

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
Учреждение высшего образования
Липецкий государственный технический университет

Е.В. Иванников

Конструкционные стали и сплавы
для заданных изделий

Учебное пособие

Рекомендовано Учебно-методическим советом ЛГТУ

в качестве учебного пособия

для студентов ЛГТУ, обучающихся по направлениям подготовки

22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» и

22.03.02 «Металлургия»

Липецк
Липецкий государственный технический университет
2017

УДК 669.01(07):621.783(07)

И 199

Рецензенты:

кафедра «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный университет»;

доктор технических наук, профессор А.Е. Чеглов.

И 199 **Иванников, Е.В.** Конструкционные стали и сплавы для заданных изделий: учеб. пос. [Текст] / **Е.В. Иванников** Липецк: Издательство Липецкого государственного технического университета, 2017. - 83 с.

ISBN 978-588247-811-6

В учебном пособии изложены принципы классификации и маркировки конструкционных сплавов, приводятся химический состав и области наиболее широкого применения основных конструкционных сталей и сплавов, дано описание их механических и физико-химических свойств в термически обработанном состоянии. Изложены методические обоснования рационального выбора материалов и режимов термической обработки заданных изделий. Приведены задачи по рациональному выбору для заданных изделий составов сплавов и даны типичные примеры их решения. Учебное пособие предназначено для обучающихся по направлениям 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» и 22.03.02 «Металлургия» для студентов Липецкого государственного технического университета, изучающих дисциплины «Материаловедение» и «Теория и технология термической обработки металлов».

Табл. 21. Библиогр.: 17 назв.

ISBN 978-588247-811-6

©ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», 2017

Содержание

Введение	4
1. Основы классификации конструкционных сталей и сплавов	5
1.1. Принципы классификации сплавов.....	5
1.2. Классификация сталей по химическому составу и основным классам качества (ГОСТ Р 54384-2011).....	7
1.2.1. Классификация сталей по химическому составу.....	7
1.2.2. Классификация стали по основным классам качества.....	9
2. Нелегированные стали	13
2.1. Углеродистые стали обыкновенного качества.....	13
2.2. Нелегированные качественные и специальные стали.....	15
2.3. Специальные стали высокой обрабатываемости резанием.....	19
2.4. Стали листовые котельные.....	20
3. Нержавеющие стали	21
3.1. Коррозионностойкие стали.....	21
3.2. Жаростойкие стали.....	24
3.3. Жаропрочные стали.....	25
4. Инструментальные стали	26
4.1. Нелегированные инструментальные стали.....	26
4.2. Легированные инструментальные стали.....	26
4.3. Инструментальные быстрорежущие стали.....	28
5. Легированные конструкционные стали	33
5.1. Цементуемые легированные стали.....	34
5.2. Улучшаемые легированные стали.....	35
5.3. Высокопрочные легированные стали.....	36
5.4. Износостойкие стали.....	39
6. Специальные стали с особыми физическими свойствами	41
6.1. Магнитно-мягкие стали и сплавы.....	42
6.2. Магнитно-твердые стали и сплавы.....	43
6.3. Сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения.....	44
6.4. Сплавы с заданными упругими свойствами.....	45
6.5. Сплавы с высоким электрическим сопротивлением.....	48
7. Чугуны	49
7.1. Классификация и маркировка чугунов.....	49
7.2. Термическая обработка чугунов.....	52
8. Выбор материалов и режимов термической обработки для заданных изделий	54
8.1. Методические указания к выполнению курсовой работы.....	54
8.2. Задачи по конструкционным сталям и чугунам.....	56
8.3. Задачи по специальным сталям и сплавам.....	67
8.4. Задачи по инструментальным сталям.....	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	81

Введение

Учебное пособие составлено в соответствии с образовательными программами по направлениям 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» и 22.03.02 «Металлургия» для студентов Липецкого государственного технического университета, изучающих дисциплины «Материаловедение» и «Теория и технология термической обработки металлов». Пособие имеет целью способствовать формированию у выпускников профессиональных компетенций - умения использовать методы моделирования при прогнозировании и оптимизации технологических процессов и свойств материалов, способности следовать метрологическим нормам и правилам, выполнять требования национальных и международных стандартов в области профессиональной деятельности, способности осуществлять выбор материалов для изделий различного назначения с учетом эксплуатационных требований и охраны окружающей среды. Достижение этой цели должно основываться в том числе на знании классификации конструкционных материалов, наиболее распространенными из которых по прежнему остаются сплавы на основе железа. В пособии приведены характеристики основных конструкционных сталей и сплавов, которые классифицированы по химическому составу и классам качества в соответствии с введенным впервые в Российской Федерации с 01.03.2012 г. национальным стандартом ГОСТ Р 54384-2011 (EN 10020:2000) «Сталь. Определение и классификация по химическому составу и классам качества».

Обоснованный выбор материалов и термической обработки для получения регламентированных структуры и свойств заданных изделий, элементов конструкций и оборудования должен базироваться на знании термодинамики и общих закономерностей фазовых превращений в твердом состоянии, умении анализировать фазовые превращения и формирование структуры при нагревании и охлаждении металлов и сплавов и основных технологических процессов видов и разновидностей термической обработки их влиянии на качество получаемых изделий. В пособии содержатся сведения, необходимые для выполне-

ния курсовой работы по дисциплине «Теория и технология термической обработки» по выбору материалов для заданных изделий.

1. Основы классификации конструкционных сталей и сплавов

1.1. Принципы классификации сплавов

Для науки наиболее важное значение имеет естественная классификация, то есть классификация, основанная на разделении объектов и соответствующих им понятий на классы, группы, подгруппы, виды, подвиды на основе общности и существенности тех признаков, которые им присущи.

Огромное количество конструкционных материалов, и прежде всего металлических, уже используемых в технике, продолжает увеличиваться, так как меняются требования к уровню их эксплуатационных характеристик и существует постоянная необходимость в разработке новых металлических сплавов с регламентированной структурой и свойствами для удовлетворения запросов промышленности при совершенствовании действующих машин и создании новых образцов техники. Невозможно охарактеризовать все многообразие сплавов по какому-то единственному признаку, общему для всех сплавов, так как они существенно разнятся и по свойствам, и по назначению. Применяемая классификация металлических сплавов по химическому составу позволяет разделить их на группы, например, по содержанию основного компонента: сплавы на основе железа, никелевые, медные, алюминиевые сплавы и др. Однако внутри таких групп сплавов из-за различного содержания других компонентов возникают подгруппы, существенно отличающиеся по структуре и, следовательно, по свойствам: в сплавах на основе железа - стали и чугуны, бронзы и латуни в сплавах на основе меди и т.д. Сложно или даже невозможно сгруппировать все сплавы таких классов, основываясь на близости свойств. Например, для большинства конструкционных сталей самые важные свойства - прочность, сопротивление хрупкому разрушению, способность закаливаться на большую глубину, тогда как для электротехнических сталей в первую очередь требуются высокие магнитные свойства.

Конструкционные стали и сплавы разделяют на классы по следующим важным признакам:

- по химическому составу;
- по структуре (по равновесной и по структуре, получающейся после охлаждения на воздухе);
- по назначению (применению).

Далее внутри классов приходится выделять подклассы, группируя сплавы внутри класса по другому самому важному и общему свойству или другому важному признаку, включая перечисленные выше признаки или другой общий признак, например, способ производства. Надо отметить, что разделение огромного количества конструкционных сталей и сплавов на классы и подклассы, как правило, проведено по признаку назначения сплава или по химическому составу, или по свойствам. При этом надо отметить, что существующая разветвленная классификация конструкционных сталей и сплавов базируется на принципе, по которому каждый класс объединяет сплавы по их общим специфическим признакам - свойствам, назначению (применению).

Маркировка сталей по химическому составу производится следующим образом: содержание углерода указывается в начале марки цифрой, отвечающей его среднему содержанию: в сотых долях процента для сталей, содержащих до 0,7% С, и в десятых долях процента для сталей, содержащих более 0,7% С (это главным образом инструментальные стали). Соответственно этому сталь, содержащая 0,07-0,14% С, обозначается как сталь 10, сталь с 0,42-0,50% С - как сталь 45 и т.д., а сталь с 0,95-1,05% С - как сталь У10 и т.д. В конце марки кипящей стали приписываются буквы «кп», а полуспокойной - буквы «пс». Леггирующие элементы обозначаются буквами: Н (никель), К (кобальт), Г (марганец), Х (хром), В (вольфрам), М (молибден), Ю (алюминий), С (кремний), Ф (ванадий), Р (бор). Буквы пишутся после цифры, указывающей содержание углерода. Если после буквы нет цифры, то содержание легирующего элемента в стали 1-1,5%. Исключение сделано для молибдена и ванадия, содержание которых в большинстве сталей 0,2-0,3%. Если легирующего элемента больше 1,5%,

то цифра после буквы указывает его содержание в процентах. Например, марка 15Х обозначает сталь, имеющую в среднем 0,15% С и 1,0-1,5% Cr, сталь 35Г2 - 0,35% С и 2% Mn. Изделия из легированных сталей как правило подвергаются термической обработке.

1.2. Классификация сталей по химическому составу и основным классам качества (ГОСТ Р 54384-2011)

1.2.1. Классификация сталей по химическому составу

Среди конструкционных материалов примерно 90% составляют сплавы на основе железа - стали и чугуны, и из них стали самый распространенный конструкционный материал. Для классификации по химическому составу и классам качества в Российской Федерации может применяться введенный с 01.03.2012 г. национальный стандарт ГОСТ Р 54384-2011 (EN 10020:2000) «Сталь. Определение и классификация по химическому составу и классам качества». Данный стандарт введен впервые и устанавливает определение термина «сталь»:

«2.1. Сталь: Материал (*сплав железа с углеродом*), в котором массовая доля железа больше, чем массовая доля какого-либо другого элемента, а массовая доля углерода составляет менее 2%, и в состав которого входят также и другие химические элементы.

У небольшого количества хромистых сталей массовая доля углерода может превышать 2%. Обычно массовая доля углерода, равная 2%, является границей раздела между сталью и литейным чугуном».

ГОСТ Р 54384-2011 подразделяет стали по химическому составу - на ***нелегированные, нержавеющие и другие легированные стали***; по основным свойствам или области применения нелегированных, нержавеющих и других легированных сталей - на ***классы качества***.

К ***нелегированным сталям*** относятся такие стали, у которых определяемая массовая доля любого химического элемента менее указанной в таблице 1.

Таблица 1

**Предельные значения массовой доли для разграничения
между нелегированными и легированными сталями
по анализу ковшевой пробы**

Химический элемент		Предельное значение массовой доли, %
Обозначение	Наименование	
Al	Алюминий	0,30
B	Бор	0,0008
Bi	Висмут	0,10
Co	Кобальт	0,30
Cr	Хром	0,30
Cu	Медь	0,40
La	Лантаноиды (каждый)	0,10
Mn	Марганец	1,65
Mo	Молибден	0,08
Nb	Ниобий	0,06
Ni	Никель	0,30
Pb	Свинец	0,40
Se	Селен	0,10
Si	Кремний	0,50
Te	Теллур	0,10
Ti	Титан	0,05
V	Ванадий	0,10
W	Вольфрам	0,30
Zr	Цирконий	0,05
	Другие элементы, кроме углерода, фосфора, серы, азота (каждый)	0,10

Когда для марганца установлен только верхний предел, этот показатель должен быть 1,80%, и правило 70% не действует (3.1.2).

Нержавеющие стали - это стали с минимальной массовой долей хрома 10,5% и максимальной массовой долей углерода 1,2%. У ограниченного количества легированных нержавеющей сталей допускается минимальная массовая доля хрома 7,5%.

Другие легированные стали - это стали, которые по определению не являются нержавеющей, но отличаются тем, что у них массовая доля, как минимум, одного химического элемента из указанных в таблице 1, соответствует установленным предельным значениям.

1.2.2. Классификация стали по основным классам качества

Нелегированные стали подразделяются на качественные и специальные.

Нелегированные качественные стали - это стали, которые должны соответствовать общим установленным для них требованиям, например по вязкости, величине зерна и или обработке давлением.. Нелегированные качественные стали - это стали, которые по определению не относятся к нелегированным специальным сталям (п. 4.1.2.2 ГОСТ Р 54384-2011). Нелегированная электро-техническая сталь классифицируется как нелегированная качественная сталь с заданными верхним пределом магнитных потерь или нижним показателем магнитной индукции, поляризации или проницаемости.

Нелегированные специальные стали, в отличие от нелегированных качественных сталей, имеют нормированную чистоту по загрязненности неметаллическими включениями. В большинстве случаев это улучшаемые стали, удовлетворяющие также одному или нескольким из следующих требований: нормированное значение ударной вязкости после улучшения, гарантированная прокаливаемость или нормированная глубина поверхностного закаленного слоя для продукции в закаленном или улучшенном состоянии или после поверхностного упрочнения. Свойства этих сталей после улучшения, соответствующие повышенным требованиям, обеспечиваются за счет точного соблюдения заданного химического состава и особенно технологии производства и контроля. К таким свойствам, заданным, как правило, в комбинации и с суженными пределами, относятся высокие или жестко ограниченные пределы показателей текучести или прокаливаемости, во многих случаях необходимые для холодной обработки давлением, улучшения свариваемости или вязкости. Нелегированные специальные стали, в отличие от нелегированных качественных сталей, имеют нормированную чистоту по загрязненности неметаллическими включениями. В большинстве случаев они предназначены для улучшающей

термической обработки (закалки с отпуском) или поверхностной закалки и характеризуются тем, что воспринимают эту обработку равномерно. Свойства этих сталей после улучшения, соответствующие повышенным требованиям, обеспечиваются за счет точного соблюдения заданного химического состава и особенно технологии производства и контроля. К таким свойствам, заданным, как правило, в комбинации и с суженными пределами, относятся высокие или жестко ограниченные пределы показателей текучести или прокаливаемости, во многих случаях необходимые для холодной обработки давлением, улучшения свариваемости или вязкости.

Нелегированные специальные стали - это стали, соответствующие одному или нескольким из нижеперечисленных требований:

- нормированный минимум работы удара (ударной вязкости) для продукции в улучшенном состоянии по результатам испытаний на ударный изгиб;

- гарантированная прокаливаемость или нормированная глубина поверхностного закаленного слоя для продукции в закаленном или улучшенном состоянии или после поверхностного упрочнения;

- нормированное содержание неметаллических включений;

- нормированный верхний предел массовой доли фосфора и серы: 1) по анализу ковшевой пробы (маркировочному анализу) $\leq 0,020\%$ каждого; 2) по контрольному анализу продукции $\leq 0,025\%$ каждого (например, катанка для высокопрочных пружин, электродов; проволока для корда автомобильных покрышек);

- нормированное значение работы удара KV (ударной вязкости KCV) при температуре испытания минус 50°C более 27 Дж (34 Дж/см^2) по результатам испытаний на ударный изгиб по Шарпи на образцах с V-образным надрезом, ориентированных в продольном направлении, или более 16 Дж (20 Дж/см^2), если ориентация образцов поперечная;

- ограничение массовой доли следующих химических элементов в сталях, предназначенных для конструкций ядерных реакторов: медь $\leq 0,10\%$, ко-

балът $\leq 0,05\%$, ванадий $\leq 0,05\%$; - гарантированная удельная электропроводность $> 9 \text{ Ом}\cdot\text{м}/\text{мм}^2$;

- дисперсионно-твердеющая сталь с нормированным нижним пределом массовой доли углерода по анализу ковшевой пробы (маркировочному анализу) $0,25\%$ и более, с микроструктурой, состоящей из феррита/перлита, при массовой доле одного или нескольких легирующих элементов, таких как ниобий или ванадий, ниже предела, установленного для легированных сталей. Дисперсионное твердение этих сталей, как правило, обеспечивается за счет регулируемого охлаждения, начиная с температуры горячей деформации;

- арматурные стали для армирования железобетонных конструкций.

Легированные нержавеющие стали подразделяются по следующим категориям: по массовой доле никеля - менее $2,5\%$ и $2,5\%$ и более; по основным свойствам: коррозионно-стойкие; жаростойкие; жаропрочные.

Другие легированные стали также подразделяются на качественные и специальные.

Легированные качественные стали. Легированными качественными сталями являются стали, к продукции из которых предъявляют комплексные требования по механическим свойствам и структуре, сопротивлению хрупкому и вязкому разрушению, технологическим свойствам (свариваемость, прокаливаемость, обработка давлением). Легированная качественная сталь предназначена для термической или термомеханической обработки, а также химико-термической обработки. Легированные качественные стали обычно не предназначены для улучшения (закалки и отпуска) или поверхностной закалки. К легированным качественным сталям по ГОСТ Р 54384-2011 относят:

- Свариваемые легированные мелкозернистые конструкционные стали для сосудов, работающих под давлением, и для изготовления труб, которые, должны соответствовать следующим условиям:

- нормирован предел текучести $< 380 \text{ Н}/\text{мм}^2$ при толщине продукции $< 16 \text{ мм}$;

- массовые доли легирующих элементов (согласно определениям, приведенным в 3.1) - ниже указанных в таблице 2 предельных значений;

- нормировано значение работы удара KV (ударной вязкости KCV) при температуре испытания минус $50^{\circ}\text{C} \leq 27 \text{ Дж}$ (34 Дж/см^2) по результатам испытаний на ударный изгиб по Шарпи на образцах с V-образным надрезом, ориентированных в продольном направлении, или $\leq 16 \text{ Дж}$ (20 Дж/см^2), если ориентация образцов поперечная.

Таблица 2

**Свариваемые легированные мелкозернистые стали.
Предельные значения массовой доли для подразделения стали
на качественную и специальную**

Химический элемент	Предельное значение массовой доли, %
Хром	0,50
Медь	0,50
Марганец	1,80
Молибден	0,10
Ниобий	0,08
Никель	0,50
Титан	0,12
Ванадий	0,12
Цирконий	0,12

- Легированные стали для изготовления рельсов, шпунтовых стоек и рудничных креплений.
- Легированные стали для изготовления горячекатаной и холоднокатаной листовой продукции, предназначенной под холодную объемную штамповку (кроме сталей для изготовления труб и сосудов, работающих под давлением), выплавленные с присадками для измельчения зерна таких элементов, как бор, ниобий, титан, ванадий и/или цирконий или двухфазные стали. Двухфазные стали имеют в основном ферритную микроструктуру с 10%-35% мартенсита в виде равномерно распределенных небольших единичных пластинок.
- Легированные стали, в которых медь является единственным легирующим элементом.
- Легированные электротехнические стали - это стали, которые содержат, в основном, кремний или кремний и алюминий в качестве легирующих элементов, поставляемые с заданным максимальным пределом магнитных по-

терь или минимальным пределом показателей магнитной индукции, поляризации или проницаемости.

