

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Факультет Энергетический
Кафедра Тепловые электрические станции

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой

_____ Н.Б. Карницкий

_____ 2016 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан

_____ К.В.Доброго

_____ 2016 г.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО
УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

МАТЕРИАЛЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

для специальности 1-43 01 04 Тепловые электрические станции

Составитель:

доцент Герасимова А.Г., к.т.н., доцент

Рассмотрено и утверждено

на заседании Совета энергетического факультета «26» мая 2016 г.,

протокол № 9

ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ

1. Теоретический раздел:

– «Материалы оборудования ТЭС» – курс лекций;

2. Практический раздел:

– «Материалы оборудования ТЭС » – перечень тем практических занятий;

3. Контроль знаний:

– «Материалы оборудования ТЭС» – перечень вопросов, выносимых на зачет, контрольные тесты;

4. Вспомогательный раздел:

– «Материалы оборудования ТЭС» – учебная программа для учреждения высшего образования.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели создания ЭУМК

Повышение качества образовательных услуг за счет обеспечения студентов комплектом учебных и учебно-методических материалов, позволяющих самостоятельно изучать дисциплину «Материалы оборудования ТЭС», что особенно важно для студентов заочной формы получения образования.

Теплоэнергетика, являющаяся основным производителем электроэнергии, имеет свои особенности в области материаловедения и используемых конструкционных материалов, основу которых составляют металлы и сплавы. Это, прежде всего длительная эксплуатация конструкционных материалов оборудования и трубопроводов в условиях повышенных температур, рабочих нагрузок, коррозионно-эрозионных воздействий. Правильный выбор конструкционных материалов и сохранение их свойств в процессе эксплуатации является одним из основных критериев, определяющих надежную и долговечную работу оборудования и трубопроводов ТЭС. Поэтому будущие специалисты должны иметь представление о классификации и маркировке сталей и сплавов, условиях работы и требованиях предъявляемых к материалам, влиянии эксплуатационных факторов на свойства и структуру конструкционных материалов, а также мероприятиях по продлению ресурса металла основных элементов теплоэнергетического оборудования.

Задачами ЭУМК являются изучение классификации и маркировки сталей и сплавов, нормативных документов, регламентирующих выбор конструкционных материалов тепломеханического оборудования ТЭС, условий

эксплуатации и основных служебных свойств материалов, а также вопросов, связанных с продлением и восстановлением ресурса материалов оборудования ТЭС.

Особенности структурирования и подачи учебного материала:

– теоретическая часть включает в себя конспект лекций по дисциплине «Материалы оборудования ТЭС» и содержит 3 раздела по общим сведениям о металлах и сплавах, особенностям материаловедения в теплоэнергетике и ресурсу металла теплоэнергетического оборудования ТЭС.

– практическая часть состоит из перечня тем практических занятий;
– раздел контроля знаний содержит вопросы к зачету и контрольные тесты;

– вспомогательный раздел содержит учебную программу по дисциплине «Материалы оборудования ТЭС».

Рекомендации по организации работы с УМК (ЭУМК): Материалы данного электронного учебно-методического комплекса можно использовать при выполнении курсовых и дипломных проектов (работ), посвященных проектированию, эксплуатации, монтажу и ремонту теплоэнергетического оборудования ТЭС.

Полученные знания при изучении данного электронного учебно-методического комплекса предназначены для формирования научного мышления и профессиональной ответственности инженеров энергетического профиля, которые должны явиться основой приобретения умения выбора конструкционных материалов элементов теплоэнергетического оборудования ТЭС при проектировании, монтаже и ремонте оборудования ТЭС.

1	Курс лекций	6
	Раздел 1. Общие сведения о металлах и сплавах	6
	Тема 1.1. Металловедение и его особенности в теплоэнергетике	6
	Тема 1.2. Механические свойства металлов и методы их определения	24
	Тема 1.3. Общие сведения о термической, химико-термической и механико-термической обработке металлов	41
	Раздел 2. Металлы в теплоэнергетике и их основные служебные свойства	55
	Тема 2.1. Условия работы металлов теплоэнергетического оборудования ТЭС	55
	Тема 2.2. Основные служебные свойства металлов в теплоэнергетике	61
	Тема 2.3. Углеродистые стали в теплоэнергетике	80
	Тема 2.4. Легированные стали и сплавы	87
	Тема 2.5. Чугуны	112
	Тема 2.6. Цветные металлы и сплавы в теплоэнергетике	120
	Раздел 3. Ресурс металла тепломеханического оборудования и трубопроводов ТЭС	135
	Тема 3.1. Общие понятия о ресурсе тепломеханического оборудования ТЭС	135
	Тема 3.2. Восстановление ресурса и защита металла теплоэнергетического оборудования ТЭС	148
2	Темы практических занятий	160
3	Вопросы к зачету, контрольные тесты	162
	3.1 Вопросы к зачету	162
	3.2 Контрольные тесты	164
4	Учебная программа	167

Электронный учебно-методический комплекс

Теоретический раздел

МАТЕРИАЛЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

2. Курс лекций

Минск 2016 г.

1 КУРС ЛЕКЦИЙ

РАЗДЕЛ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

Тема 1.1. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Металл с древних времен играл важную роль в развитии человечества. Достаточно вспомнить такие периоды мировой истории, как «бронзовый век» или «железный век», чтобы представить значение того или иного металла в развитии цивилизации.

Металл и сейчас остается фундаментом мирового научно-технического прогресса. Металлы, созданные природой, и многочисленные металлические сплавы, полученные человеком, являются основными конструкционными материалами для всех отраслей промышленности.

Среди наук о металлах металловедение является основной. Существует следующее определение металловедения как науки. *Металловедение – наука, изучающая связь между составом, строением и свойствами металлических материалов, закономерности их изменения при механических, термических, химических и других воздействиях.*

Теоретической базой металловедения являются физика, химия, термодинамика, механика и другие науки. Поэтому развитие металловедения неразрывно связано с развитием этих фундаментальных наук.

Основные физико-механические, технологические и служебные свойства металлов и сплавов определяются, прежде всего, их внутренним строением, которое зависит от химического состава и характера внешних воздействий в процессе обработки и эксплуатации деталей и конструкций.

Основные теоретические и практические положения и закономерности установленные в металловедении, являются общими для различных металлических материалов независимо от их назначения, каждая отрасль промышленности требует от металлических материалов особых служебных свойств. Например, для летательных винтов в авиации и космонавтике необходимы сплавы низкой плотности и высокой удельной прочности; для инструмента и приборов в медицине первостепенное значение имеют металлы, обладающие хорошей совместимостью с живыми тканями организма человека. Далее рассмотрим более подробно особенности металловедения в теплоэнергетике.

За последние 100 лет теплоэнергетика претерпела несколько этапов своего развития, позволивших резко повысить коэффициент полезного действия энергоблоков. Использование для изготовления оборудования и трубо-

проводов более качественных сталей и сплавов позволило увеличить давление и температуру рабочего тела (пара, газа), что обеспечило повышение технико-экономических показателей энергоустановок. Если еще полвека назад рабочие параметры водяного пара составляли 10-12 МПа и 500-540 °С, то в настоящее время эти параметры возросли до 30 МПа и 650 °С.

Основу современной теплоэнергетики составляют тепловые электрические станции, оснащенные мощными парогенераторами и турбинами. Базовыми конструкционными материалами теплоэнергетических установок являются стали и сплавы, которые обладают высокими эксплуатационными свойствами. К таким свойствам следует, прежде всего, отнести способность металла длительно противостоять воздействию высокой температуры, давлению, коррозии и эрозии. Длительная эксплуатация энергоустановок в течение десятков тысяч часов приводит к изменению структуры металла, накоплению в нем повреждений и, как следствие, ухудшению его основных служебных свойств и снижению надежности работы оборудования и трубопроводов. Для замедления этих негативных процессов повышаются требования к качеству металла, обследованию его структурно-механического состояния и обоснованию оценки остаточного ресурса. Поэтому долговечность, надежность и эффективность работы энергоблоков неразрывно связаны с качеством металла, характеризуемым заданными структурой и уровнем служебных свойств. В связи с этим прогресс в развитии теплоэнергетики зависит от обеспечения энергомашиностроительных предприятий жаропрочными, жаростойкими и коррозионно-стойкими сталями и сплавами высокого и особого качества.

Основные задачи металловедения в решении этой проблемы для теплоэнергетики состоят в изучении структуры и комплекса физико-механических свойств металла, изменений, происходящих в структуре и свойствах на стадиях изготовления и эксплуатации оборудования и трубопроводов, обосновании выбора металла и технологий его обработки для изготовления деталей и конструкций энергоблоков, использовании эффективных способов оперативной диагностики структурно-механического состояния металла и разработке надежных методик оценки его остаточного ресурса.

В ближайшие годы роль металловедения в теплоэнергетике будет постоянно возрастать в связи с тем, что в настоящее время более 80% действующих энергоблоков исчерпало свой проектный ресурс (100 тыс. ч). Поэтому задачи увеличения рабочего ресурса, сохранения показателей надежности и безопасности энергоустановок представляются чрезвычайно актуальными. Решение этих задач невозможно без знаний в области металловедения.

Продление ресурса элементов энергооборудования и трубопроводов

можно обеспечить применением специальных ремонтно-восстановительных и технологических операций по увеличению физических возможностей металла. Знания и опыт, накопленные в металловедении, позволяют обоснованно выбрать наиболее эффективные способы восстановления ресурса деградировавшего металла. Например, на тепловых электростанциях успешно применяются такие способы восстановления металла элементов оборудования и паропроводов, как восстановительная термическая обработка, наплавка, нанесение износостойких и коррозионно-стойких покрытий и др.

Использование современных методов и технических средств оперативной диагностики состояния металла, пробывшего длительное время в эксплуатации, также способствует своевременному выявлению потенциально опасных мест в деталях и конструкциях энергоустановок и предотвращению аварийных ситуаций. Металлографический и фрактографический анализы металла и изломов деталей, разрушившихся в процессе эксплуатации, и оценка фактических механических свойств металла непосредственно в этих деталях позволяют устанавливать причины разрушения и принимать своевременные меры по их устранению на других аналогичных энергоблоках. Анализ механизмов макро- и микроповреждаемости металла в зависимости от длительности эксплуатации необходим для более точной оценки степени исчерпания ресурса. Комплексный учет структурных факторов, накопленной повреждаемости и фактических механических свойств металла позволяет более точно выполнить расчеты на прочность деталей и узлов энергооборудования до и после восстановления.

Специалистами академических и отраслевых НИИ, вузов, служб металлов предприятий теплоэнергетики, заводских лабораторий предприятий энергомашиностроения проведен большой объем теоретических и экспериментальных работ по обоснованию продления срока службы энергооборудования и трубопроводов после исчерпания проектного ресурса. Разработаны и действуют нормативные документы в виде типовых инструкций по контролю металла и продлению срока службы основных элементов паровых и водогрейных котлов, паровых турбин и трубопроводов.

Понятия о металлах, их классификации и свойствах. Металлы и их сплавы повсеместно используются для изготовления конструкций машин, оборудования, инструмента и т.д. Несмотря на широкий круг искусственно созданных материалов, керамики, клеев, металлы служат основным конструкционным материалом и в обозримом будущем по-прежнему будут доминировать.

В природе металлы встречаются как в чистом виде, так и в рудах, оксидах и солях. В чистом виде встречаются химически устойчивые элементы

(Pt (платина), Au (золото), Ag (серебро), Hg (ртуть), Cu (медь)). Масса наибольшего самородка меди составляет 420 т, серебра – 13,5 т, золота – 112 кг.

Примерно 250 лет тому назад великий русский ученый Ломоносов в книге «Первые основания металлургии или рудных дел» дал металлу следующее определение: «Металлом называют светлое тело, которое ковать можно». Исходя из этого определения М.В. Ломоносов насчитывал всего шесть металлов: золото, медь, железо, свинец и олово. Известные ранее ртуть и сурьма не подходили под это определение, так как ртуть при нормальных условиях является жидкостью, а сурьма настолько хрупка, нельзя ковать.

Позднее к свойствам металлов стали причислять и другие свойства, например электрические и теплопроводные, непрозрачность в неслишком тонком слое металла, характерный металлический блеск и др.

В настоящее время техническое определение металла не претерпело существенных изменений: *«Металлы – это вещества, обладающие в твердом состоянии высокими электро- и теплопроводностью, а также ковкостью (пластичностью), специфическим блеском и другими свойствами, обусловленными наличием свободных электронов».*

С химической точки зрения под металлами понимают определенную группу элементов, расположенную в левой части Периодической системы элементов Д.И. Менделеева (левее мысленной линии, проведенной от бора №5 до астата №85 рис.1.1, эта граница недостаточно четко выражена, т.к. среди элементов, расположенных вблизи границы находятся полуметаллы). Эти элементы при химическом взаимодействии с элементами, являющимися неметаллами, отдают им свои внешние (валентные) электроны, которые прочно связаны с ядром. Поэтому на наружных электронных оболочках металлов содержится меньшее количество электронов, чем в неметаллах.

Существует еще одно определение металла: «Металл – это твердое тело, обладающее поверхностью Ферми». Под поверхностью Ферми понимают модель движения электронов в металле. По виду модели поверхности Ферми можно описать свойства металла и их изменения в различных условиях. Решение этой сложной задачи позволило бы более полно объяснить разнообразие физико-механических свойств различных металлов.

ГРУППЫ		ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ																ГРУППЫ	
ПЕРИОДЫ		Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА																	
1	1s																	He	
2	2s 2p																		
3	3s 3p																		
4	4s 3d 4p																		
5	5s 4d 5p																		
6	6s 4f 5d 6p																		
7	7s 5f 6d 7p																		

Неметаллы

ы

Металлы

I s-элементы
II p-элементы
III d-элементы
IV f-элементы
A — главные подгруппы
B — побочные подгруппы

1 Порядковые номера элементов, которым соответствуют простые вещества — неметаллы, даны на белом фоне
2 Порядковые номера элементов, которым соответствуют простые вещества — металлы, даны на цветном фоне

Рисунок 1.1 – Периодическая таблица Д.И.Менделеева

Металлы принято делить на две группы: *черные* и *цветные*. Железо и сплавы на его основе (стали, чугуны) называют *черными* металлами, а остальные металлы (Be, Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Nb, Mo, Ag, Sn, W, Au, Hg, Pb и др.) и их сплавы – *цветными*. Классификация металлов и сплавов более подробно приведена на рис.1.2.

Свойства металлов разнообразны.

Например,

- ртуть замерзает при температуре $-38,8^{\circ}\text{C}$;
- вольфрам выдерживает рабочую температуру до 2000°C ($t_{пл}=3420^{\circ}\text{C}$);
- литий, натрий, калий легче воды;
- иридий и осмий в 42 раза тяжелее лития;
- электропроводность серебра в 130 раз выше, чем у марганца.

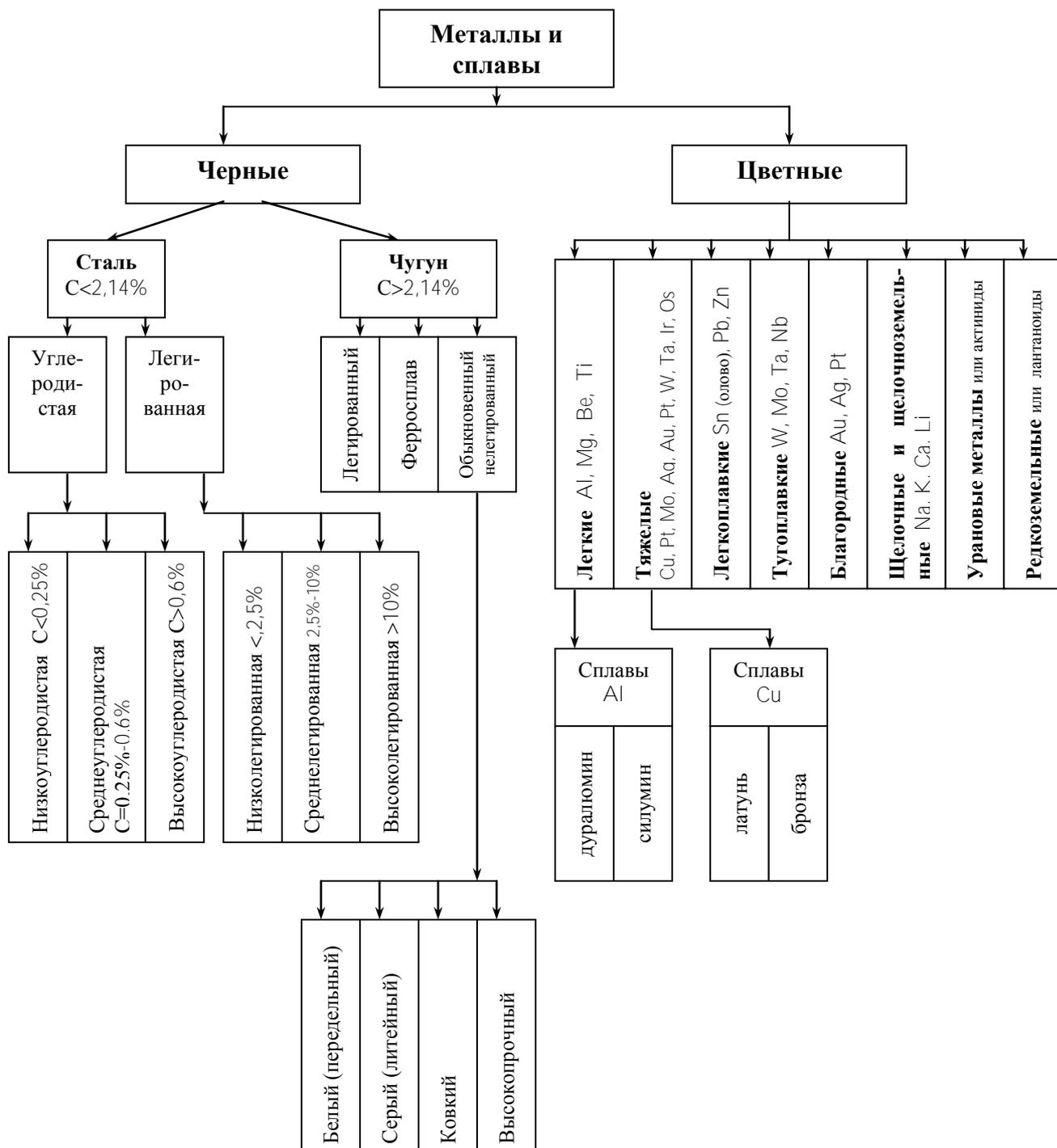


Рисунок 1.2 – Классификация металлов и сплавов

Легкие – плотностью до 5 г/см^2 ;

Тяжелые – плотностью 10 г/см^2 ;

Легкоплавкие Sn (олово), Pb, Zn – с температурой плавления $232, 327, 410^\circ\text{C}$ соответственно;

Тугоплавкие – с температурой плавления выше, чем у железа (1536°C);

Благородные Au, Ag, Pt – с высокой устойчивостью против коррозии;

Щелочные и щелочноземельные Na, K, Ca, Li в свободном состоянии применяются в качестве жидкометаллических теплоносителей в атомных реакторах; Na также используется в качестве катализатора в производстве искусственного каучука, а Li для легирования легких и прочных алюминиевых сплавов, применяемых в самолетостроении.

Редкоземельные (лантаноиды) применяются для модифицирования стали.

Вместе с тем металлы имеют *характерные общие свойства*. К ним относятся:

- высокая пластичность;
- высокие тепло- и электропроводность;
- положительный температурный коэффициент электрического сопротивления, означающий рост сопротивления с повышением температуры и сверхпроводимость многих металлов (около 30) при температурах, близких к абсолютному нулю;
- хорошая отражательная способность (металлы непрозрачны и имеют характерный металлический блеск);
- термоэлектронная эмиссия, т.е. способность к испусканию электронов при нагреве;
- кристаллическое строение в твердом состоянии.

Следует отметить, что перечисленными выше свойствами могут обладать не только чистые металлы, но и металлические сплавы. В большинстве случаев сплавы превосходят по своим служебным свойствам чистые металлы в условиях воздействия рабочих нагрузок, температуры, агрессивной среды и других эксплуатационных факторов. Разнообразие свойств металлов и сплавов является главной причиной их широкого использования в технике. Наличие или иных свойств в металлах и сплавах зависит от особенностей внутреннего строения. Основные свойства металлов и сплавов можно подразделить на физические, химические, механические, технологические и специальные.

