуска углеродистых сталей в ряде случаев используют номограмму, разработанную А.П. Гуляевым. Порядок ее использования поясним на примере (рис. 15.)

Требуется установить режим отпуска (температуру и время выдержки) закаленной стали с 0,85%С для получения твердости HRC 40. Для этого на правой диаграмме находим точку 1, соответствующую содержанию углерода 0,85% и твердости HRC 40. Из точки 1 проводим эквидистанту до точки 2 на вертикали, соответствующей содержанию углерода 0,35%. Из точки 2 проводим на левую диаграмму горизонтальную линию, параллельную оси абсцисс. Как видно, эта линия пересекает температурные линии левой диаграммы 450°C (точка 3), 500°C (точка 4) и 550°C (точка 5). Проектируя точки 3, 4 и 5 на ось абсцисс, находим время выдержки при 450°C (10 ч), 500°C (35 мин) и 550°C (4 мин), необходимое для получения твердости HRC 40.

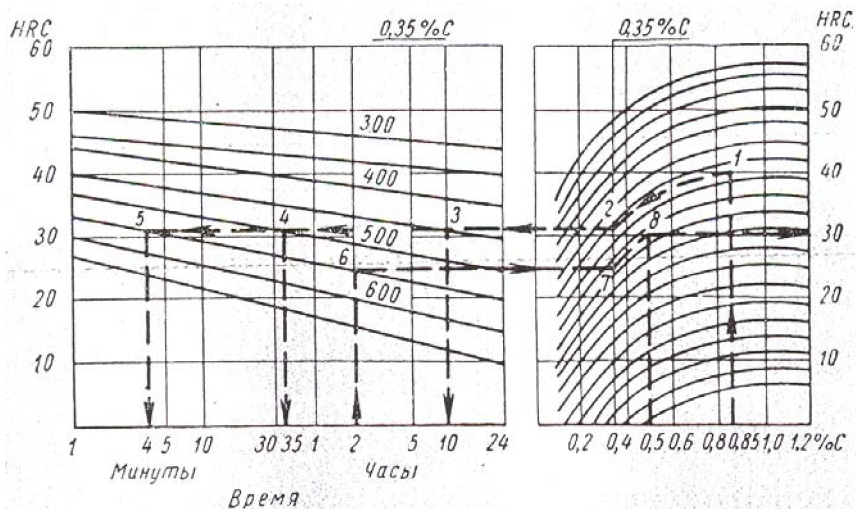


Рис. 15. Номограмма для определения твердости углеродистых сталей в зависимости от режима отпуска [18]

Инструменты из быстрорежущих сталей для распада остаточного аустенита и протекания дисперсионного твердения, сопровождающихся одновременным повышением теплостойкости, вязкости и прочности на изгиб, обычно подвергают двух- или даже четырехкратному отпуску с большой длительностью выдержки при каждом из них (одинаковом по температуре). Однако возможен и даже перспективен вариант отпуска их при повышенных температурах со значительным укорочением длительности и сокращением кратности (числа отпусков) или замена одного – двух отпусков обработкой холодом.

Дисперсионно-твердеющие стали для инструментов холодного деформирования типа 8Х4В2С2МФ, 6Х6В3МФС и др. отпускают также многократно, но с использованием режима перестаривания, обеспечивающего существенное повышение прочности на изгиб и ударной вязкости при незначительном снижении твердости на 1 – 2 HRC. Для штамповых сталей высокой теплостойкости (3Х2В8Ф, 4Х2В5МФ, 2Х6В8М2К8 и др.) с целью комплексного упрочнения границ зерен и внутренних объемов зерна различными карбидными и интерметаллидными фазами температуры первого и последующего отпусков могут существенно отличаться [22]. Для крупных инструментов сложной формы из подобных сталей первый

отпуск производят ступенчато с температурной остановкой при пониженных температурах для предотвращения трещинообразования. Крепежные части (хвостовики) молотовых штампов и некоторых сменных инструментов для повышения ударной вязкости подвергают дополнительному отпуску при более высоких температурах по сравнению с температурой основного отпуска гравюры.

Конкретные режимы отпуска различных инструментов приведены в методической разработке [6] и вышеуказанных источниках.

**2. Выбор сред и оборудования для отпуска** в принципе производится так же, как и при нагреве под закалку. Однако более низкие температуры нагрева на отпуск значительно упрощают эту задачу. При нагреве на отпуск в открытой атмосфере происходит окисление в тонком слое, но окалина, как правило, не образуется и выгорания углерода практически не происходит. Глубина дефектного слоя при самом высоком отпуске не превосходит сотых долей миллиметра, который может быть удален шлифовкой или дробеструйной обработкой. Поэтому отпуск деталей из конструкционных сталей и инструментов из углеродистых и малолегированных инструментальных сталей можно производить в газовых или электрических камерных печах с окислительной атмосферой. Исключение составляют инструменты из быстрорежущей стали и штампы из высоколегированных сталей, содержащих кремний и молибден, которые при нагреве выше 500°C могут обезуглероживаться. Для них отпуск рекомендуется проводить в контролируемой (защитной) атмосфере или расплавах солей (см. табл. П1.10). Ванны с солями, селитрами и щелочами иногда используют и при низком отпуске, но по другой причине — с целью ускорения нагрева по сравнению с нагревом в электропечах. Сведения об оборудовании для отпуска приведены в табл. П1.2 — П1.3, П1.8, П1.9.

**3. Общая продолжительность отпуска**, как и нагрева под закалку, состоит из времени прогрева детали до заданной температуры отпуска и времени выдержки, необходимого для завершения (в основном) фазовых превращений при отпуске. Первая составляющая при нагреве в газовых средах зависит не только от размера сечения детали, но и от температуры. Чем ниже температура, тем длительнее нагрев, так как он за счёт лучеиспускания ослабевает, поскольку происходит за счет менее эффективного конвективного теплообмена. С понижением температуры отпуска возрастает и время на про-

текание фазовых превращений из-за замедления диффузионных процессов. Нагрев до температуры отпуска в жидких средах (расплавы солей, селитр и щелочей, горячее масло и т.п.) протекает значительно быстрее.

Общая продолжительность отпуска при нагреве в газовых и электрических печах деталей из конструкционных сталей приводится в табл. П2.1, а в расплавах селитр и щелочей ориентировочно указана в примечании к этой таблице. Продолжительность отпуска (или нормативы для ее расчета) инструментов из легированных сталей, имеющих довольно сложные фазовые превращения при отпуске, приводится в комплексе с температурными режимами отпуска для ряда типовых инструментов и групп сталей в источниках [10, 16]. Некоторые данные на этот счет приводятся в табл. П2.4-П2.6.

**4. Охлаждение от температуры отпуска** до комнатной в большинстве случаев производится на воздухе без регламентации скорости охлаждения, так как основные фазовые превращения и формирование окончательной микроструктуры происходит во время выдержки при отпуске. Исключение составляют детали из сталей, подверженных обратимой отпускной хрупкости II рода (стали, легированные хромом и марганцем, хромом и никелем, не содержащие молибдена), проявляющейся при медленном охлаждении с температур отпуска 500 — 600°C. Их рекомендуется охлаждать в воде или масле. Во избежание образования больших остаточных напряжений с температур отпуска выше 500°C особо крупные детали (роторы турбин, прокатные валки и т.п.) рекомендуется охлаждать замедленно вместе с печью до 150 — 200°C и лишь затем для окончательного охлаждения выгружать их на воздух.

В заключительной части рассмотрения упрочняющей термической обработки (закалка и отпуск) следует привести:

- схематизированный режим термической обработки детали в виде графика;
- наиболее важные для данной детали или инструмента механические свойства;
- зарисовку и описание окончательной микроструктуры стали.

Пример графика режимов закалки и отпуска матрицы для выдавливания стальных деталей сложной формы приведен на рис. 16.

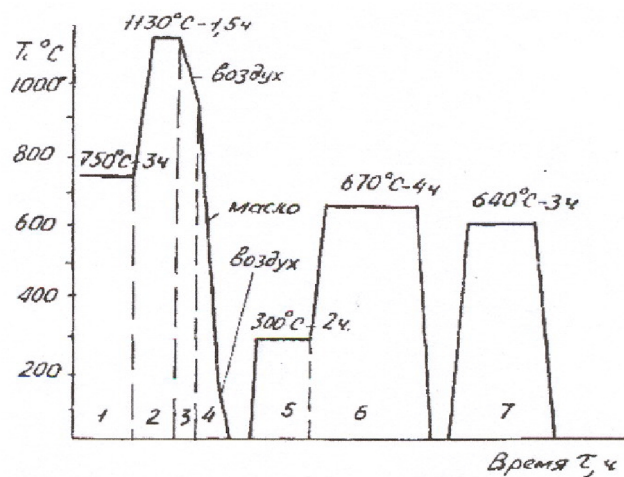


Рис. 16. Схема режимов упрочняющей термической обработки матрицы горячего прессования  $\varnothing 200$ ,  $L = 120$  мм из стали 5Х3В3МФС;  
 1 – предварительный подогрев; 2 – окончательный нагрев под закалку и выдержка; 3 – подстуживание; 4 – прерывистая закалка;  
 5 – предварительный отпуск; 6 – первый отпуск; 7 – повторный отпуск

### 7.3. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА ДЕТАЛЕЙ

При поверхностной закалке на некоторую глубину закаливается только поверхностный слой, а сердцевина остается незакаленной. Основное назначение — повышение твердости, износостойкости и предела выносливости изделия. Сердцевина его остается вязкой и может воспринимать ударные нагрузки.

Поверхностной закалке подвергаются многие детали машин из среднеуглеродистых нелегированных и реже малолегированных сталей (валы, оси, шестерни, плунжеры и т.п.). Для таких деталей отдельно задаются свойства сердцевины, поверхностная твердость и глубина упрочненного слоя.

В серийном и массовом производстве наиболее часто применяют поверхностную закалку с индукционным нагревом током высокой частоты (ТВЧ). Реже, в основном для крупных деталей при мелкосерийном или индивидуальном производстве, применяют поверхностную газопламенную закалку.

Индукционный поверхностный нагрев деталей под закалку производится в индукторах токами высокой частоты машинными или ламповыми генераторами (преобразователями частоты) за весь-

ма короткое время (2 — 200 с). Закалочное охлаждение нагретой поверхности осуществляется подачей воды под давлением 0,2 — 0,5 МПа (2 — 5 атм.) через мелкие (1,5 — 2,5 мм) отверстия душевого (спрейерного) устройства, смонтированного в одно целое с индуктором, или быстрым переносом нагретой детали в закалочный бак с водой или водомасляной эмульсией.

Перед разработкой технологии поверхностной закалки заданной детали необходимо изучить физические основы и основные закономерности индукционного нагрева. Особое внимание следует обратить на особенности фазовых превращений при быстром индукционном нагреве без выдержек, обуславливающим повышенные температуры нагрева под закалку, сохранение мелкого зерна при исходной нормализованной структуре, пониженную устойчивость переохлажденного неомогенного аустенита при закалке, повышенную твердость закаленного слоя и наличие в нем благоприятных сжимающих остаточных напряжений. Эти вопросы рассматриваются в учебной литературе [9, 17] и должны быть кратко изложены в записке. После изучения разрабатываются следующие технологические вопросы.

**1. Выбор способа поверхностной закалки и характера индукционного нагрева.** В зависимости от размера и формы упрочняемых на деталях поверхностей применяют одновременную, последовательную и непрерывно-последовательную закалки. Одновременный нагрев и охлаждение всей поверхности применяют для деталей, имеющих небольшую площадь упрочняемой поверхности, как описано выше. Последовательный нагрев и охлаждение отдельных участков используют при закалке шеек коленчатых валов (закалка одной шейки за другой), зубчатых колес с модулем более 6 мм (закалка «зуб за зубом»), кулачков распределительных валов и других деталей со сложной геометрией расположения закаливаемых поверхностей. Непрерывно-последовательную закалку применяют для длинных валов, осей и других подобных деталей. При таком способе деталь, медленно вращаясь, перемещается относительно неподвижных индуктора и охлаждающего устройства (или наоборот). Такой метод по сравнению с первым не требует большой мощности генератора.

Характер индукционного нагрева (вид закалки) определяется соотношением глубины прогрева выше критической точки  $A_3(x_k)$  к

глубине прокаливаемости ( $h$ ). От него зависят качество термообработки и режимы нагрева.

**При поверхностном индукционном нагреве**  $x_k = h$  весь нагретый слой после закалки приобретает мартенситную структуру, а глубинные слои и сердцевина сохраняют исходную структуру, полученную при предварительной термообработке (нормализация, или улучшение). На границе закаленного слоя с неупрочненной частью наблюдается резкий скачок в изменении твердости и других свойств, что неблагоприятно сказывается на эксплуатационной стойкости. Для осуществления такого нагрева требуется весьма малое время (2 — 20 с), но повышенная удельная мощность  $P_0 = 0,52 \text{ кВт/см}^2$ .

**При глубинном индукционном нагреве** (объемно поверхностная закалка) на мартенсит закаливается слой толщиной в два и более раз меньший, чем глубина прогрева выше точки  $A_3$ , поэтому в зоне от  $h$  до  $x_k$  аустенит превращается в троостит или сорбит. В этом случае за один цикл достигается сочетание упрочненного поверхностного слоя с высокой твердостью ( $HRC \geq 60$ ) при одновременном упрочнении глубинных слоев на  $HRC = 30...45$ . Это ведет к возникновению сжимающих напряжений на поверхности, повышению усталостной и контактной прочности. При этом увеличивается время нагрева (20 — 200 с), но уменьшается потребная удельная мощность (0,1—0,2 кВт/см<sup>2</sup>).

Общая глубина закаленного слоя  $x_k$  зависит от размера детали и условий ее нагружения. При работе только на износ или усталость ее принимают небольшой (1—2 мм), а при больших контактных нагрузках и возможной перешлифовке — толще (35 мм), но площадь сечения закаляемого слоя не должна превосходить 20% площади всего сечения. Для зубчатых колес оптимальная толщина слоя составляет 0,2 — 0,28 от их модуля. Глубина закаленного слоя указывается в задании или выбирается самостоятельно по приведенным нормам. При выбранном значении  $x_k$  и примерно одинаковой глубине прокаливаемости среднеуглеродистых сталей  $h$  по соотношению  $x_k/h$  нагрев может оказаться поверхностным или глубинным. Для реализации объемно поверхностной закалки, как более качественной, в ряде случаев применяют стали с регламентированной или с пониженной прокаливаемостью. Примером последней является сталь 58(55ПП).

**2. Назначение режимов закалки и выбор оборудования.** К числу термических параметров режима поверхностной закалки от-

носятся конечная температура нагрева и продолжительность нагрева (скорость нагрева выше точки  $A_3$ ), определяющие условия протекания превращения перлита и феррита в аустенит, размер зерна, степень гомогенности и устойчивость его при закалке. При заданной глубине прогрева, характере нагрева конечные температуры нагрева некоторых марок сталей приведены в табл. 5-7.

Из-за технической сложности температуру нагрева под закалку надежно проконтролировать не удастся. Поэтому фактически оценка качества термообработки производится по твердости и микроструктуре уже закаленного слоя, в частности по размеру зерна, которое должно быть не крупнее 10 балла стандартной шкалы. Более крупное зерно указывает на перегрев. Основными электрическими параметрами режима являются частота колебательного контура  $f$ , удельная мощность  $f_0$  и продолжительность нагрева  $t$ .

Частота тока  $f$  зависит от требуемой глубины прогрева выше критических точек  $x_k$ : чем она меньше, тем выше частота. Рекомендуемые частоты для закалочного индукционного нагрева на заданную глубину приводятся в табл. 6 и 7. По рекомендуемому диапазону частот выбираются тип и стандартная частота преобразователя.

Ориентировочные значения удельной мощности  $P_0$  и продолжительности нагрева  $t$  в зависимости от необходимой глубины нагрева  $x_k$  для ряда частот приведены на рис. 17.

Таблица 5. Температуры нагрева некоторых марок стали при поверхностной закалке

Марка стали	Предварительная термическая обработка	Температура печного нагрева, °С	Температура, °С, при суммарном времени аустенизации, с		
			10	3	1
45	Отжиг	810-830	850-870	870-910	910-950
50	Нормализация	810-830	830-850	850-890	890-930
	Улучшение		810-830	830-870	870-910
35Г	Нормализация	840-860	880-920	910-960	950-980
	Улучшение		860-890	880-940	920-980
45Г2	Нормализация	820-840	840-860	860-890	900-940
50Г	Улучшение	820-840	800-820	820-850	850-900
45Х	Нормализация	830-850	880-920	920-960	940-980
40ХНМ	Улучшение	830-850	840-860	860-900	880-920
	Нормализация		810-830	860-880	900-940
40ХН	Улучшение	810-830	820-840	840-880	860-900
35ХГС	Нормализация	880-900	920-940	940-980	960-1000
40ХС	Улучшение	880-900	880-900	920-960	940-980
ШХ15	Отжиг	830-850	890-930	920-960	950-1000
	Улучшение		850-870	880-920	920-960

Таблица 6. Частоты тока, рекомендуемые для индукционного закалочного нагрева на заданную глубину

Параметры	Глубина закаленного слоя, мм						
	1	1,5	2	3	4	6	10
Частота тока, Гц	250000	100000	60000	30000	15000	8000	2500
наибольшая	15000	7000	4000	1500	1000	500	150
наименьшая							
Тип генератора	ламповый	ламповый или машинный		машинный			
Рекомендуемая частота, Гц	250000 или 440000	10000 или 66000	8000 или 10000	8000 или 10000	2500	25000 или 1000	500

Таблица 7. Выбор частоты тока в зависимости от диаметра изделий и требуемой толщины закаленного слоя

Частота тока, Гц	Рациональные пределы глубин нагрева, мм	Минимальные диаметры изделий при нагреве под закалку, мм	
		Наименьший возможный	Наименьший желательный
50	15 – 80	100	200
1000	3 – 17	22	44
2400	2 – 11	14	28
4000	1,5 – 9	11	22
8000	1 – 6	8	16
10000	0,9 – 5,5	7	14
70000	0,3 – 2,5	2,7	5,4
400000	0,2 – 1,0	1,1	2,2

Примечание. Нагрев под закалку шестерен с модулем зуба  $m < 3,5 - 4$  мм производится на радиочастотах, а при  $m > 4$  мм – на средних частотах (2,5 – 10 кГц). Крупномодульные шестерни ( $m > 7$  мм) закаливают зуб за зубом по впадинам при тех же частотах.