Легированные специальные стали. Этот класс качества включает стали, которые благодаря точному соблюдению требований по химическому составу, а также особой технологии производства и условий контрольных испытаний обладают улучшенными свойствами, часто специфицированными (то есть в сборочных изделиях) в комбинации и с показателями в узкоограниченных пределах.

Все другие легированные стали, которые не классифицированы как легированные качественные стали (по определениям, перечисленным выше и приведенным в разделе 4.3.1 ГОСТ Р 54384-2011 для легированных качественных сталей), относятся к *легированным специальным сталям*: конструкционные легированные стали для машиностроения и стали для сосудов, работающих под давлением, подшипниковые стали, инструментальные стали, быстрорежущие стали и стали с особыми физическими свойствами, такие как ферритные никелевые стали с регулируемым коэффициентом расширения или стали, отличающиеся особыми показателями электрического сопротивления.

2. Нелегированные стали

2.1. Углеродистые стали обыкновенного качества

Стали обыкновенного качества (или рядовые); выплавляются в кислородных конвертерах или в мартеновских печах, содержат до 0,6% С. Углеродистые стали обыкновенного качества устанавливаются по межгосударственному стандарту [ГОСТ 380-2005](#) «Сталь углеродистая обыкновенного качества». Настоящий стандарт распространяется на углеродистую сталь обыкновенного качества, предназначенную для изготовления горячекатаного проката: сортового, фасонного, толстолистового, тонколистового, широкополосного и холоднокатаного тонколистового, а также слитков, блюмов, слябов, сутунки, заготовки катаной и непрерывнолитой, труб, поковок и штамповок, лент, проволоки, ме-

тизов и др. Химический состав стали (основные элементы) по анализу ковшевой пробы должен соответствовать нормам, указанным в таблице 3. Углеродистую сталь обыкновенного качества изготавливают следующих марок: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гпс, Ст6пс, Ст6сп. Буквы «Ст» обозначают «Сталь», цифры - условный номер марки в зависимости от химического состава, буква «Г» - марганец при его массовой доле в стали 0,80% и более, буквы «кп», «пс», «сп» - степень раскисления стали: «кп» - кипящая, «пс» - полуспокойная, «сп» - спокойная.

Таблица 3

**Химический состав сталей по анализу ковшевой пробы
(основные элементы, содержание в процентах)**

Марка стали	C	Mn	Si
Ст0	не более 0,23	-	-
Ст1кп	0,06-0,12	0,25-0,50	не более 0,05
Ст1пс	0,06-0,12	0,25-0,50	0,05-0,15
Ст1сп	0,06-0,12	0,25-0,50	0,15-0,30
Ст2кп	0,09-0,15	0,25-0,50	не более 0,05
Ст2пс	0,09-0,15	0,25-0,50	0,05-0,15
Ст2сп	0,09-0,15	0,25-0,50	0,15-0,30
Ст3кп	0,14-0,22	0,30-0,60	не более 0,05
Ст3пс	0,14-0,22	0,40-0,65	0,05-0,15
Ст3сп	0,14-0,22	0,40-0,65	0,15-0,30
Ст3Гпс	0,14-0,22	0,80-1,10	не более 0,15
Ст3Гсп	0,14-0,20	0,80-1,10	0,15-0,30
Ст4кп	0,18-0,27	0,40-0,70	не более 0,05
Ст4пс	0,18-0,27	0,40-0,70	0,05-0,15
Ст4сп	0,18-0,27	0,40-0,70	0,15-0,30
Ст5пс	0,28-0,37	0,50-0,80	0,05-0,15
Ст5сп	0,28-0,37	0,50-0,80	0,15-0,30
Ст5Гпс	0,22-0,30	0,80-1,20	не более 0,15
Ст6пс	0,38-0,49	0,50-0,80	0,05-0,15
Ст6сп	0,38-0,49	0,50-0,80	0,15-0,30

Таблица 4

**Механические свойства некоторых углеродистых сталей
обыкновенного качества**

Марка	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение, δ %	Назначение
Ст0	310	20	Малонагруженные детали: шайбы, прокладки
Ст1	310...400	32	Малонагруженные детали: болты, шпильки, гайки
Ст2	330...420	20	
Ст3	370...470	24	Среднеагруженные детали: рычаги,

Ст4	410...520	22	оси, кронштейны
Ст5	500...640	17	Средненагруженные детали: оси, валы
Ст6	600	12	

Следует заметить, что действовавший до 1988 г. ГОСТ 380-71 в зависимости от назначения и гарантируемых свойств подразделял углеродистые стали обыкновенного качества на три группы: А - поставляемую по механическим свойствам; Б - поставляемую с гарантированным химическим составом - для деталей, которые проходят в процессе изготовления термообработку и горячую обработку давлением (штамповку, ковку); В - поставляемую с гарантированными химическим составом и механическими свойствами - в основном для сварных конструкций. В последующих ГОСТах, которые разрабатывались взамен предыдущих и в актуальном в настоящее время ГОСТ 380-2005 такого деления нет, но в литературе оно до сих пор встречается.

2.2. Нелегированные качественные и специальные стали

С 1.01.2015 г. взамен ГОСТ 1050-88 «Сталь качественная и высококачественная сортовой и фасонный прокат, калиброванная сталь» и частично взамен ГОСТ 4543-71 «Прокат из легированной конструкционной стали» введен ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия». Стандарт распространяется на металлопродукцию горячекатаную, кованую, калиброванную и со специальной отделкой поверхности, предназначенную для использования в различных отраслях промышленности. Состав нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей показан в таблице 5 и таблице 6. В части требований к химическому составу (табл. 5 и 6) стандарт распространяется на слитки, блюмы, слябы, катаные, кованые и непрерывнолитые заготовки, поковки, штамповки, листовой и другие виды проката. На металлопродукцию из стали марок 05кп, 08кп, 08пс, 10кп, 10пс, 11кп, 15кп, 15пс, 18кп, 20кп и 20пс распространяется только в части требований к химическому

составу. Буква Г в марках сталей указывает на повышенное содержание марганца.

Таблица 5

**Марки и химический состав нелегированных сталей.
Содержание Ni и Cu не более 0,30% каждого (по ковшевой пробе)**

Нелегированные	Марка стали	Массовая доля элементов, %					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
					Не более		
Качественные	05кп	Не более 0,06	Не более 0,03	Не более 0,40	0,030	0,035	0,10
	08кп	0,05-0,12	Не более 0,03	0,25-0,50	0,030	0,035	0,10
	08пс	0,05-0,11	0,05-0,17	0,35-0,65	0,030	0,035	0,10
	08	0,05-0,12	0,17-0,37	0,35-0,65	0,030	0,035	0,10
	10кп	0,07-0,14	Не более 0,07	0,25-0,50	0,030	0,035	0,15
	10пс	0,07-0,14	0,05-0,17	0,35-0,65	0,030	0,035	0,15
	10	0,07-0,14	0,17-0,37	0,35-0,65	0,030	0,035	0,15
	11кп	0,05-0,12	Не более 0,06	0,30-0,50	0,030	0,035	0,15
	15кп	0,12-0,19	Не более 0,07	0,25-0,50	0,030	0,035	0,25
	15пс	0,12-0,19	0,05-0,17	0,35-0,65	0,030	0,035	0,25
	15	0,12-0,19	0,17-0,37	0,35-0,65	0,030	0,035	0,25
	18кп	0,12-0,20	Не более 0,06	0,30-0,50	0,030	0,035	0,15
	20кп	0,17-0,24	Не более 0,07	0,25-0,50	0,030	0,035	0,25
Специальные	20пс	0,17-0,24	0,05-0,17	0,35-0,65	0,030	0,035	0,25
	20	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	0,030	0,035	0,25
	25	0,22-0,30	0,17-0,37	0,50-0,80	0,030	0,035	0,25
	30	0,27-0,35	0,17-0,37	0,50-0,80	0,030	0,035	0,25
	35	0,32-0,40	0,17-0,37	0,50-0,80	0,030	0,035	0,25
	40	0,37-0,45	0,17-0,37	0,50-0,80	0,030	0,035	0,25
	45	0,42-0,50	0,17-0,37	0,50-0,80	0,030	0,035	0,25
	50	0,47-0,55	0,17-0,37	0,50-0,80	0,030	0,035	0,25
	50А	0,47-0,55	0,17-0,37	0,50-0,80	0,025	0,025	0,25
	55	0,52-0,60	0,17-0,37	0,50-0,80	0,030	0,035	0,25
	58 (55пп)	0,55-0,63	0,10-0,30	Не более 0,20	0,030	0,035	0,15
	60	0,57-0,65	0,17-0,37	0,50-0,80	0,030	0,035	0,25
	60пп	0,57-0,65	0,10-0,30	Не более 0,20	0,035	0,040	0,15
	60пп «селект»	0,57-0,61	0,10-0,30	Не более 0,20	0,035	0,040	0,15

Таблица 6

**Марки и химический состав нелегированных сталей.
Содержание Ni и Cu не более 0,30% каждого (по ковшевой пробе)**

Нелегированные	Марка стали	Массовая доля элементов, %					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
					Не более		
специальные	15Г	0,12-0,19	0,17-0,37	0,70-1,00	0,030	0,035	0,30
	20Г	0,17-0,24	0,17-0,37	0,70-1,00	0,030	0,035	0,30
	25Г	0,22-0,30	0,17-0,37	0,70-1,00	0,030	0,035	0,30
	30Г	0,27-0,35	0,17-0,37	0,70-1,00	0,030	0,030	0,30
	35Г	0,32-0,40	0,17-0,37	0,70-1,00	0,030	0,035	0,30
	40Г	0,37-0,45	0,17-0,37	0,70-1,00	0,030	0,035	0,30
	45Г	0,42-0,50	0,17-0,37	0,70-1,00	0,030	0,035	0,30
	50Г	0,48-0,56	0,17-0,37	0,70-1,00	0,030	0,035	0,30
	30Г2	0,26-0,35	0,17-0,37	1,40-1,80	0,030	0,035	0,30
	35Г2	0,31-0,39	0,17-0,37	1,40-1,80	0,030	0,035	0,30
	40Г2	0,36-0,44	0,17-0,37	1,40-1,80	0,030	0,035	0,30
	45Г2	0,41-0,49	0,17-0,37	1,40-1,80	0,030	0,035	0,30

Механические свойства сталей марок 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58(55пп), 60, 15Г, 20Г и 10Г2 определяются на нормализованных образцах и должны удовлетворять нормам таблицы 7. Механические свойства сталей марок 25Г, 30Г, 35Г, 40Г, 45Г, 50Г, 30Г2, 35Г2, 40Г2, 45Г2 определяются на образцах в термообработанном состоянии (закалка + отпуск) и должны удовлетворять нормам таблицы 8.

Стали марок 08, 10, 15, 20 применяют для малонагруженных деталей - шестерен, звездочек, осей, роликов, которые подвергают цементации. Из сталей 25, 30, 35 изготавливают средненагружаемые шатуны, шестерни, валы, оси. Для высоконагружаемых муфт, шестерен, пружин, пружинных колец применяют стали 50 и 55. Для пружин, рессор и других деталей работающих в условиях трения применяют стали с более высоким содержанием углерода.

Таблица 7

**Механические свойства нелегированных качественных сталей
(термическая обработка: нормализация)**

Марка стали	Механические свойства			
	Предел текучести	Предел прочности	Относительное удлинение δ ,	Относительное сужение ψ ,
	σ_T , МПа	σ_B , МПа	%	%
08	196	320	33	60
10	205	330	31	55
15	225	370	27	55
20	245	410	25	55
25	275	450	23	50
30	295	490	21	50
35	315	530	20	45
40	335	570	19	45
45	355	600	16	40
50	375	630	14	40
55	380	650	13	35
58(55пп)	315	600	12	30
60	400	680	12	35
60пп,60пп«селект»	355	600	12	30
15Г	245	410	26	55
20Г	275	450	24	50
10Г2	245	420	22	50

Таблица 8

**Механические свойства нелегированных качественных сталей
(термическая обработка: закалка +отпуск)**

Марка стали	Механические свойства			
	Предел текучести	Предел проч- ности	Относительное удлинение δ ,	Относительное сужение ψ ,
	σ_T , МПа	σ_B , МПа	%	%
25Г	295	490	22	50
30Г	315	540	20	45
35Г	335	560	18	45
40Г	355	590	17	45
45Г	375	620	15	40
50Г	390	650	13	40

30Г2	345	590	15	45
35Г2	365	620	13	40
40Г2	380	660	12	40
45Г2	400	690	11	40
50Г2	420	740	11	35

2.3. Специальные стали высокой обрабатываемости резанием

К этой группе относят автоматные стали с хорошей и повышенной обрабатываемостью резанием (ГОСТ 1414-75 «Прокат из конструкционной стали высокой обрабатываемости резанием. Технические условия»). Они предназначены в основном для изготовления деталей массового производства. При обработке таких сталей на станках-автоматах образуется короткая и мелкая стружка, снижается расход режущего инструмента и уменьшается шероховатость обработанных поверхностей. Автоматные стали с повышенным содержанием серы и фосфора имеют хорошую обрабатываемость. Обрабатываемость резанием улучшают также введением в стали технологических добавок селена, свинца, теллура. Автоматные стали маркируют буквой А и цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента.

В зависимости от химического состава сталь делится на пять групп: углеродистая сернистая - А11, А12, А20, А30, А35, сернистомарганцовистая А40Г, углеродистая свинецсодержащая АС40, сернистомарганцовистая свинецсодержащая - АС14, АС35Г2, АС45Г2, легированная свинецсодержащая - АС12ХН, АС14ХГН, АС19ХГН, АС20ХГНМ, АС30ХМ, АС38ХГМ, АС40ХГНМ, АС40Х. Сортамент автоматной стали предусматривает изготовление сортового проката в виде прутков круглого, квадратного и шестигранного сечений. Эти стали не применяют для изготовления сварных конструкций (см. также [ГОСТ 1051-73](#) «Прокат калиброванный. Общие технические условия»).

Горячекатаный прокат и прокат круглый с обточенной поверхностью изготавливают как в термически обработанном состоянии (отожженный, высокоотпущенный, нормализованный, нормализованный с высоким отпуском), так и без термической обработки. Калиброванный прокат поставляют в нагартован-

ном, нагартованно-отпущенном и термически обработанном состояниях (отожженный, нормализованный, нормализованный с высоким отпуском, улучшенный (закалка + отпуск), а сталь со специальной отделкой поверхности - в нагартованном, нагартованно-отпущенном или отожженном состоянии. В улучшенном состоянии изготавливают только прокат марок АС35Г2, АС30ХМ, АС40ХГНМ размером не более 35 мм. Прокат марок А11, АС14, А12, А20, АС12ХН изготавливают без термической обработки.

Прокат из стали марки А12 с 01.01.91 не допускается к применению во вновь создаваемой и модернизируемой технике.

2.4. Стали листовые котельные

Стали листовые котельные устанавливаются по ГОСТ 5520-79 «Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия» (Ограничение срока действия снято по протоколу №5-94 Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации (ИУС 11-12-94)). Настоящий стандарт распространяется на листовую прокат из углеродистой, низколегированной и легированной стали толщиной от 4 до 160 мм в горячекатаном и термически обработанном состоянии, пригодный для сварки и предназначенный для изготовления деталей и частей котлов и сосудов, работающих под давлением при комнатной, повышенных и минусовых температурах. Они должны работать при переменных давлениях и температуре до 450°С. Кроме того, котельная сталь должна хорошо свариваться. Для получения таких свойств в углеродистую сталь вводят технологическую добавку (титан) и дополнительно раскисляют ее алюминием. Выпускают следующие марки углеродистой котельной стали 15К, 16К, 18К, 20К, 22К. К классу котельных по назначению относятся низколегированные стали 09Г2С, 16ГС, 10Г2С1; 17ГС, 17Г1С, 14ХГС и легированные 12ХМ, 10Х2М, 12Х1МФ (табл. 9).

С 01.01.1991 г. стали марок 15К и 14ХГС не допускаются к использованию во вновь создаваемой и модернизируемой технике.

Таблица 9

Марки и химический состав котельных сталей.

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
				не более				
15К	0,12-0,20	0,15-0,30	0,35-0,65	0,040	0,040	-	-	-
16К	0,12-0,20	0,17-0,37	0,45-0,75	0,040	0,040	-	-	-
18К	0,14-0,22	0,17-0,37	0,55-0,85	0,040	0,040	-	-	-
20К	0,16-0,24	0,15-0,30	0,35-0,65	0,040	0,040	-	-	-
22К	0,19-0,26	0,17-0,40	0,7-1,0	0,035	0,040	-	-	-
12ХМ	Не более 0,16	0,17-0,37	0,4-0,7	0,025	0,025	0,8- 1,10	Не бо- лее 0,30	0,40- 0,55
10Х2М	0,08-0,12	0,17-0,37	0,4-0,7	0,020	0,020	2,0- 2,5	Не бо- лее 0,30	0,60- 0,80
12Х1МФ *	0,08-0,15	0,17-0,37	0,4-0,7	0,025	0,025	0,9- 1,2	Не бо- лее 0,30	0,25- 0,35
09Г2С	Не более 0,12	0,5-0,8	1,3-1,7	0,040	0,035	-	-	-
16ГС	0,12-0,18	0,4-0,7	0,9-1,2	0,040	0,035	-	-	-
10Г2С1	Не более 0,12	0,8-1,1	1,3-1,65	0,040	0,035	-	-	-
17ГС	0,14-0,20	0,4-0,6	1,0-1,4	0,040	0,035	-	-	-
17Г1С	0,15-0,20	0,4-0,6	1,15-1,6	0,040	0,035	-	-	-
14ХГС	0,11-0,16	0,4-0,7	0,9-1,3	0,040	0,035	0,5- 0,8	-	-
* Массовая доля ванадия 0,15%-0,30%.								

3. Нержавеющие стали

3.1. Коррозионностойкие стали

Коррозионностойкой нержавеющей называют сталь, обладающую высокой химической стойкостью в агрессивных средах. Коррозионностойкие стали получают легированием низко- и среднеуглеродистых сталей хромом, никелем,

титаном, алюминием, марганцем. Антикоррозионные свойства сталям придают введением в них большого количества хрома или хрома и никеля.