К *физическим* свойствам относятся магнитные, электро- и теплопроводные, а также плотность, теплоемкость, температура плавления и др.

Химические свойства характеризуют межатомные взаимодействия металла с другими веществами, в том числе с окружающей средой, например, коррозию.

Среди *механических свойств* выделяют прочность, твердость, пластичность и трещиностойкость.

Технологические и специальные свойства металлов и сплавов зависят от физических, химических и механических свойств. К *технологическим* свойствам относятся литейные, ковкость, свариваемость, обрабатываемость режущим инструментом, а к *специальным* жаропрочность, жаростойкость, износостойкость, коррозионная стойкость и др.

В технической литературе используют и такие термины как «*служебные*» или «*эксплуатационные свойства*», которые характеризуют работоспособность и долговечность деталей и конструкций, изготовленных из метал-

лов и сплавов. Эксплуатационные свойства зависят от комплекса механических, физических, химических и др. свойств.

Среди *механических свойств* прочность занимает особое место, так как от нее, прежде всего, зависит неразрушаемость изделий. Учение о прочности и разрушении металлов является важной частью металловедения. Современные представления о природе прочности физических механизмах разрушения позволяют обоснованно сделать выбор металла для изготовления деталей и конструкций в зависимости от эксплуатационных воздействий.

Кристаллическое строение металлов. Общее свойство металлов и сплавов – их кристаллическое строение. Оно характеризуется определенным закономерным расположением атомов в пространстве.

Для описания атомно-кристаллической структуры используют понятие кристаллической решетки, которая является воображаемой пространственной сеткой с ионами (атомами) в узлах (*в промежутках с огромной скоростью движутся свободные электроны*).

Ее наименьшим структурным образованием является элементарная ячейка, контур которой представляет собой составленное из атомов геометрическое тело, например куб или шестигранную призму. Элементарные ячейки, примыкая, друг к другу и многократно повторяясь, образуют более крупные элементы структуры: зерна или кристаллиты. Кристаллическое строение металлов было изучено только благодаря электронной микроскопии, когда стало возможным получать большие увеличения изображений, а классификацию типов решеток впервые привел французский ученый Браве, по фамилии которого их иногда называют.

Типы кристаллических решеток. Четырнадцать вариантов строения решетки принято объединять в три основных типа (рис. 1.3).

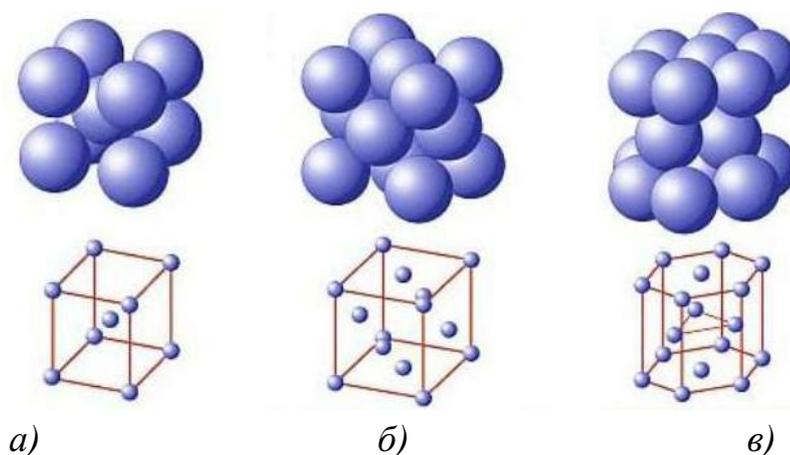


Рисунок 1.3. Основные типы кристаллических решеток:

а – объемно-центрированная кубическая; б – гексагональная плотноупакованная;
в – гранецентрированная кубическая

Объемно-центрированная кубическая (ОЦК). Строение кристаллической решетки металлов данного типа представляет собой следующую структуру (рис.1.2а). Это куб, в узлах которого находится восемь атомов. Еще один располагается в центре свободного внутреннего пространства ячейки, что и объясняет название «объемно-центрированная». Это один из вариантов наиболее простого строения элементарной ячейки, а значит, и всей решетки в целом. ОЦК решетку имеют следующие металлы: молибден (Mo), ванадий (V), хром (Cr), марганец (Mn), альфа-железо (Fe_{α}), бета-железо (Fe_{β}) и другие.

Гранецентрированная кубическая (ГЦК). Кристаллическое строение металлов, имеющих гранецентрированную кубическую решетку, представляет собой следующую структуру (рис.1б). Это куб, который включает в свой состав четырнадцать атомов. Восемь из них формируют узлы решетки, а еще шесть расположены по одному на каждой грани. Подобную структуру имеют: алюминий (Al), никель (Ni), свинец (Pb), гамма-железо (Fe_{γ}), медь (Cu). Основные отличительные свойства – блеск разного цвета, легкость, прочность, ковкость, повышенная устойчивость к коррозии.

Гексагональная плотноупакованная (ГПК). Кристаллическое строение металлов, обладающих данным типом решетки, следующее (рис.1в). В основе элементарной ячейки лежит шестигранная призма. В ее узлах располагается 12 атомов, еще два по основаниям и три атома свободно лежат внутри пространства в центре структуры. Всего семнадцать атомов. Подобную сложную конфигурацию имеют такие металлы, как: альфа-титан (Ti_{α}); магний (Mg); альфа-кобальт (Co_{α}), цинк (Zn). Основные свойства – высокая степень прочности, сильный серебристый блеск.

Дефекты кристаллического строения металлов. Технические металлы и конструкционные стали и сплавы всегда имеют разного рода дефекты, которые образуются при кристаллизации, фазовых превращениях, в процессе изготовления деталей и конструкций. Количество и концентрация этих дефектов в металле может расти в зависимости от характера технологических и эксплуатационных воздействий. Дефекты кристаллического строения подразделяют по геометрическому признаку на точечные, линейные, плоские и объемные. На уровне кристаллической решетки обычно рассматривают точечные, линейные и плоские дефекты, геометрические размеры которых соизмеримы с параметрами решетки в трех, двух или одном направлениях. Объемные дефекты имеют геометрические параметры, многократно превосходящие параметры кристаллической решетки во всех трех измерениях.

– *Точечные*. Они бывают трех основных видов: вакансии, примеси или дислоцированные атомы (рис.1.4а). Приводят к ухудшению магнитных свойств металла, электро- и теплопроводности его.

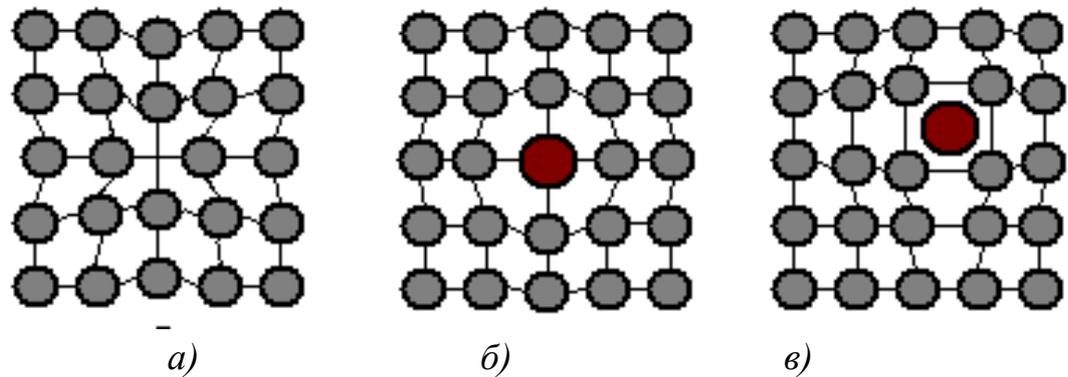


Рисунок 1.4. Схемы точечных дефектов в кристаллической решетке:
a – вакансии; *б* – дислоцированный атом; *в* – примесный атом

– *Линейные*, или дислокационные. Выделяют краевые и винтовые (рис.1.5). Ухудшают прочность и качество материала.

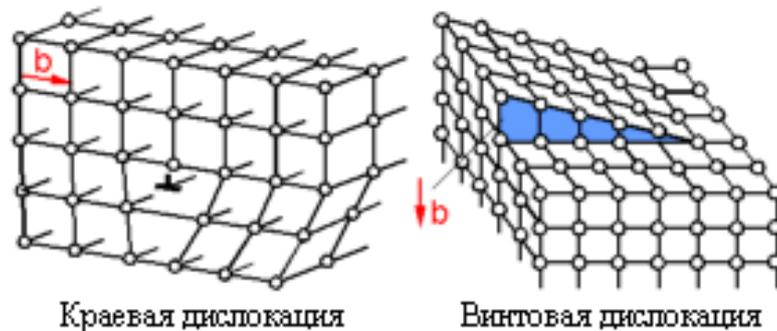


Рисунок 1.5. Схема линейных дефектов кристаллической решетки

– *Поверхностные* дефекты. К поверхностным дефектам относят границы зерен и субзерен, точнее поверхности раздела между ними, а также дефекты упаковки атомов (рис.1.6). Влияют на внешний вид и структуру металлов. В настоящее время разработаны методики устранения дефектов и получения чистых кристаллов. Однако совсем искоренить их не удастся, идеальной кристаллической решетки не существует.

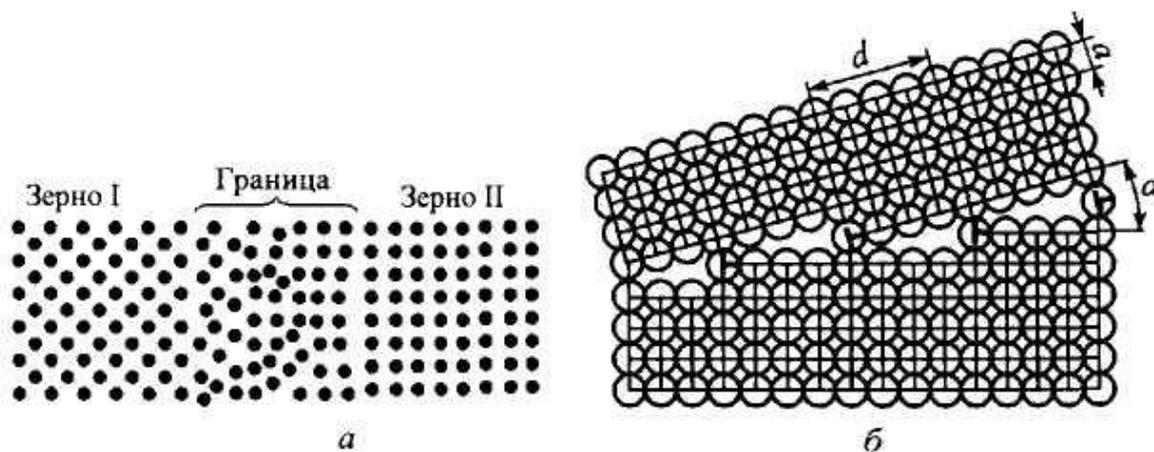


Рисунок 1.6. Схемы поверхностных дефектов: большеугловых (а) и малоугловых (б) границ

Анизотропия в кристаллах. В кристаллических решетках металла вдоль кристаллографических направлений находится разное количество атомов. Например, в ОЦК решетке по направлению вдоль диагонали куба и в ГЦК решетке по направлению вдоль диагоналей граней размещается большее количество атомов, чем по направлениям вдоль ребер кубов. В связи с этим кристаллические тела имеют различные свойства. Это различие в свойствах называется *анизотропией*.

Среди физико-механических свойств металлов от кристаллографического направления существенно зависят прочность, пластичность и вязкость. В этом можно убедиться, если вырезать образцы из металла вдоль разных кристаллографических направлений и испытать их на разрывной машине. Так же различны и значения коэффициента кристаллографического направления не зависит.

Анизотропия свойств проявляется только в пределах одного кристаллического зерна или монокристалла. Реальные металлы и сплавы являются поликристаллическими телами, состоящими из большого количества зерен, произвольно ориентированных друг к другу своими кристаллографическими направлениями и плоскостями. В связи с этим недостаток какого-либо свойства по одному из направлений приложения силы в одних зернах компенсируется большим значением этого свойства по этому же направлению в других зернах. Вследствие этого реальные поликристаллические металлы, как правило, имеют примерно одинаковые свойства по всем направлениям и их называют *изотропными*. Следует отметить, что эта изотропность является усредненной, а не истинной и поэтому поликристаллические металлы принято называть *квазиизотропными* или *псевдоизотропными*.

В процессе обработки металлов и сплавов может происходить текстурирование структуры с ориентированным расположением одностипных уча-

стков структуры. Такие металлы и сплавы также обладают анизотропией. Например, прочность или пластичность вдоль или поперек направления прокатки листовой стали различна вследствие текстурирования структуры.

Полиморфизм металлов. Способность металлов образовывать различные кристаллические структуры одинакового состава называется *полиморфизмом* или *аллотропией*. Например, некоторые металлы (железо, титан, олово и др.) способны при нагреве или охлаждении изменять свое кристаллическое строение. При этом изменяется тип элементарной ячейки. Так, ОЦК решетка железа при нагреве до 911°C перестраивается в ГЦК решетку. Этот тип решетки сохраняется до температуры 1392°C , после чего при повышении температуры решетка снова перестраивается в ОЦК решетку, которая сохраняется до температуры плавления железа 1539°C .

Основной причиной полиморфных или аллотропических превращений является стремление любого вещества иметь минимальный запас свободной энергии. Если в металле при достижении какой-то определенной температуры изменение типа кристаллической решетки обеспечивает уменьшение запаса свободной энергии, то такой металл претерпевает полиморфное превращение.

Обычно полиморфные формы металла обозначаются буквами греческого алфавита, при этом низкотемпературные модификации обозначают буквой α , а последующие в порядке увеличения температуры – β , δ , γ и т.д.

Полиморфные превращения металлов имеют важное практическое значение. Благодаря им изменяются такие свойства металла как плотность, способность растворять другие элементы и т.п. Поэтому полиморфные превращения можно использовать для изменения свойств металлов путем термической обработки.

Методы исследования строения металлов и сплавов. Металлографические методы исследования позволяют выполнить структурный анализ металлов и сплавов. При изучении строения металлов и сплавов различают *макроструктуру* – строение металла, видимое невооруженным глазом, и *микроструктуру* – строение металла, определяемое металлографическими методами, т.е. с использованием различных типов микроскопов (оптических, электронных и ионных).

Макроструктуру металла изучают путем просмотра поверхности специально подготовленных образцов – продольных и поперечных макрошлифов (темплетов) или изломов – невооруженным глазом, а также с помощью лупы при увеличении до 30 раз. Это позволяет контролировать достаточно большую поверхность и получать общее представление о качестве металла и о наличии в нем определенных дефектов. Макроструктурный анализ позво-

ляет установить форму и расположение крупных зерен в литом металле, выявить трещины, усадочные пустоты, зональную ликвацию (неоднородность химического состава в объеме слитка).

Макроанализ, как правило, является не окончательным, а предварительным этапом исследования структуры металла. Он позволяет выбрать те участки, которые затем тщательно изучаются с помощью металлографических методов.

Большое значение для успешного проведения макроанализа имеет правильный выбор наиболее характерного для исследуемой детали сечения или места излома. Как правило, для контроля качества металла число образцов, их размеры, место вырезки и другие условия отбора проб указывают в стандартах и технических условиях на конкретную металлопродукцию.

Существуют три способа изучения макроструктуры металлов: *глубокое травление, метод отпечатков, анализ изломов*.

Глубокое травление и метод отпечатков проводят на макрошлифах (темплетах). Контролируемую поверхность перед испытанием торцуют, строгают и шлифуют. Готовая поверхность должна быть ровной без наклепа и прижога.

При изучении макроструктуры *методом травления* образцы после шлифования травят специальными реактивами до выявления строения и дефектов макроструктуры. Для выявления макроструктуры многих марок сталей применяют горячий (60 – 80°C) 50% раствор соляной кислоты. Темплеты травят в течение 5 – 45 мин до четкого выявления макроструктуры. Этот метод применяют для выявления структуры и макродефектов (пор, трещин, раковин и др.). В этом случае изображение и изучение структуры осуществляется на самом макрошлифе.

Метод отпечатков основан на том, что изображение структуры проявляется не на самом шлифе, а на бумаге, ткани или пленке. Материал с нанесенным на него реактивом прижимают к поверхности шлифа. В результате воздействия реактива с отдельными структурными составляющими на бумаге образуются характерные окрашенные продукты. Таким образом, например, выявляют неравномерное распределение серы в стали.

Метод анализа излома наиболее прост и доступен. Объектом исследования является естественная поверхность разрушенного образца или детали. Вид излома свидетельствует о характере разрушения металла.

Микроструктурный анализ состоит в изучении структуры металла и сплавов с помощью световых микроскопов, увеличивающих исследуемый объект в 30 – 2000 раз. Для микроструктурного анализа необходимо изготовить небольшой образец (микрошлиф), имеющий обычно форму цилиндра

или призмы. Плоскую поверхность микрошлифа готовят более тщательно, чем при макроструктурном анализе. После шлифовки и полировки поверхность подвергают химическому травлению специальными реактивами. Например, для травления углеродистых сталей и чугунов применяют спиртовой 2 – 4 %-ный раствор азотной или пикриновой кислоты. В результате действия реактива происходит растворение металлических зерен и их пограничных слоев, которые растворяются более интенсивно. Это приводит к тому, что отражение вертикально падающих лучей света от поверхности зерен и их границ происходит под разными углами. Поэтому границы зерен выявляются в виде темных линий. Кроме того, имеются различия в скоростях растворения отдельных фаз и структурных составляющих.

После травления микрошлиф промывают в проточной воде, высушивают и устанавливают на предметном столике металлографического микроскопа. Перемещая столик микрометрическими винтами, можно детально изучить различные малые участки поверхности металла. Чем больше увеличение микроскопа, тем выше локальность анализа.

Микроструктурный анализ позволяет установить размеры кристаллических зерен, относительное количество структурных составляющих, размеры и расположение неметаллических включений, наличие микродефектов в виде пор и трещин, дендритную ликвацию в зерне, ориентировочно химический состав, изменения в строении сплава под воздействием различных видов обработки.

Железоуглеродистые сплавы. Железоуглеродистые сплавы – стали и чугуны – важнейшие металлические сплавы, применяемые во многих отраслях промышленности. Исходя из этого, изучению сплавов на железной основе в курсе «Материаловедение» отводится ведущее место. В этих сплавах основными компонентами являются железо, углерод и соединения железа с углеродом.

Железо – серебристый металл, плотность 7,86 г/см³, температура плавления 1539 °С. Технически чистое железо содержит 99,85 % железа и 0,15-0,2% примесей. Такое железо называют армко-железо и производят для электротехнических целей. Абсолютно чистого железа не существует. Прочность технического железа составляет 25 кг/мм², пластичность порядка 50 %.

В твердом состоянии железо находится в двух модификациях: α -железо существует при температурах от 1539 до 1392 °С, от 911 до 20 °С и γ -железо в интервале температур 911-1392 °С.

При температуре 768°С происходит магнитное превращение железа: ниже этой температуры железо магнитно, выше – немагнитно.

Углерод – неметаллический элемент с плотностью порядка 2,5 г/см³,

температура плавления 3500 °С. Железо с углеродом образует химическое соединение Fe₃C, называемое цементитом или карбидом железа и содержащее 6,67 % углерода.

Цементит – очень твердый и хрупкий (за счет содержания 6,67% углерода), НВ>800 кг/мм². Температура плавления составляет 1300-1600 °С в зависимости от присутствия примесей тугоплавких металлов, таких как хром, молибден.

В зависимости от содержания углерода сплавы делятся на две большие группы: стали, содержащие до 2,14% углерода, и чугуны, содержащие 2,14-6,67% углерода.

Фазы и структурные составляющие железоуглеродистых сплавов. При взаимодействии железа с углеродом образуются такие фазы, как химическое соединение, твердые растворы, механические смеси, представляющие собой структурные составляющие. Химическим соединением выступает цементит. К твердым растворам относятся феррит, аустенит.

Феррит – твердый раствор углерода в α-железе с максимальным растворением углерода 0,02%. Поэтому феррит представляет собой практически техническое железо с высокой пластичностью и низкой прочностью. Кристаллическая решетка кубическая объемноцентрированная (ОЦК). Феррит ферромагнитен (при температуре ниже 769 °С), пластичен.