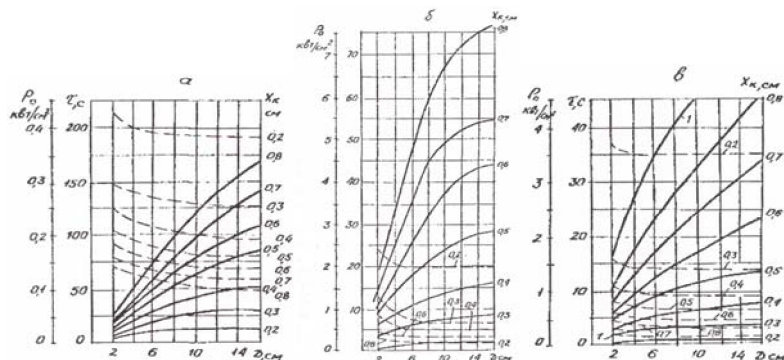


Рис. 17. Зависимость времени нагрева  $\tau$  (сплошные линии) и удельной мощности  $P_0$  (штриховые линии) от толщины нагреваемой детали  $D$  для различных толщин закаленного слоя  $x_h$  при различных частотах: а – 25000 Гц, б – 8000 Гц, в – 2500 Гц

**3. Выбор типа индуктора и охлаждающего устройства.** В задачу курсовой работы не входят детальная разработка конструкции и электрический расчет индуктора, но должна быть выбрана и изображена его принципиальная схема. Наиболее просты и распространены одно- и многovitковые кольцевые индукторы для нагрева внешних и внутренних цилиндрических поверхностей, шестерен модулем до 6 мм. Они представляют собой спиральные катушки из полых медных трубок круглого или прямоугольного сечения, по внутренней поверхности которых пропускается вода для охлаждения индуктора. Зазор между нагреваемой поверхностью и индуктором должен быть минимальным (2 — 3 мм). Охлаждающее устройство (спрейер) для подачи закалочной жидкости на нагретую поверхность детали выполняется вместе с индуктором. В некоторых случаях закалочное охлаждение производится в отдельном баке. Разнообразные конструкции индукторов приводятся на рис. П2.1.

В производственных условиях после проектирования и изготовления индуктора производится закалка опытных деталей, исследуется их структура и твердость, уточняются режимы нагрева и закалки, проводятся эксплуатационные испытания деталей, проектируется и изготавливается оснастка для стабилизации и автоматического контроля режимов при серийном производстве.

**4. Отпуск закаленных деталей.** Закаленные на установках ТВЧ детали подвергаются низкому отпуску при температурах 150—250°C в зависимости от требуемой твердости. Он производит-

ся чаще всего в камерных электропечах в течение 1,5 — 2,5 ч. В последние годы все большее применение находит электроотпуск при индукционном нагреве при повышенных температурах (на 50—100°C по сравнению с отпуском в печи), но весьма коротком времени (десятки секунд). Распространен также самоотпуск, осуществляемый на небольших деталях путем прерывания закалочного охлаждения в момент, когда в поверхностных слоях уже прошло мартенситное превращение, а температура сердцевины еще достаточно высокая. Перетекание тепла из сердцевины к поверхности разогревает поверхностный слой и производит его отпуск. Температура его разогрева должна быть на 50 — 85°C выше температуры печного отпуска, такой разогрев весьма кратковременный. На поверхности термически обработанной стали по вышеуказанной технологии наблюдается упругое сжатие ( $\sigma = 700...800$  МПа), а в сердцевине — растяжение ( $\sigma = 300...400$  МПа). Низкий отпуск снижает как сжимающие, так и растягивающие напряжения.

## 8. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ

### 8.1. ЦЕМЕНТАЦИЯ (НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ) ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Детали машин из малоуглеродистых сталей (0,1—0,3%С) для повышения твердости и износостойкости поверхности подвергаются цементации на небольшую глубину и последующей закалке с низким отпуском. При этом одновременно повышается предел выносливости, а сердцевина остаётся пластичной и вязкой, что свойственно малоуглеродистой стали. Прочность сердцевины зависит от ее структуры, приобретенной при закалке и низком отпуске, которая может изменяться от ферритной с небольшим количеством перлита для неупрочняемых деталей из нелегированных сталей до структуры малоуглеродистого мартенсита или бейнита с небольшим количеством феррита или без него — для высокопрочных деталей из умеренно легированных сталей. В слабо упрочняемых деталях из малолегированных сталей в сердцевине может быть набор всех перечисленных структурных составляющих. Основная структурная составляющая поверхностного слоя - высокоуглеродистый мартенсит отпуски.

При разработке режимов и технологии проведения ХТО изделий из малоуглеродистых сталей решаются следующие вопросы.

**1. Выбор последовательности выполнения операций в цикле ХТО** производится с учетом сплошного или местного расположения зон цементации на поверхности детали и марки стали. При местной (локальной) цементации участки, не подлежащие упрочнению, защищаются от цементации тонким слоем меди (0,04 — 0,08мм) путем гальванического меднения или нанесения обмазки из смеси огнеупорной глины, песка и асбеста, замешанной на жидком стекле. Возможен вариант цементации всей поверхности детали, но в этом случае на участках, не подлежащих упрочнению, оставляют припуск, равный 1,3 толщины диффузионного слоя, который удаляют обработкой резанием после цементации.

Отверстия малого диаметра, узкие пазы и другие места, которые трудно защитить меднением от цементации, изготавливают после нее при чистовой механической обработке. При этом цементованные детали из легированных сталей, имеющих повышенную твердость после цементации (HRC28), для улучшения обрабатывае-

мости резанием при удалении припусков предварительно подвергают высокому отпуску при 630 — 680°C.

Цементованные детали из хромоникелевых сталей, содержащих 3 — 4% никеля, после закалки имеют пониженную твердость. Во избежание этого их после цементации также подвергают высокотемпературному отпуску при 620 – 650°C с целью обеднения твердого раствора углеродом и легирующими элементами за счет выделения карбидов, что повышает точки  $M_n$  и  $M_k$ , уменьшает количество остаточного аустенита и повышает твердость цементованного слоя при последующей закалке с температур не выше 820°C. Реже удаление остаточного аустенита проводят обработкой холодом после закалки.

**2. Выбор вида цементации и оборудования для ее проведения** производится с учетом типа (массовости) производства, уровня его оснащенности на данном предприятии, степени ответственности деталей и условий труда в цехе. При цементации в твердом карбюризаторе детали, контрольные образцы и образцы-свидетели вместе с карбюризатором на основе древесного угля упаковывают в цементационные ящики, которые нагревают в универсальных шахтных или камерных электропечах до температуры цементации и выдерживают в них длительное время, определяемое требуемой толщиной цементованного слоя. Цементация в твердом карбюризаторе не позволяет регулировать ход процесса насыщения, малопроизводительна, негигиенична, но проста в исполнении и требует специализированного оборудования. Она применяется в единичном и мелкосерийном производстве.

Газовая цементация осуществляется нагревом деталей в среде газов, содержащих атомарный углерод. Она более производительна, поддается регулированию основных параметров процесса (температуры, углеродного потенциала) и обеспечивает более высокое качество слоя. Она применяется во всех типах производства. Газовую цементацию в индивидуальном и серийном производстве выполняют в муфельных шахтных печах цементации серии Ц и СШЦ с применением чаще всего жидких углеводородов, состоящих в основном из метана  $CH_4$  или метана и окиси углерода  $CO$  (синтин, пиробензол, очищенный керосин, спирты), которые каплями подаются в горячую печь, где они испаряются с образованием атомарного углерода, диффундирующего в сталь.

Более совершенны камерные безмуфельные печи — агрегаты серии СНЦА для газовой цементации в эндотермической или другой контролируемой атмосфере с регулируемым углеродным потенциалом. В них исключается контакт деталей с воздухом в течение всего процесса, в одном агрегате может выполняться весь цикл ХТО и ТО, так как в него, помимо печи цементации, входит закалочный бак, отпускная печь, моечно-сушильная машина, механизмы перемещения поддонов с деталями. Печи – агрегаты типа СНЦА комплектуются газоподготовительными установками, позволяющими производить не только цементацию, но и нитроцементацию. В последнем случае в эндотермическую атмосферу печи добавляют кроме 3 – 10% природного газа, еще и 2 – 10% аммиака  $\text{NH}_3$ .

В условиях массового производства для цементации (нитроцементации) используют автоматизированные агрегаты непрерывного действия, обеспечивающие весь цикл операций ХТО и ТО в непрерывном потоке.

**3. Краткое описание технологии цементации** (нитроцементации) производится с учетом выбранного оборудования для ее проведения. Цементация в твердом карбюризаторе включает в себя: очистку изделий от масла, эмульсии и грязи; их гальваническое меднение (при местной цементации); укладку деталей и образцов - свидетелей в ящики и их герметизацию; посадку ящиков в разогретую печь и проведение цементации при заданной температуре и длительности; выгрузку ящиков из печи на воздух и их охлаждение до  $400^\circ\text{C}$ ; разгерметизацию ящиков и выгрузку деталей.

Газовая цементация в шахтных печах включает: очистку и нанесение защитных покрытий на поверхности деталей; комплектацию садки с размещением деталей в корзинах на специальных подвесках и штанговых приспособлениях в муфеле; загрузку муфеля с садкой в разогретую печь; продувку рабочего пространства печи в течение 20 мин карбюризатором с расходом его 35 — 40% от полного расхода при насыщении для предотвращения окисления; вывод печи на рабочий режим и (активное) насыщение стали углеродом (при активной циркуляции атмосферы с помощью вентилятора); выгрузку и охлаждение цементованных деталей в колодцах с нейтральной атмосферой, на воздухе или в закалочной среде.

Газовая цементация (нитроцементация) в камерных печах периодического действия серии СНЦА состоит из подготовки и размещения деталей на поддоне, загрузки его в изолированный от ат-

мосферы тамбур и перемещения в цементационную камеру. В тамбур и камеру подается смесь эндогаза с природным газом (аммиаком). Регулирование подачи последних изменяет углеродный потенциал среды, распределение углерода по глубине и соотношение азота к углероду. После окончания выдержки при заданных температуре и времени поддон перемещается в тамбур и детали из него погружаются в закалочный бак или подаются на разгрузочную площадку. После закалки деталей поддон поднимается на загрузочную площадку, а закаленные детали транспортируются в отпускную печь.

Процесс цементации в агрегатах непрерывного действия полностью механизирован и автоматизирован, а также включает активный и диффузионный период насыщения при  $930^{\circ}\text{C}$ , подстуживание до  $850^{\circ}\text{C}$ , ступенчатую закалку сначала в горячем ( $180^{\circ}\text{C}$ ), затем в холодном масле и отпуск при  $200^{\circ}\text{C}$ . Детали, размещенные на поддонах, последовательно проходят через соответствующие агрегаты и зоны цементационной печи с изолированными друг от друга атмосферами путем периодического их проталкивания с ритмом около 10 мин. В агрегате одновременно может находиться до 80 поддонов.

#### **4. Назначение режима цементации (нитроцементации).**

Режим цементации характеризуется температурой, длительностью выдержки, составом и расходом рабочей среды на отдельных этапах процесса. Эти параметры во многом определяют качество готовых изделий, характеризуемых содержанием углерода на поверхности, твердостью и структурой цементованного слоя, которые определяют предел выносливости и износостойкость.

Температура цементации сталей может колебаться в широких пределах (от  $900$  до  $1000^{\circ}\text{C}$ ) и выбирается по справочной литературе [16] с учетом состава данной стали, ее склонности к росту зерна, вида цементации и оборудования. Выбор ее должен быть обоснован в записке. При нитроцементации температура насыщения более низкая:  $830 - 860^{\circ}\text{C}$  вместо  $920 - 950^{\circ}\text{C}$  при цементации низкоуглеродистых конструкционных сталей.

Длительность цементации зависит в основном от требуемой толщины диффузионного слоя, выбранной температуры и вида насыщающей среды. Эффективная толщина слоя цементации  $\Delta_{\text{эф}}$  (слой с твердостью  $\text{HRC} \geq 50$  и содержанием углерода более  $0,4\%$ ) указывается в задании и должна составлять  $10 - 15\%$  от толщины упроч-

няемого сечения, что обеспечивает наибольшую усталостную прочность.

Для шестерен  $\Delta_{\text{эф}} = (0,15 - 0,17) m$ , где  $m$  – модуль зуба. При нитроцементации  $\Delta_{\text{эф}}$  не должна превышать 1мм из-за возможного появления дефектов в структуре.

Длительность цементации в твердом карбюризаторе состоит из времени нагрева цементационного ящика и времени выдержки при выбранной температуре. Время нагрева до 920 – 950°C составляет 7 – 9 мин на каждый сантиметр минимального размера ящика. Размеры и форма ящиков подбираются по размерам и форме деталей, которые занимают 15 – 20% объема ящика. Длительность выдержки в среднем берут из расчета скорости насыщения 0,1 – 0,12мм за один час.

Общая длительность газовой цементации в жидком карбюризаторе зависит от требуемой эффективной толщины слоя, состава карбюризатора и температуры цементации (см. табл. П2.7). Ориентировочно можно брать 0,15 – 0,17мм за час при 930°C для малоуглеродистых конструкционных сталей. Такой же она берется при цементации в газовой среде на основе эндотермической атмосферы с добавкой метана. Скорость нитроцементации при 850°C остается примерно такой же, что и скорость газовой цементации при 930°C.

Режим насыщения углеродом при цементации в твердом карбюризаторе практически не регулируется; он контролируется, а при необходимости и корректируется, по глубине слоя и микроструктуре образцов-свидетелей.

Режим насыщения при газовой цементации регулируется и должен обеспечить содержание углерода на поверхности 0,81%, отсутствие в заэвтектоидной зоне грубой цементитной сетки и крупных изолированных карбидов, выкрашивающихся при контактной нагрузке в эксплуатации. Для этого используют ступенчатый режим насыщения. В первый активный период насыщения, занимающий примерно 2/3 общего времени цементации, поддерживают высокий углеродный потенциал атмосферы, обеспечивающий получение в поверхностной зоне стали 1,3 – 1,4%С. Во втором периоде (диффузионное выравнивание) углеродный потенциал резко снижают до 0,8% и ниже, а углерод из поверхностной зоны диффундирует в более глубокие соседние слои, обеспечивая получение в ней 0,8 – 1,0%С. При цементации жидким карбюризатором в шахтных печах расход карбюризатора в первый период устанавливается в 130 – 150

капель в минуту, а во второй — 25–50 капель в минуту. При работе на необработанном природном газе в тех же печах расход газа составляет в первый период 0,8 – 1 м<sup>3</sup>/час, а во второй — 0,2–0,25 м<sup>3</sup>/час (печь Ц – 105). Контроль подачи газа в шахтных печах ведется по цвету пламени и длине факела из выходящей трубки.

При цементации в эндотермической атмосфере высокий углеродный потенциал насыщающей среды в первый период поддерживается за счет добавки к ней природного газа (метана) в количестве 8 – 15%, подачу которого во второй период резко снижают (рис. 18).

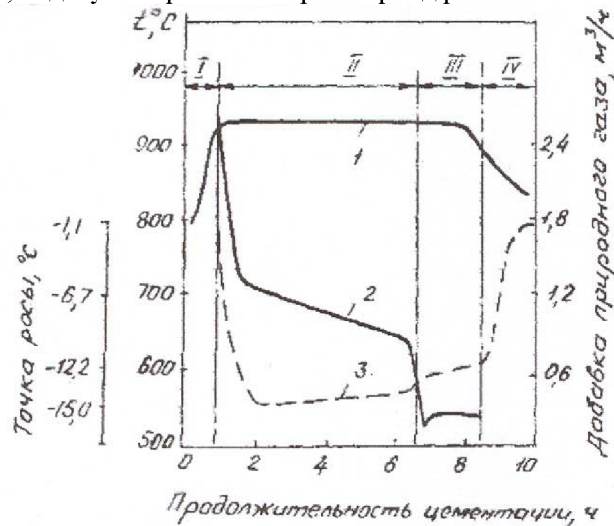


Рис. 18. Типовая схема цементации в печах периодического действия в эндотермической атмосфере с добавлением природного газа: I – нагрев; II – период насыщения; III – период диффузионного перераспределения углеродов в слое; IV – охлаждение; 1 – температура; 2 – количество добавляемого природного газа; 3 – точка росы

Контроль углеродного потенциала в этом случае осуществляют по точке росы (температура, при которой начинается конденсация водяных паров, содержащихся в атмосфере). В современных камерных печах серии СНЦА и агрегатах непрерывного действия регулирование углеродного потенциала осуществляется автоматически в газоприготовительной установке. Составы карбюризаторов, некоторые характеристики режимов цементации приведены в табл. 8.