Наибольшее распространение получили хромистые и хромо-никелевые стали. Хромистые стали более дешевые, однако хромоникелевые обладают большей коррозионной стойкостью. Содержание хрома в нержавеющей стали должно быть не менее 12% (см. табл. 10).

Таблица 10

Химический состав (%) некоторых нержавеющей сталей

Марка ГОСТ 5632-72	Класс	Элементы			Прочие эле- менты
		C	Cr	Ni	
12X13	Мартенситно-ферритный	0,09...0,15	12...14	—	—
40X13	Мартенситный	0,36...0,45	12...14	—	—
12X17 08X17Г	Ферритный То же	≤0,12 ≤0,08	16...18 16...18	—	5,0 — 0,8 Ti
12X18Н9 12X18Н9Т 04X18Н10 10X14Г14Н3	Аустенитный	≤0,12	17...19	8...10	—
		≤0,12	17...19	8...9,5	5,0...0,8Ti
		≤0,04	17...19	9...11	—
		0,09...0,14	12,5...14	2,8...3,5	—
09X15Н8Ю	Аустенитно-мартенситный	≤0,09	14...16	7...9,4	13...15,5 Mn 0,7...1,3 Al

При меньшем количестве хрома сталь не способна сопротивляться коррозии, так как ее электродный потенциал становится отрицательным. Наибольшая коррозионная стойкость сталей достигается после соответствующей термической и механической обработки. Так, для стали 12X13 лучшая коррозионная стойкость достигается после закалки в масле (1000-1100°C), отпуска (700-750°C) и полировки. Эта сталь устойчива в слабоагрессивных средах (вода, пар). Сталь 40X13 применяют после закалки в масле с температурой 1000-1050°C и отпуска (180-200°C) со шлифованной и полированной поверхностью. После термической обработки эта сталь обладает высокой твердостью (HRC 52-55). Более коррозионностойкая (в кислотных средах) сталь 12X17. Для изготовления сварных конструкций эта сталь не рекомендуется в связи с тем, что при нагреве ее выше 900-950°C и быстрого охлаждения (при сварке) проис-

ходит обеднение периферийной зоны зерен хромом (ниже 12%). Это объясняется выделением карбидов хрома по границам зерен, что приводит к межкристаллитной коррозии. Межкристаллитная коррозия - особый, очень опасный вид коррозионного разрушения металла по границам аустенитных зерен, когда электрохимический потенциал пограничных участков аустенитных зерен понижается вследствие обеднения хромом и при наличии коррозионной среды границы зерен становятся анодами. Для предотвращения этого вида коррозии применяют сталь, легированную титаном 08X17T. Сталь 08X17T применяют для тех же целей, что и сталь 12X17, а также и для изготовления сварных конструкций. Хромоникелевые стали содержат большое количество хрома и никеля, мало углерода и относятся к аустенитному классу. Для получения однофазной структуры аустенита сталь (например, 12X18Н9) закалывают в воде при температуре 1100-1150°C; при этом достигается наиболее высокая коррозионная стойкость при сравнительно невысокой прочности. Для повышения прочности сталь подвергают холодной пластической деформации и применяют в виде холоднокатаного листа и ленты для изготовления различных деталей. Сталь 12X18Н9 склонна, как и хромистая сталь ферритного класса, к межкристаллитной коррозии при нагреве. Причины возникновения межкристаллитной коррозии те же - обеднение периферийной зоны зерен хромом (ниже 12%) вследствие выделения из аустенита карбидов хрома. Для предотвращения межкристаллитной коррозии сталь легируют титаном, например сталь 12X18Н9Т, или снижают содержание углерода, например сталь 04X18Н10. Хромоникелевые нержавеющие стали аустенитного класса имеют большую коррозионную стойкость, чем хромистые стали, их широко применяют в химической, нефтяной и пищевой промышленности, в автомобилестроении, транспортном машиностроении в строительстве. Для экономии дорогостоящего никеля его частично заменяют марганцем. Например, сталь 10X14Г14НЗ рекомендуется как заменитель стали 12X18Н9. Сталь аустенитно-мартенситного класса 09X15Н8Ю применяют для тяжело нагруженных деталей. Сталь аустенитно-ферритного класса 08X21Н6М2Т применяют для изготовления деталей и сварных кон-

струкций, работающих в средах повышенной агрессивности - уксуснокислых, сернокислых, фосфорнокислых. Разработаны марки высоколегированных сталей на основе сложной системы Fe-Cr-Ni-Mo-Cu-S. Коррозионная стойкость хромоникельмолибденомедистых сталей в некоторых агрессивных средах очень велика. Например, в 80%-ных растворах серной кислоты. Такие стали широко используют в химической, пищевой, автомобильной и других отраслях промышленности (табл. 11).

Таблица 11

Характеристики коррозионностойких сталей

Марка ГОСТ 5632-2014	Рабочая температура, °С, не более	Назначение
12X13 20X13	450	Лопатки гидротурбин, компрессоров, клапанов и арматура для химической промышленности, бытовые предметы
30X13	450	Валы, болты, шестерни, пружины, работающие в условиях коррозионной среды и больших напряжений
40X13	-	Шарикоподшипники, пружины, режущий хирургический и бытовой инструмент
30X13	600	Валы, болты, шестерни, пружины, работающие в условиях коррозионной среды и больших напряжений

3.2. Жаростойкие стали

При высоких температурах металлы и сплавы вступают во взаимодействие с окружающей газовой средой, что вызывает газовую коррозию (окисление) и разрушение материала. Для изготовления конструкций и деталей, работающих в условиях повышенной температуры (400-900°С) и окисления в газовой среде, применяют специальные жаростойкие стали. Под жаростойкостью (или окалиностойкостью) принято понимать способность материала противостоять коррозионному разрушению под действием воздуха или других газовых сред при высоких температурах. К жаростойким относят стали, содержащие алюминий, хром, кремний (см. табл. 12). Такие стали не образуют окалины при высоких температурах. Например, хромистая сталь, содержащая 30% Cr, устойчива до 1200°С. Введение небольших добавок алюминия резко повышает

жаростойкость хромистых сталей. Стойкость таких материалов при высоких температурах объясняется образованием на их поверхности плотных защитных пленок, состоящих в основном из оксидов легирующих элементов (хрома, алюминия, кремния). Область применения жаростойких сталей - изготовление различных деталей нагревательных устройств и энергетических установок.

Таблица 12

Характеристики жаростойких сталей

Марка ГОСТ 5632-2014	Рабочая температура, °С, не более	Назначение
40X9C2	850	Клапаны двигателей внутреннего сгорания
08X17T	900	Детали, работающие в среде то-почных газов с повышенным содержанием серы
36X18H25C2	1100	Сопловые аппараты и жаровые трубы газотурбинных установок

3.3 Жаропрочные стали

Некоторые детали машин (двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, металлургического оборудования и т. п.) длительное время работают при больших нагрузках и высоких температурах (500-1000°С). Для изготовления таких деталей применяют специальные жаропрочные стали. Под жаропрочностью принято понимать способность материала выдерживать механические нагрузки без существенных деформаций при высоких температурах. К числу жаропрочных относят стали, содержащие хром, кремний, молибден, никель и др. Они сохраняют свои прочностные свойства при нагреве до 650°С и более. Из таких сталей изготавливают греющие элементы теплообменной аппаратуры, детали котлов, впускные и выпускные клапаны автомобильных и тракторных двигателей (табл. 13).

Таблица 13

Характеристики жаропрочных сталей

Марка ГОСТ 5632-2014	Рабочая температура, °С не более	Назначение
45X14H14B2M	800...900	Клапаны двигателей внутреннего сгорания большой мощности
08X16H13M2Б	600...700	Лопатки газовых турбин

В зависимости от назначения различают клапанные, котлотурбинные, газотурбинные стали, а также сплавы с высокой жаропрочностью. При выборе коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных сталей необходимо руководствоваться ГОСТ 5632-2014 «Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки» и ГОСТ 7350-77 «Сталь толстолистовая коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия».

4. Инструментальные стали

4.1. Нелегированные инструментальные стали

Нелегированные (углеродистые) инструментальные стали устанавливаются по ГОСТ 1435-99 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия». Нелегированные инструментальные стали выпускают следующих марок: У7, У8, У8Г, У9, У10, У12 и У7А, У8А, У8ГА, У9А, У10А, У12А. Цифры указывают на содержание углерода в десятых долях процента. Буква Г после цифры означает, что сталь имеет повышенное содержание марганца. Марка инструментальной углеродистой стали высокого качества, полученной методом электрошлакового переплава, содержит букву А, например У12А: инструментальная углеродистая сталь высокого качества, содержащая 1,2% С.

Инструменты, применение которых связано с ударной нагрузкой, например зубила, бородки, молотки, изготавливают из сталей У7А, У8А.

Инструменты, требующие большой твердости, но не подвергающиеся ударам, например сверла, метчики, развертки, шаберы, напильники, - из сталей У12А. Стали У7- У9 подвергают полной, а стали У10-У12 неполной закалке. Недостатком углеродистых инструментальных сталей является их низкая теплостойкость - неспособность сохранять большую твердость при высоких температурах нагрева. При нагреве выше 200°С инструмент из углеродистых сталей теряет твердость.

4.2. Легированные инструментальные стали

Легированные инструментальные стали устанавливаются по ГОСТ 5950-2000 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия». Легирующие элементы, вводимые в инструментальные стали, увеличивают теплостойкость (вольфрам, молибден, кобальт, хром), закаливаемость (марганец), вязкость (никель), износостойкость (вольфрам). В сравнении с нелегированными (углеродистыми) легированные инструментальные стали обладают рядом преимуществ: более высокая глубина прокаливаемости, большая пластичность в отожженном состоянии, значительно более высокая прочность в закаленном состоянии, более высокие режущие свойства.

Низколегированные инструментальные стали содержат до 2,5% легирующих элементов, имеют высокую твердость (HRC 62-69), значительную износостойкость, но малую теплостойкость (200-260°C). В отличие от углеродистых сталей их используют для изготовления инструмента более сложной формы. В низколегированных сталях X, 9XC, XBG, XBCG основной легирующий элемент - хром. Сталь X легирована только хромом. Повышенное содержание хрома значительно увеличивает ее прокаливаемость. Сталь X прокаливается в масле полностью в сечении до 25 мм, а сталь У10 - только в сечении до 5 мм. Применяют сталь X для изготовления токарных, строгальных и долбежных резцов. Сталь 9XC кроме хрома легирована кремнием. По сравнению со сталью X она имеет большую прокаливаемость - до 35 мм; повышенную теплостойкость - до 250-260°C (сталь X до 200-210°C) и лучшие режущие свойства. Из стали 9XC изготавливают сверла, развертки, фрезы, метчики, плашки. Сталь XBG легирована хромом, вольфрамом и марганцем; имеет прокаливаемость на глубину до 45 мм. Сталь XBG используют для производства крупных и длинных протяжек, длинных метчиков, длинных разверток и т.п.

Сталь XBCG - сложнолегированная сталь и по сравнению со сталями 9XC и XBG лучше закаливается и прокаливается. При охлаждении в масле она про-

каливается полностью в сечении до 80 мм. Она меньше чувствительна к перегреву. Теплостойкость ее такая же, как у стали 9ХС. Сталь ХВСГ применяют для изготовления круглых плашек, разверток, крупных протяжек и другого режущего инструмента.

4.3. Инструментальные быстрорежущие стали

Быстрорежущие стали - легированные стали, предназначенные главным образом для изготовления металлорежущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания. Быстрорежущая сталь должна обладать высоким сопротивлением разрушению, твердостью (в холодном и горячем состояниях) и красностойкостью. Высоким сопротивлением разрушению и твердостью в холодном состоянии обладают и углеродистые инструментальные стали. Однако инструмент из них не в состоянии обеспечить высокоскоростные режимы резания. Легирование быстрорежущих сталей вольфрамом, молибденом, ванадием и кобальтом обеспечивает горячую твердость и красностойкость стали. Марки и химический состав, нормативные показатели быстрорежущей стали устанавливаются по межгосударственному стандарту ГОСТ 19265-73 «Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия», ограничение срока действия которого снято по протоколу № 2-92 Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации от 05.10.92 (ИУС 2-93), дата последнего издания документа 2003-05-01.

В марках стали буквы и цифры означают: Р - быстрорежущая; цифра, следующая за буквой, - среднюю массовую долю вольфрама; М - молибден, Ф - ванадий, К - кобальт, А - азот; цифры, следующие за буквами, означают соответственно массовую долю молибдена, ванадия, кобальта; Ш - электрошлаковый переплав.

В обозначении марок стали не указывают массовую долю: хрома - при любой массовой доле, молибдена - до 1 % включительно, ванадия - в стали марок P18, P6M5, P9K5, P6M5K5, P9M4K8 и P2AM9K5, азота - в стали марок 11P3AM3Ф2 и P2AM9K5. Содержание марганца и кремния нормируется в интервале 0,20-0,50% каждого элемента. Инструменты из быстрорежущей стали иностранного производства обычно маркируются аббревиатурой HSS (High Speed Steel).

Таблица 14

Химический состав некоторых быстрорежущих сталей (в процентах)

Марка стали	C	Cr	W	Mo	V	Co
P0M2Ф3	1,10-1,25	3,8-4,6	-	2,3-2,9	2,6-3,3	-
P6M5	0,82-0,90	3,8-4,4	5,5-6,5	4,8-5,3	1,7-2,1	< 0,50
P6M5Ф2K8	0,95-1,05	3,8-4,4	5,5-6,6	4,6-5,2	1,8-2,4	7,5-8,5
P9	0,85-0,95	3,8-4,4	8,5-10,0	< 1,0	2,0-2,6	-
P18	0,73-0,83	3,8-4,4	17,0-18,5	< 1,0	1,0-1,4	< 0,50

При нормальной температуре твердость углеродистой стали даже несколько выше твердости быстрорежущей стали. Однако в процессе работы режущего инструмента происходит интенсивное выделение тепла. При этом до 80% выделившегося тепла уходит на разогрев инструмента. При повышении температуры режущей кромки происходит отпуск материала инструмента и снижается его твердость. Нагрев до 200°C и выше приводит к быстрому падению твердости углеродистой стали. Поэтому для этой стали недопустим режим резания, при котором инструмент нагревался бы выше 200°C. У быстрорежущей стали высокая твердость сохраняется при нагреве до 500-600°C. Инструмент из быстрорежущей стали более производительен, чем инструмент из углеродистой стали.

Если горячая твердость характеризует то, какую температуру может выдержать сталь, то красностойкость характеризует, как долго сталь будет выдерживать такую температуру, то есть как долго по времени закаленная и отпущенная сталь будет сопротивляться разупрочнению при разогреве. Суще-

ствует несколько характеристик красностойкости. Приведем две из них. Первая характеристика показывает, какую твердость будет иметь сталь после отпуска при определенной температуре в течение заданного времени. Вторым способом охарактеризовать красностойкость основан на том, что интенсивность снижения горячей твердости можно определить не только при высокой температуре, но и при комнатной, так как кривые снижения твердости при высокой температуре и комнатной идут эквидистантно, а измерить твердость при комнатной температуре, разумеется, гораздо проще, чем при высокой. Опытами установлено, что режущие свойства теряются при твердости 50 HRC при температуре резания, что соответствует примерно 58 HRC при комнатной. Отсюда красностойкость характеризуется температурой отпуска, при которой за 4 часа твердость снижается до 58 HRC и обозначается K_{p58}^4 .

Таблица 15

Характеристики теплостойкости углеродистых и красностойкости быстрорежущих инструментальных сталей

Марка стали	Температура отпуска, °С	Время выдержки, час	Твердость, HRC ₂
У7, У8, У10, У12	150—160	1	63
Р9	580	4	
У7, У8, У10, У12	200—220	1	59
Р6М5К5, Р9, Р9М4К8, Р18	620—630	4	

Кроме «горячих» свойств от материала для режущего инструмента требуются и высокие механические свойства; здесь подразумевается сопротивление хрупкому разрушению, так как при высокой твердости (более 60 HRC) разрушение всегда происходит по хрупкому механизму. Прочность таких высокотвердых материалов обычно определяют как сопротивление разрушению при изгибе призматических, не надрезанных образцов, при статическом (медленном) и динамическом (быстром) нагружении. Чем выше прочность, тем большее усилие может выдержать рабочая часть инструмента, тем большую подачу и глубину резания можно применить, и это увеличивает производительность процесса резания.

Получение и обработка быстрорежущих сталей. Быстрорежущие стали изготавливают либо классическим способом - разливка стали в слитки, горячая прокатка и проковка, либо методами порошковой металлургии (распыление струи жидкой стали азотом). Качество быстрорежущей стали в значительной степени определяется степенью ее проковки. При недостаточной проковке в изготовленной классическим способом стали наблюдается карбидная ликвация. При изготовлении быстрорежущих сталей распространенной ошибкой является подход к ней как к «самозакаливающейся стали». То есть достаточно нагреть сталь и охладить на воздухе, и можно получить твердый износостойкий материал. Такой подход абсолютно не учитывает особенности высоколегированных инструментальных сталей. Перед закалкой быстрорежущие стали необходимо подвергнуть отжигу. В плохо отожженных сталях наблюдается особый вид брака: нафталиновый излом, когда при нормальной твердости стали она обладает повышенной хрупкостью. Грамотный выбор температуры закалки обеспечивает максимальную растворимость легирующих добавок в α -железе, но не приводит к росту зерна. После закалки в стали остается 25-30% остаточного аустенита. Помимо снижения твердости инструмента, остаточный аустенит приводит к снижению теплопроводности стали, что для условий работы с интенсивным нагревом режущей кромки является крайне нежелательным. Снижения количества остаточного аустенита добиваются двумя путями: обработкой стали холодом или многократным отпуском. При обработке стали холодом ее охлаждают до $-80\dots-70^{\circ}\text{C}$, затем проводят отпуск. При многократном отпуске цикл «нагрев - выдержка - охлаждение» проводят по 2-3 раза. В обоих случаях добиваются существенного снижения количества остаточного аустенита, однако полностью избавиться от него не получается.