Аустенит – твердый раствор углерода в γ-железе с максимальным растворением углерода 2,14% при 1147 °С и 0,8% при 723 °С. При температуре ниже 723 °С аустенит распадается на феррит и цементит. Аустенит пластичен, но твердость его выше, чем у феррита. Кристаллическая решетка кубическая гранцентрированная (ГЦК). Аустенит немагнитен, плотность его больше плотности других составляющих стали.

Мартенсит – структурная составляющая закаленной стали – пересыщенный твердый раствор углерода в α-железе такой же концентрации, как и у исходного аустенита. Кристаллическая решетка тетрагональная. Мартенсит образуется из аустенита при быстром охлаждении, имеет меньшую плотность, чем аустенит и другие структурные составляющие стали; структуре мартенсита в стали сопутствуют высокие напряжения, твердость и прочность, но низкие пластические свойства и особенно низкая ударная вязкость. Исключение составляет мартенсит с очень низким содержанием углерода в сталях и сплавах с повышенным содержанием никеля.

К механическим смесям относятся перлит и ледебурит.

Перлит – структурная составляющая стали – эвтектоидная смесь феррита с цементитом (карбид железа Fe₃C), образующаяся из аустенита,

содержащего 0,8 % углерода, при его медленном охлаждении ниже температуры 727 °С.

Ледебурит – это эвтектика, состоящая из аустенита и цементита в диапазоне температур 1147–723 °С и из смеси перлита и цементита при температуре ниже 723° С.

Графит – свободно выделившийся углерод, в сплавах с содержанием углерода свыше 2,14%. Графит имеет слоистое строение, обладает низкой прочностью, высокой электропроводностью и теплопроводностью, а также способностью гасить вибрации. В чугунах присутствует в виде включений различной формы. Стали и чугуны кроме железа и углерода имеют так называемые постоянные примеси: марганец, кремний, сера, фосфор, а также газы – кислород, азот, водород и др.

Основы диаграммы «железо–углерод» заложил **Д.К.Чернов**, открывший критические точки фазовых превращений, их зависимость от содержания углерода и предугадав взаимосвязь структурных изменений со свойствами стали.

Знание диаграммы «железо–углерод» необходимо для понимания сущности всех превращений, происходящих в железоуглеродистых сплавах при нагреве и охлаждении.

Превращение из жидкого состояния в твердое (первичная кристаллизация) происходит по линии АСД (рис.1.7). Линия АСД – ликвидус, а линия АЕСF – солидус. Форма этих линий показывает, что перед нами сложная диаграмма, представляющая сочетание диаграмм типа II (от точки А до точки Е) и диаграмма I типа (от точки Е до точки F). По линии АС из жидкого расплава начинают выпадать кристаллы твердого раствора углерода в γ -железе, называемого аустенитом (по имени У. Робертса-Аустена – английского металлурга). По линии СД из жидкого расплава выпадают кристаллы цементита. В точке С при содержании 4,3% углерода и температуре 1130 °С происходит одновременно кристаллизация аустенита и цементита, и образуется их механическая смесь – эвтектика, называемая в этой системе ледебуритом (по имени А. Ледебура – немецкого металлурга). Ледебурит присутствует во всех сплавах, содержащих от 2,14 до 6,67% углерода. Эти сплавы относятся к группе чугунов. Точка Е соответствует предельному насыщению железа углеродом (2,14%). Сплавы, лежащие левее этой точки, относятся к группе сталей.

Превращения в твердом состоянии (вторичная кристаллизация) происходят при температурах выше 723 °С. Линии GSE, PSK и GPQ показывают, что в сплавах системы в твердом состоянии происходят изменения структуры. Эти превращения происходят вследствие перехода железа из одной мо-

дификации в другую, а также в связи с изменением растворимости углерода в железе. При охлаждении сплавов аустенит распадается с выделением по линии GS феррита – твердого раствора углерода в α -железе, а по линии SE – вторичного цементита. В точке S при содержании 0,8% углерода и при температуре 723 °С весь аустенит распадается и одновременно кристаллизуется механическая смесь феррита и цементита – эвтектоид (т.е. подобный эвтектике), который в этой системе называется перлитом. Сталь, содержащая 0,8 % углерода, называется эвтектоидной, менее 0,8% – доэвтектоидной, от 0,8 до 2,14 % С – заэвтектоидной.

Чугуны с содержанием углерода до 4,3% называются доэвтектическими, ровно 4,3% – эвтектическими, свыше 4,3% – заэвтектическими. Для чугунов образование цементита – свидетельство метастабильного равновесия, т.е. неустойчивое, при очень медленном охлаждении должна происходить графитизация (распад цементита). На диаграмме «железо – углерод» пунктиром нанесены линии выделения графита, а сплошной – цементита. Диаграмма состояния «железо – углерод» является стабильной (равновесной). По ней изучают серые чугуны, структурным признаком которых является наличие графита, выделяющегося на ферритной основе.

Диаграмма состояния «железо-графит». Диаграмма состояния «железо–графит» отображает стабильное равновесие фаз. В стабильной системе при температурах, соответствующих линии С'Д', кристаллизуется графит, называемый первичным. На участке АС' линии ликвидус при кристаллизации выделяется аустенит. При температуре, соответствующей линии Е'С'F', образуется смесь, состоящая из графита и аустенита, называемая графитной эвтектикой. Линия S'E', характеризующая растворимость углерода в аустените, показывает, что с понижением температуры растворимость углерода снижается и из аустенита начинает выделяться свободный углерод – вторичный графит. При температуре, соответствующей линии P'S'K', аустенит, содержащий 0,7% углерода (точка S'), распадается на феррит и графит, образуя графитный эвтектоид.

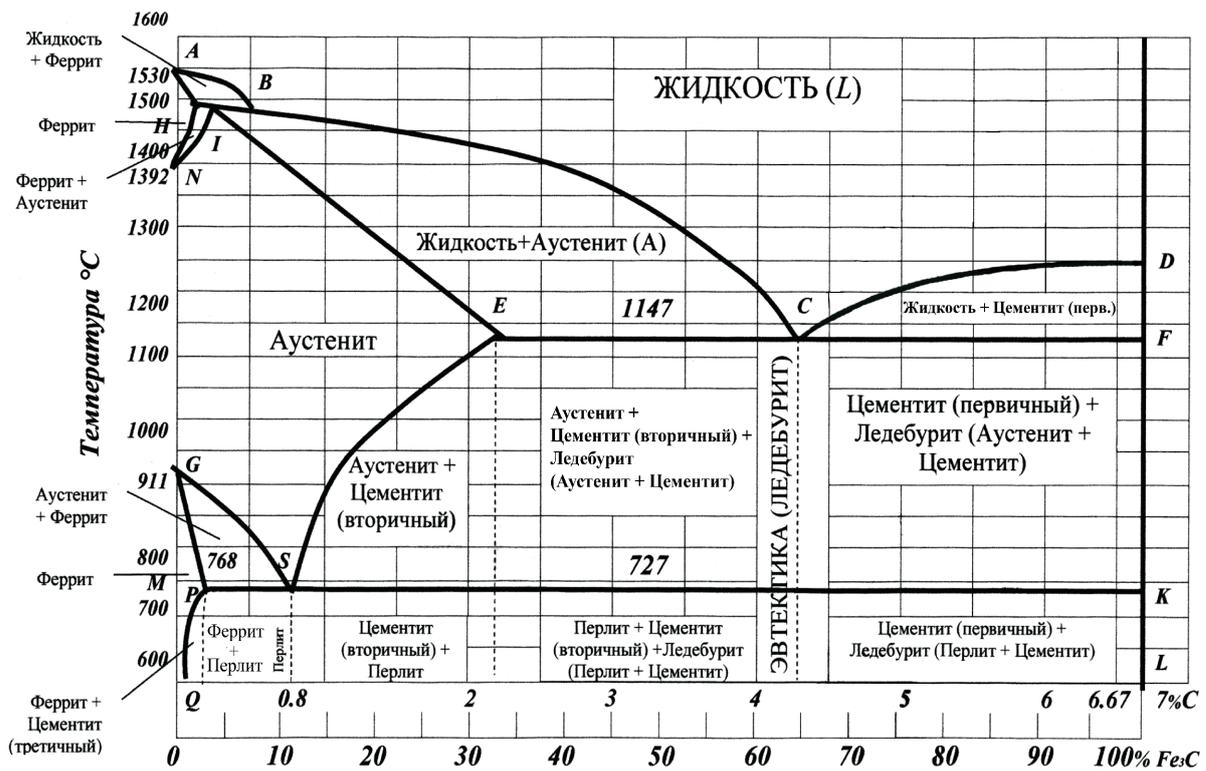


Рисунок 1.7. Диаграмма состояния «железо – цементит» (Fe_3C)

Если при эвтектической кристаллизации выделяется только графит, то чугун называется серым по цвету излома, если выделяется графит и цементит, то чугун называется половинчатым, а если только цементит – белым, по цвету излома.

Процесс графитизации состоит из трех стадий: первичной – когда графит выделяется из жидкой фазы и в результате распада первичного и эвтектического цементита на аустенит и графит; промежуточной – когда графит (вторичный) выделяется из аустенита; вторичной – когда графит выделяется при распаде цементита на графит и феррит.

Основная масса графита в серых чугунах образуется в период первой стадии графитации. В зависимости от концентрации углерода в сплаве чугуны подразделяются на доэвтектические со структурой перлит + цементит, эвтектические состоят из ледебурита, заэвтектические имеют структуру ледебурит + цементит.

Диаграмма состояния «железо – графит» позволяет изучить наличие тех или иных фаз и структурных составляющих в сплаве в зависимости от концентрации компонентов и температуры сплава (рис. 1.8). Эта диаграмма имеет не только теоретическое, но и практическое значение. По ней можно определить температурные режимы при различных видах термической обработки, температуры начала и конца заливки металла в литейные формы, по-

лучать информацию о свойствах сплавов, так как все они определяются структурой (внутренним строением) сплава.

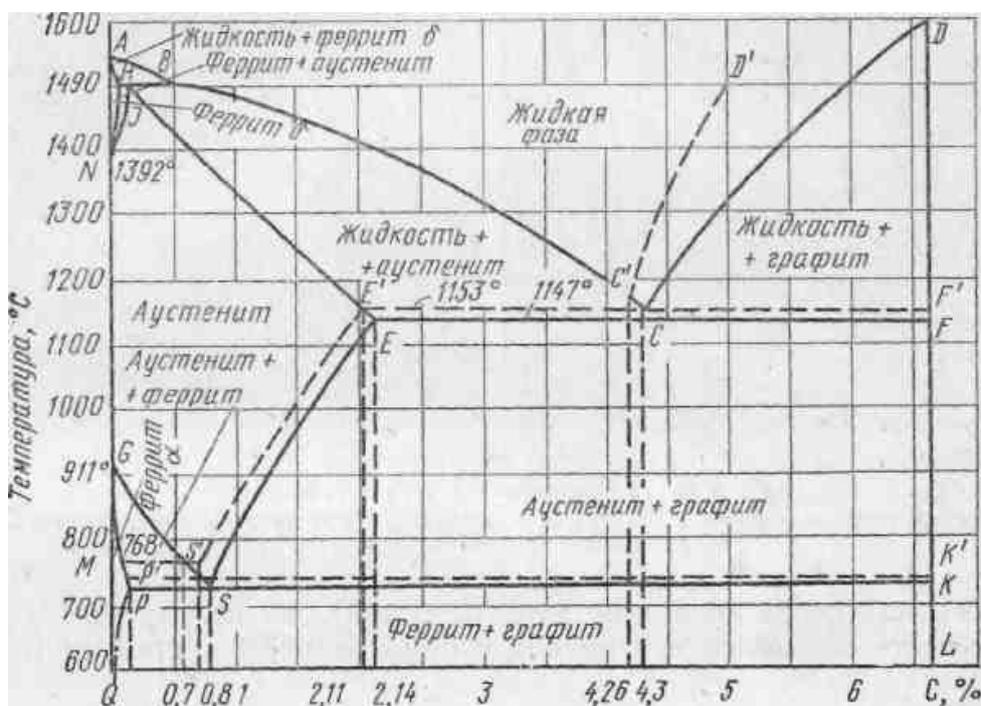


Рисунок 1.8. Диаграмма состояния «железо – графит» (FeC)

Тема 1.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Под механическими свойствами понимают совокупность свойств, характеризующих сопротивление металла действию приложенных к нему внешних сил (нагрузок). Силы могут быть приложены в виде статической (плавно возрастающей), и динамической (возрастающей резко и с большой скоростью), повторно-переменной (многократно прикладываемой, изменяющейся по величине или величине и направлению) нагрузки.

К наиболее характерным механическим свойствам относятся: *временное сопротивление, предел текучести, сопротивление деформации, относительное удлинение и сужение, ударная вязкость, твердость.*

Механические испытания в зависимости от характера изменения и времени действия нагрузки разделяют на статические испытания (на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, твердость), динамические испытания (на ударный изгиб), усталостные испытания (при повторно-переменном приложении нагрузки). Отдельную группу составляют длительные высокотемпературные механические испытания (на ползучесть, длительную прочность и т.д.).

Испытания на растяжение. Испытания на растяжение позволяют получить достаточно полную информацию о механических свойствах материала. При испытаниях на специальных разрывных машинах образец растягивается двумя противоположными силами, приложенными к его оси. В соответствии с ГОСТ 1497–84 для испытания на растяжение используют стандартные образцы, имеющие в поперечном сечении форму круга (цилиндрические образцы) или прямоугольника (плоские образцы) рис.1.9. Плоские образцы обычно применяют для испытания листовых материалов. Длина начальной расчетной части l_0 образцов зависит от площади поперечного сечения F_0 . Перед испытанием на образцы наносят расчетную длину неглубокими кернами, рисками или другими метками.

Для цилиндрических образцов l_0/d_0 называют *кратностью образца*, от которой зависит его конечное относительное удлинение. На практике применяют образцы с кратностью 2,5, 5 и 10. Самым распространенным является образец с кратностью 5.

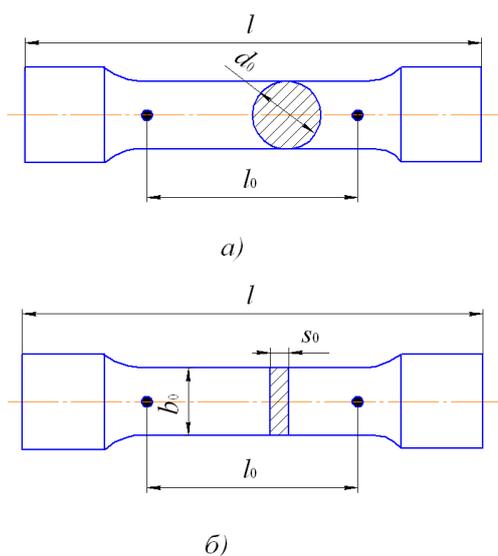


Рисунок 1.9. Образцы для испытания на растяжение: а – круглый цилиндрический; б – плоский

Перед испытанием образец закрепляют вертикально в захватах испытательной машины. На рис. 1.10 представлена принципиальная схема типичной испытательной машины, основными элементами которой являются: приводной нагружающий механизм, обеспечивающий плавное нагружение образца вплоть до его разрыва; силоизмерительное устройство для измерения силы сопротивления образца растяжению; механизм для автоматической записи диаграммы растяжения.

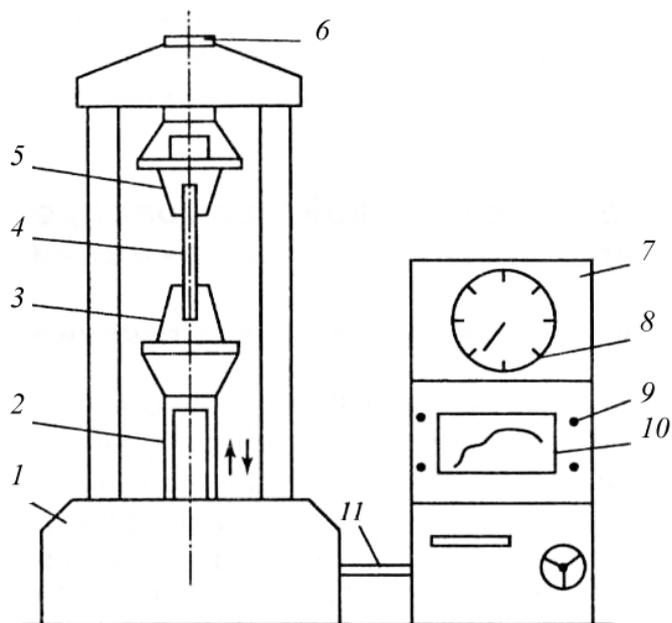


Рисунок 1.10. Схема испытательной машины: 1 – остов машины; 2 – винт грузовой; 3 – нижний захват (активный); 4 – образец; 5 – верхний захват (пассивный); 6 – силоизмерительный датчик; 7 – пульт управления с электроприводной аппаратурой; 8 – индикатор нагрузок; 9 – рукоятка управления; 10 – диаграммный механизм; 11 – кабель

В процессе испытания диаграммный механизм непрерывно регистрирует первичную (машинную) диаграмму растяжения в координатах нагрузка P – абсолютное удлинение образца Δl (рис.1.11).

Диаграмма растяжения состоит из трех участков: упругой деформации OA , равномерной деформации AB и сосредоточенной деформации шейки BC .

Для большинства пластичных материалов характерна диаграмма растяжения с постепенным переходом от упругой в пластическую область (рис.1.11,б). Для некоторых пластичных материалов (например, низкоуглеродистая сталь) свойственна диаграмма растяжения с переходом в пластическую область в виде площадки текучести $A-A'$ (рис.1.11,а).

При растяжении определяют следующие основные показатели прочности и пластичности материалов.

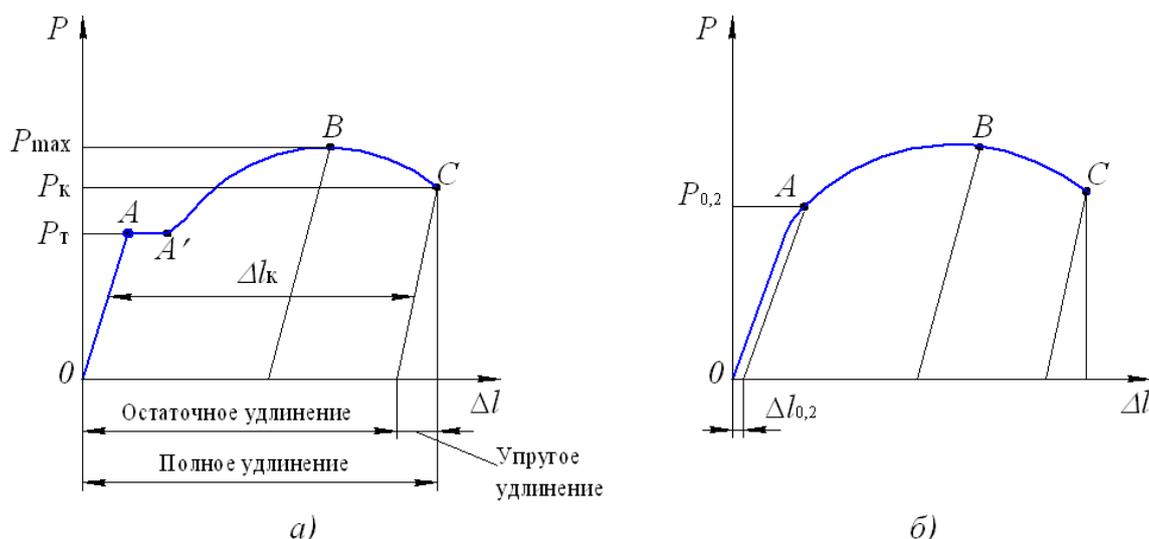


Рисунок 1.11. Схемы машинных (первичных) диаграмм растяжения пластичных материалов: *а* – с площадкой текучести; *б* – без площадки текучести

Диаграмма растяжения состоит из трех участков: упругой деформации *ОА*, равномерной деформации *АВ* и сосредоточенной деформации шейки *ВС*.

Для большинства пластичных материалов характерна диаграмма растяжения с постепенным переходом от упругой в пластическую область (рис.1.11,*б*). Для некоторых пластичных материалов (например, низкоуглеродистая сталь) свойственна диаграмма растяжения с переходом в пластическую область в виде площадки текучести *А–А'* (рис.1.11,*а*).