Нитроцементацию ведут чаще всего в безмуфельных агрегатах с автоматически регулируемым потенциалом углерода и строго дозированным количеством аммиака. Например, при толщине слоя 0,5 – 1мм температура процесса принимается 830 – 860°C, а добавка к эндотермической атмосфере составляет: метана – 4 – 6%, а аммиака – 1,5%; при температурах 860 – 890°C содержание метана снижают до 0,5 – 0,8%, а доля аммиака составляет 2 – 4% (890°C) или 0,6 – 1,3% (860°C). Ступенчатые циклы по углеродному потенциалу обычно не применяют, так как при температуре насыщения (~ 860°C) растворимость углерода в аустените близка к оптимальной (не более 0,8%). С повышением температуры содержание углерода в слое возрастает, а азота — падает. При 780 – 820°C содержание азота в низколегированных сталях составляет 0,6 – 1%, при 820 – 860°C – 0,4 – 0,7%, при 860 – 890°C 0,3 – 0,5%. Более детальное описание режимов нитроцементации приводится в источнике [24].

Выбор режимов цементации должен сопровождаться соответствующими обоснованиями их влияния на формирование структуры зон и свойства слоя со ссылками на справочную литературу.

Таблица 8. Цементация стали

Состав карбюризатора	t цементации, °C	Общая продолжит. процесса, ч	Толщина слоя, мм	Примечание
Твердый карбюризатор				
1. Древесный (березовый) уголь в смеси с 20-25% BaCO <sub>3</sub> и 3,5-5% CaCO <sub>3</sub> (ГОСТ 2704-66)	930-950	4-15	0,5-1,5	Ящики загружаются в печь, нагретую до 600-700°C, либо имеющую рабочую температуру. Охлаждение ящиков на воздухе (объем деталей 15-30% от объема цементационного ящика)
2. Каменноугольный полукокс в смеси с 10-15% BaCO <sub>3</sub> и 3,5-5% CaCO <sub>3</sub> (ГОСТ 5535-76)				
3. Рабочая смесь состоит из 25-30% свежего и 70-75% отработанного карбюризатора с 5-7% BaCO <sub>3</sub>				

Состав карбюризатора	t цементации, °С	Общая продолжит. процесса, ч	Толщина слоя, мм	Примечание
Газовая цементация				
4. Эндотермическая атмосфера (20% CO, 40% H <sub>2</sub> , 40% N <sub>2</sub> ) + 5% природного газа CH <sub>4</sub>	930-950	6-10	0,7-1,5	В методических безмуфельных и камерных печах Р = =25-30 мм вод. ст., охлаждение в закалочной среде или колодцах
5. Экзо-эндогаз (20% CO-20% H <sub>2</sub> +60%N <sub>2</sub> ) 0,5-5,0% CH <sub>4</sub>	930-950	6-10	0,7-1,5	- " -
6. Газы, получаемые из керосина, синтина, пиробензола различных спиртов и др. углеводородов непосредственно в печи для цементации				
7. 78-85% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (или K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) + 10-15% NaCl- 6-8% SiC	870-900	0,5	0,15-0,2	Мелкие детали и нормали

**5. Выбор режимов термообработки цементованных (нитроцементованных) деталей.** Цементация лишь создает оптимальное распределение углерода по сечению. Окончательные свойства цементованные детали приобретают после закалки с низким отпускком. При выборе режимов их термообработки учитывают:

- химический состав исходной стали;
- степень проявления дефектов структуры, образующихся в результате длительной выдержки при высоких температурах цементации (крупнозернистость поверхностного слоя и сердцевины, наличие цементитной сетки или крупных изолированных карбидов в заэвтектоидной зоне, внутреннее окисление и т.п.) и зависящих от вида, оборудования и режима цементации;
- степень ответственности и уровень заданных свойств в сердцевине и на поверхности, определяемых условиями эксплуатации детали;

- размер и форму детали, наличие в ней концентраторов напряжений, а также точность геометрии (допустимые биение и коробление);

- масштаб производства.

Описанный выше наиболее производительный процесс, включающий закалку с цементационного нагрева (с подстуживанием до 800 – 850°C или без него) в холодном или горячем (160 – 190°C) масле в механизированных камерных печах и автоматизированных агрегатах непрерывного действия, применяют в массовом или крупносерийном производствах и только для деталей из наследственно мелкозернистых сталей (18ХГТ, 25ХГНМ, 25ХГТ, 25ХНТЦ, 20ХГНТР и др.), которые подвергались цементации (нитроцементации) в среде с регулируемым углеродным потенциалом. При этом обеспечивали содержание углерода в поверхностном слое не более 0,9%, отсутствие цементитной сетки и крупных изолированных карбидов.

В большинстве случаев закалку цементованных деталей выполняют с повторного нагрева. Это относится и к деталям из выше-названных сталей, если для них необходима промежуточная механическая обработка. При этом после цементации их замедленно охлаждают в специальной камере агрегата до 250 – 300°C и далее на воздухе, а затем закачивают с нагревом в печах до 820 – 860°C.

Детали из легированных хромоникелевых сталей, содержащих 3 – 4% Ni (12ХН3А, 20ХН3А, 20Х2Н4А, 18Х2Н4ВА и т.п.), непосредственной закалке с цементационного нагрева, как правило, не подвергают из-за сохранения в структуре слоя большого количества остаточного аустенита, снижающего твердость до 45 – 52 HRC. Их охлаждают после цементации в печи до 300 – 450°C, затем подвергают высокому отпуску при 600 – 650°C с последующим замедленным охлаждением до 20°C. Для закалки такие детали повторно нагревают до 780 – 820°C и охлаждают в масле. Иногда вместо этого варианта применяют обработку холодом после закалки с цементационного нагрева с сохранением крупнозернистости сердцевины.

Слабо и умеренно нагруженные детали после твердой цементации или цементации в шахтных печах подвергают одинарной закалке с повторного нагрева. Температура их нагрева под закалку может колебаться в широких пределах (от 780 до 950°C) в зависимости от состава стали, режима цементации и условий нагружения в эксплуатации, но чаще всего берется равной 820 – 860°C.

Особенности формирования структуры для них в зависимости от температуры закалки достаточно полно описаны в учебниках. Охлаждение закаливаемых деталей ведут в основном в масле, а для тонких маложестких деталей во избежание сильного коробления используют ступенчатую закалку.

Наиболее ответственные детали с высоким уровнем требований к структуре и свойствам после цементации в шахтных печах и охлаждения до комнатной температуры подвергают двойной закалке или нормализации и закалке. Такая термообработка, в частности, предусмотрена в авиа- и моторостроении. Однако она сложна и сопровождается повышенным короблением, окислением и обезуглероживанием поверхности. Для предотвращения обезуглероживания и образования окалины на поверхностях, особенно не шлифуемых в дальнейшем, нагрев под закалку рекомендуется выполнять в печах с защитной атмосферой, а для нитроцементованных деталей, особенно склонных к обезуглероживанию вследствие возрастания скорости диффузии углерода в присутствии азота, — только в защитной среде с регулируемым углеродным потенциалом и заданной подачей аммиака. Поэтому основным процессом упрочнения нитроцементованных деталей является непосредственная закалка с температуры насыщения, которая выполняется в автоматизированных агрегатах. Особенностью закалки нитроцементованных деталей является большое количество остаточного аустенита в слое из-за присутствия азота, резко снижающего точки  $M_n$  и  $M_k$ . Однако оно допустимо (до 40–45%) и даже желательно в шестернях для улучшения их прирабатываемости и бесшумности работы. При этом обеспечивается высокая усталостная прочность и контактная выносливость при некотором небольшом снижении износостойкости, что объясняется присутствием в структуре поверхностного слоя (кроме остаточного аустенита и мелкоигольчатого мартенсита) дисперсных частиц карбонитридов, нитридов и карбидов легирующих элементов.

Окончательная термообработка цементованных и нитроцементованных деталей состоит в отпуске при 180—200°C. В курсовой работе следует привести обобщенную схему режима цементации, закалки и отпуска (см. пример на рис. 19), дать зарисовку и описать структуру по зонам сечения, указать необходимые механические свойства поверхностного слоя (твердость) и сердцевины ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ , КСЧ).

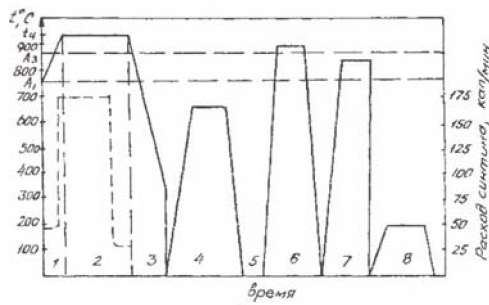


Рис. 19. Схема ХТО ответственных деталей из стали 18ХГТ в шахтной печи при местной цементации с использованием синтина:

- 1 – продувка печи и вывод ее на рабочий режим; 2 – цементация при 930°C; 3 – охлаждение с печью до 300°C, далее на воздухе; 4 – высокий отпуск при 650°C; 5 – чистовая механическая обработка; 6 – нормализация при 900°C; 7 – закалка в масле с 860°C; 8 – отпуск при 180 – 200°C;  
 - - - - - температура; ----- расход синтина

## 8.2. АЗОТИРОВАНИЕ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ЦИАНИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТОВ

Насыщение поверхностных слоев изделий азотом или азотом совместно с углеродом позволяет получить очень высокую твердость на поверхности (600 – 1200 НВ), не изменяющуюся при нагреве до 400 – 450°C, высокую износостойкость и низкую склонность к задирам, высокий предел выносливости и хорошую сопротивляемость коррозии в атмосфере, пресной воде и паре, недостижимые при цементации. В промышленности наибольшее распространение получило низкотемпературное азотирование и цианирование (500 – 600°C) при температурах ниже эвтектоидного превращения в системе Fe-N, в процессе которых обрабатываемые изделия испытывают самые минимальные деформации и коробления. Это выгодно отличает их от других способов упрочняющей обработки, так как позволяет проводить эти операции как финишные на практически готовых деталях, структура и свойства сердцевин которых формируются на предыдущих операциях термообработки в соответствии с условиями их эксплуатации.

Детали машин из среднеуглеродистых сталей до азотирования обычно проходят улучшение (закалка + высокий отпуск) на твердость 260 – 320 НВ. В связи с низкой температурой азотирования получение толстого диффузионного слоя требует очень больших

затрат времени. Из-за этого максимальную толщину слоя ограничивают обычно от 0,4 до 0,8мм. При такой толщине не исключено продавливание азотированного слоя при очень высоких контактных нагрузках. При таком нагружении предпочтительнее цементация. Повысить твердость сердцевины конструкционных сталей нельзя, т.к. температура отпуска должна быть не ниже температуры азотирования. Инструменты из теплостойких сталей до насыщения азотом имеют мартенситную или тростомартенситную структуру с высокой твердостью (45—62 HRC), полностью исключающую продавливание азотированного слоя. Поэтому их азотируют или цианируют на небольшую глубину (до 0,2мм) за сравнительно короткое время.

**1. Формирование структуры и свойств диффузионного слоя** в рассматриваемых процессах весьма сложно и должно быть тщательно проработано по учебной литературе [11, 17].

В соответствии с диаграммой Fe—N при низкотемпературном азотировании происходит последовательное образование насыщенных азотом слоев: азотистого феррита ( $\alpha$ -фаза), нитрида  $Fe_4N$  ( $\gamma'$ -фаза с узкой областью гомогенности) и затем нитрида  $Fe_3N$  ( $\epsilon$ -фаза с широкой областью гомогенности). При этом слои с двухфазной структурой не образуются. При охлаждении с температуры азотирования до комнатной в связи с переменной растворимостью азота в  $\alpha$ - и  $\epsilon$ -фазах происходит образование мелких вторичных выделений  $\gamma'_{11}$  в зернах  $\alpha$ - и  $\epsilon$ -фаз. Поэтому при 20°C структура диффузионного слоя будет состоять из следующих (в направлении от поверхности к сердцевине) зон:  $(\epsilon + \gamma'_{11}) \rightarrow \gamma' \rightarrow (\alpha + \gamma'_{11})$ . Обычно первые две зоны называют нитридными, а последнюю — зоной внутреннего азотирования. Если перед азотированием исходной структуры был мартенсит, то  $\alpha$ -фазу называют азотистым мартенситом.

При азотировании железа в атмосфере с высоким азотным потенциалом (высокая степень диссоциации аммиака) содержание азота в  $\epsilon$ -фазе достигает 9—10%. Она обладает повышенной хрупкостью и, кроме того, экранирует диффузию в нижележащие слои. Снижая азотный потенциал, можно уменьшить содержание азота в  $\epsilon$ -фазе или даже подавить образование  $\epsilon$ -фазы или  $\epsilon$ - и  $\gamma'$ -фаз. Для этого необходимо понижать температуру или при  $t = \text{const}$  разбавлять аммиак, подающийся в рабочее пространство печи, водородом, продуктами диссоциации аммиака, инертными газами и пр. При азотировании стали в смеси аммиака и углеродосодержащих газов (метан, пропан, эндогаз и т.п.)  $\epsilon$ -фаза имеет карбонитридную природу (т.е.

$\text{Fe}_3(\text{N}, \text{C})$ ); содержание азота в ней снижается до 5 — 6%, устраняется ее хрупкость, но область ее существования расширяется.

Твердость азотированного слоя на железе и углеродистых сталях невелика (200 — 250 НВ). Поэтому упрочняющему азотированию и цианированию подвергают только легированные стали. Переходные металлы Mn, Cr, Mo, W, V, Ti, Zn, будучи растворены в феррите, резко повышают растворимость в нем азота. Это значительно упрочняет зону внутреннего азотирования как за счет искажения решетки  $\alpha$ -фазы атомами N (растворное упрочнение), так и за счет образования сегрегации типа зон Гинье-Престон (при  $t \leq 520^\circ\text{C}$ ) или зародышей нитридов легирующих элементов типа  $\text{Me}_2\text{C}$  и  $\text{MeC}$  (при  $t > 520^\circ\text{C}$ ) и их роста как в процессе азотирования, так и при охлаждении от температуры насыщения до комнатной вследствие уменьшения растворимости азота и легирующих элементов в  $\alpha$ -фазе. Они могут образовываться и за счет перехода карбидов легирующих элементов (особенно сильных карбидообразований) в соответствующие нитриды  $\text{MeC} \rightarrow \text{MeN}$ . Дисперсность нитридов легирующих элементов весьма высока и составляет 20 — 40 Å при  $550^\circ\text{C}$ , ~ 100 Å при  $600^\circ\text{C}$ . Азотирование выше  $600^\circ\text{C}$  сопровождается коагуляцией и сфероидизацией нитридов, что существенно снижает твердость.

Наиболее эффективное повышение твердости достигается при комплексном легировании Mo, Cr и другими элементами в присутствии Al (38Х2МЮ), но при этом повышается хрупкость слоя. Предельное повышение твердости не всегда сопровождается повышением износостойкости. Лучшую износостойкость имеет азотированный слой с развитой зоной карбонитридов  $\text{Fe}_3(\text{N}, \text{C})$ ; образование хрупкого нитрида  $\text{Fe}_2\text{N}$  приводит к его выкрашиванию. Сопротивление износу зоны внутреннего азотирования в легированных сталях выше, чем у нитрида железа  $\text{Fe}_3\text{N}$ , но и ниже, чем у карбонитрида  $(\text{Fe}, \text{Me})_3(\text{N}, \text{C})$ . Для деталей, работающих в коррозионной среде и на износ при малых контактных нагрузках, требуется слой с развитой сплошной нитридной зоной, обеспечивающей высокое сопротивление коррозии и прирабатываемость трущихся поверхностей.

Для деталей, работающих при знакопеременных нагрузках в условиях умеренного износа при высоких давлениях, необходим азотированный слой, состоящий только из хорошо развитой зоны внутреннего азотирования. Он рекомендуется для деталей и штампового инструмента, работающих в режиме динамического изнаши-

вания и ударных нагрузок. Легирование в этом случае целесообразно осуществлять W, Mo, Cr, V (но без Al) и иметь HV = 600...850 (40X, 40XФА, 20X3МВФ, 30XНМФ, 18ХГТ, 40ХН2МА и др.).

Толщина слоя у деталей машин, работающих при высоких контактных нагрузках и имеющих в сердцевине сорбит отпуска, должна быть не менее 0,5мм, иначе он будет продавливаться. Для штамповых инструментов горячего деформирования с повышенной вязкостью он рекомендуется 0,2—0,25, для инструментов холодного деформирования из X12М — 0,08 — 0,12мм, для режущих инструментов из быстрорезов с HRC > 60 — 0,01—0,03мм (иногда до 0,1 мм).

Таким образом, строение диффузионного слоя и его свойства зависят от марки стали, температуры процесса и состава среды (вида насыщения). Глубина диффузионного слоя зависит от времени выдержки, температуры и от состава стали (легированные, высоколегированные). Рассмотрим выбор режимов и технологий в зависимости от назначения изделий для отдельных видов процессов низкотемпературного насыщения.