Высокая твердость мартенсита объясняется растворением углерода в α -железе. Известно, что при отпуске из мартенсита в углеродистой стали выделяются мельчайшие частицы карбида. Пока выделившиеся карбиды еще находятся в мельчайшем дисперсном рассеянии (то есть на первой стадии выделения при отпуске до 200°C), твердость заметно не снижается. Но если темпера-

туру отпуска поднять выше 200°C, происходит рост карбидных выделений, и твердость падает. Чтобы сталь устойчиво сохраняла твердость при нагреве, нужно ее легировать такими элементами, которые затрудняли бы процесс коагуляции карбидов. Если ввести в сталь какой-нибудь карбидообразующий элемент в таком количестве, что он образует специальный карбид, то красностойкость скачкообразно возрастает. Это обусловлено тем, что специальный карбид выделяется из мартенсита и коагулирует при более высоких температурах, чем карбид железа, так как для этого требуется не только диффузия углерода, но и диффузия легирующих элементов. Практически заметная коагуляция специальных карбидов хрома, вольфрама, молибдена, ванадия происходит при температурах выше 500°C.

Таким образом, красностойкость создается легированием стали карбидообразующими элементами (вольфрамом, молибденом, хромом, ванадием) в таком количестве, при котором они связывают почти весь углерод в специальные карбиды и эти карбиды переходят в раствор при закалке. Несмотря на сильное различие в общем химическом составе, состав твердого раствора очень близок во всех сталях, атомная сумма $W+Mo+V$, определяющая красностойкость, равна примерно 4% (атомн.), отсюда красностойкости и режущие свойства у разных марок быстрорежущих сталей близки. Быстрорежущая сталь, содержащая кобальт, превосходит по режущим свойствам остальные стали (он повышает красностойкость), но кобальт очень дорогой элемент.

Применение. В последние десятилетия использование быстрорежущей стали сокращается в связи с широким распространением твердых сплавов. Из быстрорежущей стали изготавливают в основном концевой инструмент (метчики, сверла, фрезы небольших диаметров). В токарной обработке резцы со сменными и напаянными твердосплавными пластинами почти полностью вытеснили резцы из быстрорежущей стали. По применению отечественных марок быстрорежущих сталей существуют следующие рекомендации.

Сталь P9 рекомендуют для изготовления инструментов простой формы и не требующих большого объема шлифовки, для обработки обычных конструкционных материалов (резцов, фрез, зенкеров).

Для фасонных и сложных инструментов (для нарезания резьб и зубьев), к которым основным требованием является высокая износостойкость, рекомендуют использовать сталь P18 (вольфрамовая).

Кобальтовые быстрорежущие стали (P9K5, P9K10) применяют для обработки деталей из труднообрабатываемых коррозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов, в условиях прерывистого резания, вибраций, недостаточного охлаждения.

Ванадиевые быстрорежущие стали (P9Ф5, P14Ф4) рекомендуют для изготовления инструментов для чистовой обработки (протяжки, развёртки, шеверы). Их можно применять для обработки труднообрабатываемых материалов при срезании стружек небольшого поперечного сечения.

Вольфрамомолибденовые стали (P9M4, P6M3) используют для инструментов, работающих в условиях черновой обработки, а также для изготовления протяжек, долбяков, шеверов, фрез.

5. Легированные конструкционные стали

Легированные конструкционные стали выплавляют преимущественно в электрических, а также в кислых мартеновских печах. Для придания необходимых свойств в эти стали вводят следующие наиболее распространенные легирующие элементы: хром - до 2%, хром хорошо растворяется в феррите и цементите и улучшает механические свойства; никель - от 1 до 5%, никель заметно повышает предел текучести стали, но делает сталь чувствительной к перегреву поэтому для измельчения зерна одновременно с никелем в сталь вводят карбидообразующие элементы; марганец вводят в сталь до 1,5%, он распределяется между ферритом и цементитом, кремний не является карбидообразующим элементом, его содержание не превышает 2%, значительно повышает пре-

дел текучести стали и при содержании более 1% снижает ударную вязкость и повышает порог хладноломкости; молибден и вольфрам являются карбидообразующими элементами, которые большей частью растворяются в цементите, молибден в количестве 0,2-0,4% и вольфрам в количестве 0,8-1,2% в комплекснолегированных сталях способствуют измельчению зерна, увеличивают прокаливаемость и улучшают некоторые другие свойства стали; ванадий и титан - еще более сильные карбидообразующие элементы, которые вводят в небольшом количестве (до 0,3% V и 0,1% Ti) в стали, содержащие хром, марганец, никель, для измельчения зерна. Высокое содержание ванадия, титана, молибдена и вольфрама в конструкционных сталях нежелательно из-за образования специальных труднорастворимых при нагреве карбидов. Избыточные карбиды, располагаясь по границам зерен, способствуют хрупкому разрушению и снижают прокаливаемость стали. Для повышения прокаливаемости в сталь могут вводить до 0,002-0,005% бора.

Содержание серы и фосфора в как правило не превышает 0,025% каждого. Стали имеют также повышенную чистоту по неметаллическим включениям. Интервал содержания углерода конкретной марки стали составляет не более 0,07%. Стали особо высококачественные выплавляются в электрических печах с электрошлаковым переплавом (или в вакуумнодуговых печах), имеют пониженное содержание газов и серы (менее 0,015%) и отвечают более жестким требованиям по неметаллическим включениям.

Изделия из легированных конструкционных сталей применяются как правило в термообработанном состоянии.

5.1. Цементуемые легированные стали

Цементуемые легированные стали устанавливаются по ГОСТ 4543-71. Цементуемые стали - это низкоуглеродистые (до 0,25% C), низколегированные (до 2,5%) и среднелегированные (2,5-10% суммарное содержание легирующих элементов) стали. Эти стали (см. табл. 16) предназначены для дета-

лей машин и приборов, работающих в условиях трения и испытывающих ударные и переменные нагрузки. Работоспособность таких деталей зависит от свойств сердцевины и поверхностного слоя металла. Цементуемые стали насыщают с поверхности углеродом (цементуют) и подвергают термической обработке (закалке и отпуску). Такая обработка обеспечивает высокую поверхностную твердость (58-63 HRC) и сохраняет требуемую вязкость и заданную прочность сердцевины металла.

Таблица 16

Характеристики цементуемых легированных сталей

Марка	Предел прочности при растяжении, σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость, КС, МДж/м ²	Назначение
	не менее	не менее		
15XA	700	12	0,7	Небольшие детали, работающие в условиях трения при средних давлениях и скоростях
18XГ	900	10	-	Ответственные детали, работающие при больших скоростях, высоких давлениях и ударных нагрузках
25XГМ	1200	10	0,8	
20XH 20X2H4A	800	14	0,8	Крупные ответственные тяжело нагруженные детали
18X2H4MA	1150	12	1,0	Крупные особо ответственные тяжело нагруженные детали, работающие при больших скоростях с наличием вибрационных и динамических нагрузок

5.2. Улучшаемые легированные стали

Улучшаемые легированные стали устанавливаются по ГОСТ 4543-71 «Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия». Это среднеуглеродистые (0,25-0,6% С) и низколегированные стали. Для обеспече-

ния необходимых свойств (прочности, пластичности, вязкости) эти стали (см. табл. 17) термически улучшают, подвергая закалке и высокому отпуску (500-600° С). Дополнительно рекомендуется использовать ГОСТ 5950-2000 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия».

Таблица 17

Характеристики улучшаемых легированных сталей

Марка	Предел прочности при растяжении, σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость, КС, МДж/м ²	Назначение
	не менее	не менее		
40ХС 40ХФА	1250 900	12 10	0,35 0,9	Небольшие детали, работающие в условиях повышенных напряжений и знакопеременных нагрузок
30ХГСА	1100	10	0,5	Детали, работающие в условиях старения, и ответственные сварные конструкции, работающие при знакопеременных нагрузках и температуре до 200°С
20ХН 20Х2Н4А	800	14	0,8	Крупные ответственные тяжело нагруженные детали
30ХГСА	1100	10	0,5	Детали, работающие в условиях старения, и ответственные сварные конструкции, работающие при знакопеременных нагрузках и температуре до 200°С

5.3. Высокопрочные легированные стали

Улучшаемые и цементуемые стали после термической обработки приобретают прочность до $\sigma_B = 1300$ МПа и ударную вязкость до

$KC = 0,8-1,0 \text{ МДж/м}^2$. Для тяжелонагруженных деталей, деталей, испытывающих большие динамические и в том числе ударные нагрузки, а также при проектировании новых современных машин такой прочности недостаточно. Необходимы стали с пределами прочности $\sigma_B = 1500-2000 \text{ МПа}$. Для этих целей применяют комплексно-легированные и мартенситно-старяющие стали.

Комплексно-легированные стали - это среднеуглеродистые (0,25-0,6% С) легированные стали, которые для достижения максимальной прочности подвергаются закалке с низким отпуском или термомеханической обработке. Закалка с низким отпуском обеспечивает высокую прочность даже для углеродистых сталей с содержанием приблизительно 0,4% углерода. Легирование большим количеством элементов производится для повышения вязкости, уменьшения аустенитного зерна и увеличения прокаливаемости. Для достижения этих целей производится легирование никелем (1,5-3%) и небольшими количествами кремния, молибдена, вольфрама, ванадия, хрома и марганца (30ХГСНА, 40ХГСНЗВА, 40ХН2СМА и др.). Сталь 30ХГСНА, представляющая собой хромансиль с добавкой 1,6% никеля, широко применяется в самолетостроении для силовых сварных конструкций. Штампы горизонтально-ковочных машин и прессов имеют меньшие размеры, чем молотовые штампы, при работе испытывают высокие давления без больших ударных нагрузок, нагреваются до гораздо более высоких температур. Поэтому основные требования к сталям для этих штампов - высокие теплостойкость и разгаростойкость, т.е. высокое сопротивление термической усталости (определяется сопротивлением стали образованию поверхностных трещин под нагрузкой при многократном нагреве и охлаждении). Этим требованиям удовлетворяют комплексно-легированные стали 3Х2В8Ф, 4Х2В5МФ, 5Х3В3МФС. По составу и превращениям при термической обработке эти стали сходны с быстрорежущими. Термомеханическая обработка применяется для упрочнения среднеуглеродистых легированных сталей 30ХГСА, 40ХН, 40ХНМА, 38ХН3МА и других.

Мартенситно-старееющие стали (maraging steel) - это высокопрочные высоколегированные безуглеродистые (не более 0,03% С) конструкционные стали, содержащие 5-20% Ni, а также Co, Mo, Ti, Al и другие элементы. После закалки на воздухе и старения в интервале 450-520°С структура стали состоит из пластичной матрицы - мартенсита и равномерно распределенных в ней дисперсных частиц интерметаллидных фаз - упрочнителей, что обеспечивает уникальный комплекс ее механических свойств: высокую прочность при достаточной пластичности и вязкости, высокое сопротивление малым пластическим деформациям, хрупкому и усталостному разрушению, повышенную хладостойкость, тепло- и коррозионную стойкость. Наибольшее распространение как конструкционный материал общего назначения с наилучшим сочетанием прочности, пластичности и вязкости получила сталь Н18К9М5Т, содержащая < 0,03% С; 16,7-19% Ni; 8,5-9,5% Co, 4,6-5,5% Mo; 0,5-0,8% Ti; < 0,15% Al. На базе систем Fe-Cr-Ni-Mo и Fe-Cr-Ni-Co-Mo разрабатывается ряд специальных (особо высокопрочных с $\sigma_B > 2,5$ ГПа, теплостойких, коррозионностойких и др.) мартенситно-старееющих сталей.

Мартенситно-старееющая сталь как конструкционный материал с высокой удельной прочностью и сопротивлением хрупкому разрушению используется для изготовления конструктивных элементов авиационной, космической и ракетной техники, в криогенном машиностроении, приборостроении и других отраслях. В табл. 18 приведены показатели механических свойств некоторых комплекснолегированных и мартенситностарееющих сталей. Для комплекснолегированных сталей в числителе показаны значения свойств после закалки от 900°С и низкого отпуска при 250°С, в знаменателе - после изотермической закалки. Показатели механических свойств мартенситно-старееющих сталей даны в состоянии после закалки на воздухе и последующего старения.

Таблица 18

Характеристики высокопрочных легированных сталей

Марка	Предел прочности при растяжении, σ_B , МПа	Относительное удлинение δ ,	Ударная вязкость, КС,	Назначение
-------	---	------------------------------------	-----------------------	------------

		%	МДж/м ²	
	не менее	не менее		
Комплексно-легированные стали				
30ХГСН2А	1850/1650	13/9	0,55/0,62	Особо ответственные тяжело нагруженные детали (детали шасси и фюзеляжа в авиационной промышленности), работающие в условиях резко меняющихся нагрузок
40ХГСН3ВА	2000/1850	11/12	0,45/0,5	
Мартенситно-старяющие стали				
H12K15M10	2500	6	0,3	Особо ответственные тяжело нагруженные детали
H18K9M5T	2100	8	0,5	

5.4. Износостойкие стали

Для деталей машин, работающих в условиях трения, применяют специальные износостойкие стали - шарикоподшипниковые, графитизированные и высокомарганцовистые.

Для изготовления шариков, роликов и колец подшипников применяют недорогие технологичные хромистые стали ШХ4, ШХ15, ШХ15ГС и ШХ20ГС, содержащие примерно 1% С. В обозначении марок буква Ш означает шарикоподшипниковую сталь; буква Х и число - содержание хрома в десятых долях процента (0,4; 1,5; 2,0); буквы С, Г - легирование кремнием (до 0,85%) и марганцем (до 1,7%). Химический состав по ГОСТ 801-78 «Сталь подшипниковая. Технические условия» приведен в табл. 19.

Таблица 19

Химический состав стали подшипниковых сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu	Cu+Ni
	не менее								
ШХ15	0,95 - 1,05	0,17 - 0,37	0,20 - 0,40	1,30 - 1,65	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50
ШХ15СГ	0,95 - 1,05	0,40 - 0,65	0,90 - 1,20	1,30 - 1,65	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50

ШХ4	0,95 - 1,05	0,15 - 0,30	0,15 - 0,30	0,35 - 0,50	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50
ШХ20СГ	0,90 - 1,00	0,55 - 0,85	1,40 - 1,70	1,40 - 1,70	0,02	0,027	0,30	0,25	0,50

Подшипниковую сталь поставляют после сфероидизирующего отжига со структурой зернистого перлита (НВ=1790-2170 МПа) и повышенными требованиями к качеству металла. В стали строго регламентированы карбидная неоднородность и загрязненность неметаллическими включениями. Для изготовления высокоскоростных подшипников применяют стали после электрошлакового переплава (к марке таких сталей добавляют букву Ш, например, ШХ15-Ш), отличающиеся наиболее высокой однородностью структуры. Такие стали необходимы также для изготовления высокоточных приборных подшипников. Детали подшипников подвергают типичной для заэвтектоидных сталей термической обработке: неполной закалке от 820-850°С в масло и низкому отпуску при 150-170°С. После закалки в структуре сталей сохраняется 8-15% остаточного аустенита, превращение которого может вызывать изменение размеров деталей подшипников. Поэтому для стабилизации размеров детали прецизионных подшипников обрабатывают холодом при температурах от -70 до -80°С. После обработки холодом подшипниковая сталь имеет структуру мартенсита с включениями мелких карбидов и высокую твердость (HRC 60-64). Твердость стали для подшипников нормирована ГОСТ 29212-91 «Подшипники скольжения. Испытания на твердость металлических материалов для подшипников скольжения. Многослойные подшипники». Детали крупногабаритных роликовых подшипников диаметром до 2 м (для прокатных станков, электрических генераторов) изготавливают из сталей 12ХНЗА, 12Х2Н4А, подвергая их цементации на большую глубину (3-6 мм). Для подшипников, работающих в агрессивных средах, применяют коррозионностойкую хромистую сталь 95Х18 (0,95% С, 18% Cr).

Графитизированная сталь - высокоуглеродистая заэвтектоидная сталь, содержащая 1,5-2% С, до 2% Cr и 1-1,25% Si. Такую сталь используют для изготовления штампов, матриц, шаров, лопастей дробеструйных аппаратов, порш-

невых колец, поршней, коленчатых валов и других фасонных отливок, работающих в условиях трения. Сталь обладает хорошей жидкотекучестью, что позволяет получать из нее тонкостенные отливки, износоустойчива и обладает антифрикционными свойствами. Это дает возможность применять ее в качестве заменителя бронзы и для изготовления тонкостенных деталей, работающих при ударных нагрузках. Изготовленные из этой стали штампы имеют стойкость в 15-20 раз большую, чем из стали марки У10А. Графитизированная сталь поставляется в виде отливок и поковок и может иметь специальную маркировку - ЭИ293, ЭИ366. Механические свойства отливок, зависящие от термической обработки, следующие: предел прочности при растяжении 538-890 МПа, относительное удлинение 16,5-6,5%; твердость по Бринеллю НВ от 1700 до 2700 МПа. Закаленные и отпущенные поковки могут иметь предел прочности 1330-1500 МПа. Графитизированную сталь применяют для изготовления штампов, матриц, коленчатых валов, шаров, лопастей дробеструйных аппаратов и т.д. После термической обработки структура стали состоит из зернистого перлита с некоторым количеством мелких округлых включений графита. При неабразивном износе графит играет роль смазки, предотвращая сухое трение и схватывание. Кроме того, эти стали обладают антивибрационными свойствами. Структура графитизированной стали в литом состоянии состоит из ферритоцементитной матрицы и графита. Количество графита может значительно меняться в зависимости от режима термической обработки и содержания углерода. Графитизированная сталь после закалки сочетает свойства закаленной стали и серого чугуна. Графит в такой стали играет роль смазки.

Высокомарганцовистую сталь 110Г13Л - сталь Гадфильда применяют для изготовления железнодорожных крестовин, рельсовых переводов, звеньев (траков) гусениц и т.п. По ГОСТ 977-88 «Отливки стальные. Общие технические условия» сталь содержит 0,90-1,50% С, 11,50-15,00% Мп, 0,30-1,00% Si. Эта сталь обладает максимальной износостойкостью когда имеет однофазную структуру аустенита, что обеспечивается закалкой от 1000-1100°С после охла-

ждения на воздухе. Закаленная сталь имеет низкую твердость (НВ 2000 МПа), после сильного наклепа ее твердость повышается до 6000 МПа.

6. Специальные стали и сплавы с особыми физическими свойствами

Большинство подобных сплавов относится к прецизионным и регламентируются ГОСТ 10994-74 «Сплавы прецизионные. Марки». ГОСТ 10994-74 «распространяется на прецизионные деформируемые сплавы и устанавливает требования к химическому составу сплавов. К прецизионным сплавам относятся высоколегированные сплавы с заданными физическими и физико-механическими свойствами, требующие в ряде случаев узких пределов содержания элементов в химическом составе, специальной технологии выплавки и специальной обработки».