При растяжении определяют следующие основные показатели прочности и пластичности материалов.

Показатели прочности материалов характеризуются удельной величиной – напряжением, равным отношению нагрузки в характерных точках диаграммы растяжения к площади поперечного сечения образца. Дадим определение наиболее часто используемым показателям прочности материалов.

Предел текучести (физический) (σ_T , МПа) – это наименьшее напряжение, при котором материал деформируется (течет) без заметного изменения нагрузки:

$$\sigma_T = P_T / F_0,$$

где P_T – нагрузка, соответствующая площадке текучести на диаграмме растяжения (рис.1.9, *а*).

F_0 – начальная площадь поперечного сечения расчетной части образца.

Если на машинной диаграмме растяжения нет площадки текучести (рис.1.9, *б*), то задаются допуском на остаточную деформацию образца и определяют условный предел текучести.

Условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$, МПа) – это напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % от начальной расчетной длины образца:

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0,$$

где $P_{0,2}$ – нагрузка, соответствующая остаточному удлинению $\Delta l_{0,2} = 0,002 l_0$.

Временное сопротивление (предел прочности) (σ_B , МПа) – это напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке P_{\max} , предшествующей разрыву образца:

$$\sigma_B = P_{\max} / F_0.$$

Истинное сопротивление разрыву (S_k , МПа) – это напряжение, определяемое отношением нагрузки P_k в момент разрыва к площади поперечного сечения образца в месте разрыва F_k :

$$S_k = P_k / F_k.$$

Показатели пластичности. Величина пластической деформации к моменту разрушения образца характеризует пластичность материала. Различают две характеристики пластичности: относительное удлинение δ и относительное сужение ψ .

Относительное удлинение после разрыва (δ , %) – это отношение приращения расчетной длины образца после разрыва Δl_k к ее первоначальной длине:

$$\delta = (\Delta l_k / l_0) \cdot 100 = [(l_k - l_0) / l_0] \cdot 100.$$

Относительное удлинение после разрыва зависит от соотношения l_0 и d_0 , т.е. от кратности образцов. Чем меньше отношение l_0 / d_0 (кратность образца), тем больше δ . Это объясняется влиянием шейки образца, где имеет местососредоточенное удлинение. Поэтому индекс δ указывает на кратность образца, например δ_5 , δ_{10} . Если значения δ приведены без указания кратности образцов, то в этом случае имеют в виду кратность 5.

Относительное сужение после разрыва (ψ , %) – это отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва ΔF_k к начальной площади поперечного сечения:

$$\psi = (\Delta F_k / F_0) \cdot 100 = [(F_0 - F_k) / F_0] \cdot 100 .$$

Условно принято считать металл надежным при $\delta \geq 15 \%$, $\psi \geq 45 \%$.

В отличие от конечного относительного удлинения конечное относительное сужение не зависит от соотношения l_0 и d_0 (кратности образца), так как в последнем случае деформацию оценивают в одном, наиболее узком, сечении образца.

Условно принято считать металл надежным при $\delta \geq 15 \%$, $\psi \geq 45 \%$.

Современные испытательные машины позволяют проводить испытания по различным режимам в широком диапазоне нагрузок и скоростей деформирования и оснащены ПЭВМ. Внешний вид разрывной испытательной машины приведен на рис.1.12.



Рисунок 1.12. Внешний вид испытательной разрывной машины с ПЭВМ

Испытания на твердость. Основными методами определения твердости являются методы внедрения в поверхность испытываемого металла стандартных наконечников из твердых недеформируемых материалов под действием статических нагрузок: методы Бринелля, Роквелла, Виккерса. Твердость

определяется глубиной внедрения в испытываемый материал закаленного стального или вольфрамового шарика, алмазных конуса или пирамиды.

Значения твердости выражаются *числами твердости* в различных шкалах.

Определение твердости по методу Бринелля.

Для определения твердости по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59) в качестве твердого тела, вдавливаемого в испытуемый материал, используют стальной шарик определенного диаметра D , который вдавливается в испытуемый материал с усилием P . (рис.1.13) После снятия нагрузки на поверхности материала остается шаровой отпечаток диаметром d .

Показателем твердости является число твердости по Бринеллю, обозначаемое НВ. Число твердости представляет собой отношение усилия P к площади поверхности F получаемого отпечатка (шарового сегмента):

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2H}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - (d/D)^2}\right)}$$

Чем меньше диаметр отпечатка, тем выше твердость металла.

На практике твердость определяют не по формулам, а по специальным таблицам, исходя из диаметра отпечатка d .

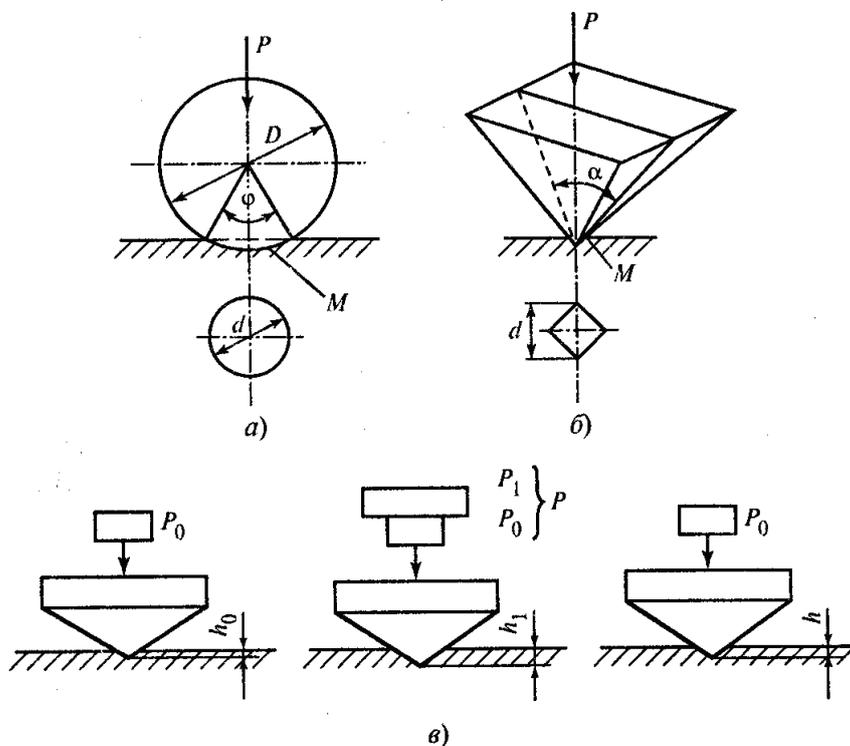


Рисунок 1.13. Схемы испытания на твердость:
 а – по Бринеллю; б – по Виккерсу; в – по Роквеллу

Твердость по Бринеллю выражается в кгс/мм² (значение твердости по Бринеллю обычно дают без указания размерности, например НВ 350).

Методом по Бринеллю можно испытывать материал с твердостью не более НВ 450. При более высокой твердости испытуемого материала вдавливаемый шарик деформируется и результаты испытания искажаются.

Временное сопротивление и число твердости по Бринеллю связаны между собой: для стали $\sigma_{\text{в}} = 0,34 \text{ НВ}$, для алюминиевых сплавов $\sigma_{\text{в}} = 0,35 \text{ НВ}$, для медных сплавов $\sigma_{\text{в}} = 0,45$.

Определение твердости по Виккерсу (ГОСТ 2999-75) осуществляется вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине 136° (рис.1.13,б). После снятия нагрузки вдавливания измеряется диагональ отпечатка d . Число твердости по Виккерсу НV подсчитывается как отношение нагрузки P к площади поверхности пирамидального отпечатка F :

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2}$$

Число твердости по Виккерсу обозначается символом НV, указываются нагрузка P и время выдержки под нагрузкой, причем размерность числа твердости, кгс/мм², не ставится. Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают для сталей 10–15 с, а для цветных металлов – 30 с. Например, НV_{10/15} 450 означает, что число твердости по Виккерсу 450 получено при $P = 10$ кгс (98,1 Н), приложенной к алмазной пирамиде в течение 15с.

Преимущество метода Виккерса по сравнению с методом Бринелля заключается в том, что методом Виккерса можно испытывать материалы более высокой твердости из-за применения алмазной пирамиды.

При испытании на твердость по *методу Роквелла* (ГОСТ 9013–59) в поверхность материала вдавливается алмазный конус, угол при вершине которого составляет 120°, или стальной шарик диаметром 1,588 мм. Согласно этому методу, за условную меру твердости принимается глубина отпечатка. Схема испытания по методу Роквелла показана на рис.1.13,в. Вначале к индентору прикладывается предварительная нагрузка P_0 , под действием которой он вдавливается в образец на глубину h_0 . Затем прикладывается основная нагрузка P_1 , под действием которой индентор вдавливается на глубину h_1 . После этого снимают нагрузку P_1 , но оставляют предварительную нагрузку P_0 . При этом под действием упругой деформации индентор поднимается вверх, но не достигает уровня h_0 . Разность $h - h_0$ зависит от твердости мате-

риала; чем тверже материал, тем меньше эта разность. Глубина отпечатка измеряется индикатором часового типа с ценой деления 0,002 мм. При испытании мягких металлов методом Роквелла в качестве индентора применяется стальной шарик. Последовательность операций такая же, как и при испытании алмазным конусом. Число твердости, определенное методом Роквелла, обозначается символом HR. Однако в зависимости от формы индентора и значений нагрузок вдавливания к этому символу добавляется буква А или С, или В, обозначающая соответствующую шкалу измерений.

Число твердости по Роквеллу подсчитывают по формулам:

$$HRA(HRC) = 100 - ((h - h_0) / 0,002),$$

$$HRB = 130 - ((h - h_0) / 0,002),$$

где 100 и 130 – предельно заданные числа делений индикатора часового типа с ценой деления 0,002 мм.

Например, HRC 50 означает, что твердость, определенная методом Роквелла по шкале С при вдавливании алмазного конуса, равна 50 (размерность не ставится).

Преимущество метода Роквелла по сравнению с методами Бринелля и Виккерса заключается в том, что значение твердости по методу Роквелла фиксируется непосредственно стрелкой индикатора, при этом отпадает необходимость в оптическом измерении размеров отпечатка.

Для измерения твердости тонких слоев материалов и даже их отдельных структурных составляющих применяют *метод микротвердости* (ГОСТ 9450–76). Этот метод подобен методу Виккерса, однако при этом используют малые нагрузки вдавливания: 0,049 (0,005); 0,098 (0,01); 0,196 (0,02); 0,49 (0,05); 0,98 (0,1); 1,962 (0,2); 4,9 (0,5) Н (кгс).

Испытания на твердость проводят на приборах твердомерах. Внешний вид современного прибора твердомера, предназначенного для измерения твердости по Роквеллу, представлен на рис. 1.14.

Испытания на трещиностойкость. *Трещиностойкостью* называют свойство материалов сопротивляться развитию трещин при механических и других воздействиях. Трещины в материалах могут быть металлургического и технологического происхождения, а также возникать и развиваться в процессе эксплуатации. При возможном хрупком разрушении для безопасной работы элементов конструкций и машин необходимо количественно оценивать размеры допустимых трещиноподобных дефектов.



Рисунок 1.14. Внешний вид цифрового твердомера для проведения измерений твердости по Бринеллю

Для оценки размера допустимого дефекта необходимо знать количественную характеристику трещиностойкости материала.

Количественной характеристикой трещиностойкости материала является *критический коэффициент интенсивности напряжений в условиях плоской деформации K_{Ic} в вершине трещины*. На практике значение K_{Ic} используют для определения связи между разрушающими напряжениями и размерами дефектов в элементе конструкции.

Коэффициент K_{Ic} определяют испытанием специальных образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной (ГОСТ 25506–85). На рис.1.15 изображена схема компактного образца с надрезом и выращенной усталостной трещиной для определения K_{Ic} .

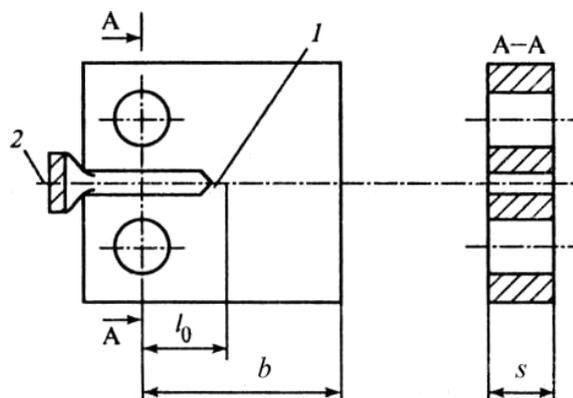


Рисунок 1.15. Схема прямоугольного компактного образца для определения K_{Ic} : 1 – трещина усталости; 2 – датчик раскрытия

Образец подвергается внецентренному растяжению (рис.1.16, а) с автоматической регистрацией диаграммы нагрузка P – раскрытие берегов надреза образца V (рис.1.16, б).

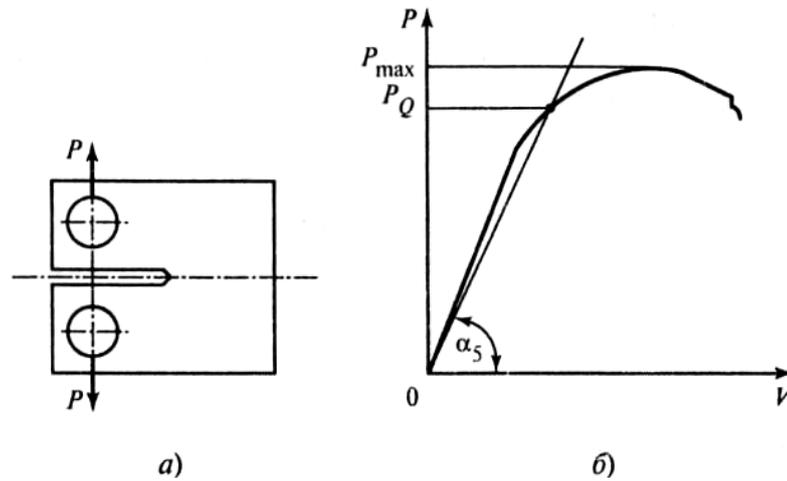


Рисунок 1.16. Схемы компактного образца (а) и диаграммы его внецентренного растяжения $P-V$ (б)

При обработке диаграммы из начала координат проводят секущую, под углом α_5 тангенс угла наклона которой на 5 % меньше тангенса угла наклона начального прямолинейного участка диаграммы. Затем определяют нагрузку P_Q и по излому разрушенного образца оценивают длину трещины l . По полученным значениям P_Q и l рассчитывают коэффициент интенсивности напряжений K_Q , МПа $\sqrt{м}$:

$$K_Q = \frac{P_Q}{h\sqrt{b}} f(l/b),$$

где s, b – толщина и ширина образца соответственно;
 $f(l/b)$ – функция значений l/b .

Значение коэффициента K_Q равно значению критического коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} , если выполняются условия:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_{\max}}{P_Q} &\leq 1,1; \\ h &\geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{0,2}} \right)^2; \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{S - S_c}{S} \cdot 100\% \leq 15\%,$$

где S_c – толщина разрушенного образца в зоне максимального поперечного сужения.

Если условия не выполняются, то необходимо взять образец с большей толщиной и повторить испытания.

Значения критического коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} и предела текучести σ_{02} , определенные при комнатной температуре для некоторых конструкционных материалов, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Значения K_{1c} и σ_{02} для некоторых конструкционных материалов

Материал	Марка	K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$	σ_{02} , МПа
Легированная сталь	25ХНЗМФА	120	745
Титановый сплав	BT3-1	52	1010
Алюминиевый сплав	Д-16	33	290

Испытания на ударную вязкость. Основным динамическим испытанием является метод испытания на ударный изгиб (ГОСТ 9454–78). Этот вид испытаний проводят для оценки склонности материалов к хрупкому разрушению. Метод основан на разрушении образца с надрезом одним ударом маятникового копра (рис.1.17). В результате таких испытаний определяют *ударную вязкость*, которая оценивается работой, затраченной на ударный излом образца и отнесенной к площади его поперечного сечения в месте надреза.

Согласно стандарту, для определения ударной вязкости применяют призматические образцы с надрезами различных типов. Самыми распространенными типами являются образцы с U-образным (рис.1.18, а) и V-образным (рис.1.18, б) надрезами.

Работа K , МДж, затраченная на ударный излом образца, может быть определена по формуле:

$$K = G(h_1 - h_2),$$

где G – вес маятника;

h_1 – высота подъема маятника до испытаний;

h_2 – высота подъема маятника после испытаний.

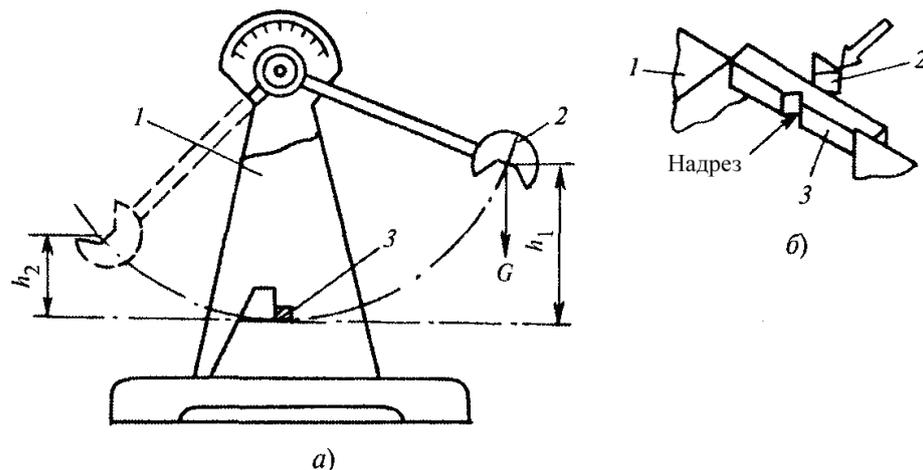


Рисунок 1.17. Схема испытаний на ударную вязкость: *а* – схема маятникового копра; *б* – расположение образца на копре; 1 – корпус; 2 – маятник; 3 – образец

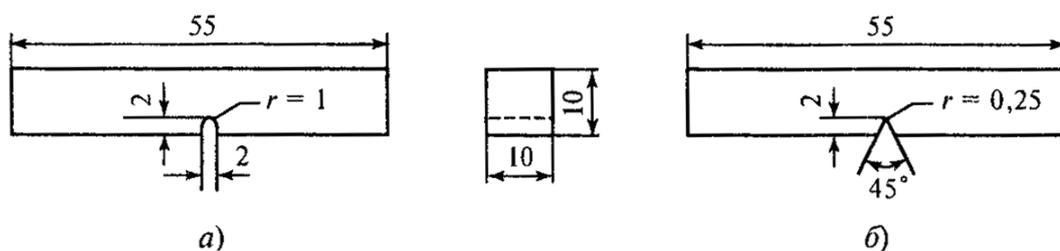


Рисунок 1.18. Образцы для испытаний на ударную вязкость: *а* – с U-образным надрезом; *б* – с V-образным надрезом

Указатель на шкале копра, проградуированный с учетом потерь (трения в подшипниках, сопротивления стрелки указателя, сопротивления воздуха и т.п.) фиксирует значение работы K .

Ударная вязкость обозначается символом $KС$, МДж/м², и подсчитывается как отношение работы K к площади поперечного сечения образца в надрезе F . Если образец с U-образным надрезом, то к символу добавляется буква U ($KСU$), а если с V-образным надрезом, то добавляется буква V ($KСV$).

Вместе с тем ударная вязкость является сложной механической характеристикой и состоит из двух составляющих: удельной работы зарождения трещины $KС_3$ и удельной работы ее распространения $KС_p$:

$$KС = KС_3 + KС_p.$$

В охрупченных материалах основная часть работы совершается на зарождение трещины, при этом работа распространения трещины незначительна. В пластичных материалах преобладает работа на распространение трещины. Анализ составляющих ударной вязкости позволяет более рационально выбрать материал и определить его назначение.

Современные маятниковые копры (рис.1.19) автоматизированы: подъем молота осуществляется с помощью моторизованной системы, которая автоматически возвращает молот в исходное положение после каждого испытания. Каждый инструмент с автоматической цифровой системой управления укомплектован автоматической системой торможения молота.