**2. Технология и режимы газового азотирования.** Газовое азотирование является наиболее распространенным процессом низкотемпературного насыщения азотом или азотом и углеродом. Оно проводится в среде частично диссоциированного аммиака с добавками или без них при температурах 500 — 600°С и осуществляется в шахтных герметизированных печах типа США или камерных (колпаковых) печах типа США периодического действия (см. табл. П1.6), а также в конвейерных и толкательных печах непрерывного действия. Наибольшее распространение получили шахтные печи. В них весь цикл азотирования, включая нагрев, выдержку и ускоренное охлаждение садки до 150—250°С, проводят при непрерывной подаче аммиака. Камерные печи делают с передвижной камерой и используют для одновременного азотирования нескольких крупных деталей.

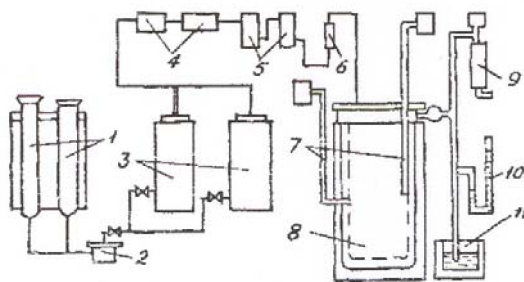


Рис. 20. Схема установки для азотирования:  
 1 – баллон с аммиаком; 2 – фильтры; 3 – испарители;  
 4 – отстойник для очистки газообразного аммиака;  
 5 – фильтр тонкой очистки и осушитель; 6 – ротаметр  
 для измерения расхода газа; 7 – термопары; 8 – печь для азотирования;  
 9 – диссоциометр; 10 – манометр; 11 – гидравлический затвор

Принцип работы установок для газового азотирования в аммиаке виден из схемы, приведенной на рис. 20. Изделия и контрольные образцы помещают в печь в сетчатых корзинах или на поддонах так, чтобы обеспечить свободное омывание азотируемых поверхностей газом. Печь закрывают, герметизируют, присоединяют шланги для подачи и отвода газа и производят продувку печи до полного вытеснения воздуха. Для снижения хрупкости слоя и экономии аммиака последний разбавляют азотом до 70—80% или предварительно диссоциированным аммиаком ( $N_2+H_2$ ). Для ускорения процесса в состав атмосферы печи можно вводить кислород (4л на 100л аммиака), воздух, углекислый газ и их смеси.

Состав отходящей из печи аммиачно-азотно-водородной смеси контролируется степенью диссоциации аммиака  $\alpha$ , которая является эквивалентом насыщающей активности атмосферы (азотного потенциала). Она повышается с ростом температуры процесса и скорости подачи (расхода) аммиака. Автоматический контроль и регулирование степени диссоциации аммиака осуществляется диссоциометрами различных конструкций.

Выбор температуры определяется требованиями к твердости и толщине слоя [11]. При высокой твердости (более 800 HV) и небольшой толщине (до 0,4мм) азотирование конструкционных сталей ведут при 500—520°C, что обеспечивает также высокий предел выносливости и самое минимальное коробление. При больших толщи-

нах слоя и меньшей допустимой твердости температуру повышают либо используют ступенчатый режим: сначала при 500—520°C при большой насыщающей способности среды, а затем при 540— 600°C при меньшей ее активности за счет снижения скорости подачи аммиака. Для сталей, легированных титаном (1% и более), образующим твердые и устойчивые против коагуляции нитриды, температуру повышают до 600— 650°C. Это ускоряет процесс при сохранении достаточно высокой твердости.

Длительность азотирования назначается в зависимости от требуемой толщины слоя и температуры [11] с учетом состава стали. Толщина слоя зависит от условий эксплуатации, твердости сердцевины. Рекомендуемые значения толщин указаны ранее в п. 1 этого раздела.

Конкретные режимы азотирования некоторых сталей и деталей из них приведены в табл. 9, 10, 11.

Состав защитных слоев при местном азотировании приводится в табл. 12. Перед азотированием детали и инструменты должны быть тщательно обезжирены электрохимическим методом, промывкой в бензине. Поверхности высокохромистых сталей для удаления с них пленки  $Cr_2O_3$  перед азотированием подвергают травлению в водном растворе соляной кислоты или в рабочее пространство печи вводят хлористый аммоний  $NH_4Cl$ .

Таблица 9. Рекомендуемые режимы газового азотирования в аммиаке деталей машин из конструкционных и нержавеющей сталей

Марка стали	Температура азотирования, °C	Выдержка, ч	Глубина слоя, мм	Твердость HV	Примеры деталей
38X2MЮЛ	500-520	48-60	0,4-0,5	1000-1100	Кулачковые валы
38X2MЮЛ	510-540	12+42	0,5-0,8	950-1000	Гильзы цилиндров дизелей
18X2H4ВЛ	490-510	40-50	0,35-0,4	750-850	Коленчатые валы
40XH2MЛ	510-540	25 35	0,5-0,6	600	
40X	510	18-24	0,25	510-610 610-700 630-720	Шпинделя для опор качения, ходовые винты, валы, зубчатые колеса станков

Марка стали	Температура азотирования, °С	Выдержка, ч	Глубина слоя, мм	Твердость HV	Примеры деталей
40ХФЛ 18ХГТ	510	50-60	0,5-0,6	640-700	
40ХН2МЛ 38Х2Н2МЛ 38ХН3МФЛ					
40Х2Н2МЛ 30ХН2МФЛ 28ХН3МФЛ	510+540	25+30	0,6-0,7	640 700 700	
30Х12	600	3-5	0,3	850-950	
45Х, 38ХС	570	8-10		600	

Низкотемпературная нитроцементация шестерен тракторных двигателей

Таблица 10. Рекомендуемые режимы азотирования в аммиаке инструментальных сталей

Марка сталей	Степень диссоциации аммиака, %	Режим азотирования		Толщина слоя, мм	Твердость HV	Инструмент
		Температура, °С	Время, ч			
P18, P9, P6M5	30-40	560-580	0,1-0,25 0,5-1	0,03-0,06 0,065-0,095	1250-1400 1350-1400	Режущий
X12M, X12Ф1	25-40	560-580	8-12	0,08-0,12	1100-1200	Накатн. ролики, фильеры и пр.
7Х3, 5ХНМ, 4ХМС, 5ХГСФ		480-500	40-50	0,3-0,5	650-700	Молотовые штампы
4Х5В2ФС 4Х3ВМФ 4Х5МФ1С 3Х3М3Ф	40-60	540-550	15-20	0,15-0,25	790-900	Инструменты гор. деформ., пресс-формы литья под давлением
		530-550	6-8 + 4-6	0,2-0,25	1100-1200	
3Х2В8Ф 4Х4ВМФС 5Х3В3МФС 4Х2В5МФ	50-80	560-580	8-11	0,2-0,3	750-850	Инструменты гор. деформ., пресс-формы литья под давлением
		580-600	1-2	0,1-0,15	1150-1310	

Примечания. 1. Данные для быстрорежущих сталей приведены для азотирования в аммиаке. При добавлении в него азотогазородной

смеси твердость снижается до 1100-1200HV, но работоспособность повышается в 24 раза. 2. Штамповые стали под азотирование проходят закалку с понижением температур.

Таблица 11. Кратковременное азотирование с добавками углеродосодержащих газов

Насыщающая среда	Температура, °С	Выдержка, ч	Примечание
Аммиак + 50% эндогаза (40% H <sub>2</sub> +20% CO + 40% N <sub>2</sub> )*	570	0,5-1	Перед азотированием детали обезжирить в парах трихлорэтилена или других растворителей**
Аммиак + 50% эндогаза (20% H <sub>2</sub> +20% CO + 60% N <sub>2</sub> ) с точкой росы 0° С	570	0,5-3	После окончания детали охлаждать в светлокалящем масле или в потоке защитного газа
Аммиак + 33% эндогаза (90% +10% CO)****	560-580	1-4	
Аммиак + 50% пропана (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )****	570	2-10	Степень диссоциации аммиака 30-60%
Продукты пиролиза керосина, спирта или синтина(50%)+NH <sub>3</sub> (50)	570	1-6	

\* Для деталей, работающих на усталость, выдержку увеличивают до 4 – 5 ч.

\*\* При применении эндогаза ниже 700°С возможен взрыв.

\*\*\* За рубежом процесс называется «питрон» взрывоопасен.

\*\*\*\* Процесс невзрывоопасен, недорогой. Толщина цитридного слоя 7 – 25 мкм.

Таблица 12. Способы местной защиты от азотирования

Способ защиты	Толщина наносимого слоя, мм
Гальваническое лужение	0,01-0,02
Гальваническое никелирование	0,05-0,06
Гальваническое цинкование	0,04-0,05
Гальваническое биметаллическое покрытие: свинец-цинк, медь-свинец, никель-свинец	1-й металл-0,005 1-й металл-0,015
<i>Обмазки:</i> Свинцово-оловянистая пыль(60:40) разбавляется на смеси: пять частей растит. масла, одна часть стеарина, две части свиного сала, две части смолы, одна часть хлористого цинка-жидкое стекло (2-кратное нанесение) с последующей сушкой 100-120°С	1-2

### 3. Технология и режимы азотирования в жидких средах.

Азотирование в жидких средах заключается в диффузионном насыщении стали азотом и частично углеродом в жидких расплавах различных солей, содержащих цианистую группу (CN). Оно, в отличие от газового азотирования, позволяет интенсифицировать процесс нагрева до заданной температуры, значительно сократить время насыщения и уменьшить деформацию изделий. После жидкого азотирования делают только доводку деталей до точных размеров.

В состав оборудования для осуществления процесса, кроме печей-ванн с электрическим или газовым обогревом и бортовыми вентиляционными отсосами вредных выделений, входят ванны для обезжиривания, предварительного подогрева до 350 – 450°C (чтобы исключить захлаживание расплава солей), охлаждения и промывки деталей от налипших солей в горячей (80°C) воде. Для приготовления ванн жидкого азотирования используют азотно-кислые соли  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{KNO}_2$ , соли, содержащие цианиды  $\text{NaCN}$ ,  $\text{KCN}$ ,  $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ ,  $\text{Ca}(\text{CN})_2$ , а также щелочные цианиты, например  $\text{KCNO}$ , получаемый при сплавлении карбамида  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  и поташа  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . В настоящее время наибольшее распространение получило жидкое азотирование в ваннах с рабочим составом (44 – 46%  $\text{NaCN}$ ) + (42 – 45%  $\text{KCNO}$ ) +  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (остальное), которое используется на различных деталях машин (коленчатые и кулачковые валы, шестерни, шпиндели станков, шнеки и пр.), штампах, пресс-формах литья под давлением из низкоуглеродистых, среднеуглеродистых легированных, штамповых и нержавеющей сталей при насыщении их на глубину 0,15 – 0,5 мм, а также инструментов из быстрорежущих сталей на глубину 0,05 – 0,12 мм. Жидкое азотирование в ряде случаев проводят в ваннах на основе карбамида  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  (56%) с добавками соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  или поташа  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . В исходном состоянии карбамид, в отличие от цианидов, не ядовит, но в процессе работы, и в этом случае в жидком расплаве, образуются ядовитые цианистые соли, но в меньшем количестве (1 – 8%), чем в цианид-цианатных ваннах. В процессе работы содержание цианидов истощается, поэтому для корректировки состава каждые два часа состав ванн корректируется добавкой  $\text{NaCN}$  (рис.21).

Рекомендуемые режимы и получаемые характеристики диффузионного слоя для некоторых сталей приведены в источнике [24].

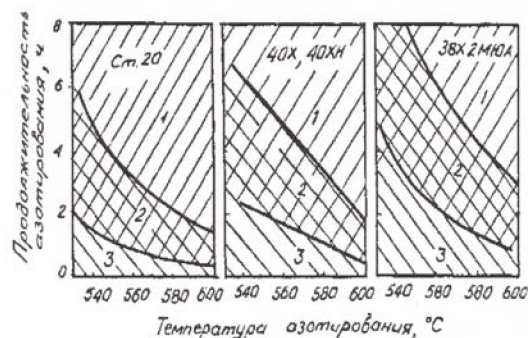


Рис. 21. Диаграмма преимущественных режимов жидкостного азотирования сталей: 1 – зона пористых слоев; 2 – зона, обеспечивающая высокое качество слоя; 3 – зона недостаточно развитого слоя

В России разработаны ванны на основе смеси цианата калия  $\text{KCNO}$  (75-85%) и карбоната калия  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (15-25%). Процесс насыщения в них называют карбонитрацией. Она, как и низкотемпературное цианирование, используется для обработки в основном режущих инструментов из быстрорежущих сталей при 550-560°C с выдержкой около 20 мин. Глубина диффузионного слоя такая же, как и при цианировании; структура - мартенсит и дисперсные карбонитриды легирующих элементов и карбиды, легированные азотом. В ваннах для карбонитрации концентрация наиболее опасной составляющей (группы CN) значительно ниже, чем в ваннах для низкотемпературного цианирования.

В целом жидкостное азотирование в 1,5-2 раза производительнее газового, дает несколько меньшую твердость, но по износостойкости не уступает ему. Однако токсичность применяемых солей, сложность обезвреживания цианистых отходов и контроля состава ванн ограничивают его применение.

В записке по данному разделу следует:

- обосновать необходимость и выбрать один из способов поверхностного упрочнения в связи с общей технологией упрочняющей обработки;

- кратко описать физико-химическую сущность процесса и особенности формирования структуры и свойств диффузионного слоя;

- описать технологию проведения и привести ее режимы (температуру, длительность, состав насыщающей среды, способ охлаждения, подготовительные и заключительные операции) и получаемые свойства;

- привести схематическую зарисовку микроструктуры диффузионного слоя.

## 9. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ, СВЯЗАННЫЕ С ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Кроме основных операций термической и химико-термической обработки при изготовлении деталей машин и инструментов в термических цехах выполняют дополнительные и вспомогательные операции, которые оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства изделий, их товарный вид, или без которых невозможно проведение основных операций термообработки. В зависимости от назначения они могут выполняться перед основными, между ними или как финишные в конце изготовления. В курсовой работе они должны быть отражены в карте технологического процесса и быть кратко описаны в записке с указанием их назначения.

Рассмотрим сначала некоторые наиболее часто выполняемые вспомогательные операции.

**1. Очистка изделий** от следов жира, масла, смазочно-охлаждающих жидкостей и загрязнений перед закалкой и ХТО, а также для удаления остатков солей и пригоревшего масла на закаленных деталях и инструментах производится путем промывки их в течение 3 – 5 мин в горячих ( $60 - 80^{\circ}\text{C}$ ) щелочных ваннах [8,16], представляющих водный раствор  $\text{NaOH}$  (8 – 10%) с добавками тринатрийфосфата  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  (1,5 – 2%) и жидкого стекла  $\text{Na}_2\text{Si}_3$  (0,2 – 0,5%). Для этого используются также 3% водные растворы каустической соды и 10% водные растворы кальцинированной соды. Допускается применение моющих средств типа синтол, препаратов вертолин с последующей обмывкой теплой водой и сушкой.

**2. Удаление окалины** после окончательной термообработки (отпуска) достигается травлением в подогретых растворах  $\text{HCl}$  (18–20%) в течение 18 – 20 мин с последующей нейтрализацией в ваннах с горячими ( $60 - 80^{\circ}\text{C}$ ) растворами 2% кальцинированной соды (химическая очистка). Травление высокопрочных сталей категорически запрещено из-за снижения свойств.

Для удаления окалины и окислов чаще всего используют гидropескоструйную обработку смесью воды и кварцевого песка или электрокорунда  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (400 г/л) в гидropескоструйных аппаратах (гидроочистка). Наиболее тщательная очистка поверхностей достигается дробеструйной (дробеметной) обработкой.

**3. Пассивирование** проводят после всех видов очистки в водных растворах нитрита натрия (1 - 1,5%) с добавками кальцинированной соды при температуре 70 - 80°C. Пассивированию подвергают обычно инструменты и некоторые детали машин для предохранения от коррозии в условиях цеховой атмосферы.

**4. Правка** покоробленных при закалке инструментов и деталей машин стержневой формы производится на ручных винтовых прессах в нагретом состоянии до температуры, не превышающей температуру отпуска, путем постепенного надавливания на выпуклую часть, после чего их оставляют под давлением до полного охлаждения. Для правки крупных деталей (например коленчатых валов) применяют мощные гидравлические прессы. Некоторые инструменты (развертки, сверла и т.п.) можно править сразу после закалки ударами рихтовального (медного) молотка по прогнутой части при расположении инструмента на подушке из мягкого металла.

Способ рихтовки применим и для правки деталей небольшой толщины, имеющих плоскую форму. При этом положенная на плиту деталь выстукивается быстрыми и легкими ударами бойка рихтовального молотка по той стороне, где имеются впадины. Лучше правятся изделия с вязкой сердцевиной из цементуемых и из углеродистых инструментальных сталей с несковозной прокаливаемостью, а также высоколегированные стали, содержащие после закалки повышенное количество остаточного аустенита.

Из дополнительных операций термообработки наиболее распространены следующие.

**1. Дополнительный отпуск** предназначен для уменьшения внутренних (остаточных) напряжений, возникающих при заточке и шлифовании инструмента в тонких (несколько десятых долей мм) поверхностных слоях. Наличие растягивающих шлифовочных напряжений существенно снижает усталостную прочность и коррозионную стойкость, особенно на изделиях с высокой твердостью из высокоуглеродистых сталей. Дополнительному отпуску обычно подвергают режущие и штамповые инструменты и некоторые низкоотпущенные детали машин (подшипники качения, шейки коленчатых валов и пр.). Температура дополнительного отпуска не должна превосходить температуру ранее проведенного основного отпуска и чаще всего составляет 140—160°C, время выдержки 0,5 — 2 часа.