6.1. Магнитно-мягкие стали и сплавы

Магнитные материалы это ферромагнитные стали и сплавы на основе ферромагнитных элементов - железа, кобальта и никеля. У ферромагнитных материалов относительная магнитная проницаемость достигает десятков и сотен тысяч единиц, для других материалов она близка к единице. Магнитные свойства материала характеризуются остаточной индукцией и коэрцитивной силой. Остаточной индукцией называют магнитную индукцию, остающуюся в образце после его намагничивания и снятия внешнего магнитного поля. Единицей измерения остаточной индукции - Тл (тесла). $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А}\cdot\text{м})$. Коэрцитивной силой H_c называют значение напряженности внешнего магнитного поля, необходимое для полного размагничивания ферромагнитного вещества. Коэрцитивная сила определяет свойство ферромагнетика сохранять остаточную намагниченность, единица измерения - А/м.

Магнитные стали и сплавы в зависимости от коэрцитивной силы и магнитной проницаемости делят на магнитно-мягкие и магнитно-твердые. Магнитно-мягкие стали и сплавы относятся к ферромагнитным материалам и ха-

рактируются высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой и высокой остаточной магнитной индукцией, а также обладают низкими удельными потерями энергии при перемагничивании. Важное место в этой группе занимают электротехнические стали - сплавы железа с кремнием. Для магнитопроводов трансформаторов применяют холоднокатаную анизотропную тонколистовую электротехническую сталь с содержанием 3,2% Si. По ГОСТ 21427.1-83 «Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая» изготавливают анизотропную сталь марок: 3311 (3411), 3411, 3412, 3413, 3414, 3415, 3404, 3405, 3406, 3407, 3408, 3409.

Для изготовления вращающихся магнитопроводов, трансформаторов, низковольтной и высоковольтной аппаратуры, дросселей, реле и т.д. применяется изотропная (динамная) сталь различной степени легирования кремнием - от 1 до 3,5-4% . Марки и свойства изотропной стали устанавливает ГОСТ 21427.2-83 «Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая». Изготавливают изотропную сталь марок: 2011, 2012, 2013, 2111, 2112, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2312, 2411, 2412, 2413, 2414 и 2421.

Основными нормируемыми характеристиками являются удельные магнитные потери $P_{1,5/50}$ и $P_{1,7/50}$ при магнитной индукции соответственно 1,5Тл и 1,7Тл и магнитная индукция при напряженности магнитного поля 2500 А/м.

Для аппаратуры, работающей в слабых электромагнитных полях (телефон, радио), применяют пермаллой - сплавы с высокой магнитной проницаемостью. Пермаллой содержат 45-80% Ni, их дополнительно легируют Cr, Si, Mo. Например, у пермаллоя марки 79НМ (13.7-16.8% Fe; 78.5-80 Ni; 3.8-4.1% Mo) магнитная проницаемость $\mu = 175,15 \cdot 10^9$ ГГн/м.

Для устройств, работающих в диапазоне высоких и сверхвысоких частот, применяют магнитно-мягкие ферриты - материалы с очень высоким удельным электросопротивлением. Их получают спеканием смеси порошков ферромагнитной окиси железа Fe_2O_3 и окислов двухвалентных металлов (ZnO, NiO, MgO и др.).

6.2. Магнитно-твердые стали и сплавы

Магнитно-твердые материалы - это сплавы с заданным сочетанием параметров предельной петли гистерезиса или петли гистерезиса, соответствующей полю максимальной проницаемости

Магнитно-твердые стали и сплавы применяют для изготовления постоянных магнитов так как имеют большую коэрцитивную силу. Это высокоуглеродистые и легированные стали и специальные сплавы. Углеродистые стали (У10 - У12) после закалки имеют достаточную коэрцитивную силу ($H_c = 5175$ А/м), но так как они прокаливаются на небольшую глубину, их применяют для изготовления небольших магнитов. Хромистые стали по сравнению с углеродистыми прокаливаются значительно глубже, поэтому из них изготавливают более крупные магниты. Магнитные свойства этих сталей такие же, как и углеродистых. Хромокобальтовые стали (например, марки EX5K5) имеют более высокую коэрцитивную силу - $H_c = 7166$ А/м. Магнитные сплавы, например ЮНДК24 (9% Al, 13,5% Ni, 3% Cu, 24% Co, остальное железо), имеют очень высокую коэрцитивную силу - $H_c = 39810$ А/м, поэтому из них изготавливают магниты небольшого размера, но большой мощности. При выборе материалов для постоянных магнитов необходимо руководствоваться ГОСТ 25639-83 «Магниты литые постоянные. Технические условия» и ГОСТ 24936-89 «Магниты постоянные литые для электротехнических изделий. Общие технические условия».

6.3. Сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения

Сплавы с заданным коэффициентом теплового расширения содержат большое количество никеля Ni.

Сплав 36Н, называемый инваром ($\leq 0,05\% \text{ C}$ и $35-37\% \text{ Ni}$), почти не расширяется при температурах от -60 до $+100^\circ\text{C}$. Его применяют для изготовления деталей приборов, требующих постоянных размеров в интервале климатических изменений температур (детали: геодезических приборов и др.).

Сплав 29НК, называемый коваром ($\leq 0,03\% \text{ C}$; $28,5-29,5\% \text{ Ni}$; $17-18\% \text{ Co}$), имеет низкий коэффициент теплового расширения в интервале температур от -70°C до $+420^\circ\text{C}$. Его применяют для изготовления деталей, спаиваемых в стекло при создании вакуумно-плотных спаев.

ГОСТ 14082-78 «Прутки и листы из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Технические условия».

ГОСТ 14081-78 «Проволока из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Технические условия».

6.4. Сплавы с заданными упругими свойствами

Сплавы с заданными свойствами упругости, обладающие высокими упругими свойствами в сочетании с другими специальными свойствами, выпускаются по ГОСТ 10994-74 (группа 4). К таким сплавам относятся в том числе сплавы 40КХНМ ($0,07-0,12\% \text{ C}$, $15-17\% \text{ Ni}$, $19-21\% \text{ Cr}$; $6,4-7,4\% \text{ Mo}$, $39-41\% \text{ Co}$, остальное железо), 40КХНМВ7Ю (содержит также W и Al). Это высокопрочные с высокими упругими характеристиками, немагнитные, коррозионно-стойкие в агрессивных средах сплавы. Применяют их для изготовления заводных пружин часовых механизмов, витых цилиндрических пружин, работающих при температурах до 400°C .

Сплавы со стабильными упругими свойствами для работы при повышенных температурах 36НХТЮ, 17ХГНТ, 42НХТЮА (с минимальным температурным коэффициентом модуля упругости $\text{TK}_a=2\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) применяют для изготовления ответственных упругих чувствительных элементов, работающих при температурах до 250°C .

Для изготовления пружин и рессор различных машин применяются рессорно-пружинные стали, химический состав и требования к свойствам регламентируются ГОСТ 14959-79 «Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия». Настоящий стандарт распространяется на горячекатаный и кованый сортовой прокат диаметром или толщиной до 250 мм, а также прокат калиброванный и со специальной отделкой поверхности, предназначенный для изготовления пружин, рессор и других деталей машин и механизмов, применяемых в закаленном и отпущенном состоянии. Рессорно-пружинные углеродистые и легированные стали имеют высокий модуль упругости, ограничивающий упругую деформацию. Они недорогие и достаточно технологичные, применяются для изготовления жестких (силовых) упругих элементов в авто- и тракторостроении, железнодорожном транспорте, станкостроении, для силовых упругих элементов приборов. Стали должны иметь высокие пределы упругости, выносливости и релаксационную стойкость. Они должны обладать высоким пределом выносливости и достаточно высоким пределом прочности, но пластичность ограничена - 5-10% по относительному удлинению и 20-35% по относительному сужению. Это связано с тем, что в рессорах и пружинах не допускается пластическая деформация. Этим требованиям удовлетворяют стали с повышенным содержанием углерода (0,5-0,7%), которые подвергают закалке и среднему отпуску при температуре 420-520°C, что обеспечивает формирование троостита отпуска. Механические свойства проката категорий, определяемые на термически обработанных продольных образцах, должны соответствовать нормам табл. 20.

Таблица 20

Механические свойства проката категорий, определяемые на термически обработанных продольных образцах

Марка стали	Режим термической обработки (ориентировочный)			Механические свойства, не менее			
	Температура закалики, °С	Закалочная среда	Температура отпуска, °С	Предел текучести σ_T , МПа (кгс/мм ²)	Временное сопротивление σ_B , МПа(кгс/мм ²)	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
65	830	Масло	470	785(80)	980(100)	10	35

Марка стали	Режим термической обработки (ориентировочный)			Механические свойства, не менее			
	Температура закалки, °С	Закалочная среда	Температура отпуска, °С	Предел текучести σ_T , МПа (кгс/мм ²)	Временное сопротивление σ_B , МПа(кгс/мм ²)	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
70	830	Масло	470	835(85)	1030(105)	9	30
75	820	Масло	470	885(90)	1080(110)	9	30
80	820	Масло	470	930(95)	1080(110)	8	30
85	820	Масло	470	980(100)	1130(115)	8	30
60Г	830	Масло	470	785(80)	980(100)	8	30
65Г	830	Масло	470	785(80)	980(100)	8	30
70Г	830	Масло	470	835(85)	1030(105)	7	25
55С2 55С2А	870	Масло или вода	470	1175(12)	1270(130)	6	30
60С2	870	Масло	470	1175(12)	1270(130)	6	25
70С3А	850	Масло	470	1470(15)	1670(170)	6	25
60С2Г	870	Масло	470	1325(5)	1470(150)	6	25
50ХГ 50ХГА	850	Масло	470	1175(12)	1270(130)	7	35
55ХГР	850	Масло	470	1175(12)	1270(130)	7	35
60С2А	870	Масло	420	1375(14)	1570(160)	6	20
50ХФА	850	Масло	470	1080(11)	1270(130)	8	35
50ХГФА	850	Масло	470	1325(13)	1420(145)	6	35
55С2ГФ	870	Масло	470	1375(14)	1570(160)	6	25
60С2ХА	870	Масло	470	1325(13)	1470(150)	6	25
60С2ХА	870	Масло	470	1470(15)	1670(170)	6	25
65С2ВА	850	Масло	420	1665(17)	1860(190)	5	20
60С2Н2А	870	Масло	470	1325(13)	1470(150)	8	30

Углеродистые стали (65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 65Г, 70Г) характеризуются низкой прокаливаемостью и невысокой релаксационной стойкостью, особенно при нагреве, из них изготавливают пружины небольшого сечения для работы при температурах до 100°С.

Легированные рессорно-пружинные стали относятся к перлитному классу. Основными легирующими элементами в них являются кремний (1-3%), марганец (1%), а в сталях более ответственного назначения - хром (1%), ванадий (0,15%) и никель (1,7%). Легирование (за исключением кремния и марганца) мало влияет на предел упругости - главное свойство этих сталей. Более существенно оно проявляется в повышении прокаливаемости, релаксационной стойкости, предела выносливости. Дешевые кремнистые стали 55С2, 60С2, 70С3А

стойки к росту зерна при нагреве под закалку, но склонны к обезуглероживанию - опасному поверхностному дефекту, снижающему предел выносливости. В кремнемарганцевой стали 60СГА этот недостаток выражен менее сильно $\sigma_B = 1300-1800$ МПа, $\sigma_T = 1100-1600$ МПа, $\delta = 5-8\%$. Стали 50ХФА, 50ХГФА, которые по сравнению с кремнистыми и кремнемарганцевой сталями подвергают более высокому нагреву при отпуске (520°C), обладают теплостойкостью, повышенной вязкостью, меньшей чувствительностью к надрезу. Они предназначены для рессор легковых автомобилей, клапанных и других пружин ответственного назначения, которые могут работать при температурах до 300°C .

Стали 60С2ХА и 60С2Н2А применяются для крупных тяжело нагруженных и особо ответственных пружин и рессор. Механические свойства сталей определяются содержанием углерода и температурой отпуска. Отпуск проводят при температуре несколько более высокой, чем та, которая отвечает максимальному пределу упругости, что необходимо для повышения пластичности и вязкости. Наиболее высокие механические свойства имеют стали 70СЗА, 60С2ХА и 60С2Н2А: $\sigma_B = 1800$ МПа; $\sigma_T = 1600$ МПа; $\delta > 5\%$, $\psi > 20\%$. Предел упругости составляет $\sigma_y = 880-1150$ МПа, а твердость HRC 38-48. При такой прочности и твердости стали чувствительны к концентраторам напряжений, поэтому на сопротивление усталости большое влияние оказывает состояние поверхности. При отсутствии поверхностных дефектов (обезуглероживания, окалины, грубых рисок и др.) предел выносливости сталей при изгибе не ниже 500 МПа, а при кручении - 300 МПа. Для уменьшения чувствительности к концентраторам напряжений готовые пружины и листы рессор подвергают поверхностному наклепу обдубкой дробью. После упрочнения дробью предел выносливости увеличивается в 1,5-2 раза.

Для пружин и других упругих элементов специального назначения могут применяться высокохромистые мартенситные (30Х13), мартенситно-старяющиеся (03Х12Н10Д2Т), аустенитные нержавеющие (12Х18Н10Т), аустенито-мартенситные (09Х15Н8Ю), быстрорежущие (Р18) и другие стали и сплавы.

6.5. Сплавы с высоким электрическим сопротивлением

Сплавы с высоким электрическим сопротивлением применяют для изготовления электронагревателей и элементов сопротивлений (резисторов) и реостатов. Сплавы для электронагревателей обладают высокой жаростойкостью, высоким электрическим сопротивлением, удовлетворительной пластичностью в холодном состоянии.

Указанным требованиям отвечают железо-хромоалюминиевые сплавы, например марок Х13Ю4 ($\leq 0,15\%$ С; 12-15% Cr; 3,5-5,5% Al), 0Х23Ю5 ($\leq 0,05\%$ С; 21,5-23,5% Cr; 4,6-5,3 % Al), и никелевые сплавы, например марок Х15Н60 - ферронихром, содержащий 25% Fe, Х20Н80 - нихром. Стойкость нагревателей из железохромоалюминиевых сплавов выше, чем у нихромов. Сплавы выпускают в виде проволоки и ленты, применяют для бытовых приборов (сплавы Х13Ю4, Х15Н60, Х20Н80), а также для промышленных и лабораторных печей (0Х23Ю5). При выборе прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением рекомендуется использовать ГОСТ 12766.1-90 «Проволока из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением. Технические условия» и ГОСТ 12766.3-90 «Сплавы калиброванные прецизионные с высоким электрическим сопротивлением. Технические условия»

К прецизионным относятся также сверхпроводящие сплавы и термобиметаллы. Сверхпроводящие сплавы характеризуются специальными электрическими свойствами в области низких температур; термобиметаллы, представляют материал, состоящий из двух или более слоев металлов или сплавов с различными температурными коэффициентами линейного расширения, разность которых обеспечивает его упругую деформацию при изменении температуры.

7. Чугуны

7.1. Классификация и маркировка чугунов

Углерод в чугуне может содержаться в связанном состоянии в составе цементита и в свободном состоянии в виде графита. В зависимости от формы графита и количества цементита различают белый, серый, ковкий и высокопрочный чугуны. Чугун значительно дешевле стали, но в некоторых случаях по эксплуатационным характеристикам не уступает или даже превосходит сталь и является важным конструкционным материалом. Для улучшения свойств чугуны легируют Cr, Ni, V, Al и другими элементами.

В белом чугуне весь углерод находится в виде цементита. Структура такого чугуна - перлит, ледебурит и цементит. Такое название этот чугун получил из-за светлого металлического цвета излома.

Серый чугун это сплав железа, кремния (от 1,2-3,5 %) и углерода, содержащий также постоянные примеси Mn, P, S. В структуре таких чугунов большая часть или весь углерод находится в виде графита пластинчатой формы. Излом такого чугуна из-за наличия графита имеет серый цвет.

Ковкий чугун получают длительным отжигом белого чугуна, в результате которого образуется графит хлопьевидной формы. Металлическая основа такого чугуна: феррит и реже перлит. Ковкий чугун получил свое название из-за повышенной пластичности и вязкости (хотя обработке давлением не подвергается). Ковкий чугун обладает повышенной прочностью при растяжении и высоким сопротивлением удару. Из ковкого чугуна изготавливают детали сложной формы: картеры заднего моста автомобилей, тормозные колодки, тройники, угольники и т.д. Маркируется ковкий чугун двумя буквами и двумя числами, например КЧ 370-12. Буквы КЧ означают ковкий чугун, первое число - предел прочности (в МПа) на разрыв, второе число - относительное удлинение (в процентах), характеризующее пластичность чугуна.

Высокопрочный чугун имеет в своей структуре шаровидный графит, который образуется в процессе кристаллизации. Шаровидный графит ослабляет металлическую основу не так сильно как пластинчатый и не является концентратором напряжений.

Чугун, в структуре которого углерод содержится частично в виде графита и в составе цементита, называется половинчатым. Структурные составляющие такого чугуна - перлит, ледебурит и пластинчатый графит.

В зависимости от содержания углерода серый чугун будет доэвтектическим (2,14-4,3% углерода), эвтектическим (4,3%) или заэвтектическим (4,3-6,67%). Состав сплава влияет на структуру материала.

В зависимости от состояния и содержания углерода в чугуне различают: белые и серые (по цвету излома, который обуславливается структурой углерода в чугуне в виде карбида железа или свободного графита), высокопрочные с шаровидным графитом, ковкие чугуны, чугуны с вермикулярным графитом. В белом чугуне углерод присутствует в виде цементита, в сером - в основном в виде графита.

В промышленности разновидности чугуна маркируются следующим образом:

- передельный чугун - П1, П2;
- передельный чугун для отливок (передельно-литейный) - ПЛ1, ПЛ2;
- передельный фосфористый чугун - ПФ1, ПФ2, ПФ3;
- передельный высококачественный чугун - ПВК1, ПВК2, ПВК3;
- чугун с пластинчатым графитом – СЧ, цифры после букв «СЧ», обозначают величину временного сопротивления разрыву в кгс/мм²);
- антифрикционный чугун;
- антифрикционный серый - АЧС;
- антифрикционный высокопрочный - АЧВ;
- антифрикционный ковкий - АЧК;
- чугун с шаровидным графитом для отливок - ВЧ (цифры после букв «ВЧ» означают временное сопротивление разрыву в кгс/мм² и относительное удлинение (%);
- чугун легированный со специальными свойствами - Ч.