При установке образца вручную, испытатель находится вне рабочей зоны инструмента. Установка производится с помощью специального устройства, обеспечивающего центровку образца на опорах. Цифровая консоль управления имеет мембранную клавиатуру и жидкокристаллический дисплей с подсветкой для выбора параметров испытания и результатов.



Рисунок 1.19. Внешний вид копра для проведения испытаний образцов на ударную вязкость

При установке образца вручную, испытатель находится вне рабочей зоны инструмента. Установка производится с помощью специального устройства, обеспечивающего центровку образца на опорах. Цифровая консоль управления имеет мембранную клавиатуру и жидкокристаллический дисплей

с подсветкой для выбора параметров испытания и результатов.

Испытания на хладноломкость и критическую температуру хрупкости. Испытания ударной вязкости широко применяют для оценки склонности металла к хрупкому разрушению при низких температурах. Для оценки хладноломкости обычно проводят испытания серии образцов при понижающихся температурах.

Хладноломкостью называют способность некоторых металлов охрупчиваться при низких температурах. К хладноломким относят металлы с ОЦК, например, Fe_{α} и ГПК решеткой, например, Zn. Для этой группы металлов при отрицательной температуре наблюдается резкое снижение ударной вязкости.

К нехладноломким металлам относят металлы с ГЦК решеткой, например Fe_{γ} , Al, Ni и др. Деление металлов на хладноломкие и нехладноломкие условно, так как, например, аустенитные стали, имеющие решетку гранецентрированного куба, тоже подвержены охрупчиванию, но только в меньшей степени и при более низких температурах, чем углеродистые и низколегированные стали, имеющие решетку объемно-центрированного куба.

Испытывая образцы на ударную вязкость, можно хрупко разрушить вязкий металл в результате одновременного воздействия надреза, повышенной скорости деформирования и низкой температуры. Кривые зависимости ударной вязкости от температуры называют *серийными кривыми хладноломкости*. На рис.1.18, а представлены графики температурного изменения ударной вязкости хладноломкой стали. Как видно из рисунка, снижение ударной вязкости, т.е. вязкие и хрупкие изломы, происходит в некотором интервале температуры.

Характер снижения ударной вязкости напоминает порог, что привело к выражению *порог хладноломкости*. Температура, при которой происходит определенное снижение ударной вязкости, называется *критической температурой хрупкости* $T_{кр}$. Количественно критическую температуру хрупкости можно определить по температуре, соответствующей началу порога хладноломкости (точка 1), концу порога хладноломкости (точка 3) и по заданному значению ударной вязкости KC_2 (точка 2).

Оценку хладноломкости можно также проводить по виду излома разрушившегося образца. Метод основан на определении соотношения площадей вязких и хрупких участков излома ударных образцов. Вязкий излом имеет характерное волокнистое строение с пепельным оттенком. С понижением температуры количество волокнистой структуры в изломе снижается, появляются кристаллические блестящие участки. Обычно за критическую температуру хрупкости принимают такую температуру, при которой доля волок-

нистой составляющей структуры равна 50%.

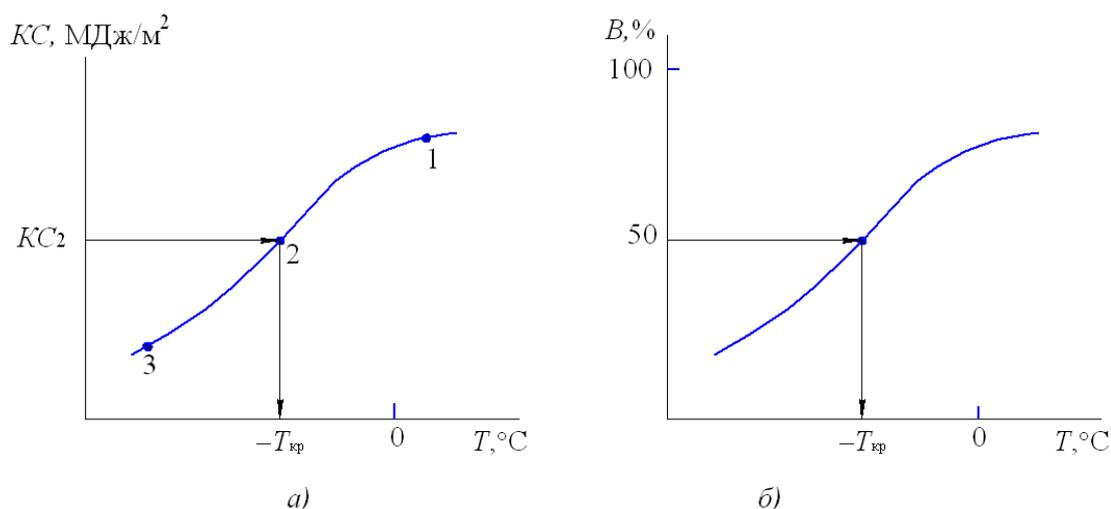


Рисунок 1.18. Схемы низкотемпературного изменения ударной вязкости (а) и волокнистости в изломе ударного образца (б)

Усталостные испытания. Усталость представляет собой процесс постепенного накопления повреждений в металле под действием переменных напряжений, приводящих к образованию и развитию усталостных трещин. Усталость ответственна примерно за 50 % случаев всех аварийных разрушений, встречающихся в инженерной практике.

Большинство разрушений деталей и конструкций при эксплуатации происходит в результате циклического нагружения. Металл, подверженный такому нагружению, может разрушаться при более низких напряжениях, чем при однократном плавном нагружении. Свойство материалов противостоять усталости называют *выносливостью*.

Испытания на усталость проводят в соответствии с ГОСТ 25.502 – 79. Усталостные характеристики при комнатной температуре обычно определяют при испытании образцов круглого сечения на изгиб с вращением рис.1.19.

Циклическое нагружение осуществляется подвешенным неподвижным грузом при вращении консольно закрепленного образца (рис.1.19, а). Цикл напряжений – это совокупность переменных значений напряжений за один период T их изменения. За максимальное напряжение цикла σ_{\max} принимают наибольшее по алгебраической величине напряжение, а за минимальное σ_{\min} – наименьшее по алгебраической величине напряжение. Цикл характеризуется

коэффициентом асимметрии $R_{\sigma} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$.

Если $|\sigma_{\min}| = |\sigma_{\max}|$, то $R = -1$ и цикл в этом случае называют *симметричным* (рис.1.19, б). Если $|\sigma_{\min}| \neq |\sigma_{\max}|$ то цикл называют *асимметричным*.

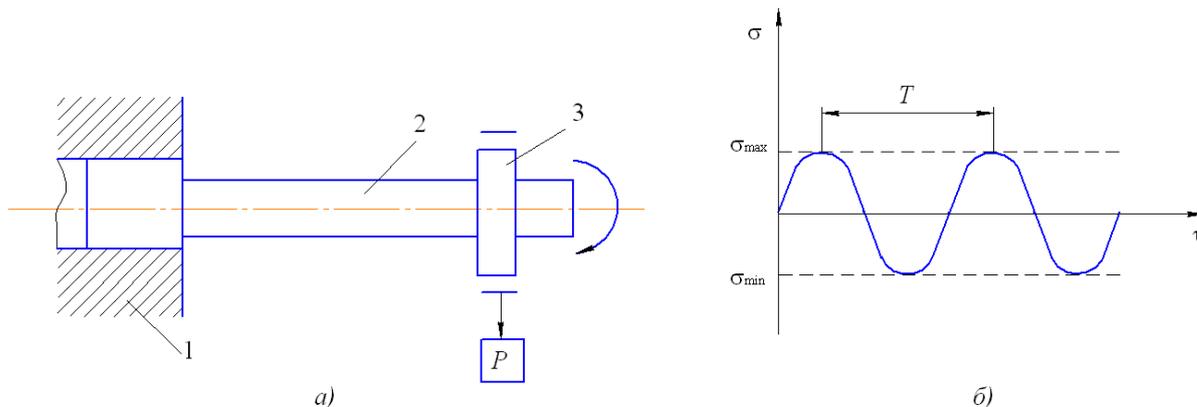


Рисунок 1.19. Пример испытаний на усталость: а – схема нагружения образца; б – циклическое изменение напряжения а в образце; 1 – вращающийся шпиндель; 2 – образец; 3 – нагружающий подшипник

Сопротивление усталости характеризуется *пределом выносливости* σ_R , под которым понимают максимальное напряжение, не вызывающее разрушения образца при любом числе циклов (физический предел выносливости) или заданном числе циклов (ограниченный предел выносливости). Предел выносливости при симметричном цикле обозначается σ_{-1} .

Испытывают серию образцов (не менее 15) при различной нагрузке и определяют разрушающее напряжение и соответствующее число цикло нагружения. Каждый образец испытывают только на одном уровне напряжений – до разрушения или базового числа циклов. По результатам испытаний отдельных образцов строят диаграммы усталости в координатах максимальное напряжение σ_{\max} – число циклов N (рис.1.20).

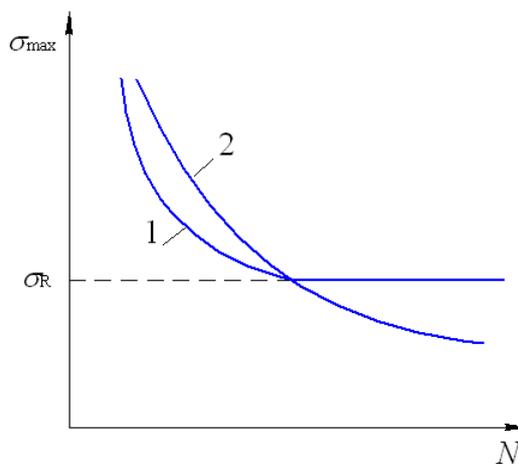


Рисунок 1.20. Диаграмма усталости: 1 – материалы, имеющие физический предел выносливости; 2 – материалы, не имеющие физический предел выносливости образец

Переход кривой усталости в горизонтальную линию наблюдается обычно на сталях после 10^7 циклов нагружения. Для цветных сплавов это значение составляет обычно 10^8 циклов нагружения. Ордината, соответствующая постоянному значению σ_{\max} , является физическим пределом выносливости. Но могут быть случаи, когда и после указанного числа циклов кривая усталости не переходит в горизонтальную линию, а продолжает снижаться. Тогда $N = 10^7$ для сталей и $N = 10^8$ для цветных сплавов принимают за базовое число циклов и при указанных числах циклов определяют ограниченный предел выносливости.

Изложенная выше методика испытания материалов относится к испытаниям на *многоцикловую усталость*, когда используются большое базовое число циклов (до $N = 10^7-10^8$) и высокая частота нагружения (до 300 Гц). Кроме того, проводят испытания и на *малоцикловую усталость*, отражающие условия эксплуатации конструкций, подвергающихся воздействию редких, но значительных по величине циклических нагрузок. Испытания на малоцикловую усталость проводятся при малой частоте нагружения (3–5 Гц) и базовом числе циклов не более $N = 5 \cdot 10^4$.

Термической усталостью называют усталость металлов, вызванную напряжениями от циклических колебаний температуры. Термическая усталость отличается от силовой меньшим числом циклов и сравнительно высоким уровнем напряжений.

Тема 1.3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕРМИЧЕСКОЙ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ И МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру, а, следовательно, и свойства является термическая обработка.

Физическая сущность термической обработки. Термическая обработка является одним из главных способов влияния на строение и свойства сплавов.

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения металлов и сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения. Термическая обработка используется в качестве промежуточной операции для улучшения обрабатываемости давлением, резанием и как окончательная операция технологического процесса, обеспечивающая заданный уровень физико-механических свойств конкретной детали.



Рисунок 1.21. Термическая обработка деталей

Трудно переоценить значение термической обработки в современной машинной технике, основанной на использовании различных металлических сплавов. Основные факторы воздействия при термической обработке – это температура и время, поэтому режим любой термической обработки можно представить графиком в координатах «температура (t) – время (τ)» (рис.1.22).

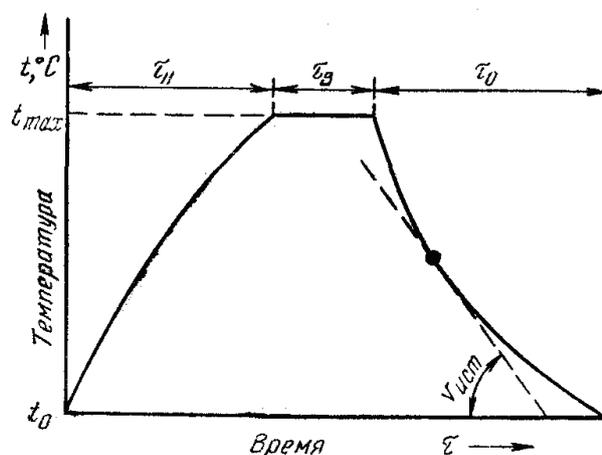


Рисунок 1.22. График режима термической обработки

Режим термообработки характеризует следующие основные параметры: температура нагрева t_{max} , время выдержки сплава при температуре нагрева $\tau_в$, скорость нагрева $V_н$ и скорость охлаждения $V_{охл.}$. Если нагрев производится с постоянной скоростью, то это в координатах «температура – время» характеризуется прямой линией с постоянным углом наклона. При неравномерной скорости нагрева (или охлаждения) на практике оперируют значением средней скорости охлаждения (нагрева).

Основной задачей термической обработки является тепловое воздействие на металл в целях изменения строения, а следовательно, и свойств. Следует обратить внимание на отличие термообработки от других способов воздействия на металл, состоящее в том, что при термической обработке форма и размеры изделий, а также химический состав стали остаются неизменными. С помощью термообработки повышаются надежность и срок службы деталей машин и инструментов, расширяется область применения различных сталей (повышаются такие необходимые свойства, как твердость, прочность, износостойкость, упругость).

Термическая обработка применялась с давних времен, но сущность изменений, происходящих при нагреве и охлаждении сплавов, и, следовательно, умение управлять ими и получать нужные результаты, были изучены сравнительно недавно. Д.К. Чернов обнаружил ряд изменений в стали при ее охлаждении и нагревании, которые не были замечены металлургами до него. Он открыл два значения температуры, которые оказывали решающее значение на строение и свойства стали. Д.К. Чернов назвал эти температуры критическими точками, которые обозначаются A_1 , A_3 . Одна критическая точка соответствовала темно-вишневому калению, т. е. 723°C (точка A_1), а вторая – красному калению (температура понижается, начиная с 911°C , точка A_3). Критические точки зависят от содержания углерода. Последующие исследования ученых подтвердили существование критических точек и превращений в стали. Изменяя температуру и продолжительность нагрева, температуру и продолжительность выдержки и скорость охлаждения, можно сообщить стали одного и того же химического состава самые разнообразные свойства. Совокупность этих условий называется режимом термической обработки. Основой для разработки таких режимов служит классическая диаграмма «железо – углерод».

Основные структурные превращения при нагревании и охлаждении стали. Для сталей характерны следующие структуры для сталей:

- доэвтектоидных – феррит + перлит;
- эвтектоидных – перлит;
- заэвтектоидных – перлит + цементит.

При нагреве выше 723°C (линия PSK на диаграмме «железо–углерод») доэвтектоидные стали имеют структуру аустенит+феррит, эвтектоидные имеют аустенитную структуру, заэвтектоидные – аустенит+цементит. При нагреве доэвтектоидных сталей выше температур, отложенных на линии GS, и заэвтектоидных выше температур, отложенных на линии SE, их структура становится чисто аустенитной. Следовательно, все структурные составляю-

щие – феррит, перлит и цементит – в процессе нагрева превращаются в аустенит. При термической обработке стали, которая сопровождается нагревом и охлаждением, различают четыре основных превращения:

- 1) при нагреве перлита в аустенит;
- 2) при охлаждении аустенита в перлит;
- 3) при охлаждении аустенита в мартенсит;
- 4) мартенсита в перлитные структуры (сорбит, троостит).

Превращение перлита в аустенит происходит при температуре $723\text{ }^{\circ}\text{C}$, чем выше температура, тем быстрее идет превращение. При охлаждении в интервале температур ($700\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$) образуется перлит. При увеличении переохлаждения растет дисперсность продуктов превращения аустенита. При температурах $600\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуется сорбит, а при $550\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ – троостит.

Структура сорбит названа в честь английского ученого Г.К. Сорби, а троостит по имени французского химика Л.Ж. Труста. При большой скорости охлаждения до $200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ образуется мартенсит – пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железо. Мартенсит имеет ту же концентрацию углерода, что и аустенит, высокую твердость и хрупкость (рис. 1.23).

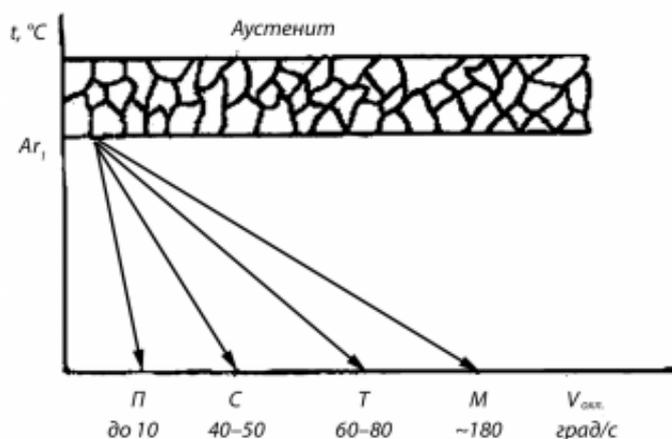


Рисунок 1.23. Влияние скорости охлаждения на структуру стали: П – перлит, С – сорбит, Т – троостит, М – мартенсит

При нагреве закаленной стали с мартенситной структурой до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуется структура троостита, а при нагреве до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуется структура сорбита отпуска. Отличие троостита от сорбита, получаемых при распаде аустенита от распада мартенсита, в форме зерна цементита. Структура мартенсит получила название в честь немецкого металловеда А. Мартенса.

Превращение аустенита в перлит может происходить только при температурах ниже $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ниже точки A_1). Закономерность этого процесса характеризуется диаграммой изотермического превращения аустенита, т.е. распадом аустенита при постоянной температуре. Мартенсит является основной

структурой закаленной стали, так как она обладает высокой твердостью. Мартенсит в стали есть перенасыщенный твердый раствор углерода в α -железе с такой же концентрацией, как у исходного аустенита (2,14 %). Так как растворимость углерода в α -фазе равна всего лишь 0,02 %, то мартенсит является перенасыщенным твердым раствором.

Мартенсит отличается игольчатым строением и способен к самопроизвольному распаду (особенно при повышении температуры).

Троостит является смесью феррита и цементита весьма высокой размеречности. Эта структура получается как при большой скорости охлаждения стали, так и в результате распада мартенсита при нагреве до температуры 400–500°C. Троостит обладает меньшей твердостью и большей вязкостью, чем мартенсит. Сорбит является мелкодисперсной смесью феррита и цементита. Эту структуру можно получать при охлаждении стали или в результате распада мартенсита при нагреве до температуры 550–650°C. Структура сорбит по своему равновесному состоянию близка к перлиту, но имеет большую степень раздробленности частиц. Его твердость выше перлитной, он более пластичен и упруг.

Виды термической обработки стали. Различают три основных вида термической обработки металлов:

– *собственно термическая обработка (ТО)*; только температурное воздействие на сплавы;

– *химико-термическая обработка (ХТО)*; при нагреве меняется химический состав в поверхностном слое деталей за счет насыщения его различными химическими элементами;

– *термомеханическая обработка (ТМО)*; меняется структура за счет температурного и деформационного воздействия). Классификация видов термической обработки приведена на схеме рис.1.24.