**2. Азотирование или цианирование в жидких средах** проводят на режущих и штамповых инструментах и некоторых деталях

машин для дополнительного упрочнения поверхностного слоя на глубину несколько сотых долей мм с целью повышения предела выносливости, износостойкости, задиростойкости и других эксплуатационных качеств на окончательно готовых деталях. При этом снимаются шлифовочные напряжения и отпадает необходимость в дополнительном отпуске, но требуется промывка для очистки от солей.

**3. Оксидирование** заключается в контролируемом окислении поверхности инструментов и деталей машин при нагреве их до 480 – 570°С с целью повышения коррозионной стойкости и износостойкости, улучшения товарного вида продукции. Оксидирование снимает шлифовочные напряжения, вызывает дополнительное старение после азотирования и цианирования, что повышает твердость поверхности на 100 – 400 HV, уменьшает адгезию и коэффициент трения при работе инструмента. Способы и режимы проведения оксидирования кратко описаны в книге [9].

## 10. ДЕФЕКТЫ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Дефекты изделия — это отклонения от нормативного качества, предусмотренного государственными стандартами (ГОСТами), отраслевыми стандартами (ОСТАми) и техническими условиями (ТУ) на поставку продукции заказчику, что отражается в чертежах в виде технических требований на детали, узлы и изделия. Наличие дефектов в готовых деталях ведет к снижению степени годности при использовании их по назначению или к полной невозможности такого использования — браку. Брак может явиться следствием наличия в готовых деталях или полуфабрикатах дефектов чисто металлургического происхождения (раковины, волосовины и пр.), дефектов горячей и холодной обработки давлением и, наконец, следствием нарушения действующей технологии термической обработки или неверно назначенных режимов ее проведения. Некоторые дефекты могут быть исправлены повторной обработкой.

Неправильно проведенная термообработка может вызвать различные дефекты. Наиболее распространенными дефектами при закалке деталей машин и инструментов являются: пережог, перегрев, недостаточная твердость, пестрота твердости, обезуглероживание и окисление поверхности, коробление (поводка) деталей и трещины. При цементации и нитроцементации возможны следующие дефекты: сплошная или разорванная цементитная сетка по границам бывших аустенитных зерен, крупные ( $d > 1$  мкм) изолированные включения карбидов и нитридов в поверхностном слое, «темная составляющая» (продукты внутреннего окисления) в диффузионном слое нитроцементованных деталей, крупнозернистость, обезуглероживание поверхностного слоя или образование сплошной корки карбидов на поверхности. Характерными дефектами азотированных деталей являются: а) хрупкость и шелушение поверхностного слоя, ведущие к образованию мелкой сыпи и густой сетки мелких трещин при доводочных операциях; б) пористость зоны внутреннего азотирования, возникающая при повышенной температуре и времени выдержки при азотировании.

Сущность указанных дефектов приводится в учебной и справочной литературе [9, 10], а также описана выше при назначении режимов термообработки.

Высокое качество термообработанных деталей обеспечивается как обоснованным назначением технологических режимов, так и соответствующим техническим контролем технологических процессов термообработки и качества продукции. Объектами контроля качества продукции являются исходные материалы (входной контроль), детали на отдельных этапах их термообработки (промежуточный контроль) и готовые детали (окончательный или выходной контроль). Контроль осуществляется в соответствии с техническими требованиями чертежа, в которых перечислены объекты контроля, контролируемые характеристики и средства контроля, процент контроля от партии, допускаемый разброс в свойствах. Контроль может быть 100% (для продукции ответственного назначения) и выборочным.

### ***10.1. КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ***

**1. Контроль и регулирование температуры печного пространства печей** осуществляется обычно автоматическими электронными потенциометрами (ЭП) с записью температуры на дисковой диаграмме или ленте и регулирующим устройством, включающим или выключающим печь при отклонении температуры от заданной на некоторую малую величину.

Датчиками потенциометров служат термопары, изготовленные из двух зачехленных проволочек разнородных сплавов: хромель — алюмель (ХА) — для регистрации температур до 1100°C, хромель — копель (ХК) — до 600°C, платинородий — платина (ПП) — до 1600°C и др. «Горячий спай» проволочек термопары размещается в печи, а холодный — подключается к потенциометру, установленному на щите управления температурным режимом. Показания термопар соответствуют электродвижущей силе, возникающей в термопаре, и регистрируются потенциометром по шкале градуировок ХА, ХК, ПП. В печах периодического действия, как правило, устанавливается одна термопара. Распределение температуры всего печного пространства изучается предварительно, по результатам такого измерения регламентируется распределение садки на площади пода печи. В методических и конвейерных печах, имеющих различное заданное распределение температуры по зонам, контроль и регулирование температуры производится для каждой зоны с использованием многоточечных потенциометров.

Для контроля температуры нагрева внепечных процессов (например при поверхностной закалке) используются оптические и фотоэлектрические пирометры. Однако точность регистрации температуры ими недостаточно высокая, а средства регулирования температуры на основе этих приборов ненадежны. Регулирование таких процессов ведется обычно по другим параметрам, связанным с температурой.

**2. Контроль углеродного потенциала при газовой цементации** с использованием жидких карбюризаторов осуществляется по числу капель, подаваемых в рабочее пространство печи в минутах. Процесс можно контролировать по виду факела при горении отходящих газов, длина которого должна быть 150 — 300 мм, цвет пламени — оранжевый или желто-оранжевый без копоти.

При цементации в газовой среде (например эндогазе с добавками природного газа) контроль и регулирование насыщающей способности среды проводят по содержанию паров воды, характеризуемому точкой росы, либо по содержанию  $\text{CO}_2$  с помощью приборов, использующих инфракрасное излучение.

**3. Контроль расхода газа при азотировании** осуществляется ротаметром, давление — манометром, а его состав, определяющий азотный потенциал, — по степени диссоциации аммиака в отходящей из печи аммиачно-азотно-водородной смеси с помощью ручных или автоматических диссоциометров и другими методами [24]. Требуемая степень диссоциации аммиака сильно зависит от температуры процесса, измеряемой термопарой и регулируемой потенциометром, и устанавливается опытным путем с отражением в технологической инструкции.

**4. При нагреве под закалку и ступенчатой закалке в расплаве солей и селитр** контролируют температуру ванн и их обезуглероживающую активность. Основным средством предотвращения обезуглероживания является периодическое раскисление (ректификация) ванн различными веществами [9]. Периодичность раскисления зависит от температуры ванны, состава раскислителей и устанавливается опытным путем, что отражается в технической документации термического цеха (обычно через несколько часов непрерывной работы).

**5. Контроль закалочных масел** производится периодически (обычно один раз в три месяца). Контролируют содержание воды (не более 0,1%), механических примесей (не более 0,15%) и кинетиче-

скую вязкость при 50°C, которая для масел И12А, И20А, И30А (ГОСТ 20799 – 75) должна быть не более 33 сантистоксов. При превышении указанных норм производят регенерацию масел и очистку от механических примесей или добавляют свежее масло.

## **10.2. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТОВ**

В термических цехах предприятий применяют разнообразные методы и виды контроля продукции [25]. Наиболее распространены следующие:

**1. Контроль твердости** является самым распространенным и универсальным способом контроля. Ее определяют при входном, промежуточном и окончательном контроле полуфабрикатов и изделий.

**Определение твердости** стальным закаленным шариком по Бринеллю (ГОСТ 9012—59) производится на приборе типа ТШ (твердомер шариковый). Этим методом испытываются главным образом поковки, отливки, улучшенные и нормализованные крупные изделия и прокат из черных и цветных металлов с твердостью от 8 до 450 НВ. При толщине испытуемого образца  $h \geq 6$  мм из черных металлов диаметр шарика  $D$  берется 10 мм, нагрузка  $P = 3000$  кг, время выдержки под нагрузкой — 10 с. Число твердости устанавливается по диаметру отпечатка  $d$  с использованием таблицы и обозначается НВ. При иных условиях испытания, оговоренных в чертеже, при НВ проставляются соответствующие индексы.

**Определение твердости** алмазным конусом с углом при вершине 120° по Роквеллу на приборе типа ТК (твердомер конусный) (ГОСТ 23677—79) производится на термически упроченных стальных деталях толщиной не менее 1,5 мм. Число твердости, определяемое при общей нагрузке 150 кг, обозначается HRC, пределы измерений — от 20 до 67 HRC. Для тонких деталей устанавливается нагрузка 60 кг, число твердости обозначается HRA, пределы измерения от 70 до 85 HRA. Результат замера твердости HRC и HRA отсчитывается по черной шкале прибора.

Измерение твердости по Роквеллу является весьма простым, производительным, не оставляет больших повреждений на поверхности и нашло самое широкое распространение в термических цехах.

На приборе типа ТК можно контролировать твердость и термически неупрочненных стальных деталей, и деталей из цветных сплавов. В этом случае в качестве индентора используется стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм (1/16"), общая нагрузка 100 кг, минимальная толщина детали 2,0 мм, пределы измерения от 25 до 100 HRB.

**Определение твердости** вдавливанием алмазной пирамиды по Виккерсу (ГОСТ 9030—75) на приборе типа ТП производится по среднеарифметической длине зон измеренных диагоналей отпечатка и обозначается HV. Указанным методом определяют твердость тонких поверхностных слоев, образующихся при ХТО (азотирование, цианирование и т.п.) и гальванических покрытиях. Минимальная толщина слоя должна быть больше диагонали отпечатка в 1,2 раза. Пределы измерения HV от 15 до 1530 единиц, но обычно на приборе ТП контролируют высокую твердость  $HV > 700$  ( $HRC > 60$ ). По виду отпечатка осуществляется контроль хрупкости азотированного слоя. Для этого разработана специальная шкала хрупкости [25].

Числа твердости, полученные различными методами, сопоставляются по специальным переводным таблицам.

При определении твердости любым из указанных методов измеряемая поверхность не должна иметь окалины и трещин. Поэтому перед замером твердости она зачищается на наждаке на глубину 0,3 — 0,4 мм, при использовании защитных сред и соляных ванн при закалке — на глубину 0,1—0,2 мм, а при нагреве в аргоне и вакууме — до 0,1 мм. При замере твердости HRC круглых тонких деталей ( $d < 5$  мм) вносятся поправки на кривизну поверхности. При замере твердости HV криволинейных поверхностей готовится плоская площадка размером 20x20 мм. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков при измерении на приборе ТК должно быть не менее 2 — 2,5 мм, такое же расстояние должно быть от края детали. Места замера твердости ответственных и сложных по форме деталей указываются в чертеже. Число замеров твердости данного участка должно быть не менее трех, результаты замеров осредняются. Число проверяемых на твердость участков длинномерных деталей регламентируется чертежом.

**2. Контроль механических свойств** при испытаниях на растяжение ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) на ударный изгиб (КСУ, КСВ, КСТ) и другие виды деформации производится в основном для крупных тяжело нагруженных и ответственных термически обработанных деталей

(роторы турбин, коленчатые валы, штоки прессов, крупные отливки и т.п.). Для этого на них предусматриваются места отбора проб, которые отрезаются после термообработки изделия, разрезаются на отдельные образцы, после изготовления которых их подвергают испытанию в ОТК цеха или в ЦЗЛ завода.

Номенклатура проверяемых механических свойств и их значения указываются в чертеже детали. Для большинства деталей и инструментов механические свойства не определяют, а судят о них по твердости. В частности, предел прочности  $\sigma_b$  стальных деталей рассчитывают по твердости по Бринеллю  $\sigma_b \approx 0,36 \text{ HB МПа}$  или определяют по таблицам в зависимости от значений HB и HRC.

**3. Металлографические виды контроля**, используемые в термических цехах, весьма разнообразны. Их выбор зависит от конкретной детали или инструмента, марки стали, типа производства и других факторов. В частности, в инструментальном производстве существует обоснованная практика *входного контроля легированной инструментальной стали* в состоянии поставки. На макрошлифах такой стали определяют центральную пористость и ликвационный квадрат, которые допускаются лишь для инструментов, имеющих центральное отверстие (долбяки, червячные фрезы, крупные матрицы и т.п.), и не допускаются в инструментах типа протяжек, сверл, концевых фрез, игл для прессования труб и т.п. На микрошлифах заготовок инструментальной стали контролируют:

а) карбидную ликвацию — наличие карбидной сетки, ее остатков, крупных изолированных карбидов; скопление карбидов любой величины способствует выкрашиванию режущих кромок, появлению трещин и потому недопустимо;

б) размер зерна и дисперсность перлита — наличие крупнозернистого грубопластинчатого перлита ухудшает обрабатываемость резанием и способствует получению крупноигльчатого мартенсита после закалки, для устранения этого дефекта назначают дополнительный (исправительный) отжиг.

Степень карбидной ликвации, размер зерна и дисперсность перлита оценивают по шкале балльности, они регламентируются стандартами или технологическими инструкциями завода.

Детали, изготавливаемые из крупных поковок, подвергают выборочному макроконтролю на ликвацию серы, углерода и наличие флокенов по нормам, разработанным предприятием. На ответст-

венных термически обработанных деталях и инструментах производится выборочный контроль микроструктуры.

При удовлетворительной закалке заэвтектоидных и ледебуритных сталей она должна содержать безыгольчатый или мелкоигольчатый мартенсит и избыточные равномерно распределенные карбиды. Перегрев обнаруживается по появлению крупноигольчатости мартенсита. Наличие темных участков троостита свидетельствует о недогреве или недостаточной интенсивности охлаждения. Наличие светлых участков феррита в структуре закаленных конструкционных сталей свидетельствует о недогреве и является браковочным признаком. Исследование микроструктуры проводят на шлифах, вырезанных из деталей или образцов-свидетелей.

Обязательному выборочному (3—5%) контролю микроструктуры подвергают поверхностно закаленные, цементированные и азотированные детали и инструменты. На поверхностно закаленных деталях выявляют такие дефекты, как перегрев (по появлению крупноигольчатости мартенсита), недогрев (по наличию включений феррита), наличие трооститных пятен. По цвету травимости шлифа устанавливают глубину закаленного слоя. На цементированных и нитроцементированных деталях после закалки при микроанализе обнаруживаются такие дефекты, как сетка цементита, трооститные полосы или участки, немартенситные составляющие, связанные с внутренним окислением, повышенное содержание остаточного аустенита, появление структурно - свободного феррита на поверхности, крупнозернистость сердцевины. Глубина упрочненного слоя выявляется в виде зоны повышенной травимости. На азотированных деталях при микроисследовании четко выявляются различные по фазовому составу зоны диффузионного слоя, наличие таких дефектов, как пористость, наличие выкрошивание (сыпь) и шелушение поверхности с утолщенной зоной  $\epsilon$ -фазы. Контроль производится на шлифах, вырезанных непосредственно из детали или образца-свидетеля. На заводах с крупносерийным и массовым производством разработаны эталонные шкалы микроструктур для ходовых марок стали после соответствующей термообработки, с которыми сравниваются исследуемые детали и производится оценка их годности.

**4. Фрактографический контроль** производят на изломах путем их визуального осмотра или с помощью электронно-микроскопического исследования. Электронно-фрактографические

исследования производят в основном в научных лабораториях. Визуальным осмотром изломов выявляется перегрев и пережог при ковке и термической обработке, глубина упроченного слоя при поверхностной закалке и ХТО. По виду излома оценивается качество термообработки. При удовлетворительной закалке излом матово-серый, фарфоровидный, шелковистый. Присутствие характерных блесток свидетельствует о нафталинистом (мраморном) изломе высоколегированных инструментальных сталей, который охрупчивает сталь. Он наблюдается при закалке с повышенных температур, если при горячей обработке давлением температура ее окончания была излишне высокой (1050 — 1100°С), или при выполнении повторной закалки без промежуточного отжига.

**5. Неразрушающие виды контроля (ГОСТ 18353—79).** К ним относятся визуально-оптический контроль, магнитная, люминесцентная, рентгеновская и ультразвуковая дефектоскопия. Все они предназначены для выявления трещин и других несплошностей на поверхности и внутри металлических изделий и находят все более широкое применение в термических цехах.

**Визуально-оптический контроль** ведется невооруженным глазом или с помощью бинокулярной лупы с увеличением до 30 раз. Минимальный размер дефекта составляет 0,1—0,2 мм, а с оптикой — несколько сотых долей мм. Он производится на всех закаленных деталях и инструментах (100%) после очистки их от окалины. При соответствующей квалификации калильщика им отсеиваются большинство деталей, бракуемых по поверхностным трещинам.

**Магнитно-порошковые дефектоскопы** работают на принципе рассеивания магнитного поля в зоне поверхностных и подповерхностных (до 10 мм) мелких трещин в стальных деталях и инструментах. Частицы ферромагнитного порошка, нанесенного на поверхность, попадая в зону магнитного поля рассеяния, под действием магнитных сил притягиваются к границам дефекта и оседают на них, в результате чего ранее невидимый дефект становится хорошо заметным. Этим методом контролируются пружины, рессорные листы, режущие и мерительные инструменты и прочие детали после их закалки и очистки от окалины или в готовом виде. Открытые поверхностные дефекты (микротрещины) можно выявить люминесцентным методом. Он состоит в том, что нанесенный на поверхность детали флюоресцирующий раствор (смесь трансформаторного масла, керосина и специального зелено-золотистого порошка) вса-

сывается в микротрещины, после просушки под действием ультрафиолетовых лучей светится зеленоватым светом и позволяет тем самым их выявить. Люминесцентным методом можно контролировать детали не только из ферромагнитных материалов (стали, чугуны), но и немагнитных материалов (алюминиевые, титановые, магниевые и другие цветные сплавы). Наиболее прост магнитный метод, при необходимости им можно контролировать 100% стальных деталей и инструментов. Объем контроля устанавливается в зависимости от ответственности деталей, марки материала и склонности его к трещинообразованию и указывается в технологической карте. Там же оговариваются нормы допустимых дефектов.