При выборе чугуна в качестве материала для заданного изделия необходимо руководствоваться следующими стандартами:

ГОСТ 1585-85 «Чугун антифрикционный для отливок. Марки. Область применения: настоящий стандарт распространяется на антифрикционный чугун для отливок, работающих в узлах трения со смазкой, и устанавливает марки, определяемые химическим составом, микроструктурой и твердостью».

ГОСТ 7293-85 «Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки. Область применения: настоящий стандарт распространяется на чугун для отливок, имеющий в структуре графит шаровидной или вермикулярной формы, и устанавливает марки чугуна, определяемые на основе механических свойств».

ГОСТ 7769-82 «Чугун легированный для отливок со специальными свойствами. Марки. Область применения: настоящий стандарт распространяется на легированные чугуны для отливок с повышенной жаростойкостью, коррозионной стойкостью, износостойкостью или жаропрочностью».

ГОСТ 28394-89 «Чугун с вермикулярным графитом для отливок. Марки. Область применения: настоящий стандарт устанавливает марки чугуна для отливок, имеющего в структуре графит вермикулярной формы (ВГ) с количеством шаровидного графита не более 40 %, определяемые на основе механических свойств».

7.2. Термическая обработка чугуна

Отжиг для снятия внутренних напряжений. Этому виду отжига подвергают чугуны при следующих температурах: серый чугун с пластинчатым графитом - при 500-570°C; высокопрочный чугун с шаровидным графитом - при 550-650°C; высоколегированный чугун (типа «кирезист») - при 620-650°C. Скорость нагрева составляет примерно 70-100 град/ч, выдержка при температуре нагрева зависит от массы и конструкции отливки и составляет от 1 до 8 ч.

Охлаждение до 200°C медленное, со скоростью 20-50 град/ч, что достигается охлаждением отливки вместе с печью. Далее отливки охлаждаются на воздухе. При этом отжиге не происходит фазовых превращений, снимаются внут-

ренные напряжения, повышается вязкость, исключается коробление и образование трещин в процессе эксплуатации.

Смягчающий отжиг (отжиг графитизирующий низкотемпературный) проводят для улучшения обрабатываемости резанием и повышения пластичности. Его осуществляют продолжительной выдержкой при 680-700°C (ниже точки A_{c1}) или медленным охлаждением отливок при 760-700°C. Время выдержки должно быть достаточным для полного или необходимого частичного распада эвтектоидного цементита. Охлаждение медленное для деталей сложной конфигурации.

В результате такого отжига в структуре чугунов увеличивается количество феррита.

Нормализация (серого и ковкого чугуна) проводится при температуре 850-950°C. Время выдержки должно быть достаточным для насыщения аустенита углеродом и в зависимости от конфигурации изделий составляет от 1 до 3 ч. Охлаждение ускоренное, чтобы аустенит смог превратиться в перлит, и чаще всего осуществляется на воздухе.

Для деталей сложной формы охлаждение с температуры 600-550°C должно быть замедленным, чтобы уменьшить величину термических напряжений.

В результате нормализации получается структура: перлит + графит - и повышается прочность и износостойкость. После нормализации для снятия внутренних напряжений применяется высокий отпуск при 650-680°C с выдержкой 1-1,5 ч.

Закалка и отпуск чугунов. Для закалки чугун нагревают до 850-950°C. Скорость нагрева изделий сложной формы меньше, чем изделий простой формы. Время выдержки обычно составляет от 1 до 3 ч. Охлаждение осуществляют в воде или масле. При закалке аустенит превращается в неравновесные структуры: мартенсит или троостит + графит.

После закалки проводят отпуск при температуре 200-600°C. В результате повышаются твердость, прочность и износостойкость чугуна. При изотермической закалке чугун нагревают так же, как и при обычной закалке, выдерживают

от 10 до 90 мин и охлаждают в расплавленной соли при 200-400°C. При этом происходит изотермический распад аустенита с образованием структуры: игольчатый троостит + графит.

В результате изотермической закалки повышаются твердость и прочность, но сохраняется пластичность.

Возможна поверхностная закалка кислородно-ацетиленовым пламенем, токами высокой частоты или в электролите. Температура нагрева - 900-1000°C. Охлаждение - в воде, масле или масляной эмульсии. При поверхностной закалке в поверхностном слое образуются структуры: мартенсит + графит или троостомартенсит + графит. После отпуска при 200-600°C и охлаждения на воздухе повышаются твердость, прочность и износостойкость поверхностного слоя при наличии мягкой сердцевины.

8. Выбор материалов и режимов термической обработки для заданных изделий

8.1. Методические указания к выполнению курсовой работы

Курсовая работа состоит из решения трех задач и предусматривает обоснованный выбор материала для конкретного изделия и разработку технологии его термической обработки, при использовании которых в наибольшей степени обеспечиваются надежность и стойкость деталей в условиях эксплуатации, указанных в каждой отдельной задаче. Как правило, в задачах приведены наиболее типичные условия использования изделий, имеющие место в разных отраслях промышленности. Кроме того, в задачах сформулированы характерные свойства, которые должен иметь сплав в соответствующем изделии. Для решения

задачи необходимо прежде всего определить группу сплавов (например, конструкционных сталей общего назначения, чугунов, жаропрочных сталей и сплавов, инструментальных сталей или других материалов), обладающих свойствами, близкими к требуемым. Для этой цели рекомендуется ознакомиться с классификацией, составом и назначением основных материалов, используемых в технике и приведенных в предыдущих разделах данного пособия. Более подробные сведения по этому вопросу содержатся в гл. XXVII учебного пособия [2]. Затем для окончательного определения наиболее пригодного сплава из числа приведенных в выбранной группе и рекомендации режима его обработки необходимо в качестве общего правила рассмотреть возможность использования более дешевого материала, например для деталей машин - углеродистой стали обыкновенного качества или серого чугуна. Свойства основных материалов приведены в учебниках и в указанной ниже справочной литературе. Если при рассмотрении свойств намечаемых сплавов окажется, что они не удовлетворяют требованиям задачи, например, по прочности или по вязкости, то следует рассмотреть возможность их улучшения выбором термической или химико-термической обработки. Дорогие легированные стали, содержащие никель, вольфрам, молибден или цветные сплавы, следует рекомендовать в тех случаях, когда выбор более дешевых материалов не может обеспечить удовлетворения требований, указанных в задаче. Сделанный выбор сплава надо обосновать. Если для улучшения свойств выбранного материала нужны термическая или химико-термическая обработки, то необходимо указать их режимы, получаемую структуру и свойства. При рекомендации режимов обработки необходимо также указывать наиболее экономичные и производительные способы, например для деталей, изготавливаемых в больших количествах, - обработку с индукционным нагревом, газовую цементацию (при необходимости химико-термической обработки) и др. Для деталей, работающих в условиях переменных нагрузок, например для валов, зубчатых колес многих типов, необходимо рекомендовать обработку, повышающую предел выносливости (в зависимости от рекомендуемой стали к ним относятся: цементация, цианирование, азотирование, закалка с

индукционным нагревом, обработка дробью). Для получения навыков в выборе материала и обосновании принимаемых рекомендаций ниже приведены примеры решения двух задач - по конструкционным сталям (№ 1.1) и инструментальным сталям (№ 3.1). В пояснительной записке решение задачи сопровождается описанием фазовых и структурных превращений в выбранном сплаве при термической обработке, указывается конечная структура и ее эксплуатационные характеристики. При решении задач и описания структуры и свойств выбранных сплавов помимо рекомендованного библиографического списка литературы необходимо использовать ГОСТы, справочники и другие литературные источники.

Оформление курсовой работы осуществляется в соответствии с требованиями стандартов ЛГТУ «СТО-12-2012 Стандарт организации. Студенческие работы: виды, требования к структуре и оформлению», (п. 7.4.1) и «СТО-13-2011. Стандарт организации. Студенческие работы. Общие требования к оформлению», (п. 3, Прил. 1).

При составлении этого раздела использованы задачи, приведенные в учебном пособии [2].

8.2. Задачи по конструкционным сталям и чугунам

№ 1.1. Заводу нужно изготовить вал диаметром 70 мм для работы с большими нагрузками. Сталь должна иметь предел текучести не ниже 735 МПа (75 кгс/мм^2), предел выносливости не ниже 392 МПа (40 кгс/мм^2) и ударную вязкость КСУ не ниже $0,88 \text{ МДж/м}^2$ (9 кгс-м/см^2).

Завод имеет сталь трех марок: Ст 4, 45 и 20ХН3А. Какую из этих сталей следует применить для изготовления вала?

Нужна ли термическая обработка выбранной стали и если нужна, то какая? Дать характеристику микроструктуре и указать механические свойства после окончательной термической обработки.

Решение задачи № 1.1

Стали марок Ст 4, 45 и 20ХНЗА имеют химический состав, приведенный в табл. 21. Сталь марки Ст 4 согласно ГОСТ имеет следующие свойства в состоянии поставки (после прокатки иликовки): предел прочности $\sigma_B = 412-530$ МПа ($42-54$ кгс/мм²), предел текучести $\sigma_{0,2} = 235-255$ МПа ($24-26$ кгс/мм²), относительное удлинение $\delta = 21$ %.

Таблица 21

Химический состав сталей, %

Сталь	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
Ст 4	0,18-0,27	0,40-0,70	0,12-0,30	≤0,3	≤0,3	≤0,050	≤0,040
Ст 45	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	≤0,25	≤0,25	≤0,045	≤0,040
20ХНЗА	0,17-0,23	0,30-0,60	0,17-0,37	0,60-0,90	2,75-3,15	≤0,025	≤0,025

Сталь 45, согласно ГОСТ, в состоянии поставки (после прокатки и отжига) имеет твердость не более НВ 2030(207). При твердости НВ 1863-1960(190-200) сталь имеет предел прочности не выше 588-608 МПа ($60-62$ кгс/мм²), а при твердости ниже НВ=1765 МПа(180 кгс/мм²) предел прочности не превышает 539-588 МПа($55-60$ кгс/мм²). Для отожженной углеродистой стали отношение предела текучести к пределу прочности $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ составляет примерно 0,5. Следовательно, предел текучести стали 45 в этом состоянии не превышает 265-314 МПа ($27-32$ кгс/мм²).

Сталь 20ХНЗА, согласно ГОСТ, в состоянии поставки (после прокатки и отжига) имеет твердость не более НВ =2452МПа(250 кгс/мм²). Следовательно, предел прочности при твердости НВ =2255-2452МПа($230-250$ кгс/мм²) не превышает 657-735 МПа ($67-75$ кгс/мм²) и может быть ниже 588МПа (60 кгс/мм²) для плавок с более низкой твердостью. Тогда предел текучести составляет 345-392 МПа ($35-40$ кгс/мм²), так как отношение предела текучести к пределу прочности $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ для отожженной легированной стали 0,5-0,6.

Таким образом, для получения заданной величины предела текучести вал необходимо подвергнуть термической обработке.

Для низкоуглеродистой стали Ст 4 улучшающее влияние термической обработки незначительно. Кроме того, Ст 4 как сталь обыкновенного качества имеет повышенное содержание серы и фосфора (см. табл.21), которые понижают механические свойства и особенно сопротивление ударным нагрузкам.

Для такого ответственного изделия как вал двигателя, поломка которого нарушает работу машины, применение более дешевой по составу стали обыкновенного качества нерационально.

Сталь 45 относится к классу качественной углеродистой, а сталь 20ХНЗА - к классу высококачественной легированной стали. Они содержат соответственно 0,42-0,50 и 0,17-0,23% С и принимают закалку. Для повышения прочности можно применять нормализацию или закалку с высоким отпуском.

Последний вариант обработки сложнее, но позволяет получить не только более высокие характеристики прочности, но и более высокую вязкость. В стали 45 минимальные значения ударной вязкости КСУ после нормализации составляют 0,20-0,29 МДж/м² (2-3 кгс-м/см²), а после закалки и отпуска с нагревом до 500°С достигают 0,59-0,69 МДж/м² (6-7 кгс -м/см²).

Так как вал двигателя воспринимает в работе динамические нагрузки, а также и вибрации, более целесообразно применить закалку и отпуск. После закалки в воде углеродистая сталь 45 получает структуру мартенсита. Однако вследствие небольшой прокаливаемости углеродистой стали эта структура в изделиях диаметром более 20-25 мм образуется только в сравнительно тонком поверхностном слое толщиной до 2-4 мм.

Последующий отпуск вызывает превращение мартенсита и троостита в сорбит только в тонком поверхностном слое, но не влияет на структуру и свойства перлита и феррита в основной массе изделий. Сорбит отпуска обладает более высокими механическими свойствами, чем феррит и перлит.

Наибольшие напряжения от изгиба, кручения и повторно переменных нагрузок воспринимают наружные слои, которые и должны обладать повышенными механическими свойствами. Однако в сопротивлении динамическим

нагрузкам, которые воспринимает вал, участвуют не только поверхностные, но и внутренний слой металла.

Таким образом, углеродистая сталь не будет иметь требуемых свойств по сечению вала диаметром 70 мм.

Сталь 20ХНЗА легирована никелем и хромом для повышения прокаливаемости и закаливаемости. Она получает после закалки достаточно однородные структуру и механические свойства в сечении диаметром до 75 мм.

Для стали 20ХНЗА рекомендуется термическая обработка:

1. Закалка с 820-835°C в масле.

При закалке с охлаждением в масле (а не в воде, как это требуется для углеродистой стали) возникают меньшие напряжения, а следовательно и меньшая деформация. После закалки сталь имеет структуру мартенсит и твердость не ниже HRC 50.

2. Отпуск 520-530°C. Для предупреждения отпускной хрупкости, к которой чувствительны стали с хромом (марганцем), вал после нагрева следует охлаждать в масле.

Механические свойства стали 20ХНЗА в изделии диаметром до 75 мм после термической обработки:

- предел прочности $\sigma_{в}$ = 883-9807 МПа (90-100 кгс/мм²);
- предел текучести $\sigma_{0,2}$ = 735-785 МПа (75-80 кгс/мм²);
- предел выносливости σ_{-1} = 392-422 МПа (40-43 кгс/мм²);
- относительное удлинение δ = 8-10%;
- относительное сужение Ψ = 45-50 %;
- ударная вязкость КСУ = 0,88 МДж/м² (9 кгс м/см²).

Таким образом, эти свойства обеспечивают требования, сформулированные в задаче для вала диаметром 70 мм.

№ 1.2. Станкостроительный завод изготавливает шпиндели токарных станков. Шпиндели работают с большой скоростью в условиях повышенного износа, поэтому твердость в поверхностном слое должна быть HRC 58-62.

Выбрать стали для шпинделей диаметром 40 и 75 мм. Привести состав и марку выбранной стали и рекомендовать режим обработки, обеспечивающей получение заданной твердости в поверхностном слое.

Указать структуру стали в поверхностных слоях и в сердцевине шпинделя, механические свойства сердцевины после окончательной термической обработки.

№ 1.3. Заводу необходимо изготовить шпиндели для токарных станков, работающих в условиях износа, и для шлифовальных станков, которые, кроме того, должны обеспечить высокую точность обработки. Поэтому деформация шпинделей шлифовальных станков при окончательной термической обработке должна быть минимальной, а шпиндели, также должны иметь повышенную износостойкость.

Выбрать стали для шпинделей обоих типов и рекомендовать режим обработки. Указать структуру стали и твердость поверхностного слоя и сердцевины после окончательной обработки.

№ 1.4. Станины станков изготавливают литьем. Предел прочности должен быть 196-245 МПа (20-25 кгс/мм²).

Выбрать марку сплава, пригодного для изготовления станины, имеющей неодинаковую толщину в разных сечениях, и указать режим термической обработки станины и структуры сплава.

При решении задачи учесть, что в литой детали необходимо иметь возможно меньше напряжений и термическая обработка должна предупредить деформацию (коробление) станины в процессе эксплуатации станка.

№ 1.5. Коленчатый вал двигателя легкового автомобиля экономично изготавливать из чугуна - материала малочувствительного, кроме того, к надрезу. Для этого назначения используют чугун повышенного качества. Выбрать класс и марку чугуна с пределом прочности не ниже 392 МПа (40 кгс/мм²) и относительным удлинением 2-3%. Указать структуру выбранного чугуна и форму выделения графита и объяснить, какие изменения в этом случае надо внести в условия выплавки.

№ 1.6. Блоки цилиндров двигателей трактора изготавливают из чугуна с твердостью HB 1667-2363 МПа(170-241 кгс/мм²) и повышенной прочностью и износостойкостью.

Выбрать марку чугуна, привести его структуру и механические свойства и указать, каким должен быть его состав для того, чтобы обеспечить получение заданных свойств чугуна.

Каковы должны быть требования к химическому составу и структуре чугуна, если цилиндры нагреваются в работе до 500-600°С?

№ 1.7. Конические зубчатые колеса диаметром 50 мм в электротележке работают в условиях динамических нагрузок и повышенного износа. По требованию конструктора сталь должна обладать высокой вязкостью в сердцевине.

Выбрать углеродистую цементуемую сталь, указать состав, рекомендовать режим термической обработки для получения максимальной вязкости в сердцевине изделия, если цементация выполняется в твердом карбюризаторе. Одновременно для сравнения указать режим термической обработки для цементации в газовой среде.

Указать механические свойства стали в сердцевине изделия и твердость на поверхности после окончательной термической обработки и объяснить, целесообразно ли применение для этой цели стали обыкновенного качества.

№ 1.8. Палец шарнира диаметром 30 мм работает на изгиб, и срез должен, кроме того, обладать высокой износостойкостью на поверхности и высокой вязкостью в сердцевине.

Выбрать углеродистую сталь, привести ее состав и марку, рекомендовать режим химико-термической и термической обработки и указать структуру, механические свойства в сердцевине и твердость на поверхности после окончательной обработки.

Указать желательную толщину твердого поверхностного слоя. Объяснить, в каких случаях необходимо выбрать легированную сталь и какие механические свойства можно гарантировать в стали указанных различных типов.

№ 1.9. Заводу нужно изготовить зубчатые колеса сложной формы диаметром 50 мм и высотой 100 мм. Они должны иметь твердость на поверхности не ниже HRC 58-60, а в сердцевине предел прочности не ниже 392 МПа (40 кгс/мм²) и ударную вязкость не ниже 0,49-0,59 МДж/м² (5-6 кгс-м/см²). Завод изготовил первую партию зубчатых колес из углеродистой цементуемой стали, однако некоторые зубчатые колеса получили деформацию при закалке.