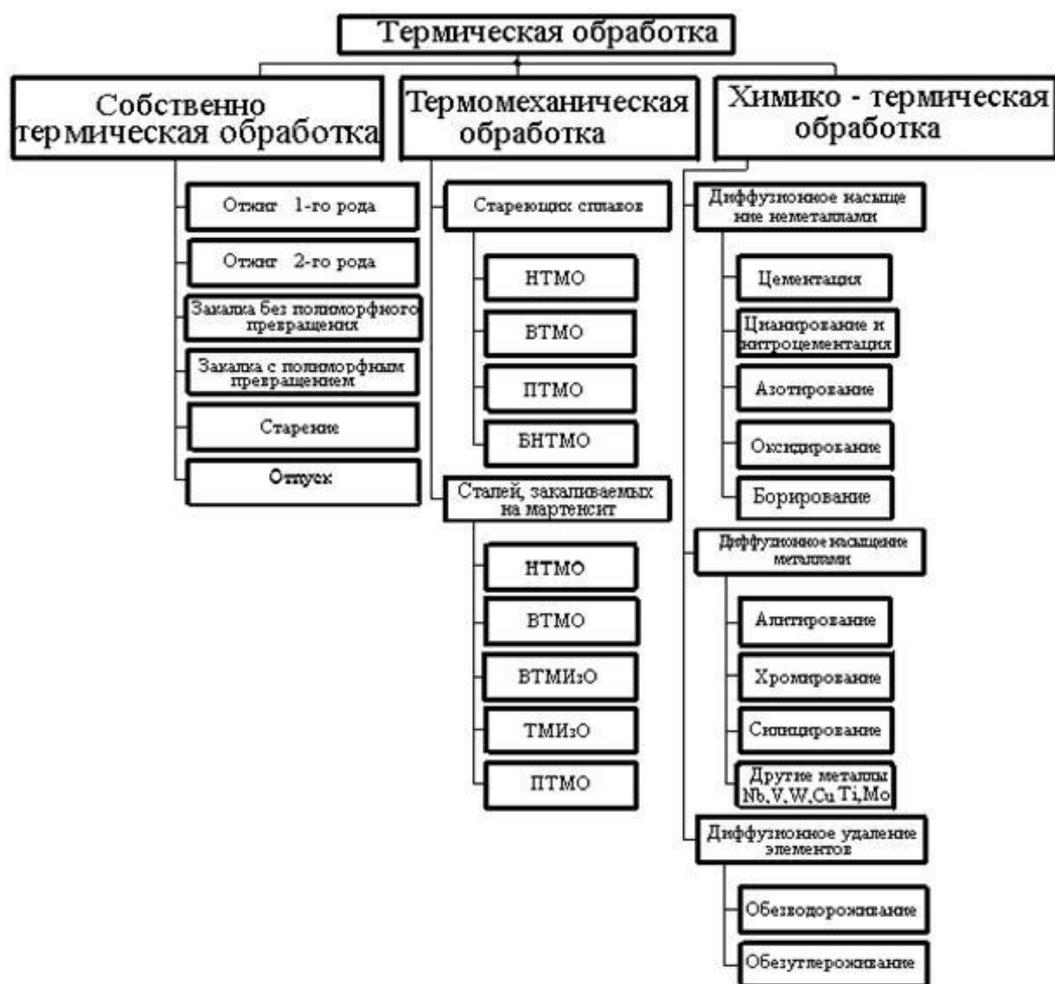


Рисунок 1.24. Классификация видов термической обработки

Собственно термическая обработка и ее виды. В зависимости от температуры нагрева и условий охлаждения различают следующие виды термической обработки: отжиг, нормализация, закалка, отпуск.

Отжиг стали состоит из ее нагрева до определенной температуры, выдержки во времени при этой температуре и последующего медленного охлаждения вместе с печью. Отжиг разделяется на отжиг первого и второго рода.

Отжиг первого рода – приведение структуры из неравновесного состояния в более равновесное (возврат, рекристаллизация, отжиг для снятия внутренних напряжений, диффузионный отжиг, или гомогенизация).

Возврат (отдых) стали – нагрев до 200–400°C, для уменьшения или снятия наклепа при пластической деформации.

Рекристаллизационный отжиг происходит при температурах 500–550°C и предназначен для снятия наклепа после холодной пластической деформации. При этих температурах из деформированных зерен вырастают (образуются) новые кристаллиты, приближающиеся к равновесным, в результате твердость стали снижается, а пластичность увеличивается. Отжиг для снятия внутренних напряжений производится при 600–700 °C. Охлажде-

ние после выдержки при заданной температуре должно быть достаточно медленным, так как в противном случае вновь возрастают внутренние напряжения.

Диффузионный отжиг (или гомогенизация) осуществляется при высоких температурах 1100–1200°C с выдержкой от 10 до 15 ч и предназначен для устранения химической неоднородности (ликвации), образовавшейся при кристаллизации стали.

Отжиг второго рода – изменение структуры сплава посредством перекристаллизации около критических точек в целях получения равновесных структур. К отжигу второго рода относится полный, неполный и изотермический отжики.

Полный отжиг применяют после горячей обработки металлов давлением (ковки, штамповки), а также для литья из углеродистых и легированных сталей. Основной его целью является измельчение зерна. Полный отжиг осуществляется путем нагрева стали на 30–50°C выше точки A_3 , выдержки при этой температуре и последующего медленного охлаждения вместе с печью.

Неполный отжиг достигается нагревом стали на 30–50°C выше температуры точки A_1 и не выше температуры точки A_3 , выдержкой при этой температуре и последующим медленным охлаждением. Неполному отжигу обычно подвергают заэвтектоидные инструментальные стали для снятия внутренних напряжений, создания мелкозернистой структуры, снижения твердости и улучшения их обрабатываемости резанием.

Изотермический отжиг в отличие от полного отжига заключается в том, что сталь нагревают до температуры на 30–50°C выше точки A_3 , выдерживают при этой температуре, а затем быстро охлаждают до температуры ниже точки A_1 (680–700°C). При этой температуре сталь подвергается выдержке до полного распада аустенита на перлит, а затем ее охлаждают на воздухе. Основное преимущество изотермического отжига состоит в том, что он позволяет сократить время и повысить производительность. Например, обыкновенный отжиг сталей длится 10–12 ч, а изотермический – 4–7 ч.

Нормализацией называется операция нагрева стали на 30–50°C выше точки A_3 (для конструкционной стали или $A_{ст}$ – для инструментальной стали) с выдержкой при этой температуре и последующем охлаждении на воздухе. С помощью нормализации получают мелкозернистую и однородную структуру. Твердость и прочность стали после нормализации выше, чем после отжига. Таким образом, можно утверждать, что нормализация представляет собой разновидность отжига. Скорость охлаждения несколько больше, чем при обычном отжиге. Охлаждение на воздухе, вне печи, снижает экономические

затраты на термообработку.

Закалка – это термическая обработка, которая заключается в нагреве стали до температуры, превышающей температуру фазовых превращений, выдержке при этой температуре, а затем быстром охлаждении в воде, машинном масле, водных растворах солей, эмульсиях. Цель закалки – получение стали с высокой твердостью, прочностью, износоустойчивостью и другими важными свойствами, повышающими долговечность и надежность деталей и инструментов. При закалке конструкционные стали нагревают на 20–40°C выше точки A_3 , а инструментальные стали (заэвтектоидные) – на 30–50°C выше точки A_1 .

В зависимости от химического состава стали и размеров изделий применяют несколько способов закалки: обычная в одном охладителе, в двух охладителях, ступенчатая, изотермическая, закалка с самоотпуском, обработка холодом, поверхностная.

Закалка в одном охладителе – нагретая деталь погружается в охлажденную жидкость и остается там до полного охлаждения.

Закалка в двух охладителях – деталь до 300–400°C охлаждают в воде, а затем переносят в масло.

Ступенчатая закалка – деталь быстро охлаждается погружением в соляную ванну с температурой, немного превышающей температуру мартенситного превращения, а затем охлаждается на воздухе.

Изотермическая закалка – деталь выдерживается в соляной ванне до изотермического превращения аустенита.

Закалка самоотпуском – в закалочной среде охлаждают только часть детали, а теплота, сохранившаяся в остальной части после извлечения из среды, вызывает отпуск охлажденной части.

Поверхностная закалка состоит из нагрева поверхностного слоя детали выше точки A_3 (для получения аустенитной структуры) и быстрого охлаждения. После такой закалки детали имеют твердый, износостойкий поверхностный слой и вязкую сердцевину. В зависимости от способа нагрева различают поверхностный нагрев металла внешним источником и внутренний нагрев в электромагнитном поле. В качестве внешнего источника используются газовые горелки, а в качестве внутреннего – индукционный нагрев токами высокой частоты (ТВЧ). Нагрев ТВЧ нашел широкое применение в промышленности, так как отличается высокой производительностью, легко поддается управлению и обеспечивает хорошее качество.

Индукционный нагрев (рис.1.25) заключается в том, что деталь помещается во внутрь специального индуктора (медной рубки, изогнутой по форме нагреваемой детали со значительным воздушным зазором). В трубке для

охлаждения циркулирует вода. Через индуктор пропускают ток высокой частоты от 500 до 1000 Гц. Возникающее при этом электромагнитное поле индуктирует вихревые токи, которые за доли секунды нагревают поверхность детали. Такой вид закалки целесообразно применять в крупносерийном производстве, так как на каждую деталь надо изготавливать свой индуктор. В последнее время нашла применение лазерная закалка.

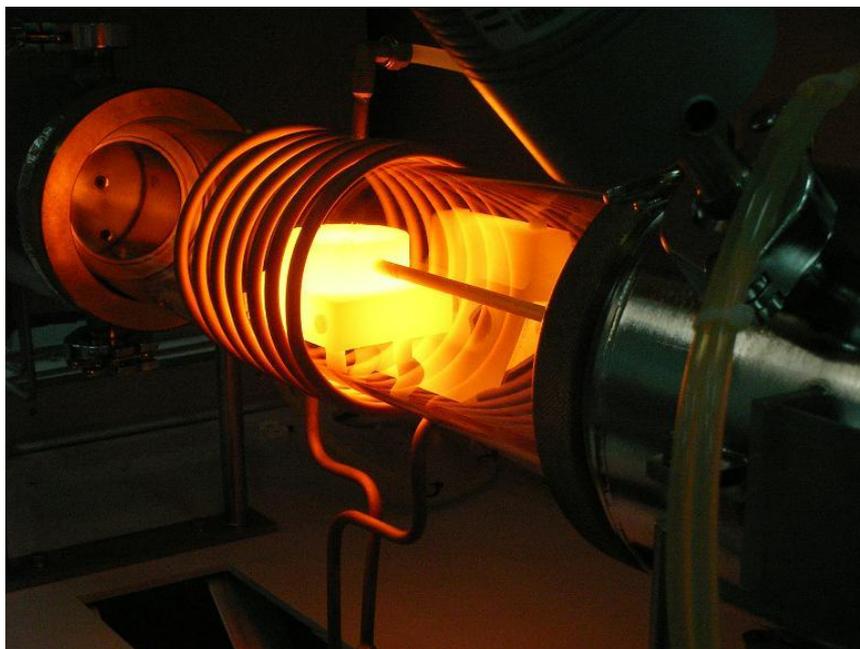


Рисунок 1.25. Индукционный нагрев

Термомеханическая обработка, виды и характеристика. Термомеханическая обработка (ТМО) заключается в сочетании пластической деформации стали в аустенитном состоянии с ее закалкой и последующим отпуском. При этом значительно повышается прочность, увеличивается пластичность, что повышает сопротивление хрупкому разрушению и повышает эксплуатационную надежность деталей.

В зависимости от температуры, при которой сталь подвергают пластической деформации, различают два основных способа термомеханической обработки:

- высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО), при которой деформируют сталь, нагретую выше точки A_3 (выше линии GS на диаграмме «железо–углерод»). Степень деформации составляет 25–30%. После деформации следует немедленная закалка, после чего производится низкотемпературный отпуск в пределах 150–300 °С;

- низкотемпературную термомеханическую обработку (НТМО) проводят нагревом выше точки A_3 , затем охлаждают до 550–600°С, пластически

деформируют при этой температуре (степень деформации 75–95%). Сразу после деформации производят закалку и низкий отпуск. Схематично можно представить ВТМО и НТМО в виде таких графиков на рис. 1.26.

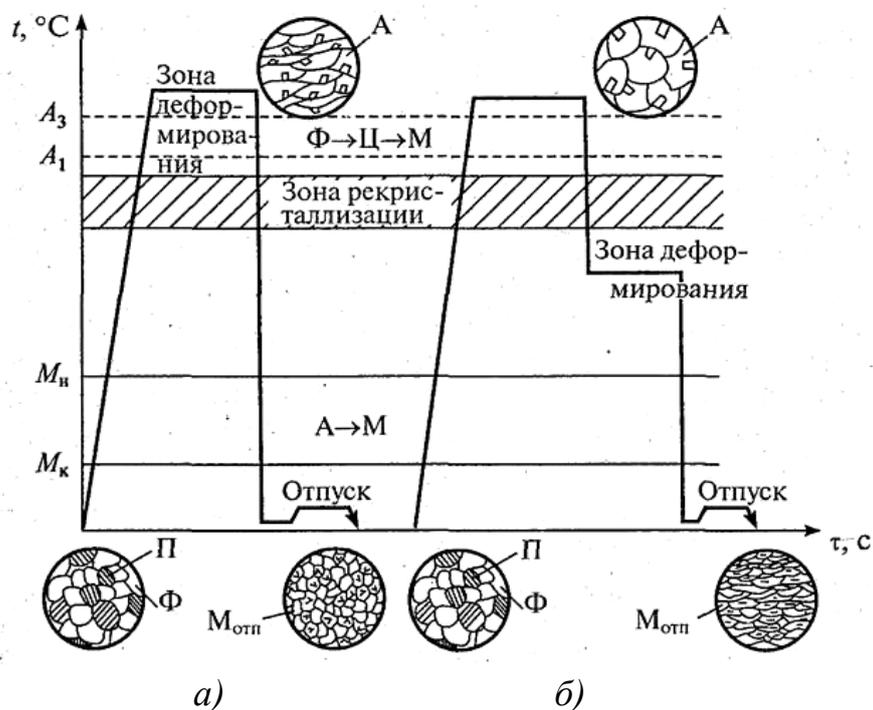


Рисунок 1.26. Графики ВТМО (а) и НТМО (б)

Процессы пластической деформации при ТМО и термической обработке совмещены в одной технологической операции. Пластическое деформирование при ТМО производят ковкой, прокаткой, горячей объемной штамповкой, прессованием и другими видами горячей обработки давлением.

Наибольшее упрочнение достигается при НТМО, но проведение ее более сложно по сравнению с ВТМО, так как требуются более высокие усилия деформации.

ВТМО можно подвергать любые стали – углеродистые и легированные, а НТМО – в основном только легированные стали с повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита. Новейшим методом является термомагнитная обработка без деформации. В этом случае детали, нагретые для закалки, охлаждаются под воздействием мощного электромагнитного поля. Механотермическая обработка, так же как и термомеханическая, сочетает закалку и деформирование, но имеет обратный порядок этих процессов: сначала сталь подвергают термической обработке, а затем деформируют. Одним из видов механотермической обработки является патентирование.

Патентирование заключается в термической обработке на троостит с последующей деформацией на 90–95%. Такая обработка позволяет достичь

предела прочности тонкой проволоки из высокоуглеродистой стали до 500 кг/мм³. В практике механотермической обработки также используется деформирование на 3–5% после закалки, что позволяет повысить предел прочности на 10–20%.

Химико-термическая обработка стали. Химико-термической обработкой называется процесс, представляющий собой сочетание теплового и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя деталей. При этом происходит насыщение поверхности детали такими элементами, как углерод, азот, хром, алюминий, бор и др.

Химико-термическая обработка применяется в целях повышения твердости, износоустойчивости, коррозионной стойкости поверхностного слоя при сохранении вязкой и достаточно прочной сердцевины. Химико-термическая обработка основана на диффузии атомов различных химических элементов в кристаллическую решетку железа при нагреве в среде, содержащей эти элементы. Процесс диффузии протекает очень медленно, глубина насыщения другими элементами составляет от 0,1 до 2 мм.

Химико-термическая обработка состоит из следующих процессов:

– *диссоциация* – распад молекулы химического элемента на элементарные атомные частицы;

– *адсорбция* – поглощение, собирание на поверхности детали элементарных частиц;

– *диффузия* – перемещение атомов химического элемента с поверхности в глубь детали.

Насыщающий элемент должен взаимодействовать с основным металлом, образуя твердые растворы или химические соединения, иначе процессы адсорбции и диффузии невозможны.

При диссоциации процесс протекает в газовой среде с образованием активных атомов диффундирующего элемента.

Например, $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ или $\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H} + \text{N}$.

Адсорбция происходит на границе газ–металл и состоит в поглощении (растворении) поверхностью свободных атомов. Этот процесс возможен только в том случае, если диффундирующий элемент способен растворяться в основном металле.

В результате диффузии насыщающий элемент, проникая внутрь основного металла, образует слой диффундирующего элемента определенной толщины. Повышение температуры значительно ускоряет диффузионные процессы. Наиболее распространенными видами химико-термической обработки стали являются цементация, азотирование, цианирование и диффузионная металлизация.

Цементацией называется технологический процесс насыщения поверхностного слоя низкоуглеродистых сталей углеродом, в результате чего получается высокоуглеродистый поверхностный слой. Цементация изменяет химический состав и структуру поверхностного слоя, а следовательно, изменяются и свойства. Цементации подвергают такие детали, которые работают одновременно на износ и на удар. Цементацию проводят после окончательной механической обработки с небольшим припуском на шлифование.

При термической обработке после цементации получают высокую твердость поверхности при сохранении мягкой и вязкой сердцевины, что повышает износоустойчивость и предел усталости стальных деталей. Эффективность цементации зависит от многих факторов: режима цементации (температуры и времени выдержки, состава карбюризатора, состава стали, режима термической обработки после цементации).

Существует три вида цементации: твердым карбюризатором, жидкая и газовая.

Твердая цементация (в твердом карбюризаторе) является наиболее старым процессом химико-термической обработки. В качестве карбюризатора используют смесь древесного угля (70%), углекислого бария (20–25%) и углекислого кальция (3–5%). Добавление к древесному углю углекислых солей ускоряет процесс цементации. Детали помещают в железные ящики, засыпают карбюризатором и помещают в печь при температуре 930–950°C в течение 5–10 ч.

После цементации детали подвергают обязательной термической обработке – закалке и низкому отпуску. Одним из существенных недостатков цементации в твердом карбюризаторе является значительная трудоемкость, невысокая производительность, длительность процесса.

Жидкая цементация осуществляется путем погружения деталей в соляные ванны при температуре 830–850°C, карбюризатором при этом являются расплавленные соли (сода, поваренная соль, карбид кремния). Длительность процесса составляет 0,5–2 ч, глубина цементированного слоя не превышает 0,2–0,3 мм. Преимуществом цементации в соляных ваннах является равномерность нагрева и возможность непосредственной закалки после выемки из цементационной ванны.

Газовая цементация заключается в насыщении поверхности стальных деталей углеродом в атмосфере углеродосодержащих газов (метана, окиси углерода). Процесс происходит в герметически закрытых камерах печей при температуре 930–950°C. Нагрев в газовом карбюризаторе и процесс насыщения поверхностного слоя является более экономичным по сравнению с остальными. Цементацию рекомендуется проводить так, чтобы содержание уг-

лерода в наружном слое не превышало 1,1–1,2%, глубина цементации 0,5–1,5 мм. Более высокое содержание углерода приводит к образованию значительных количеств вторичного цементита, сообщающего слою повышенную хрупкость.

Азотирование – это процесс насыщения поверхностного слоя стальных изделий азотом. Азотированию подвергаются в основном легированные стали, так как азотирование углеродистых сталей не дает нужной твердости. Улучшение свойств легированных сталей при азотировании является результатом образования в поверхностном слое нитридов – устойчивых химических соединений азота с другими элементами, такими как хром, алюминий, молибден, ванадий и др.

Азотирование производится в герметизированных муфельных камерных печах путем нагревания деталей в атмосфере газообразного аммиака при температуре 500–750°C. Атомы азота поглощаются поверхностью металла, диффундируют вглубь и образуют нитриды типа MoN, AlN, Fe₄N и др.

Азотирование осуществляется после механической и термической обработок. При азотировании повышаются твердость, износостойчивость и выносливость, улучшаются антикоррозийные свойства. Глубина и поверхностная твердость азотированного слоя зависят от температуры, продолжительности азотирования и состава азотируемой стали, глубина азотированного слоя может составлять от 0,2 до 0,6 мм.

Цианирование является технологическим процессом одновременного насыщения поверхностного слоя деталей углеродом и азотом. Цианирование повышает твердость и износостойчивость поверхностного слоя деталей, а также увеличивает сопротивляемость их коррозии. Различают твердое, жидкое и газовое цианирование (последнее иногда называют нитроцементацией).