*Рентгеноскопия* заключается в различном поглощении рентгеновских лучей в различных средах (качественным металлом и дефектами). Проходя через толщу исследуемого металла с дефектами, они ослабляются в разной степени в различных местах, что фиксируется на фотопленке в виде светлых и темных участков. *Ультразвуковая дефектоскопия* обнаруживает дефектные места при распространении упругих колебаний ультразвукового и частично звукового диапазона частот. Эти методы применяются для обнаружения внутренних дефектов в отливках (усадочные раковины, рыхлоты, газовые пузыри, пористость, трещины, шлаковые включения и пр.), в кованных и штампованных деталях (трещины, надрывы, расслоения и др.), в сварных соединениях (раковины, пористость, непровары, трещины и пр.) как в исходном состоянии, так и после термообработки. Им подвергают, как правило, крупные детали. Предельные толщины рентгеновского просвечивания составляют: на стали — не менее 100 мм, на алюминиевых сплавах — 300 — 400 мм, на меди — 60 мм. Ультразвуком обнаруживаются мелкие (менее 1 — 2 мм) глубоко залегающие (до метра) трещины и другие дефекты. Объем контроля зависит от степени ответственности детали и указывается в технологической карте. Там же указываются нормы допустимых дефектов (размер, количество, глубина залегания и пр.).

**6. Контроль химического состава стали** (по содержанию углерода и основных легирующих элементов) должен производиться при поступлении партии металла с металлургического завода на склад машиностроительного завода. При хорошо налаженном входном контроле и четкой организации межцеховых маршрутов полуфабрикатов химический состав стали больше не проверяют. В отдельных случаях, когда необходимо режим термообработки некото-

рых инструментов увязать с содержанием углерода или некоторых легирующих элементов, прибегают к дополнительному контролю химического состава. Его производят и тогда, когда возникают подозрения в перепутывании марок стали при межцеховых или внутрицеховых перевозках, а также при необходимости детального анализа распределения элементов по глубине диффузионных слоев после цементации, нитроцементации, азотирования и других видов ХТО.

Для контроля химического состава готовятся навески в виде стружки, которые отбираются из исследуемой стали (заготовки, полуфабрикаты, детали). Для определения химического состава используют метод химического количественного анализа или спектральный анализ.

**7. Контроль деформации при термообработке** производится на деталях сложной формы (коленчатые и распределительные валы, режущие, мерительные и штамповые инструменты), на деталях малой жесткости (длинные валы, протяжки, иглы, тонкие плоские детали и др.) и на высокоточных деталях (кольца подшипников качения), которые склонны к короблению (поводкам) при термической обработке. У деталей и инструментов стержневой формы (валы, протяжки, кольцевые фрезы и т.п.) контролируется кривизна по величине биения, определяемого индикатором при проворачивании детали, установленной в центрах. При этом наибольшая кривизна (наибольшее биение) детали на сторону не должна быть больше половины припуска на последующее шлифование, чтобы полностью вывести черноту при шлифовании. При обнаружении недопустимого биения производят правку (рихтовку), что является вынужденной операцией, которую по возможности следует избегать, применяя меры борьбы с короблением, описанные ранее.

Кривизна плоских деталей проверяется на плите при помощи щупа. Контроль геометрии сложных по форме закаленных изделий производится в специальных приспособлениях с использованием лекал, щупов, индикаторов и других мерительных инструментов. Операции контроля геометрии и правки покоробленных деталей выполняются совместно одна за другой. Их проводят обычно после закалки на очищенных деталях. Контроль деформации и правку инструментов из высоколегированных инструментальных сталей производят не только после закалки, но и после отпуска, так как распад остаточного аустенита в них при отпуске может вызвать новые (до-

полнительные) поводки. Повышенное коробление (если не принять мер по предотвращению его) может возникнуть и при проведении цементации, азотирования и поверхностной закалки. Поэтому контроль геометрии сложных по форме и высокоточных деталей производится и после этих операций.

Объем контроля устанавливается для каждой детали индивидуально и указывается в технологической документации. Более сложные по форме детали (коленчатые валы и т.п.) и многие режущие и штамповые инструменты (протяжки, сверла, развертки, метчики, концевые фрезы, иглы для прессования труб и т.п.) проходят обычно 100% контроль и контроль геометрии.

В заключение укажем, что контрольные операции должны быть внесены в технологическую карту с указанием типа приборов и средств контроля. В записке следует обосновать выбор необходимых методов и кратко указать их сущность.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марочник сталей и сплавов / под ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. - 640 с.
2. Журавлев, В.Н. Машиностроительные стали: справочник / В.Н. Журавлев, О.И. Николаева. - М.: Машиностроение, 1992. - 332 с.
3. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский [и др.]; под общ. ред. А.С. Зубченко. - 2-е изд., доп. и испр. - М.: Машиностроение, 2003. - 784 с.
4. Классификация и термообработка конструкционных сталей: метод. разработка / сост. А.А. Мельников. - Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1990. - 44 с.
5. Высокопрочные и специальные стали: метод. указания / сост. Е.М. Минаев. - Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1990. - 37 с.
6. Инструментальные стали и сплавы: метод. указания / сост. Н.П. Морозов. - Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1990. - 48 с.
7. Коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы: метод. разработка / сост. Ю.К. Фавстов. - Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1990. - 30 с.
8. Тылкин, М.А. Справочник термиста ремонтной службы / М.А. Тылкин. - М.: Металлургия, 1981. - 648 с.
9. Башнин, Ю.А. Технология термической обработки / Ю.А. Башнин, Б.К. Ушаков, А.Г. Секей. - М.: Металлургия, 1986. - 424 с.
10. Уваров, В.В. Термические режимыковки, штамповки и предварительной термической обработки заготовок: учеб. пособие / В.В. Уваров, В.С. Уварова, Е.А. Носова. - 2-е изд., перераб. и доп. - Самара: СГАУ, 2006. - 88 с.
11. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин. - М.: Металлургия, 1986. - 360 с.
12. Справочник кузнеца-штамповщика / В.И. Ершов, В.В. Уваров, А.С. Чумадин [и др.]. - М.: Изд-во МАИ, 1996. - 352 с.
13. Ковка и штамповка: справочник / под ред. Е.И. Семенова. - М.: Машиностроение, 1985. Т1. - 568 с.
14. Золотаревский, В.С. Металловедение литейных алюминиевых сплавов / В.С. Золотаревский, Н.А. Белов. - М.: Изд-во «МИСиС», 2005. - 376 с.

15. Заббаров, Р. Материалы и современные технологические процессы изготовления отливок и заготовок аэрокосмического назначения/ Р. Заббаров, С.П. Голанов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2000. - 148 с.
16. Фиргер, И.В. Термическая обработка сплавов: справочник / И.В. Фиргер. - Л.: Машиностроение, 1982. - 304 с.
17. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 648 с.
18. Гуляев, А.П. Металловедение/ А.П. Гуляев. - М.: Металлургия, 1986. - 544 с.
19. Колачев, Б.А. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов/ Б.А. Колачев, Ф.М. Габидулин, Ю.В. Пигузов. - М.: Металлургия, 1980. - 280 с.
20. Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. - М.: Машиностроение, 1980. - 783 с.
21. Седов, Ю.С. Справочник молодого термиста/ Ю.С. Седов, А.М. Адашкин. - М.: Высш. шк., 1986. - 238 с.
22. Гольдштейн, М.Н. Специальные стали/ М.Н. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. - М.: Металлургия, 1985. - 407 с.
23. Позняк, Л.А. Штамповые стали/ Л.А. Позняк. - М.: Металлургия, 1980. - 280 с.
24. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов/ Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. - М.: Металлургия, 1985. - 256 с.
25. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: справочник / под ред. В.Д. Кальнера. - М.: Машиностроение, 1984. - 384 с.
26. Дроздов, И.А. Штамповые стали: учеб. пособие / И.А. Дроздов, Н.В. Ляченков, В.В.Уваров. - Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. - 136 с.

Приложение 1

**Термическое оборудование**  
*Индексация печей для термической обработки*

Первая буква – вид нагрева

Нагрев	Обозначение	Нагрев	Обозначение
Газовый	Г	Индукционный	И
Сопротивления	С	Пламенный	П

Вторая буква – основной конструкционный признак

Конструкционный признак	Обозначение	Конструкционный признак	Обозначение
Карусельная	А	Конвейерная	К
Барабанная	Б	Камерная	Н
Ванна	В	Протяжная	П
Колпаковая	Г	Рольганговая	Р
Выдвижной под	Д	Толкательная	Т
Подвесной конвейер	Е	Шахтная	Ш
Пульсирующий под	И	Элеваторная	Э

Третья буква – рабочая среда

Среда	Обозначение	Среда	Обозначение
Азот	А	Окислительная атмосфера	О
Вакуум	В	Пар водяной, вода	П
Металлы	Г	Соль, селитра	С
Защитная атмосфера	З	Цементационный газ	Ц
Масло	М		

Четвертая буква – отдельные особенности

Особенности	Обозначение	Особенности	Обозначение
Агрегат	А	Механизированная	М
Лабораторная	Л	Непрерывного действия	Н
Вертикальная	В	Периодического действия	П

Таблица П1.1. Камерные электропечи сопротивления широкого назначения с металлическими нагревателями

Тип	Размеры рабочего пространства, мм			Наибольшая температура применения, °С
	длина	ширина	высота	
СНО - 2,0 · 4,0 · 1,4 / 7	400	200	140	700
СНО - 2,0 · 4,0 · 1,4 / 10	400	200	140	1000
СНЗ - 2,0 · 4,0 · 1,4 / 12	400	200	140	1250
СНО - 2,5 · 5,0 · 1,4 / 7	500	250	170	700
СНЗ - 2,0 · 5,0 · 1,4 / 10	500	250	170	1000
СНЗ - 2,0 · 5,0 · 1,4 / 12	500	250	170	1250
СНО - 3,0 · 6,5 · 2,0 / 7	650	300	200	700
СНЗ - 3,0 · 6,5 · 2,0 / 10	650	300	200	1000
СНЗ - 3,0 · 6,5 · 2,0 / 12	650	300	200	1250
СНО - 4,0 · 8,0 · 2,6 / 7	800	400	260	700
СНЗ - 4,0 · 8,0 · 2,6 / 10	800	400	260	1000
СНЗ - 4,0 · 8,0 · 2,6 / 12	800	400	260	1250
СНО - 5,0 · 10 · 3,2 / 7	1000	500	320	700
СНЗ - 5,0 · 10 · 3,2 / 10	1000	500	320	1000
СНЗ - 5,0 · 10 · 3,2 / 12	1000	500	320	1250
СНО - 6,5 · 13 · 4,0 / 7	1300	650	400	700
СНЗ - 6,5 · 13 · 4,0 / 10	1300	650	400	1000
СНЗ - 6,5 · 13 · 4,0 / 12	1300	650	400	1250
СНО - 8,5 · 17 · 5,0 / 7	1700	850	500	700
СНЗ - 8,5 · 17 · 5,0 / 10	1700	850	500	1000
СНЗ - 8,5 · 17 · 5,0 / 12	1700	850	500	1250
СНЗА - 3,0 · 6,5 · 2,0 / 10	650	300	200	1000
СНЗА - 4,0 · 8,0 · 2,6 / 10	800	400	260	1000
СНЗА - 5,0 · 10 · 3,2 / 10	1000	500	320	1000
СНЗА - 6,5 · 13 · 4,0 / 10	1300	650	400	1000

Таблица П1.2. Шахтные электропечи широкого назначения

Тип	Размеры рабочего пространства, мм		Наибольшая температура применения, °С
	диаметр	высота	
СШО - 2 · 4 / 3	200	400	350
СШО - 2 · 4 / 7	200	400	700
СШЗ - 2 · 4 / 10	200	400	1000
СШЗ - 2 · 4 / 12	200	400	1250
СШО - 4 · 8 / 3	400	800	350
СШО - 4 · 4 / 3	400	400	350
СШО - 4 · 8 / 7	400	800	700
СШО - 4 · 4 / 7	400	400	700
СШЗ - 4 · 8 / 10	400	800	1000
СШЗ - 4 · 4 / 10	400	400	1000
СШЗ - 4 · 8 / 12	400	800	1250
СШЗ - 4 · 4 / 12	400	400	1250
СШО - 6 · 12 / 3	600	1200	350
СШО - 6 · 6 / 3	600	600	350
СШО - 6 · 12 / 7	600	1200	700
СШО - 6 · 6 / 7	600	600	700
СШЗ - 6 · 12 / 10	600	1200	1000
СШЗ - 6 · 6 / 10	600	600	1000
СШЗ - 6 · 12 / 12	600	1200	1250
СШЗ - 6 · 6 / 12	600	600	1250
СШО - 10 · 20 / 3	1000	2000	350
СШО - 10 · 20 / 7	1000	2000	700
СШЗ - 10 · 20 / 10	1000	2000	1000
СШЗ - 10 · 20 / 12	1000	2000	1250
СШО - 10 · 10 / 3	1000	1000	350
СШО - 10 · 10 / 7	1000	1000	700
СШЗ - 10 · 10 / 10	1000	1000	1000
СШЗ - 10 · 10 / 12	1000	1000	1250
СШО - 15 · 30 / 3	1500	3000	350
СШО - 15 · 30 / 7	1500	3000	700
СШЗ - 15 · 30 / 10	1500	3000	1000
СШЗ - 15 · 30 / 12	1500	3000	1250

Таблица П1.3. Шахтные печи для газовой цементации

Тип	Размеры рабочего пространства, мм		Мощность, кВт
	диаметр	высота	
СПЩ - 3 · 4 / 10	300	450	20
СПЩ - 3 · 6 / 10	300	600	30
СПЩ - 4 · 6 / 10	450	600	45
СПЩ - 4 · 9 / 10	450	900	65
СПЩ - 6 · 12 / 10	600	1200	110
ОКБ - 827А	2400	1700	230
Ц - 60А	450	600	60
Ц - 105А	600	1200	105

Примечание. Наибольшая температура применения для печей серии СПЩ 1050°С, для остальных 950°С.

Таблица П1.4. Электроды сопротивления периодического действия для газового азотирования

Тип	Типоразмеры	Размеры рабочего пространства, мм			Мощность, кВт	Максимальная нагрузка, кг
		диаметр ширина	длина	высота		
Шахтные	СПА - 2 · 3 / 6	2	-	3	12	50
	СПА - 3,2 · 4,8 / 6	3,2	-	4,8	20	150
	СПА - 5 · 7,5 / 6	5,0	-	7,5	50	400
	СПА - 8 · 12 / 6	8	-	12	100	1200
	СПА - 12,5 · 20 / 6	12,5	-	20	180	2500
	СПА - 20 · 30 / 6	20	-	30	220	3000
	СПА - 25 · 37,5 / 6	25	-	37,5	300	3500
Контейнерные с передвижной камерой	СНА-7,5·2,4·10/6М	7,5	24	10	100	1800
	СНА-10·32·13/6М	10	32	13	200	2000
	СНА-13·45·16/6М	13	45	16	400	3500

Примечание. Максимальная температура применения 650° С.

Таблица П1.5. Соляные электродные ванны

Тип	Мощность, кВт·А	Число электродных групп	Температура применения, °С
СВС – 35 / 6,5	35	1	150-650
СВС – 60 / 8,5	60	1	550-850
СВС – 35 / 13	35	1	850-1300
СВС – 35 · 2 / 6,5	35	2	160-650
СВС – 35 · 2 / 8,5	35	2	550-850
СВС – 60 / 13	60	1	850-1300
СВС – 35 · 2 / 13	35	2	850-1300
СВС – 100 / 13	100	1	850-1300
СВС – 20 / 13	20	1	850-1300
СВС – 100 · 3 / 8,5	100	3	550-850
СВС – 100 · 2 / 13	100	2	850-1300
СВС – 100 · 3 / 13	100	3	850-1300
СВС – 100 · 8 / 13	100	8	850-1300

Таблица П1.6. Составы соляных ванн, применяемых в качестве нагревающих и охлаждающих сред при ступенчатой и изотермической закалке и отпуске

Состав ванн (по весу)	Температура плавления, °С	Диапазон рабочих температур, °С	Область применения
	Высокотемпературные		
100% BaCl <sub>2</sub>	900	1000-1300	Нагрев под закалку быстрорежущих сталей и нержавеек
	Среднетемпературные		
100% NaCl	800	850-1000	Нагрев под закалку углеродистых и низколегированных сталей
78% BaCl <sub>2</sub> + 22% NaCl	640	700-900	
70% BaCl <sub>2</sub> + 30% NaCl	640	700-900	
50%KCl + 50% NaCl	670	750-900	
20%KCl + 60% NaCl + 20% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	700	750-900	Охлаждение при высокоступенчатой закалке
50%KCl + 50% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	560	620-870	
48 - 50% BaCl <sub>2</sub> + 25-30% KCl + 22-25% NaCl		600-650	

Состав ванн (по весу)	Температура плавления, °С	Диапазон рабочих температур, °С	Область применения
	Низкотемпературные		
NaNO <sub>3</sub>	310	400-550	Охлаждение при ступенчатой и изотермической закалке и отпуск
50% NaNO <sub>3</sub> + 50% KNO <sub>3</sub>	220	300-400	
50% KNO <sub>3</sub> + 50% NaNO <sub>2</sub>	137	160-200	
50% NaNO <sub>3</sub> + 50% KNO <sub>2</sub>	150	160-300	
	328	400-500	
50%KNO <sub>3</sub> + 50% NaOH + 1-2% H <sub>2</sub> O	145	200-300	
70% KNO <sub>3</sub> + 30% NaOH	325	400-550	
35% NaOH + 65%KOH + 3-4% H <sub>2</sub> O	155	180-350	
25% NaOH + 75% KOH	170	200-350	
25% NaOH + 75% KOH + 4-6% H <sub>2</sub> O	140	160-250	

П р и м е ч а н и я. 1. При охлаждении в расплавах селитр изделий, нагретых под закалку в хлористых солях, поверхность окисляется, что требует дальнейшей очистки.