Выбрать сталь и рекомендовать режим термической обработки после цементации для получения заданных механических свойств и предупреждения брака по деформации. Указать структуру стали в сердцевине и поверхностном слое после окончательной обработки и причины, вызывающие деформацию при закалке.

№ 1.10. Стаканы цилиндров мощных моторов должны иметь особо повышенную износостойкость на рабочей поверхности, высокую твердость (HV=950-1000), и высокие механические свойства в сердцевине: предел текучести должен быть не менее 735 МПа (75 кгс/мм²).

Указать применяемую для этого марку стали и рекомендовать режим термической и химико-термической обработки. Сопоставить последовательность применяемых при этом термических операций, продолжительность химико-термической обработки, толщину, структуру и твердость поверхностного слоя и сравнить выбранные сталь и режим обработки с составом стали и обработкой, применяемой при цементации или цианировании.

№ 1.11. Завод изготавливает коленчатые валы диаметром 35 мм; сталь в готовом изделии должна иметь предел текучести не ниже 30 кгс/мм² и ударную вязкость не ниже 0,49 МДж/м² (5 кгс-м/см²). Кроме того, вал должен обладать повышенной износостойкостью не по всей поверхности, а только в шейках, т. е. в участках, сопряженных с подшипниками и работающих на истирание.

Привести марку стали, рекомендовать режим термической обработки всего вала для получения заданных свойств и высокопроизводительный режим последующей термической обработки, повышающей твердость только в отдельных участках поверхности вала; указать необходимое для этого оборудование.

Привести структуру и твердость стали в поверхностном слое шейки вала и структуру и механические свойства в остальных участках.

№ 1.12. Многие крупные детали для железнодорожного транспорта, например автосцепки, изготавливают литыми. Для повышения механических свойств отливки подвергают термической обработке.

Выбрать марку стали и обосновать режим термической обработки, если предел прочности должен быть не ниже 343 МПа (35 кгс/мм²).

Указать структуру и механические свойства стали после литья и после термической обработки.

№ 1.13. Отдельные детали автомобиля (тормозные колодки, ступицы колес и др.), имеющие сравнительно сложную форму и работающие в условиях динамических нагрузок, можно изготавливать не из стали, а из чугуна, что дает существенную экономию в изготовлении. Однако при этом необходимо, чтобы чугун обладал высокими механическими свойствами.

Рекомендовать способ изготовления чугуна с пределом прочности не ниже 35 кгс/мм² и относительным удлинением не ниже 8-10% и указать его микроструктуру и область применения.

Указать марку, химический состав и механические свойства стали, которую можно применить для изготовления аналогичных изделий.

№ 1.14. Завод изготавливал червячные колеса диаметром 150 мм и толщиной 40 мм из серого чугуна. В дальнейшем потребовалось изготовить колеса из чугуна, обладающего пределом прочности в 1,5 раза более высоким, и относительным удлинением не менее 2-3%.

Указать структуру и предел прочности серого чугуна, обладающего наиболее высокими механическими свойствами, которые можно получить в отливке указанной толщины.

Привести способ получения чугуна, имеющего прочность в 1,5 раза больше прочности указанного серого чугуна, и охарактеризовать его структуру.

№ 1.15. Завод изготавливает чугунные детали двух типов: а) массивные сложной формы (без внутренних отверстий); б) тонкостенные.

Детали воспринимают в эксплуатации динамические нагрузки. Поэтому чугун в обоих случаях должен иметь повышенные механические свойства, в том числе относительное удлинение не ниже 2%.

Выбрать тип и марку чугуна для деталей каждого из указанных типов и обосновать сделанный обзор.

№ 1.16. Для изготовления вкладышей подшипников некоторых механизмов вместо цветных металлов (латуни и бронзы) успешно применяют более дешевый антифрикционный серый чугун.

Указать, какая структура металлической основы серого чугуна и форма выделения графита являются наиболее пригодными для того, чтобы обеспечить повышенную износостойкость вкладыша.

Привести примерные механические свойства выбранного чугуна, если наименьшая толщина вкладыша составляет 15-20 мм.

№ 1.17. В практике литья тонкостенных изделий из серого чугуна иногда получают отливки с поверхностным слоем повышенной твердости, что затрудняет механическую обработку.

Указать причины получения повышенной твердости в поверхностном слое, его структуру и режимы термической обработки для снижения твердости таких отливок.

Для каких назначений необходимо получение в изделиях поверхностного слоя высокой твердости? Указать способы отливки, обеспечивающие получение такого слоя.

№ 1.18. Несущие конструкции современных морских и речных судов должны иметь повышенные габариты и массу, если их изготавливают из углеродистой строительной стали обыкновенного качества. Выбрать марку строительной стали с примерно таким же относительно низким содержанием углерода, но с пределом текучести в 1,5 раза более высоким, чем у стали марки Ст 3, и хорошей свариваемостью. Объяснить, какими путями может быть достигнуто указанное улучшение свойств.

№ 1.19. Рессоры грузового автомобиля изготавливают из качественной легированной стали; толщина рессоры до 10 мм. Сталь в готовой рессоре должна обладать высокими пределами прочности, выносливости и упругости.

Рекомендовать режим термической обработки, структуру и механические свойства, которые можно получить при правильном выборе состава стали и обработки рессоры.

Объяснить, как влияет состояние поверхности на качество рессоры, и указать способ обработки поверхностного слоя, позволяющий повысить предел выносливости.

№ 1.20. Рессоры трехтонного грузового автомобиля изготавливаются из листов стали 60С2 толщиной 10 мм, которые после закалки и отпуска должны получить высокую прочность по всему сечению.

Для автомобиля большей грузоподъемности рессоры должны быть толщиной 20 мм, и тогда в стали 60С2 уже нельзя обеспечить равномерного упрочнения по всему сечению.

Рекомендовать марку стали для подобных рессор и режим термической обработки, позволяющий получить высокую прочность по всему сечению.

№ 1.21. В сложных механизмах применяют зубчатые колеса нескольких типов; их изготавливают из разных материалов и подвергают различной термической обработке. Завод изготавливает зубчатые колеса:

1) цементованные, имеющие предел прочности в сердцевине 637-686 МПа ($65-70 \text{ кгс/мм}^2$) и ударную вязкость не менее $0,78 \text{ МДж/м}^2$ (8 кгс-м/см^2);

2) азотированные, имеющие предел прочности в сердцевине 932-980 МПа ($95-100 \text{ кгс/мм}^2$) и ударную вязкость не менее $0,88 \text{ МДж/м}^2$ (9 кгс-м/см^2);

3) из термически улучшенной стали с пределом прочности 883-980 МПа ($90-100 \text{ кгс/мм}^2$) и ударной вязкостью не ниже $0,59 \text{ МДж/м}^2$ (6 кгс-м/см^2);

4) из алюминиево-железистой бронзы твердостью НВ 2157-2255 (220-230).

Выбрать марки сплавов, привести их химический состав, обработку и структуру, необходимые для получения указанных механических свойств. Сравнить режим обработки и, учитывая свойства, полученные в готовом изде-

лии, определить, для каких условий эксплуатации наиболее рационально использовать зубчатые колеса каждого из перечисленных типов.

При решении можно принять, что зубчатые колеса всех типов имеют одинаковые диаметр (50 мм) и высоту (80 мм).

№ 1.22. Завод проводит термическую обработку массовых партий зубчатых колес диаметром 50 мм из стали марки 20 в термическом цехе. Зубчатые колеса поступали в термический цех из механического цеха, а затем вновь возвращались для окончательной обработки в механический цех.

Для повышения производительности и сокращения длительности производственного цикла завод изменил марку стали и начал выполнять закалку с индукционного нагрева. Это позволило проводить термическую обработку непосредственно в потоке механического цеха.

Привести марку стали, из которой следует изготавливать зубчатые колеса, закаливаемые с индукционного нагрева.

Указать технологический режим обоих процессов термической обработки и сравнить их по продолжительности операций.

№ 1.23. Поршневые пальцы диаметром 30 мм и длиной 50 мм должны иметь по условиям работы вязкую сердцевину и твердую поверхность, хорошо сопротивляющуюся износу (HRC 58-62).

Указать режим обработки, обеспечивающий получение требуемых свойств, если пальцы изготавливают массовыми партиями из сталей 20 и 45.

Привести химический состав сталей 20 и 45 и сравнить продолжительность выдержки изделий из стали 20 при цементации и из стали 45 при других способах обработки для получения поверхностного твердого слоя толщиной 0,8-1,0 мм.

Указать цикл всех операций термической обработки поршневых пальцев из этих сталей и механические свойства в сердцевине изделия из сталей 20 и 45.

№ 1.24. В термическом цехе обрабатывают зубчатые колеса диаметром 30 мм, изготовленные из стали 20Х. Цех отказался от выполнения цементации в

твердом карбюризаторе и наметил более производительный процесс жидкого цианирования.

Сравнить условия и режим всего цикла химико-термической и термической обработки зубчатых колес в случае выполнения цементации в твердом карбюризаторе и цианирования. Требуемая толщина поверхностного твердого слоя 0,4-0,6 мм. Указать микроструктуру и твердость на поверхности и механические свойства в сердцевине после окончательной обработки.

№ 1.25. Стаканы цилиндров двигателей внутреннего сгорания с толщиной стенки 40 мм должны обладать высоким сопротивлением износу на поверхности. На заводе эти детали изготавливают из стали 20 с последующей цементацией и термической обработкой.

В дальнейшем завод начал изготавливать цилиндры более ответственного назначения с повышенной износостойкостью и твердостью на поверхности не ниже HV 950-1000. Эту твердость сталь должна сохранить при нагреве до 300-400°C.

Указать сталь, которую необходимо выбрать для этой цели, и изменения, которые следует внести в технологический процесс термической и химико-термической обработки.

Сравнить оба процесса обработки по последовательности и продолжительности операций, а также механические свойства и твердость на поверхности и в нижележащих слоях, получаемые в результате изменения химического состава стали и применения каждого из этих процессов.

№ 1.26. Для повышения износостойкости стаканов цилиндров мощных двигателей внутреннего сгорания применяют азотирование. Выбрать сталь, пригодную для азотирования, привести химический состав, рекомендовать режим термической обработки и режим азотирования и указать твердость поверхностного слоя и механические свойства нижележащих слоев в готовом изделии.

Сравнить: а) твердость, получаемую при азотировании, с получаемой при цементации; б) температуры, до которых может быть сохранена твердость азо-

тированного и цементованного слоев; в) при каком из этих процессов меньше деформация детали.

8.3. Задачи по специальным сталям и сплавам

№ 2.1. Выбрать марку стали для изготовления болтов, если их обрабатывают на быстроходных станках-автоматах, на которых надо обеспечить максимальную производительность резания и получить высокую чистоту обрабатываемой поверхности; болты не воспринимают в конструкции значительных нагрузок. Указать марку, химический состав, механические свойства и назначение стали этого типа. Объяснить влияние отдельных элементов, присутствующих в этой стали.

Привести для сравнения состав, структуру и механические свойства цветного сплава высокой обрабатываемости, применяемого для аналогичного назначения.

№ 2.2. Козырьки и черпаки землечерпательных машин, изготовленные из углеродистой стали, быстро изнашиваются при интенсивной работе по грунту.

Применение легированной стали с аустенитной структурой, обладающей повышенной износостойкостью при ударных нагрузках, позволяет повысить стойкость козырьков и черпаков в несколько раз.

Привести химический состав стали, применяемой для этого, а также режим термической обработки, структуры и свойства и объяснить причины повышенной износостойкости в указанных условиях эксплуатации.

Указать для сравнения, какую сталь следует применить для изготовления деталей, работающих в условиях трения качения одного металла по другому, не сопровождающегося ударами.

№ 2.3. Щеки и шары машин для дробления руды и камней работают в условиях повышенного износа, сопровождаемого ударами.

Выбрать сталь для изготовления щек и шаров, указать ее химический состав и свойства, в том числе обрабатываемость резанием на станках и поведение в работе.

Рекомендовать наиболее эффективный технологический процесс изготовления и режим термической обработки щек и шаров. Указать структуру стали в готовом изделии.

№ 2.4. Завод изготавливает среднемодульные цилиндрические зубчатые колеса из стали 45 и упрочняет их способом индукционной закалки при поверхностном нагреве. Однако впадина зубьев при такой обработке не закаливается, что мешает высокой долговечности колес.

Рекомендовать: а) марку стали и обработку, обеспечивающую закалку зубчатых колес по всему контуру, а следовательно, с упрочнением зубьев по всей их поверхности; б) привести для сравнения состав углеродистой или низколегированной стали, пригодной для изготовления зубчатых колес, упрочняемых методом химико-термической обработки.

№ 2.5. В шестернях, изготовленных из стали 40Х и обработанных на твердость HRC 40-42, в эксплуатации при повышенных напряжениях, в том числе динамических нагрузках, возникали трещины при низких температурах в условиях Севера.

Объяснить причины, вызывающие этот брак, и рекомендовать марку улучшаемой стали, вязкость которой мало уменьшается при понижении температуры с +20 и до -60°C.

№ 2.6. Рекомендовать состав (марку) стали и способ ее металлургического передела для шестерен ответственного назначения в механизмах, работающих при температурах от -60 до +60°C. Предел текучести должен быть не ниже 735-785 МПа (75-80 кгс/мм²). Объяснить, какие факторы способствуют понижению порога хладноломкости, и указать режим термической обработки и механические свойства готового изделия.

№ 2.7. Детали холодильных машин во избежание хрупкого разрушения изготавливают из сталей и сплавов с пониженным порогом хладноломкости и соответственно повышенной вязкостью при низких температурах.

Рекомендовать состав стали для деталей холодильных машин, работающих при температурах: а) до 70°C, б) до 259°C (в среде жидкого водорода).

Объяснить, какие отличия в структуре, а следовательно, и в составе должны быть между этими сталями.

№ 2.8. Для изготовления пружин приборов завод применяет сталь 70С2ХА, обрабатываемую на твердость HRC 40-44. Однако пружины из этой стали при нагреве даже в области климатических температур изменяют свои характеристики в связи с изменением модуля упругости. Это снижает точность работы приборов.

Рекомендовать сплав для изготовления пружин, модуль упругости которого почти не изменяется при температурах от -50 до +100°C. Сопоставить режим упрочняющей обработки стали 70С2ХА и выбранного сплава.

№ 2.9. Детали гидронасосов, в частности клапаны, изготавливали из стали 40Х. Однако в дальнейшем в новых более мощных насосах, в которых скорость движения потока жидкости резко возросла, поверхность клапанов из стали 40Х быстро разрушалась.

Объяснить причины, по которым это изменение условий службы вызвало разрушение клапанов, и какие явления этому способствовали.

Рекомендовать состав стали, стойкой: а) в условиях большой скорости потока воды; б) для насосов перекачки морской воды.

№ 2.10. Котлы многих тепловых электростанций работают при давлении пара 49 МПа (500 ат) и температуре 600°C. В этом случае для котлов нужны стали с высоким сопротивлением ползучести. Указать марку, химический состав и структуру стали, пригодной для работы в указанных условиях.

Сравнить характеристики выбранной стали со свойствами другой стали, обычно применяемой для котлов, работающих при температурах 300-400°C.

№ 2.11. Сталь, применяемая для пароперегревателей котлов высокого давления, должна сохранять повышенные механические свойства при длительных нагрузках при температурах порядка 500°C и иметь достаточно высокую пластичность для возможности выполнения холодной деформации (гибки, завальцовки и т.п.) при сборке котла.

Указать химический состав, микроструктуру и механические свойства стали при комнатной и при повышенной температурах (400-500°C). Объяснить основные отличия выбранной стали от углеродистой котельной стали.

№ 2.12. Многие детали установок расщепления нефти, в частности трубы печей, подвержены действию высоких температур.

Выбрать состав стали для труб, не испытывающих больших нагрузок, но нагреваемых в работе до 450-500 и до 600°C.

Указать режим термической обработки и микроструктуру стали, а также объяснить роль легирующих элементов, позволяющих использовать эти стали для длительной работы при высоких температурах.

№ 2.13. Многие детали паровых турбин, например лопатки, работают при повышенных температурах (400-500°C) и в условиях воздействия пара и влаги. Сталь этого назначения должна обладать устойчивостью против ползучести и коррозии.

Выбрать марку стали для лопаток и указать ее химический состав, а также режим термической обработки и микроструктуру и в готовом изделии.

Привести механические свойства выбранной стали при 20°C и при 500°C; сравнить их со свойствами углеродистой качественной стали, имеющей одинаковое содержание углерода.

Указать, в каком направлении надо изменить химический состав и микроструктуру стали при необходимости повышения температуры работы деталей до 600-650°C.

№ 2.14. Лопатки реактивных и турбореактивных двигателей работают в окислительной среде при высоких температурах (до 800-900°C). Сплавы, из которых изготавливают эти детали, должны обладать повышенной коррозионной

стойкостью (окалиностойкостью), высоким сопротивлением ползучести, длительной прочностью при указанных температурах.

Выбрать состав сплава, указать методы термической обработки и привести изменения структуры и свойств после основных операций этой обработки.

№ 2.15. Нержавеющая хромоникелевая сталь некоторых составов обладает хорошей стойкостью против действия ряда химических сред, но после сварки становится чувствительной к интеркристаллитной коррозии в зоне, прилегающей к сварному шву.

Указать химический состав, режим термической обработки и макроструктуру нержавеющей стали, стойкой против действия органических кислот, и указать, какой компонент должна содержать эта сталь для сохранения стойкости против межкристаллитной коррозии после сварки.

Объяснить причины, вызывающие межкристаллитную коррозию.

Сравнить состав, структуру, режим термической обработки, свойства и область применения стали выбранного состава с аналогичными характеристиками нержавеющей хромистой стали с таким же содержанием углерода.

№ 2.16. Магнитные сердечники радиотехнических приборов изготавливают из магнитномягких металлических сплавов, имеющих высокую магнитную проницаемость и малые потери на перемагничивание и на вихревые токи. Однако эти сплавы непригодны при резком повышении частоты поля до 50 МГц из-за сильно возрастающих потерь на вихревые токи.

Указать: а) тип материала и способ изготовления сердечников, применяемых для этого назначения; б) составы металлических сплавов, которые можно применять для сердечников, работающих в области средних частот.