Твердое цианирование аналогично твердой цементации. В качестве карбюризатора применяют цианистые соли: 30–40% K₄Fe(CN)₆ (желтая кровяная соль), 10% Na₂CO₃ (сода) и 50–60% древесного угля. Применяется этот вид цианирования, как правило, в мелкосерийном производстве.

Жидкое цианирование – наиболее распространенный вид цианирования стали – проводят в расплавленных цианистых солях: NaCN, KCN, Ca(CN)₂ и др. При расплавлении происходит разложение цианистых солей с образованием N и C, которые, диффундируя в поверхность стальных деталей, азотируют и науглероживают их. Процесс может производиться при 600–950°C с выдержкой от 1 до 6 ч, глубина цианированного слоя – 0,03–2,0 мм. После цианирования детали подвергают закалке и низкому отпуску.

Газовое цианирование (нитроцементация) осуществляют в смеси, состоящей из 75% науглероживающих и 25% азотирующих газов (например,

смесь генераторного, природного газа и аммиака). Процесс ведется при температурах порядка 800–850°C и выдержке от 1 до 6 ч. Глубина цианирования при этом составляет 0,4–0,6 мм. Цианистые соли ядовиты, и это является существенным недостатком цианирования. Поэтому его обычно проводят в специально выделенных помещениях, в которых строго соблюдаются правила техники безопасности.

Диффузионная металлизация представляет собой процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев стали различными металлами (алюминием, хромом, цинком, молибденом, кремнием, бором) для защиты изделий от коррозии и повышения их жаростойкости, износостойкости и твердости. Наибольшее применение имеют процессы насыщения алюминием – алитирование, хромом – хромирование, кремнием – силицирование и т. д.

Алитирование применяется для деталей, работающих при высоких температурах для повышения окислительной стойкости. Жидкое алитирование осуществляется погружением деталей из стали в печь-ванну с расплавленным алюминием при 750–800°C и выдержкой 45–90 мин. Толщина алитированного слоя равна 0,2–0,35 мм. Последующий диффузионный отжиг при 900–1000°C увеличивает толщину алитированного слоя до 1 мм.

Прогрессивный способ алитирования, заключающийся в том, что алюминий сначала наносят на изделие, распыляя сжатым воздухом. Далее нанесенный слой алюминия защищают жаростойкой обмазкой и производят диффузионный отжиг изделий при температуре 920°C в течение 3 ч. В процессе отжига поверхностный слой изделия насыщается алюминием на глубину в среднем 0,5 мм.

Диффузионное хромирование производится в порошковых смесях, состоящих из феррохрома и шамота, смоченных соляной кислотой, или в газовой среде при разложении паров хлорида хрома. Хромированию подвергается сталь с содержанием углерода не более 0,2%. Хромированные детали имеют высокую коррозионную стойкость.

Силицирование – насыщение поверхностного слоя стальных изделий кремнием, обеспечивающее повышение стойкости против коррозии в морской воде, азотной, серной, соляной кислотах. Существует силицирование в порошкообразных смесях ферросилиция, а также газовое силицирование в среде хлорида кремния.

Силицированный слой обладает высокой кислотоупорностью до 850°C и сопротивлением износу. Борирование является процессом насыщения поверхностного слоя стали бором. Борирование повышает твердость, сопротивление абразивному износу и коррозии в агрессивных средах. Его проводят в твердых жидких и газообразных средах с боросодержащими солями и газами.

При диффузионной металлизации сталь может насыщаться и другими металлами, например, титаном (титанирование), вольфрамом (вольфрамирование), ниобием (ниобирование), ванадием (ванадирование) и др. Комплексные свойства диффузионного слоя могут быть получены насыщением стали двумя или несколькими металлами одновременно (хром и алюминий).

РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛЫ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ИХ ОСНОВНЫЕ СЛУЖЕБНЫЕ СВОЙСТВА

Тема 2.1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ МЕТАЛЛОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Условия работы металла в теплоэнергетике под воздействием конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов. Металл в теплоэнергетике работает в тяжелых условиях под воздействием многочисленных конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов. К конструктивно-технологическим факторам следует отнести:

- концентраторы напряжений и деформаций, вызванные геометрией деталей отверстия, малые радиусы скруглений, резкие переходы от сечения к сечению и т.п.);
- остаточные напряжения и деформации, возникающие в результате технологической обработки деталей; габаритные размеры и массу конструкций;
- качество металла и изготовления деталей конструкций и т.п.

Эксплуатационными факторами являются повышенная температура, давление рабочей среды, коррозия, эрозия, стационарные и периодически меняющиеся нагрузки, длительность эксплуатации. В период эксплуатации возможны случаи, когда работа энергоустановок происходит в более тяжелых условиях по сравнению с расчетными (в пиковых и остропиковых режимах). Многие элементы энергоустановок работают в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, вызванного сочетанием весовых нагрузок, термических расширений, циклических воздействий и т.п.

Трубы поверхностей нагрева в современных котлоагрегатах работают при температурах 550–570 °С. Причем имеет место перепад температур; температура металла поверхностей нагрева существенно выше температуры пара на выходе из котла. Кроме того, перепад температур возникает из-за неравномерного распределения пара по змеевикам и неравномерного обогрева труб газовыми потоками. В тяжелых температурных условиях находятся

стойки и подвески труб поверхностей нагрева.

При повышенном содержании серы в сжигаемом топливе поверхности нагрева и стальные газоходы паровых котлов подвергаются сернистой коррозии. На внутренних поверхностях труб, барабанов и камер происходит коррозия в воде или паре. С течением времени образуются отложения и забивания гибов труб поверхностей нагрева продуктами коррозии, что приводит к ухудшению теплообмена.

При сжигании топлива под воздействием абразивных частиц золы происходит эрозионный износ труб поверхностей нагрева. Под воздействием потоков воды или пара эрозионному износу подвержены лопатки паровых турбин, питательные насосы, теплообменники и пароводяная арматура.

При длительном воздействии рабочих нагрузок и температуры металл оборудования и трубопроводов испытывает постоянно накапливающуюся пластическую деформацию при напряжениях ниже предела текучести. Это явление, называемое ползучестью, может происходить с различной скоростью в зависимости от температуры, действующих напряжений и структуры металла, а на заключительной стадии приводит к образованию трещин и разрушению деталей. Наиболее опасно одновременное воздействие ползучести и усталости, что должно учитываться при оценке долговечности ответственных деталей и конструкций.

Основные типы эксплуатационных повреждений металла оборудования ТЭС и причины их возникновения. Металл большинства деталей и конструкций энергоустановок повреждается под воздействием ползучести, коррозии и малоциклового усталости. При этом чаще всего возникают хрупкие разрушения металла без заметных следов пластической деформации.

В табл. 2.1 приведены примеры типичных повреждений элементов энергоустановок с указанием характера и причин разрушения.

При оценке дефектов используется термин «повреждаемость». Под повреждаемостью принято понимать совокупность технологических и эксплуатационных дефектов. Технологические дефекты могут появляться еще на стадии изготовления оборудования, эксплуатационные дефекты – в процессе эксплуатации.

Повреждаемость барабанов паровых котлов. В процессе эксплуатации барабаны котлов испытывают циклические нагрузки, вызванные пусками-остановами котла, перепадами температуры, гидроиспытаниями и другими факторами. Наиболее интенсивно повреждаемость накапливается в области трубных отверстий, находящихся в нижней части водяного объема барабана. Максимальные растягивающие напряжения в этой области могут превышать средние расчетные в 3–4 раза. Поэтому вокруг отверстий могут распростра-

няться и зарождаться трещины.

Таблица 2.1. Примеры типичных повреждений элементов энергоустановок

Элементы энергоустановок	Повреждаемые детали	Вид дефекта	Характер разрушения	Причины разрушения
Пароперегреватели котлов	Прямые трубы и гибы	Продольные трещины	Хрупкий Вязкий	Снижение длительной прочности Снижение кратковременной прочности
Экономайзеры	Прямые трубы и гибы	Продольные разрывы	Вязкий	Утонение стенок от износа и потеря кратковременной прочности
Холодная воронка	Прямые трубы и гибы	Продольные разрывы	Вязкий	Язвенная коррозия
Перепускные трубы, паропроводы	Гибы	Продольные трещины	Хрупкий	Снижение длительной прочности при $t_{экс} < 450^{\circ}\text{C}$
Барабаны паровых котлов	Кромки отверстий опускных труб	Трещины вокруг отверстий	Хрупкий	Коррозийно-термическая усталость
Корпусные детали турбин	Корпус цилиндра высокого давления, клапан	Трещины в радиусных переходах	Хрупкий	Снижение длительной прочности и малоцикловая усталость

При оценке дефектов используется термин «повреждаемость». Под повреждаемостью принято понимать совокупность технологических и эксплуатационных дефектов. Технологические дефекты могут появляться еще на стадии изготовления оборудования, эксплуатационные дефекты – в процессе эксплуатации.

Повреждаемость барабанов паровых котлов. В процессе эксплуатации барабаны котлов испытывают циклические нагрузки, вызванные пусками-остановами котла, перепадами температуры, гидроиспытаниями и другими факторами. Наиболее интенсивно повреждаемость накапливается в области трубных отверстий, находящихся в нижней части водяного объема барабана. Максимальные растягивающие напряжения в этой области могут превышать средние расчетные в 3–4 раза. Поэтому вокруг отверстий могут распространяться и зарождаться трещины.

На повреждаемость барабанов также оказывает влияние местная корро-

зия, поверхностные дефекты и металлургическое качество металла. Так, повреждаемость барабанов из наиболее распространенных марок сталей 22К и 16ГНМ зависит от соотношения содержания марганца и серы. При избытке серы и недостатке марганца образуется сульфид железа, который снижает пластичность стали и увеличивает ее хрупкость.

Технологические дефекты барабанов могут являться следствием некачественного изготовления листовых заготовок на металлургическом заводе или некачественного изготовления барабанов на котельном заводе. К дефектам листовых заготовок относят трещины, плены, закаты, расслоения, наличие обезуглероженного слоя и т.п. Технологическими дефектами котельного производства являются отклонения деталей барабана от заданной геометрической формы, дефекты сварки (непровары, поры, шлаковые включения). В сварных барабанах в местах пересечения сварных швов возникают повышенные остаточные напряжения, также приводящие к появлению дефектов.

Повреждаемость металла паропроводов. Трубопроводы энергоустановок в процессе эксплуатации находятся под воздействием механических и температурных напряжений, статических и динамических нагрузок, коррозии, компенсационных нагрузок и т.п. Наиболее повреждаемыми элементами трубопроводов являются гибы, которые находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии. Овальность и разнотолщинность труб, искажение формы поперечного сечения приводят к возникновению дополнительных изгибных напряжений. Тонкостенные холоднодеформированные гибы характеризуются определенной степенью наклепа, что снижает их деформационную способность. Поэтому они подвержены большей повреждаемости по сравнению с толстостенными термообработанными гыбами.

Гибы водоопускных и водоперепускных труб из стали 20, работающие при температуре 300–400 °С, могут разрушаться под воздействием коррозионно-усталостных нагрузок при пусках и остановах котла. Разрушение носит хрупкий характер с образованием протяженной сквозной трещины и многочисленных поверхностных трещин.

Гибы паропровода из стали 12Х1МФ, работающие при температуре 540°С, могут разрушаться хрупко под воздействием ползучести. Зарождение трещины возникает в растянутой зоне гыба.

Причинами разрушения гыбов поверхностей нагрева являются перегревы, коррозия и термическая усталость. Перегрев труб может быть кратковременным и длительным. Причинами кратковременного перегрева могут быть слабая циркуляция и малая скорость рабочей среды, упуск воды, закупорка сечений труб и т.п. Кратковременный перегрев труб, например поверхностей нагрева котлоагрегатов, приводит не только к изменению микроструктуры и

накоплению повреждений, но и к разрушению. Анализ микроструктуры труб из перлитных сталей, которые разрушались в результате кратковременного перегрева, оказывает наличие мартенсита в зоне разрушения стальной трубы. В этой зоне наблюдаются утонение стенки и увеличение периметра трубы. Магистральная трещина проходит вдоль оси трубы. В зоне разрушения происходит раскрытие трубы под действием тангенциальных напряжений от внутреннего давления.

Длительный перегрев металла труб может быть вызван отложениями солей и окислов на внутренней поверхности труб, присутствием сварочного грата в трубах, нарушением гидродинамики в отдельных змеевиках и т.п. При длительном перегреве труб также возникают продольные трещины, вокруг которых образуется сетка многочисленных трещинок от ползучести. В зоне разрушения микроструктура низколегированных перлитных сталей отличается большей степенью сфероидизации перлитной составляющей, которая усиливается при увеличении длительности перегрева.

Сильное отрицательное воздействие на трубопроводы оказывает ползучесть. Расчетный ресурс гибов паропроводов, работающих в условиях ползучести, составляет 100 тыс. ч. Однако разрушение гибов может происходить раньше этого срока. Предел длительной прочности паропроводных сталей может существенно различаться в зависимости от фактических режимов термической обработки, структуры и размера зерна. При отклонении от принятых режимов термической обработки интенсивность накопления повреждаемости гибов увеличивается, что отрицательно сказывается на длительной прочности.

Повреждаемость металла паровых турбин. Частые пуски-остановы приводят к появлению трещин в корпусах турбин. Основной причиной образования трещин являются температурные изменения. В тяжелых условиях работают корпуса цилиндров высокого давления (ЦВД). Наиболее повреждаемыми частями корпусных деталей являются зона регулирующей ступени на внутренней поверхности корпусов ЦВД турбин мощностью 100 и 200 МВт, наружные поверхности в зонах паропроводящего и отводящего патрубков корпусов стопорных клапанов турбин мощностью 100 МВт и переходы в подфланцевой зоне на наружной поверхности корпусов стопорных клапанов турбин мощностью 200 и 300 МВт. Интенсивное развитие трещин происходит при наработке 30–40 тыс. ч, а затем при увеличении времени эксплуатации интенсивность развития трещин снижается.

Практика эксплуатации показывает, что основная доля повреждений проточной части турбин приходится на рабочие лопатки.

В основном это рабочие лопатки последних ступеней турбин, которые

в большей степени подвержены эрозионному износу. Однако эрозия под воздействием потоков влажного пара представляет собой сложный и опасный коррозионно-эрозионный процесс. Поэтому для защиты металла от такого износа должен быть предусмотрен комплекс мер, включающих в себя легирование сталей, нанесение покрытий, химико-термическую обработку и т.п.

Требования, предъявляемые к металлу в теплоэнергетике. Выбор конструкционных материалов, используемых в теплоэнергетике, и основные требования, предъявляемые к ним, определяются условиями эксплуатации энергооборудования и трубопроводов. Эти условия характеризуются высокими температурой и давлением, агрессивностью рабочей среды. Например, металл поверхностей нагрева котлоагрегатов должен обладать не только высокими прочностью и пластичностью, но и достаточно высоким сопротивлением электрохимической коррозии со стороны пароводяной среды и химической коррозии от продуктов сгорания топлива. В таких условиях металл энергоустановок должен надежно работать длительное время. Обычно расчетный срок службы энергетического оборудования принимают равным 105 ч. Это срок службы обусловлен процессами ползучести при высоких температурах и сохранением характеристик длительной прочности на необходимом уровне. При увеличении скорости ползучести, снижении длительной прочности может возникнуть опасность разрушения металла элементов оборудования.

Исходя из сложных условий, в которых работают современные энергоустановки, к микроструктуре и свойствам металла предъявляют следующие основные требования:

- жаропрочность (сопротивление ползучести);
- жаростойкость (сопротивление окислению в газовой среде при высоких температурах);
- сопротивление усталости (включая термическую усталость);
- коррозионная стойкость (сопротивление разрушению в результате химического или электрохимического воздействия внешней среды);
- эрозионная стойкость (сопротивление износу под воздействием абразивных частиц, потоков воды и пара);
- стабильность структуры и механических свойств при рабочих температурах.

Кроме того, металл оборудования и трубопроводов должен обладать высокими технологическими свойствами (хорошо свариваться, обрабатываться давлением и резанием, не иметь металлургических дефектов и т.п.). Высокие технологические свойства металла, которые закладываются при его выплавке на металлургических заводах, обеспечивают высокое качество обо-

рудования и трубопроводов на стадиях их изготовления на машиностроительных заводах, монтажа на стройплощадках и ремонта в цеховых условиях.

Для обеспечения высокой жаропрочности используют специальное легирование и последующую термическую обработку. При повышенных температурах из пересыщенного твердого раствора с ограниченной растворимостью выделяются упрочняющие частицы, которые затрудняют движение дислокаций. Легирование и термическая обработка определяют структурный класс сталей, уровень механических свойств и предельную рабочую температуру.

В табл. 2.2 приведены значения предельной рабочей температуры для нескольких марок легированных сталей различных классов, широко используемых в теплоэнергетике.

Таблица 2.2. Предельная рабочая температура для некоторых марок легированных сталей

Класс стали	Марка стали	Предельная рабочая температура, °С
Перлитный	12МХ	530
Перлитный	15ХМ	550
Перлитный	12Х1МФ	570
Перлитный	15Х1М1Ф	575
Ферритно-мартенситный	12Х11В2МФ	630
Аустенитный	12Х18Н10Т	610

Правильный выбор конструкционных материалов является важным условием надежности, долговечности и экономичности эксплуатации оборудования и трубопроводов в теплоэнергетике.

Тема 2.2. ОСНОВНЫЕ СЛУЖЕБНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Исходя из специфических эксплуатационных условий, в которых работает оборудование ТЭС, жаропрочность, жаростойкость, коррозионно-эрозионная и радиационная стойкость являются основными служебными свойствами.

Жаропрочность. Одним из основных требований, предъявляемых к металлу энергоустановок, является высокая жаропрочность. Жаропрочность – способность металлов и сплавов длительно работать без разрушения под воздействием внешних нагрузок и повышенных температур [2, 4]. Знание характеристик жаропрочности важно при выборе материала, когда металл деталей и конструкций нагревается до температуры выше температуры плавления

$T_{пл}$. Чем выше рабочая температура, действующее напряжение и длительность эксплуатации, тем более высокие требования предъявляются к жаропрочности металла.

В процессе эксплуатации металла при высоких температурах ускоряются диффузионные процессы, изменяются исходные микроструктура и механические свойства материалов. При повышении температуры значительно возрастает число вакансий и увеличивается подвижность точечных дефектов. Диффузия способствует перемещению дислокаций путем их переползания, в результате чего реализуется диффузионный механизм пластической деформации (ползучести). При увеличении времени эксплуатации снижается прочность, полученная при исходной термической обработке, происходит потеря упрочнения, вызванного пластической деформацией, за счет возврата и рекристаллизации.

Для увеличения жаропрочности конструкционных материалов необходимо ограничить подвижность дислокаций и замедлить диффузионные процессы. Это возможно за счет повышения прочности межатомных связей, создания препятствий для перемещения дислокаций внутри зерен и на их границах и увеличения размеров зерен. Чем крупнее зерно, тем меньше протяженность межзеренных границ и слабее межзеренное скольжение и диффузионные перемещения.

В основе явлений, характеризующих жаропрочность, лежат процессы, происходящие при ползучести. Чем медленнее увеличивается деформация, а следовательно меньше скорость ползучести, тем выше будет жаропрочность материала при заданных напряжении и температуре. Для металлов в теплоэнергетике характерна рекристаллизационная ползучесть, которая начинается при температуре, большей температуры рекристаллизации $T_{рек}$. Следовательно, чем выше $T_{рек}$ материала, тем выше его жаропрочность. Поэтому одним из путей повышения жаропрочности является увеличение $T_{рек}$ за счет использования тугоплавких материалов в качестве основы сплавов или твердых растворов при легировании.

Тугоплавкие материалы повышают не только $T_{рек}$, но и прочность межатомных связей, а, следовательно, снижают скорости диффузии и ползучести. При легировании растворенные атомы легирующих элементов повышают сопротивление ползучести за счет упругого взаимодействия с дислокациями и влияния на диффузионные процессы.

На скорость ползучести может сильно влиять термическая обработка, в результате которой происходит упрочнение металла вследствие выделения из пересыщенных твердых растворов упрочняющих фаз. Такие фазы в виде карбидов, нитридов, интерметаллидов создают препятствия и затрудняют

пластическую деформацию, что приводит к снижению скорости ползучести.