2. Расплавы щелочей химически нейтральны к охлаждаемому металлу (светлая закалка), но раздражающе действуют на кожу.

Таблица П1.7. Технические характеристики индукционных закалочных установок типа ИЗ

Параметры	ИЗ1-30/8	ИЗ2-100/2,4	ИЗ2-100/8	ИЗ1-200/2,4	ИЗ2-200/8
Число и тип преобразоват.	ВПЧ-30/8	ВПЧ-100/2,4	ВПЧ-100/8	2ВПЧ-100/2,4	2ВПЧ-100/8
Мощность, потребляемая от сети, кВт·А	50	140	140	280	280
Мощность средней частоты, кВт	30	100	100	200	200
Рабочая частота, кГц	8	2,4	8	2,4	8
Напряжение, В средней частоты на индукторе (наибольшее)	400 74	800 240	800 240	800 240	800 240
Наибольшая площадь закаливаемой поверхности, см <sup>2</sup>	25	200	200	400	400
Глубина закаленного слоя, мм	1,3-2,5	2,5-10	1,3-5	2,5-10	1,3-5
Диаметр нагреваемой детали (мин), мм	17	35	19	35	19
Расход воды на охлажд., м <sup>3</sup> /ч	2,58	7,2	7,2	10,2	10,2
Расход закал. жидкости, л/мин	83	200	200	200	200
Давление закал. жидкости, МПа	0,4-0,6	0,4-0,6	0,4-0,6	0,4-0,6	0,4-0,6
Масса устан., кг	2170	4500	4500	7000	7000

## Приложение 2

Таблица П2.1. Расчет продолжительности нагрева.  
Общая длительность выдержки при нагреве в минутах

Условная толщина S, мм	Закалка, отжиг, нормализация		Отпуск в электропечах			
	Воздух, газовая среда	Жидкая среда (соль)	Конструкц. стали		Корроз.-стойкие стали 300 °С	Все стали ниже 300 °С
			300-400 °С	400 °С		
До 5	10-15	5-6	35-40	25-30	90-105	120-135
5,1-10	15-20	7-8	35-40	25-30	90-105	120-135
10,1-15	20-25	9-10	40-50	30-40	90-105	120-135
15,1-20	25-30	11-12	40-50	30-40	105-120	135-150
20,1-25	30-35	13-14	50-60	40-50	105-120	135-150
25,1-30	35-40	15-16	50-60	40-50	105-120	135-150
30,1-35	40-50	17-19	60-70	50-60	120-135	150-165
35,1-40	40-50	17-19	60-70	50-60	120-135	150-165
40,1-45	50-60	20-22	70-80	60-70	120-135	150-165
45,1-50	50-60	20-22	70-80	60-70	135-150	165-180
50,1-55	60-70	23-25	80-90	70-80	135-150	165-180
55,1-60	60-70	23-25	80-90	70-80	135-150	165-180
Свыше 60	5-10	3-5	20-30	10-20	90	120
	мин+1 мин на 1 мм усл. толщины	мин+1/3мин на 1 мм усл. толщины	мин+1мин на 1 мм усл. толщины	мин+1мин на 1 мм усл. толщины	мин+1мин на 1 мм усл. толщины	мин+1мин на 1 мм усл. толщины

П р и м е ч а н и я. 1. Длительность выдержки назначать по минимальной условной толщине максимального сечения, определяемой как произведение фактической толщины S на коэффициент формы детали K. Коэффициент формы зависит от соотношения между нагреваемой поверхностью и объемом детали и назначается по табл. П2.2.

2. Определенная по табл. П2.1 длительность выдержки умножается на коэффициент формы садки, приведенной в табл. П2.3 и зависящей от взаимного расположения деталей.

3. Длительность отпуска в табл. П2.1 приведена для случая нагрева в электропечах. Длительность отпуска в селитровой или щелочной ванне при температуре ниже 300°С — 2ч, при 300 — 480°С — не менее 30 мин, при температуре выше 480°С — из расчета 3 мин + 0,4 мин на 1 мм условной толщины.

4. Длительность выдержки по данной методике рассчитывается только для указанных в таблице операций и видов сталей. Для других сталей и видов термообработки длительности назначаются совместно с температурами нагрева и приводятся в других источниках.

Таблица П2.2. Коэффициент формы деталей



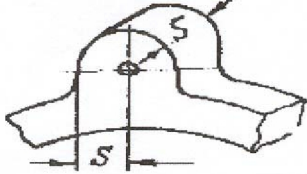
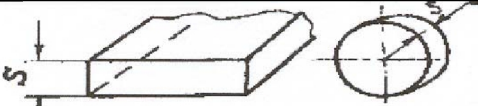
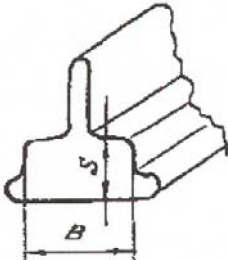
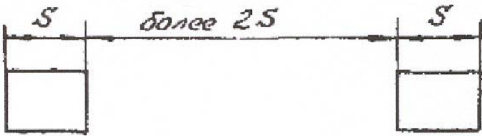
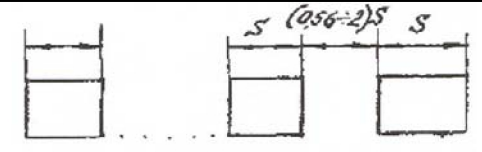
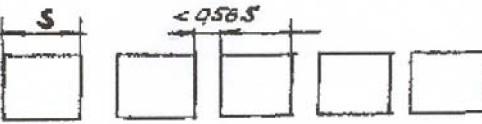
№ п/п	Тип детали	Эскиз	Коэффициент формы К
1	Детали типа шара, куба со сплошным сечением		0,75
2	Детали типа валов и прутков		1
3	Детали с утолщениями типа проушин		1,5
4	Листовые детали, диски тонкие		2
5	Детали типа длинных труб ( $L/D > 3$ ) или труб с закрыт. концами		4
6	Детали типа коротких труб ( $L/D < 3$ ) с открыт. концами		2
7	Пустотелые детали типа баллонов		4
8	Детали сложного профиля		при $B < 2S$ $K = 1,5$ при $B (3,5-4)$ $K = 1,75$ при $B > 4S$ $K = 2$

Таблица П2.3. Коэффициент формы садки

Характеристика садки	Взаимное расположение деталей	Коэффициент формы садки
Нагрев малого количества деталей		1,0
Укладка деталей с зазором		1,3-1,4
Плотная укладка деталей		2,0

Примечание. Детали сечением менее 5 мм и размерами 30 — 35 мм можно нагревать и закаливать партиями в металлических корзинах, сетках или на противнях. Высота слоя загрузки под закалку мелких деталей — не более 40 мм. Длительность выдержки для деталей, уложенных слоем, назначать по табл. П2.1, принимая за условное сечение S высоту слоя.

Таблица П2.4. Продолжительность нагрева и охлаждения молотовых штампов

Условия нагрева или охлаждения	Нормы времени
Посадка в печь, нагретую до температуры заковки	$\tau = 6,6 H^{1,2}$ , мин, где H — высота, см
Посадка в печь с температурой 500-560°C: нагрев до закалочной температуры, выдержка	1 ч на 25 мм наименьшей толщины, 20% от времени нагрева
Выдержка при закалке в закалочном масляном баке	13-17 мин на 100 мм наименьшей толщины
Нагрев и выдержка при отпуске гравюры	2 ч + 11 мин на 1 мм наименьшей толщины

Таблица П2.5. Продолжительность цементации в шахтных печах рабочим объемом более 0,3 м<sup>3</sup> при 930°С ( $\tau_{\text{общ}}$ , ч)

Общая глубина насыщения, мм	Карбюризатор		
	синтин	пиробензол	керосин
0,5-0,7	2,5-3	3-4	3-4
0,7-1,0	3-4	4-6	5-7
1,0-1,3	5-6	6-8	7-9
1,3-1,6	6-8	8-10	9-11
1,6-1,9	9-10	10-12	12-13

Примечания. 1. Отсчет времени цементации производится с момента достижения печью нижней границы принятого диапазона температур цементации.

2. При снижении температуры цементации с 930 до 910°С требуемое расчетное время увеличить на 15%, а при увеличении ее с 930 до 950°С уменьшить на 15%.

3. Указанная продолжительность уточняется для конкретных деталей и условий проведения цементации по данным исследования образцов-свидетелей.

4. Расход карбюризатора в активный период насыщения ( $2/3 \tau_{\text{общ}}$ ) составляет 130 - 160 кап/мин, а в период выравнивания ( $1/3 \tau_{\text{общ}}$ ) — 30-50 кап/мин.

## Улучшаемая сталь

К этой группе относят сталь со средним содержанием углерода, которую после закалки подвергают отпуску при повышенных температурах вплоть до температуры ниже  $A_{c1}$  с целью достижения высокой пластичности при сохранении соответствующей прочности. Хорошее сочетание механических свойств стали в результате улучшения обусловлено измельчением зерна и еще в большей степени равномерным распределением мелких карбидов одинаковой величины. Сталь с повышенным содержанием углерода подвергают, как правило, нормализации и отпуску при повышенных температурах.

Детали машин, к которым предъявляются высокие требования в отношении твердости поверхности, подвергают поверхностной закалке или азотированию.

Для поверхностной закалки наиболее пригодны стали марок 45, 30ХЗФ, 45Х, 45ХН, 30ХГСА, 35ХГСА. Азотированию можно с успехом подвергать хромомолибденовую сталь марки, хромоалюминиевую сталь 35ХЮ и хромоалюминиевомолибденовую сталь 38ХМЮА.

Детали, которые должны иметь высокую твердость поверхности, но к которым не применима ни поверхностная закалка, ни цементация, подвергают лишь отпуску при низких температурах с целью сохранения высокой твердости после закалки. В таких случаях применяют сталь, закаливаемую на воздухе, или в масле, которая наряду с повышенной твердостью имеет хорошее сочетание механических свойств. Сюда относятся прежде всего стали марок 38Х2НФ, 40ХН2М, 35ХН3А.

В зависимости от химического состава улучшаемая сталь подразделяется на углеродистую, марганцовистую, марганцово-кремнистую, хромистую, хромокремнистую, хромокремнемарганцовую, хромованадиевую, хромомолибденовую, хромоалюминиевую, хромоалюминиевую с молибденом, хромомарганцовую с ванадием и хромоникелевую.

Повышение содержания углерода приводит к снижению температуры закалки и повышению прочности после закалки. Легирующие элементы, смещая точки превращения, изменяют температуры отдельных операций термической обработки. Все легирующие элементы, входящие в сталь перечисленных марок, повышают прокаливаемость, что вызывает необходимость подбора охлаждающей

среды в каждом конкретном случае. Эти же легирующие элементы, за исключением алюминия, снижают точку  $M_n$  и влияют тем самым на окончательную твердость. Влияние легирующих элементов на возникновение отпускной хрупкости является решающим фактором, определяющим способ охлаждения после отпуска. Легирующие элементы оказывают значительное влияние на механические свойства стали, особенно на их изменение при отпуске.

Рекомендуемые температуры термической обработки приведены в табл. ПЗ.1.

Особую группу представляет улучшаемая сталь с гарантированными механическими свойствами при повышенных температурах. Эта сталь имеет сравнительно низкое содержание углерода. Высший уровень механических свойств при повышенных температурах достигается присадкой легирующих элементов, прежде всего молибдена, хрома и ванадия. Наиболее простым способом термической обработки стали этой группы является нормализация, которой подвергают сталь марок 10, 20, 15Х. Сталь марок 18УГ, 10ХФ, 15ХФ, 15ХМ, 15УГФ, 34Х1М, 34Х2М2Ф подвергаются нормализации и отпуску. Все марки стали этой группы характеризуются отсутствием склонности к отпускной хрупкости. Рекомендуемые режимы термической обработки этой группы сталей приведены в табл. ПЗ.2.

Таблица ПЗ.1. Термическая обработка улучшаемой стали

Марка ста- ли	Ковка		Нормализация		Отжиг (охлаждение с печью)		Закалка		Отпуск	
	темпера- турный ин- тервал, °С	макси- мальная твердость	темпера- тура, °С	макси- мальная твердость	темпера- тура, °С	макси- мальная твердость	температура, °С	охлажда- ющая среда	темпера- тура, °С	охлажда- ющая среда
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
25	1150-750	188	860-890	183	680-720	-	830-860	Вода, масло	600-640	Воздух
30	1150-800	197	850-880	191	680-720	-	840-870	Вода	530-670	«
35	1150-800	208	840-870	202	680-720	-	850-880	Масло	530-670	«
40	1150-800	-	820-850	-	680-720	-	840-870	Вода	530-670	«
45	1150-800	231	820-850	225	680-720	188	850-880	Масло	530-670	«
50	1150-800	241	820-850	241	680-720	197	790-830	Вода <sup>*1</sup>	530-670	-
55	1100-800	253	810-840	253	680-720	202	800-840	Масло	530-670	Воздух
60	1100-800	265	810-840	265	680-720	212	790-830	Вода <sup>*1</sup>	530-670	«
30Г2	1100-850	-	830-870	-	680-720	-	800-840	Масло	530-670	«
35Г2	1150-850	-	850-890	-	680-720	217	820-850	Вода	530-670	«
40Г2	1050-850	-	840-870	-	640-670	-	830-850	Масло <sup>*2</sup>	530-680	Вода, воздух
45Х	1100-800	-	840-880	-	650-700	197	820-850	Вода <sup>*3</sup>	530-680	Вода, воздух
30ХГР	1100-800	-	850-870	-	700-720	229	840-880	Масло	580-620	Вода, масло
30ХГСА	1100-850	-	830-870	-	700-740	211	850-870	Масло	570-680	Воздух
35ХГСА	1050- 820	-	830-870	-	700-740	220	840-880	Вода	-	Вода, масло
20ХМ	1050-800	-	850-930	-	680-720	197	830-850	Масло	530-650	Вода, масло
35ХМ	1050-850	-	870-900	-	680-720	200	840-860	Масло	520-640	Вода, масло
30ХМА	1100-800	-	860-870	-	700-740	197	800-860	Вода, масло	500	Вода, масло
							800-860	Вода		
							880	Масло	560	Вода,масло
							830-850	Масло	560	Вода,масло

Окончание табл. ПЗ.1

Марка ста- ли	Ковка		Нормализация		Отжиг (охлаждение с печью)		Закалка		Отпуск	
	темпера- турный ин- тервал, °С	макси- мальная твердость	темпера- тура, °С	макси- мальная твердость	темпера- тура, °С	макси- мальная твердость	темпера- тура, °С	охлаждающая среда	темпера- тура, °С	охлажда- ющая среда
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
35ХГФ	1100-800	-	860-880	-	700-750	197	830-850 840-870	Вода Масло	530-670	Вода
38ХМЮА	1150-800	-	880-920	-	700-740	225	940	Масло	650	Вода
40ХН	1150-800	-	850-880	-	700-750	206	810-850 800-870	Вода Масло	530-640	Вода
45ХН	1150-800	-	850-890	-	680-720	219	800-820 810-850	Вода Масло	500-640	Вода
40ХН2МА	1150-850	-	850-880	-	700-750	225	810-850	Масло,воздух	240-400	Масло,воздух
30ХН3А	1150-800	-	850-880	-		239	810-850	Масло	550-600	Вода
30ХГСН1А	1100-850	-	900	-	730	253	890-910	Масло	200-300	Воздух
20Х2Н4А	-	-	950	-	630	269	850-900	Воздух	160	Воздух

Таблица ПЗ.2. Термическая обработка улучшаемой стали с гарантированными механическими свойствами

Марка стали	Температурный интервал деформации, °С	Нормализация		Неполный отжиг (охлаждение с печью)		Закалка		Отпуск (охлаждение на воздухе)	
		температура, °С	максимальная твердость НВ	температура, °С	твердость НВ	температура, °С	охлаждающая среда	температура, °С	твердость НВ
10	-	900-930	135	-	-	-	-	-	-
20	-	900-930	163	-	-	-	-	-	-
15X	1200-800	900-920	-	-	-	-	-	600-680	141
10X	1200-800	960-990	-	-	-	-	-	650-720	118
15221	1200-800	890-930	-	680-730	-	890-930	Масло, вода	690-730	-
15223	1180-800	880-960	-	-	-	-	-	580-700	155
15225	1180-800	960-1000	-	-	-	-	-	650-730	135-197
15233	1050-850	950-980	-	820-840	211	960-1020	Масло, вода	700-750	207
15236	1100-800	950-980	-	700-760	200	940-1000	Масло, вода	620-700	208
15313	1150-850	920-960	-	-	-	-	-	680-780	127-169
15320	1180-800	900-960	268	-	-	880-900	Вода, масло	620-720	210
15331	1050-850	950-980	-	800-840	170	960-1000	Масло, вода	690-740	239
15335	1180-850	1020-1050	-	800-830	-	1020-1050	Масло	720-750	261
15412	1100-800	880-900	-	750-780	-	830-890	Масло	730-780	127
15420	1150-830	1050-1100	-	680-730	-	980-1040	Масло	660-720	223
15421	1200-830	880-920	-	680-720	-	880-920	Масло	650-710	170-225
15423	1100-850	1050-1100	-	680-730	-	1000-1050	Масло	630-730	220-270
15520	1100-850	900-970	-	700-750	-	-	-	680-750	196
16221	1200-800	870-900	-	-	-	860-900	Масло	600-680	176-239
16322	1150-830	840-870	-	-	-	-	-	620-680	176-239
16342	1150-830	860-880	-	700-730	-	840-870	Масло	580-650	-
16343	1180-800	-	-	660-680	-	850-880	Масло, вода-масло	560-650	223-285
16444	1150-820	840-880	-	700-730	-	840-870	Масло	570-650	253-335
16540	1150-830	850-880	-	-	-	820-860	Масло, вода-масло	550-650	253-317

П р и м е ч а н и е. Крупные детали из стали марки 13123 при нормализации и отпуске охлаждают в воде или масле.