№ 2.17. Завод изготавливает вибрационно-частотные датчики для контроля давления и скорости потока газа и жидкости и т.п. Упругие элементы датчиков изготавливались из низколегированной пружинной стали 50ХФА с обработкой на твердость HRC 42-45. В дальнейшем завод должен изготавливать датчики для контроля параметров агрессивных окислительных сред; это требует применения коррозионностойкой ферромагнитной стали для датчиков.

Указать состав стали с возможно меньшим содержанием дорогих легирующих элементов и рекомендовать режим упрочняющей термической обработки, обеспечивающей получение твердости HRC 42-45.

Сопоставить режим обработки новой стали с режимом обработки пружинной стали 50ХФА.

№ 2.18. Завод изготавливает прецизионные магнитоэлектрические приборы - осциллографы, гальванометры, милливольтметры и т.п. из сплава ЮНДК24 (см. табл. 32 [2]). Принцип работы этих приборов основан на взаимодействии поля, создаваемого измерительной системой, с магнитным полем постоянного магнита. Для повышения чувствительности приборов, уменьшения размеров магнитов, следовательно, и размеров приборов было решено применить сплавы с более высокой магнитной энергией.

Привести состав, термическую обработку и свойства нового сплава.

8.4. Задачи по инструментальным сталям

№ 3.1. Стойкость сверл и фрез, изготовленных из быстрорежущей стали умеренной теплостойкости марки P12 и обрабатывавших конструкционные стали твердостью HB 180-200, была удовлетворительной. Однако стойкость этих сверл резко снизилась при обработке жаропрочной аустенитной стали.

Рекомендовать быстрорежущую сталь повышенной теплостойкости, пригодную для производительного резания жаропрочных сталей, указать ее марку и химический состав, термическую обработку и микроструктуру в готовом инструменте. Сопоставить теплостойкость стали P12 и выбранной стали.

Решение задачи № 3.1

Режущие инструменты для производительного резания изготавливают из быстрорежущих сталей, так как эти стали обладают теплостойкостью. Они сохраняют мартенситную структуру и высокую твердость при повышенном нагреве (500-650°C), возникающем в режущей кромке.

Однако стойкость инструментов из быстрорежущих сталей, подвергавшихся оптимальной термической обработке, определяется не только их хими-

ческим составом, структурой и режимом резания, но сильно зависит от свойств обрабатываемого материала.

При резании сталей и сплавов с аустенитной структурой (нержавеющих, жаропрочных и др.), получающих все более широкое применение в промышленности, стойкость инструментов и предельная скорость резания могут сильно снижаться по сравнению с получаемыми при резании обычных конструкционных сталей и чугунов с относительно невысокой твердостью до НВ 2157-2452 МПа (220-250 кгс/мм²). Это связано главным образом с тем, что теплопроводность аустенитных сплавов понижена. Вследствие этого тепло, выделяющееся при резании, лишь в небольшой степени поглощается сходящей стружкой и деталью и в основном воспринимается режущей кромкой. Кроме того, эти сплавы сильно упрочняются под режущей кромкой в процессе резания, из-за чего заметно возрастают усилия резания.

Для резания подобных материалов, называемых труднообрабатываемыми, мало пригодны быстрорежущие стали умеренной теплостойкости, сохраняющие высокую твердость (HRC 60) и мартенситную структуру после нагрева не выше 615-620°C. Для обработки аустенитных сплавов необходимо выбирать быстрорежущие стали повышенной теплостойкости, а именно кобальтовые. Кобальт способствует выделению при отпуске наряду с карбидами также и частиц интерметаллидов, более стойких против коагуляции, и затрудняет процессы диффузии при температурах нагрева режущей кромки. Кобальтовые стали сохраняют твердость HRC 60 после более высокого нагрева: до 640-645°C. Кроме того, кобальт заметно (на 30-40%) повышает теплопроводность быстрорежущей стали, а следовательно, снижает температуры режущей кромки из-за лучшего отвода тепла в тело инструмента. Наконец, стали с кобальтом имеют более высокую твердость (до HRC 68 у стали P8M3K6C).

Для сверл и фрез, применяемых для резания аустенитных сплавов, рекомендуются кобальтовые стали марок P12F4K5 или P8M3K6C. Термическая обработка кобальтовых сталей принципиально не отличается от обработки других быстрорежущих сталей. Инструменты закаливают с очень высоких температур

(1240-1250°C для стали P12Ф4К5 и 1210-1220°C для стали P8МЗК6С), что необходимо для растворения большего количества карбидов и насыщения аустенита (мартенсита) легирующими элементами: вольфрамом, молибденом, ванадием и хромом. Нагрев под закалку до более высоких температур, дополнительно усиливающий растворение карбидов в аустените, недопустим: он вызывает рост зерна, а это снижает прочность и вязкость. Структура стали после закалки: мартенсит, остаточный аустенит (15-30%) и избыточные карбиды, не растворяющиеся при нагреве и задерживающие рост зерна. Твердость HRC 60-62.

Затем инструменты отпускают при 550-560°C (3 раза по 60 мин). Отпуск вызывает: а) выделение дисперсных карбидов и интерметаллидов из мартенсита (дисперсионное твердение), что повышает твердость до HRC 66-69; б) превращает мягкую составляющую - остаточный аустенит в мартенсит; в) снимает напряжения, вызываемые мартенситным превращением.

После отпуска инструменты шлифуют, а затем подвергают цианированию, чаще всего жидкому в смеси NaCN (50%) и Na₂CO₃ (50%) с выдержкой 15-30 мин (в зависимости от сечения инструмента). Твердость цианированного слоя на глубину 0,02-0,03 мм достигает HRC 69-70; немного (~на 10°C) возрастает и теплостойкость. При нагреве для цианирования снимаются также напряжения, вызванные шлифованием. Цианирование повышает стойкость инструментов на 50-80%.

После цианирования целесообразен кратковременный нагрев при 450-500°C в атмосфере пара и с охлаждением в масле; поверхность инструмента приобретает тогда синий цвет и несколько лучшую стойкость против воздушной коррозии.

№ 3.2. Выбрать сталь для червячных фрез, обрабатывающих конструкционные стали твердостью HB 2157-2354 МПа(220-240 кгс/мм²).

Объяснить причины, по которым для этого назначения нецелесообразно использовать углеродистую инструментальную сталь У12 с высокой твердостью (HRC 63-64). Рекомендовать режим термической обработки фрез из вы-

бранной быстрорежущей стали, приняв, что фрезы изготовлены из проката диаметром 40 мм.

№ 3.3. Завод должен изготовить долбяки, обрабатывающие с динамическими нагрузками конструкционные стали с твердостью HB 1961-2265 МПа (200-230 кгс/мм²).

Выбрать марку быстрорежущей стали, наиболее пригодной для этого назначения, рекомендовать режим термической обработки и указать структуру и свойства (для долбяков наружным диаметром 60 мм).

№ 3.4. Завод изготавливал протяжки из высоковольфрамовой стали P18.

Указать, можно ли использовать для протяжек менее легированную, а следовательно, более экономичную быстрорежущую сталь.

Выбрать марку стали для протяжек, обрабатывающих конструкционные стали с твердостью до HB 2452 МПа (250 кгс/мм²), указать ее термическую обработку, структуру и свойства для случаев, когда протяжки изготавливают из проката диаметром 40 и 85 мм.

№ 3.5. Завод изготавливает червячные фрезы двух размеров: наружным диаметром 30 и 80 мм из катаной быстрорежущей стали соответствующего профиля.

Выбрать марку быстрорежущей стали умеренной теплостойкости и рекомендовать режим термической обработки.

Указать способ химико-термической обработки, позволяющий дополнительно повысить стойкость фрез.

Объяснить, в чем заключается различие в структуре и свойствах быстрорежущей стали из проката диаметром 30-32 и 80-82 мм.

№ 3.6. Инструменты из быстрорежущих сталей имеют недостаточную стойкость при резании с повышенной скоростью (более 80-100 м/мин).

Выбрать марку инструментальных сплавов, пригодных для резания с высокой скоростью: а) сталей; б) чугунов.

Указать состав, структуру и свойства выбранных сплавов и сопоставить их с аналогичными свойствами быстрорежущих сталей.

Объяснить причины, по которым для обработки стали следует выбрать сплав другого состава, чем для обработки чугуна.

№ 3.7. В распоряжении завода имеются быстрорежущие стали двух марок:

а) вольфрамомолибденовая P6M5; б) кобальтовая P12Ф4К5.

Объяснить различие в основных свойствах этих сталей и рекомендовать оптимальное назначение каждой из них.

Указать термическую обработку этих сталей и их структуру и свойства в готовых инструментах диаметром 20 и 60 мм.

№ 3.8. Цех выполняет токарную обработку чугунных и стальных деталей с большой скоростью резания.

Выбрать сплавы для резцов, обеспечивающие высокую производительность обработки: а) стали; б) чугуна.

Привести химический состав, структуру, твердость, прочность, теплоустойчивость и способ изготовления этих сплавов и сравнить их с аналогичными характеристиками быстрорежущей стали.

№ 3.9. При обработке стали с твердостью более HB 2746-2942 МПа (280-300 кгс/мм²) резцы из быстрорежущей стали не имеют достаточной стойкости.

Указать состав сплава, обладающего более высокими режущими свойствами. Вследствие высокой стоимости и большей хрупкости такого сплава привести способ изготовления составных резцов и указать металл, из которого следует изготовить державку резца.

Сопоставить структуру, твердость, теплоустойчивость и способ изготовления выбранного сплава с аналогичными характеристиками быстрорежущей стали.

№ 3.10. Машиностроительный завод изготавливает детали при различных условиях резания: резцами с большой скоростью резания обрабатывается легированная сталь твердостью HB 2942-3432 МПа (300-350 кгс/мм²); резбовыми фрезами с умеренной скоростью - стали твердостью HB 1961-2157 МПа (200-220 кгс/мм²); плашками диаметром 60 мм с небольшой скоростью нарезается резьба на стали с твердостью HB 1177-1373 МПа (120-140 кгс/мм²).

Подобрать марку сплава (стали) для каждого из этих инструментов, обосновать сделанный выбор и сравнить микроструктуру и основные свойства выбранных материалов.

№ 3.11. Выбрать марку легированной инструментальной стали для изготовления круглых плашек, обрабатывающих мягкую низкоуглеродистую сталь.

Указать режим термической обработки и способы защиты от обезуглероживания и окисления при нагреве для закалки.

Сравнить химический состав, микроструктуру, основные свойства и область применения выбранной и быстрорежущей сталей.

№ 3.12. Измерительные инструменты (калибры, измерительные плитки) должны обладать не только высокой твердостью и хорошим сопротивлением износу, но и не должны изменять своих размеров с течением времени. Между тем изделия после закалки и низкого отпуска иногда обнаруживают незначительные изменения размеров во время эксплуатации, недопустимые однако для измерительных инструментов большой точности.

Указать причины, вызывающие эти изменения (старение), и привести марку стали и режим термической обработки измерительных инструментов, значительно уменьшающий эффект старения.

№ 3.13. Многие измерительные инструменты плоской формы (шаблоны, линейки, штангенциркули) изготавливают из листовой стали; они должны обладать высокой износостойкостью в рабочих кромках.

Привести режим обработки, обеспечивающей получение этих свойств, если инструменты изготавливают большими партиями из сталей 15 и 20.

№ 3.14. На машиностроительном заводе изготавливают зубчатые колеса из прутков стали 40Х, поставляемой металлургическим заводом с твердостью НВ 1569-1765 (160-180). Одна плавка стали, доставленная заводу, имела твердость НВ 2255-2452 (230-250). Для обработки стали повышенной твердости требовалось снижение режимов резания, принятых на заводе.

Указать способ и режим термической обработки, позволяющей улучшить обрабатываемость резанием стали этой плавки.

Привести химический состав, структуру и режим термической обработки стали для фрез, пригодных для обработки стали 40Х.

№ 3.15. Получение заготовок горячей деформацией является производительным способом обработки.

Выбрать марку стали для изготовления крупного молотового штампа (размерами 500x400x400 мм); рекомендовать режим термической обработки штампа и указать микроструктуру и механические свойства после отпуска. Объяснить, почему подобные штампы не следует изготавливать из углеродистой стали.

№ 3.16. Стальные стаканы цилиндров двигателей внутреннего сгорания изготавливают штамповкой в горячем состоянии. Внутренняя полость образуется путем прошивки - вдавливанием пуансона в нагретый металл, устанавливаемый в специальной матрице. Пуансон работает в условиях попеременного нагрева (при прошивке) и охлаждения (после прошивки).

Указать температуры штамповки (прошивки) заготовок, если их изготавливают из стали 50.

Выбрать марку стали для изготовления пуансона диаметром 40 мм, обосновать сделанный выбор; указать режим термической обработки и структуру стали в готовом пуансоне.

№ 3.17. Для пуансонов горячего выдавливания - операции, при которой штамп длительное время находится в соприкосновении с нагретым деформируемым металлом, необходимы теплостойкие штамповые стали.

Выбрать сталь для пуансонов выдавливания жаропрочных сплавов: для этих условий обработки штамповая сталь должна сохранять повышенные прочностные свойства при нагреве до 700-720°C.

Рекомендовать режим термической обработки штампов и ее структуру в готовом штампе.

№ 3.18. Штампы сложной формы, особенно имеющие внутреннее отверстие, сильно деформируются при закалке.

Рекомендовать температуру закалки штампов из высокохромистой стали X12M, при выполнении которой значительно уменьшается деформация.

Указать структуру стали после закалки и объяснить причины, способствующие уменьшению деформации.

№ 3.19. Штампы холодной вырубки стальных листов должны иметь высокую износостойкость и по возможности лучшую вязкость. Выбрать сталь для этого назначения и рекомендовать термическую обработку.

Указать получаемые твердость и структуру стали.

Объяснить, в каких штампах: с наименьшей стороной 50 или 90 мм сталь будет иметь более высокие прочность и вязкость и причины этого различия.

№ 3.20. Пневматические долота, применяемые при разработке горных пород, должны обладать относительно высокой твердостью (HRC 55-58) и износостойкостью, но вместе с тем должны иметь достаточную вязкость, так как они испытывают в работе ударные нагрузки.

Указать химический состав, марку углеродистой (для долот простой формы) и легированной сталей (для крупных долот сложной формы) и режим термической обработки, обеспечивающей получение требуемых структуры и твердости.

№ 3.21. Выбрать марку стали для изготовления топоров. Лезвие топора не должно сминаться или выкрашиваться в процессе работы; поэтому оно должно иметь твердость в пределах HRC 50-55 на высоту не более 30-40 мм; остальная часть топора не подвергается закалке и имеет более низкую твердость.

Указать химический состав стали, режим термической обработки, обеспечивающий получение твердости в пределах HRC 50-55, а также способ закалки, позволяющий получить эту твердость только в лезвии топора.

№ 3.22. Выбрать марку стали для изготовления продольных пил по дереву и указать режим термической обработки, микроструктуру и твердость готовой пилы.

Режим термической обработки выбирается таким образом, чтобы предупредить деформацию пилы при закалке и отпуске, а также обеспечить получение

ние в стали высоких упругих свойств после отпуска (пила должна «пружинить»).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солнцев, Ю.П. Материаловедение [Текст] / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин. - Санкт-Петербург.: ХИМИЗДАТ, 2004. - 734 с.
2. Геллер, Ю.А. Материаловедение [Текст] / Ю.А.Геллер, А.Г. Рахштадт. - Москва: Металлургия, 1989. - 456 с.
3. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов [Текст] / И.И. Новиков. - Москва: Металлургия, 1986. - 480 с.
4. Бернштейн, М.Л. Металловедение и термическая обработка. Справочник. Т. 2. [Текст] / М.Л. Бернштейн, А.Г. Рахштадт. - Москва: Металлургия, 1983. - 368 с.
5. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали [Текст] / Ю.А. Геллер. - Москва: Металлургия, 1968. - 568 с.
6. Рахштадт, А.Г. Пружинные стали и сплавы [Текст] / А.Г. Рахштадт. - Москва: Металлургия, 1971. - 496 с.
7. Химушин, Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы [Текст] / Ф.Ф. Химушин. - Москва: Металлургия, 1969. - 749 с.
8. Химушин, Ф.Ф. Нержавеющие стали [Текст] / Ф.Ф. Химушин. - Москва: Металлургия, 1967. - 798 с.

9. Минкевич, А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов [Текст] / А.Н. Минкевич. - Москва: Металлургия, 1965. - 491с.
10. Горицкий, В.М. Диагностика металлов [Текст] / В.М. Горицкий. - Москва: Металлургиздат, 2004. - 408с.
11. Довгалецкий, Я.М. Легирование и термическая обработка магнитотвердых сплавов [Текст] / Я.М. Довгалецкий. - Москва: Металлургия, 1971. - 176 с.
12. Токмин, А.М. Выбор материалов и технологий в машиностроении. учеб. пос. [Текст] /А.М. Токмин, В.И. Темных, Л.А. Свечникова. - Москва: ИНФРА-М ; Красноярск : Сиб. федерал ун-т (СФУ), 2014. - 235 с.
13. Стали и сплавы. Марочник: справ. изд./ В. Г. Сорокин [и др]. - Москва: "Интернет Инжиниринг", 2001. - 608с.
14. Конструкционные и инструментальные материалы, применяемые в машиностроении (состав, механические свойства и назначение): справ. учеб. пос. для вузов [Текст] / Н.П. Аристов [и др.]. - Москва; МГТУ "Станкин", 2002. - 144 с.
15. Эшби, М.Ф. Конструкционные материалы. Полный курс: учеб. пос. [Текст] / М.Ф. Эшби, Д. Джонс . - Долгопрудный: Интеллект, 2010. - 672 с.
16. Конструкционные материалы: справочник [Текст] / Под ред. Б. Н. Арзамасова. - Москва: Машиностроение, 1990. - 688 с.
17. Рогов, В.А. Новые материалы в машиностроении: учеб. пособие [Текст] В.А.Рогов, В.В.Соловьев, В.В.Копылов / - Москва: РУДН, 2008. - 324 с.

Учебное издание

Иванников Евгений Васильевич

**Конструкционные стали и сплавы
для заданных изделий**

Учебное пособие

Редактор Черникова Е.И.

Подписано в печать 2017. Формат 60x84 1/16. Ризография.

Бумага офсетная. Печ. л. 5,25. Тираж 200 экз. Заказ № .

Издательство Липецкого государственного технического университета

398600 Липецк, ул. Московская, 30.

Полиграфическое подразделение Издательства ЛГТУ