### Цементуемая сталь

К этой группе относят сталь с пониженным содержанием углерода, обладающую достаточной пластичностью после закалки (без отпуска). Высокая твердость поверхности детали достигается науглероживанием поверхностного слоя перед закалкой. Последующий отпуск (150–200°С) сохраняет высокую твердость на поверхности.

В зависимости от химического состава цементуемую сталь подразделяют на углеродистую (сталь 10, 15, 20), хромистую (16Х, 15ХА, 20Х), хромомарганцовистую (18ХГ, 18ХГТ, 20ХГ), хромоникелевую (20ХН, 12ХН2, 12ХН3А, 12ХН4, 20ХН2М, 18Х2Н4МА), хромомарганцовоникелевую (15ХГН2, 20ХГН2, 20ХГНТР, 15Х2ГН2ТА). У углеродистой цементуемой стали прочность сердцевины определяется прежде всего содержанием углерода и диаметром закаливаемой детали. Данные стали обладают низкой прокаливаемостью, поэтому детали из этих сталей закаливают в воде (только детали малой толщины можно закаливать в масле). Двойная закалка (сердцевины и поверхности) обеспечивает измельчение зерна и улучшение механических свойств сердцевины.

Прокаливаемость хромомарганцовистой стали выше, поэтому ее можно закаливать в масле.

Никелевая сталь обладает меньшей склонностью к перенасыщению поверхности углеродом и к росту зерна при повышенных температурах по сравнению с хромистой сталью. Поэтому можно отказаться в ряде случаев от первой закалки (при двойной закалке). Сталь имеет более низкую температуру закалки, поэтому дает меньшее коробление.

Хромоникелевая сталь более склонна к перенасыщению поверхностного слоя углеродом (особенно при повышенном содержании хрома). Однако никель задерживает перенасыщение. Значительное повышение прочности сердцевины (при закалке) обусловлено снижением критической скорости охлаждения и температуры мартенситного превращения за счет введения в сталь цементирующих элементов. Поэтому высокая прочность сердцевины достигается и при низком содержании углерода (<0,2%).

Цементуемая хромомарганцовистая и хромоникелевая стали используются также для изготовления улучшенных изделий.

В табл. ПЗ.3 приведены рекомендуемые режимы горячей ОМД и термической обработки цементуемых сталей.

Весьма полезными при определении требуемого режима термической обработки и выборе подходящей стали являются поло-

сы прокаливаемости и зависимости влияния температур отпуска на основные механические свойства (рис. ПЗ.1).

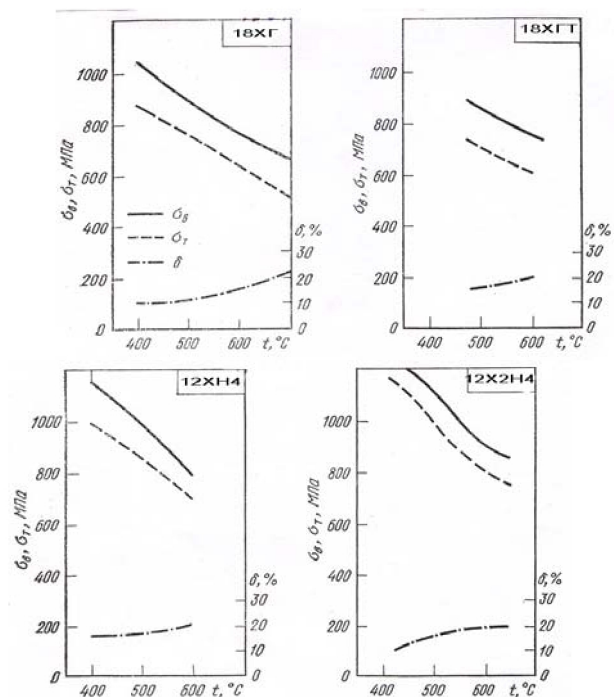


Рис. ПЗ.1. Влияние температуры отпуска на механические свойства цементуемой стали (марка стали на рисунке)

Таблица ПЗ.3. Режимы горячей пластической деформации и термической обработки цементуемой стали без улучшения (А)

Марка стали	Ковка		Нормализация		Высокий отпуск и охлаждение с печью		Цементация		Первая закалка		Промежуточный отпуск		Вторая закалка		Отпуск	
	температурный интервал деформации, °С	максимальная твердость НВ	температура, °С	максимальная твердость НВ	температура, °С	максимальная твердость НВ	температура, °С	среда	температура, °С	охлаждающая среда	температура, °С	способ охлаждения	температура, °С	охлаждающая среда	температура, °С	твердость HRC
10	1150-750	158	890-920	152	680-720	127	850-880	Т.к. <sup>1</sup>	890-920	Вода, масло	650-680	С печью	770-800	Вода, масло	150-175	62
15Г	1150-750	169	870-900	163	680-720	-	920-930	Газ	890-920	Вода, масло	650-680	С печью	770-800	Вода, масло	150-175	62
15	1150-800	163	870-900	158	680-720	-	850-880	Т.к.	890-920	Вода, масло	650-680	С печью	770-800	Вода, масло	150-175	62
20	1150-800	177	870-900	172	650-720	-	920-930	Газ	890-920	Вода, масло	650-680	С печью	770-800	Вода, масло	150-175	62
15Х	1150-800	-	870-900	-	630-680	169	850-880	Т.к.	870-900	Вода, масло	650-680	С печью	770-800	Вода, масло	150-175	63
18ХГ	1150-800	-	850-880	-	680-720	197	920-930	Газ	840-870	Вода, масло	650-680	С печью	810-830	Масло, вода	150-175	63
18ХГТ	1100-850	-	850-880	-	680-720	197	860-890	Т.к.	-	-	-	-	820-850	Масло	170-200	60
25ХГ	1100-850	-	860-890	-	680-720	211	920-950	Газ	-	-	-	-	850-880	Масло	170-220	60
15ХГН	11500-800	-	~880	-	~720	~170	870-930	С.в. <sup>2</sup>	860	Масло	-	-	810	Масло	150-200	62
15ХГН2	11500-800	-	880-900	-	~720	~170	~870	Т.к.	860	Масло	-	-	810	Масло	150-200	62
20ХГН2	11500-800	-	~880	-	~720	~185	920-930	Газ	860	Масло	-	-	810	Масло	150-200	62
12ХН4	11500-800	-	830-870	-	610-630	211	~870	Т.к.	830-870	Масло, воздух	620-640	С печью	770-810	Масло, вода	150-200	60

## С улучшением (Б)

Марка стали	Закалка		Отпуск	
	температура, °С	охлаждающая среда	температура, °С	охлаждающая среда
15	840-870	Вода	-	-
	850-880	Масло	530-570	Воздух
20	840-870	Вода <sup>*3</sup>	530-570	Воздух
	850-880	Масло <sup>*4</sup>	-	-
18ХГ	800-840	Масло, вода	450-500	-
18ХГТ	810-850	Масло	500-600	-
12ХН4	810-850	Масло, вода	500-650	
12Х2Н4				

\*1 - твердый карбюризатор, \*2 - соляная ванна, \*3 - для деталей большой толщины, \*4 - для деталей малой толщины.

### Типовые режимы термической обработки сталей для подшипников качения

Сталь для изготовления деталей подшипников качения должна обладать максимальной износостойкостью и контактной усталостной прочностью. Получение стали с указанными свойствами является сложным не только с точки зрения технологии производства, но и с точки зрения деформации и термической обработки.

Для изготовления шариков и роликов диаметром до 25 мм и колец с приблизительно такой же толщиной стенки используют сталь с повышенным содержанием хрома (сталь ШХ15). Для корпусов большого диаметра используют сталь с повышенным содержанием марганца и кремния, обладающую большей прокаливаемостью (сталь марки ШХ15СГ).

Подшипники, эксплуатируемые в химически агрессивных средах, изготавливают из стали марки 95Х18.

В табл. ПЗ.4 приведены режимы термической обработки стали ШХ15 и ШХ15СГ.

Таблица ПЗ.4. Термическая обработка стали  
для подшипников качения

Марка стали	Температурный интервал, °С	Отжиг (охлаждение с печью)		Закалка			Отпуск
		температура, °С	твёрдость НВ	температура, °С	охлаждающая среда	твёрдость HRC	
ШХ15	1050-850	720-760	≤225	790-820 820-840	Вода Масло	≥62	150-170
ШХ15СГ	1050-850	720-780	≤225	780-810 810-830	Вода Масло	≥61	150-170

Температура нагрева под закалку и охлаждающая среда в практике отечественного машиностроения выбираются не только в зависимости от химического состава подшипниковой стали, но и от вида и размера детали.

Получение требуемых механических свойств обеспечивается не только применением соответствующего режима закалки, но и подготовкой структуры в процессе деформации (охлаждение после деформации) и проведением неполного отжига. Для повышения твердости и обеспечения стабильности размеров эту сталь целесообразно после закалки подвергать обработке холодом. Сталь подвергают только низкотемпературному отпуску.

В табл. ПЗ.5 приведены значения твердости HRC и величины  $\delta_b$  в зависимости от температуры отпуска.

Таблица ПЗ.5. Твердость и предел прочности сталей ШХ15  
и ШХ15СГ в зависимости от температуры отпуска

Сталь	Продолжительность отпуска, ч	HRC при температуре отпуска, с				$\sigma_b$ , МПа при температуре отпуска в °С			
		150	175	200	250	150	175	200	250
		Не более							
ШХ15	2	63,0	62,0	60,2	58,0	2750	2700	2620	2530
	4	62,5	61,0	59,1	57,0	2700	2680	2600	2500
	6	62,2	60,8	59,0	56,8	2700	2650	2580	2480
ШХ15СГ	2	63,5	62,5	62,0	60,0	2800	2710	2630	2550
	4	63,0	61,6	60,5	58,8	2770	2685	2610	2525
	6	62,7	61,2	60,1	58,6	2730	2660	2590	2500

Сталь 95Х18 обладает хорошей коррозионной стойкостью в морской воде, весьма устойчива во влажном паре. Достаточно устойчива при эксплуатации в азотной и уксусной кислотах (при концен-

трации 10-15%), а также в щелочах и органических веществах (например сырая нефть).

Рекомендуемый режим термообработки:

1) отжиг - медленный нагрев до 850-870°C в течение 10-12 часов; выдержка при 870°C в течение 2-5 с; охлаждение с печью до 500°C со скоростью 50-70°C/ч. Механические свойства после отжига:  $\sigma_b \approx 760$  МПа;  $\xi = 14\%$ ;  $\phi = 27\%$ ; HB=230-240;

2) закалка - подогрев до 800-850°C, затем нагрев до 1000-1050°C с продолжительностью 6-12 мин; охлаждение в масле;

3) отпуск - при температуре 140-150°C; выдержка в течение 2-3 часов; твердость не ниже HRC 56.

### **Типовые режимы термической обработки пружинно-рессорных сталей**

Пружины и рессоры работают в условиях высоких статических и чаще всего знакопеременных динамических нагрузок. При правильном функционировании детали она должна после снятия нагрузки принять свою первоначальную форму, поэтому пружинная сталь должна иметь высокий предел упругости. Условия работы определяют следующие требования к пружинной стали: высокий предел усталости, который достигается при высоком пределе прочности и высоком пределе текучести.

Для изготовления слабо нагружаемых пружин можно использовать углеродистую сталь с повышенным содержанием углерода, не подвергнутую термической обработке, т. е. в состоянии поставки (стали марки 65, 70).

Прочность пружинной проволоки малого диаметра можно повысить путем холодного волочения.

Для изготовления слабо нагружаемых пружин используют сталь со средним содержанием углерода (сталь марки 50, 55), а для более нагружаемых — сталь с повышенным содержанием углерода (стали марки У7, У8, У9, У10). Крупные сильно нагружаемые пружины из углеродистой стали подвергают закалке и отпуску.

Для производства пружин применяют следующие легированные стали: марганцовистую, кремнистую, хромомарганцовую, хромокремнистую. Пружины из этих марок стали обычно подвергают закалке и отпуску. Большинство марок пружинной стали содержит кремний, который повышает прочность и прежде всего предел текучести, однако кремнистая сталь склонна к обезуглероживанию. Марган-

цовистая сталь имеет более высокую прокаливаемость. Марганцово-кремнистая сталь обладает преимуществами той и другой стали. Достоинством хромокремнистой стали является ее теплостойкость, что позволяет использовать пружины из этой стали при температурах до 300°C. Пружины, эксплуатируемые в условиях высоких температур, изготавливают из стали типа 80ХГ, а также из быстрорежущей стали.

Рекомендуемые режимы термической обработки пружинно-рессорных сталей приведены в табл. ПЗ.6.

Взаимосвязь температуры отпуска и механических свойств пружинно-рессорных сталей приведена на рис. ПЗ.2.

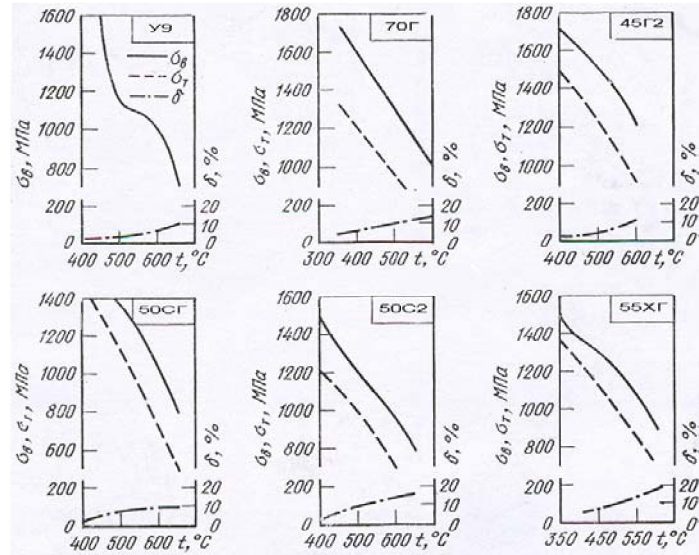


Рис. ПЗ.2. Влияние температуры отпуска на механические свойства пружинной стали (марка стали на рисунке)

Таблица ПЗ.6. Термическая обработка пружинной стали

Марка стали	Ковка		Нормализация		Отжиг (охлаждение с печью)		Закалка		Отпуск		
	температурный интервал, °С	твёрдость НВ	температура, °С	твёрдость НВ	температура, °С	твёрдость НВ	температура, °С	охлаждающая среда	температура, °С	охлаждающая среда	твёрдость НВ
70	1050-800	~240	-	-	680-720	~225	800-830	Масло	470-500	Воздух	~331
У9, У10	1120-820	-	790-820	-	680-720	≤225	780-810	Масло	400-650	Воздух	-
70Г	1050-800	≤352	820-840	-	700-740	≤239	800-840	Масло	400-550	Воздух	-
45Г2	1100-800	~230	840-860	-	700-740	-	780-820	Масло	450-550	Воздух	~370
50СГ	1100-850	-	820-850	~260	680-720	≤211	820-860	Вода	450-600	Вода, масло	-
55СГА	1050-800	-	840-860	~253	740-760	-	840	Масло	450	Воздух	≥385
60С2	1050-800	-	850-880	~290	700-740	≤239	830-860	Масло	450-550	Воздух	-
55ХГ	1100-800	-	820-840	~260	700-740	-	800-820	Масло	400-450	Воздух	-
55С2	1100-800	-	840-860	-	700-740	≤253	800-830	Масло	400-580	Воздух	-
80ХГ	1050-800	-	840-860	~330	650-700	~200	800-820	Масло	530-560	Воздух	-

Учебное издание

**Уваров Вячеслав Васильевич**

*Уваров Вячеслав Васильевич  
Уварова Вера Сергеевна  
Носова Екатерина Александровна*

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
И ИНСТРУМЕНТОВ**

*Учебное пособие*

Редактор Т.К. К р е т и н и н а  
Компьютерная верстка А.В. Я р о с л а в ц е в а

Подписано в печать 05.09.08. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 7,5.

Тираж 200 экз. Заказ . Арт. С-22/2008

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34

---

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