Основными характеристиками жаропрочности являются:

- предел ползучести;
- предел длительной прочности.

Для оценки показателей жаропрочности металла проводят механические испытания на ползучесть и длительную прочность.

Ползучесть – это явление, заключающееся в том, что металл, нагруженный при постоянно высокой температуре, медленно и непрерывно пластически деформируется под воздействием постоянных во времени напряжений. В результате развития ползучести увеличивается диаметр и уменьшается толщина стенок труб. Деталь, проработавшая определенное время в условиях ползучести, разрушается при пластической деформации, во много раз меньшей, чем при кратковременной перегрузке при той же температуре. Повышение рабочих температур на тепловых электростанциях привело к тому, что многие детали работают в условиях, при которых появляется ползучесть.

Испытания на ползучесть проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 3248-81. Сущность метода состоит в том, что образец подвергается постоянной растягивающей нагрузке при постоянной температуре, причем фиксируется удлинение образца во времени. Образцы и схема установки для этих испытаний приведены на рис.2.1 и 2.2.

Образец устанавливают в захваты машины и помещают в печь. Измерение температуры производят прибором, обеспечивающим точность измерения не менее $\pm 0,5\%$. Не реже одного раза в 2 ч проверяют температуру потенциометром. Рекомендуется автоматическая запись температуры на протяжении всего испытания.

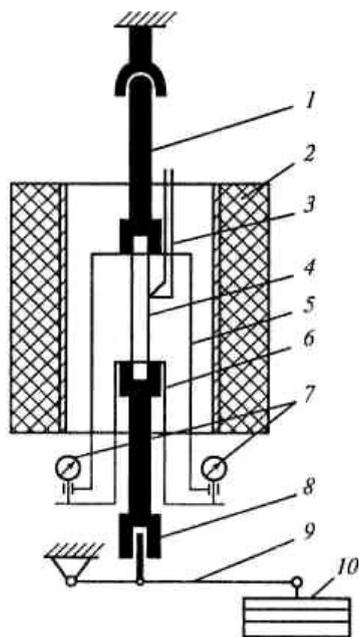


Рис 2.1 Схема установки для испытания металла на ползучесть: 1 – верхний захват; 2 – электропечь; 3 – термопреобразователи; 4 – образец; 5 – наружная шина; 6 – внутренняя шина; 7 – индикатор часового типа; 8 – нижний захват; 9 – грузовой рычаг; 10 – грузы

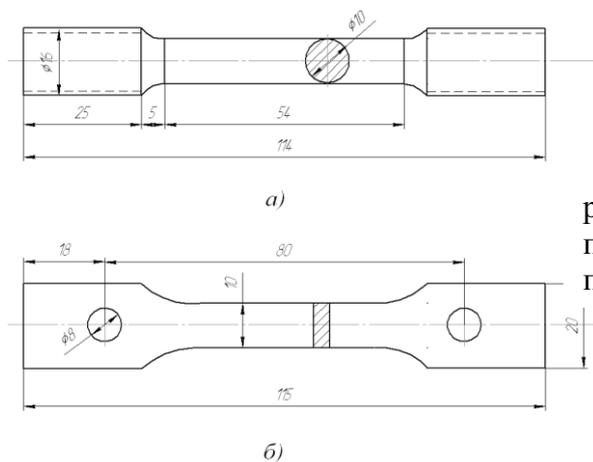


Рис. 2.2. Форма и размеры образцов для испытания на ползучесть на ползучесть: *а* – цилиндрический; *б* – плоский

На образец при помощи системы рычагов и грузов передается постоянная нагрузка. Когда образец вытягивается, один из захватов перемещается, компенсируя удлинение образца. Постоянная нагрузка обеспечивается грузами, уложенными на тарелку рычага. Допускаемая погрешность при положении нагрузки $\pm 1\%$.

Возникающие в образце деформации измеряют при помощи экзотензометров и по результатам строят диаграммы ползучести в координатах деформация ε – время τ . (рис.2.3).

Кривая ползучести состоит из 4-х участков. Участок *OA* соответствует упругой деформации, возникшей в момент приложения нагрузки.

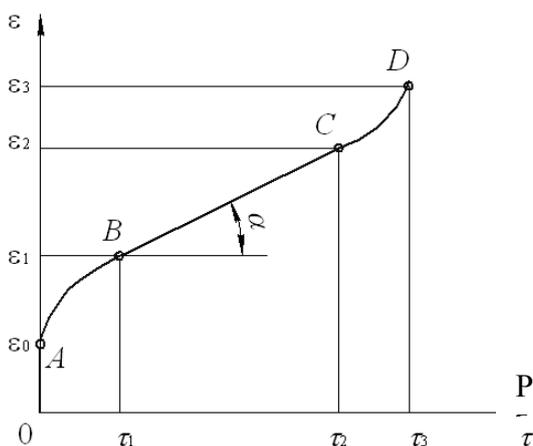


Рис.2.3. Схема диаграммы ползучести

Участок *AB* характеризует неустановившуюся ползучесть, где металл деформируется с неустановившейся скоростью, участок *BC* – установившуюся ползучесть и участок *CD* – ускоренное разрушение, связанное с образованием шейки.

Основной характеристикой ползучести является предел ползучести. *Предел ползучести* – напряжение, которое вызывает заданную деформацию

за определенный промежуток времени. Заданная деформация устанавливается исходя из допустимых зазоров между деталями, а время – из срока службы изделия. Так, для теплоэнергетического оборудования задается деформация, равная 1 %, а время – 10^5 ч. При таком большом промежутке времени основная деформация соответствует прямолинейному участку диаграммы ползучести, по сравнению с которой деформация на начальном криволинейном участке ничтожно мала, и ею можно пренебречь. Тогда скорость деформации на установившемся участке для $\varepsilon = 1$ % и времени $\tau = 10^5$ ч будет составлять $1/10^5$ %/ч (10^{-5} %/ч).

Предел ползучести обозначают $\sigma_{\varepsilon/\tau}^t$, где t – температура, °С; τ – время, ч; ε – деформация, %.

Для деталей длительное время работающих при повышенных температурах, задается обычно скорость ползучести на установившейся стадии процесса, например 0,1% за 10^5 ч.

Например, для допускаемой деформации, равной 1 %, за 10^5 ч при температуре $t = 500$ °С предел ползучести обозначается: $\sigma_{1/10^5}^{550} = 130$ МПа (напряжение, равное 130 МПа, вызывает деформацию в 1 % за 10^5 ч при температуре 550 °С).

Длительная прочность – это сопротивление материалов разрушению в условиях ползучести. *Испытания на длительную прочность* выполняются на тех же машинах, что и испытания на ползучесть, но с доведением образцов до разрушения. Обычно испытывают не менее 10 образцов из одного материала при одной и той же температуре, но при разных напряжениях: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \dots, > \sigma_n$. Методы испытаний на длительную прочность регламентированы ГОСТ 10145-81.

В результате таких испытаний получают диаграмму длительной прочности в координатах напряжение σ – время до разрушения τ (рис.2.4). При уменьшении σ время до разрушения τ увеличивается.

Чаще всего диаграмму длительной прочности представляют в виде степенного уравнения

$$\tau = A_1 \sigma^{-b_1},$$

где A_1 , и b_1 – постоянные коэффициенты для испытываемого материала при заданной температуре.

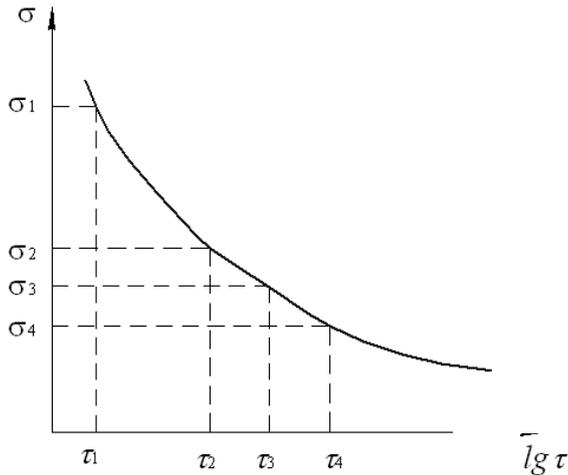


Рис.2.4. Кривая длительной прочности

Диаграммы длительной прочности дают возможность оценить *предел длительной прочности* – напряжение, которое при постоянной температуре доводит металл до полного разрушения за заданный промежуток времени, определяемый сроком службы изделия. Предел длительной прочности обозначается σ_{τ}^t , где t – температура, °С; τ – время до разрушения, ч. Так, для теплоэнергетического оборудования значения σ_{τ}^t находят по времени, равному 10^5 ч. В этом случае величина σ_{τ}^t есть напряжение, доводящее металл до разрушения за 10^5 ч при заданной температуре.

Например, $\sigma_{10^5}^{550} = 150$ МПа – напряжение, равное 150 МПа, доводит металл до разрушения за 10^5 ч при температуре 550 °С.

Жаростойкость. Жаростойкость(окалиностойкость) – способность металлов и сплавов сопротивляться окислению и газовой коррозии при высоких температурах. При низкой жаростойкости происходит преждевременное разрушение поверхностных слоев металлов и сплавов, что вызывает большие проблемы при эксплуатации деталей и конструкций в коррозионных газовых средах.

Железо с кислородом может образовывать оксиды трех видов FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃. До 560 – 600°С окалина состоит преимущественно из плотного слоя оксидов Fe₃O₄, Fe₂O₃, что затрудняет диффузию атомов кислорода и металла. Выше 600°С происходит растрескивание этих оксидов и вместо их защита металла осуществляется лишь рыхлым слоем оксида FeO, что облегчает доступ кислорода к поверхности металла. Нагрев при температурах выше 600° приводит к интенсивному окислению сплавов на основе железа.

Жаростойкость зависит от многих внешних и внутренних факторов. На жаростойкость материалов существенное влияние оказывает состояние по-

верхности металла. Чем более тщательно обработана поверхность (например, шлифовкой и полировкой), тем медленнее идет процесс окисления, так как оксиды распределены равномерно и более прочно сцеплены с поверхностью металла. Образующаяся на поверхности оксидная пленка защищает металл от дальнейшего окисления. Защитные свойства оксидной пленки повышаются, если она плотная, не пропускает ионы кислорода и не отслаивается при механическом воздействии.

Основным фактором, влияющим на жаростойкость, является химический состав металла, определяющий защитные свойства оксидной пленки. В табл. 2.3 приведена сравнительная оценка жаростойкости ряда чистых металлов, определяемая по 5-ти бальной шкале скорости окисления в воздушной среде в интервале рабочих температур. Металлы четвертой группы благодаря плотной оксидной пленке с высокими защитными свойствами при нагреве имеют хорошую жаростойкость. Хром, алюминий наряду с кремнием используют для повышения жаростойкости легированных сталей. Они обладают большим сродством с кислородом чем железо и благоприятным образом изменяют состав и строение окалины. В процессе окисления на поверхности образуются плотные окислы Cr_2O_3 , Al_2O_3 , Si_2O_3 диффузия сквозь которые происходит с трудом.

Чем выше содержание хрома, алюминия или кремния, тем выше окислительная стойкость сталей и тем выше рабочая температура.

Таблица 2.3. Жаростойкость металлов на воздухе при рабочих температурах

Балл	Металл	Оценка жаростойкости			Определяющий фактор
		качественная	температурный интервал, °С	Скорость окисления, г/(м ² ·ч)	
1	Mg	Очень плохая	500–600	10^{-1} – 10^1	Рыхлая оксидная пленка
2	Nb, Mo, W, Ti, Zr	Плохая	700–800	10^1 – 10^3	Разрушение оксидной пленки
3	Cu, Fe, Ni, Co	Удовлетворительная	500–600 700–800	10^{-3} – 10^{-1} 10^{-1}	Высокая дефектность сравнительно плотной оксидной пленки
4	Al, Zn, Sn, Pb, Cr, Be	Хорошая	400–600 700–800	менее 10^{-6} 10^{-4} – 10^{-3}	Плотная оксидная пленка
5	Ag, Au, Pt	Отличная	–	–	Низкое сродство к кислороду

Структура жаростойкого материала должна быть однородной и однофазной. Термическая обработка изменяет строение сплавов и, следовательно, их жаростойкость. Отжиг и нормализация приводят к формированию однофазной структуры и способствуют увеличению жаростойкости металла.

Величина зерна практически не влияет на жаростойкость металла. Пластическая деформация снижает жаростойкость, приводит к образованию остаточных напряжений и увеличению их градиента в структуре металла.

Коррозионная стойкость. Коррозионная стойкость – способность металлов и сплавов сопротивляться коррозии .

В зависимости от характера и свойств окружающей среды и условий взаимодействия с ней металла существует два основных вида коррозии – электрохимическая и химическая. *Электрохимическая коррозия* происходит в жидких электролитах. Характерными средами для ее протекания являются влажные атмосфера и почва, вода, водные растворы солей, щелочей и кислоты. *Химическая коррозия*, как правило, происходит при взаимодействии металла с газовой средой.

При *электрохимической коррозии* возникает коррозионный ток и металл, погруженный в электролит, растворяется в результате электрохимического взаимодействия его поверхности с электролитом. При этом на поверхности металла образуются коррозионные микрогальванические элементы типа анод-катод. На аноде происходят ионизация и растворение в электролите атомов металла, а на катоде восстановление окислительного компонента, содержащегося в окружающей металл коррозионной среде (электролите). Таким образом, при электрохимической коррозии окисление металла является результатом действия двух взаимосвязанных электрохимических процессов: ионизации атомов металла (анодный процесс) и восстановления окислителя (катодный процесс).

Схема работы анодно-катодного коррозионного элемента представлена на рис.2.5.

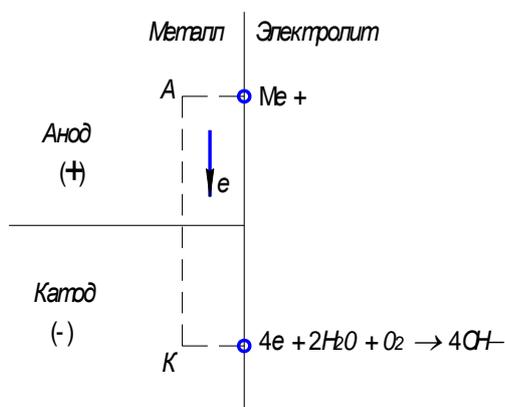
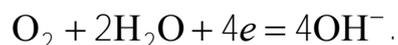


Рисунок 2.5. Схема электрохимического анодно-катодного процесса

На аноде происходит ионизация атомов повреждаемого металла:



а на катоде – восстановление растворенного в электролите кислороде:



В результате перемещения электронов (e) и ионов (OH^-) в электролите возникает коррозионный ток, значение которого характеризует интенсивность ЭХК.

Другими факторами, влияющими на интенсивность ЭХК, являются температура, давление среды, скорость потока коррозионной жидкости или газа, напряжения в металле, чистота обработки его поверхности и т.п. При увеличении скорости потока и чистоты обработки поверхности металла интенсивность ЭХК снижается, а с увеличением других перечисленных факторов – повышается.

Электрохимическая коррозия может быть гомогенной или гетерогенной рис.2.6. Если процессы на аноде и катоде равновероятны по всей площади однородной (однофазной) поверхности детали, то происходит гомогенная ЭХК. Гомогенная коррозия равномерно распределена по всей поверхности металла. Основными мероприятиями по борьбе с гомогенной коррозией является термическая обработка (закалка, нормализация, отпуск).

Если на поверхности детали имеются зоны, в которых наиболее активно протекает либо анодный, либо катодный процесс, то в этом случае происходит гетерогенная ЭХК. Гетерогенная (местная) коррозия носит точечный или язвенный характер (пятнистая, язвенная, питтинговая, точечная). Очаги местной коррозия являются концентраторами напряжений.

Для защиты от электрохимической коррозии широко применяют явление пассивации. Пассивность – это состояние повышенной коррозионной устойчивости металлов и сплавов, вызванное преимущественным торможением анодных процессов. Пассивное состояние возникает при образовании тонких прочных и непрерывных пленок, равномерно покрывающих поверхность материала. Переход от активного состояния к пассивному связан с ростом электродного потенциала.

Наиболее типичным видом *химической коррозии* теплоэнергетического оборудования является газовая коррозия. При высокотемпературной экс-

платации теплоэнергетического оборудования наиболее проблемной является *газовая коррозия*, развивающаяся при взаимодействии с газовой средой. Этот вид коррозии происходит при температурах, превышающих 550 °С в кислородосодержащих газовых средах, на воздухе, в углекислом газе, сухом водяном паре, чистом кислороде и в топочных газах котельного оборудования.

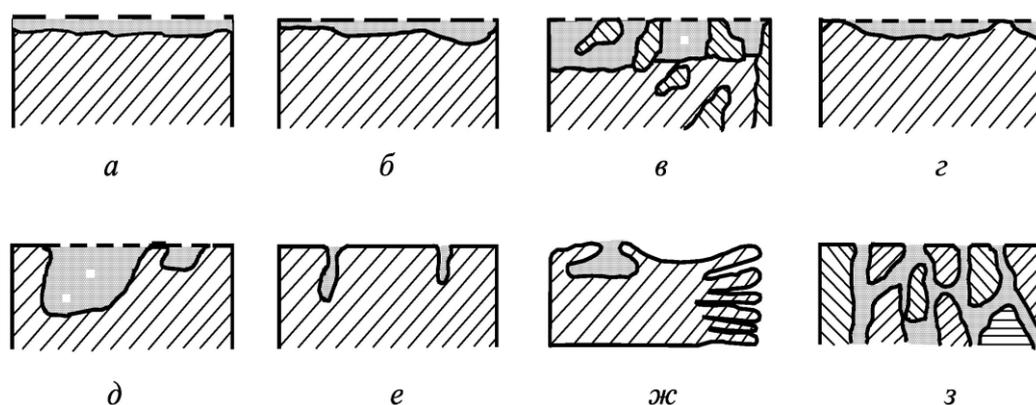


Рисунок 2.6. Виды электрохимической коррозии: *а* – сплошная равномерная; *б* – сплошная неравномерная; *в* – структурно-избирательная; *г* – пятнами; *д* – язвами; *е* – точками (питинговая); *ж* – подповерхностная; *з* – межкристаллитная

Для защиты от электрохимической коррозии широко применяют явление пассивации. Пассивность – это состояние повышенной коррозионной устойчивости металлов и сплавов, вызванное преимущественным торможением анодных процессов. Пассивное состояние возникает при образовании тонких прочных и непрерывных пленок, равномерно покрывающих поверхность материала. Переход от активного состояния к пассивному связан с ростом электродного потенциала.

Наиболее типичным видом *химической коррозии* теплоэнергетического оборудования является газовая коррозия. При высокотемпературной эксплуатации теплоэнергетического оборудования наиболее проблемной является *газовая коррозия*, развивающаяся при взаимодействии с газовой средой. Этот вид коррозии происходит при температурах, превышающих 550 °С в кислородосодержащих газовых средах, на воздухе, в углекислом газе, сухом водяном паре, чистом кислороде и в топочных газах котельного оборудования.

Главной причиной разрушения поверхности деталей является термодинамическая неустойчивость металла, находящегося в рабочей газовой среде. В связи с этим окислительный компонент среды, отнимая у металла валентные электроны, образует оксид, который обладает высокой стабильностью в

данной среде. Сформировавшийся оксид образует на поверхности детали пленку. Защитными свойствами обладают пленки, которые покрывают поверхность металла сплошным слоем. Интенсивность процесса дальнейшего окисления поверхности детали зависит от строения образовавшейся оксидной пленки, главным образом, от степени ее плотности или сплошности. Условием сплошности пленки является отношение молекулярного объема оксида $V_{ок}$ к объему металла $V_{м}$, из которого образовался оксид. Если отношение $2,5 > V_{ок} / V_{м} > 1$, то пленка имеет хорошие защитные свойства. При $V_{ок} / V_{м} < 1$ образуется рыхлый оксид. Однако, если $V_{ок} / V_{м} > 2,5$, то под влиянием возникающих внутренних напряжений пленка растрескивается и скалывается, после чего снова происходит окисление металла. Возникновение внутренних напряжений является следствием большой разницы объемов металла и оксида.

Предельное значение температуры наружной поверхности нагреваемых деталей в основном зависит от химического состава стали. Например, для стали 12Х1МФ в большинстве случаев оно составляет 585 °С, а для сталей 12Х11В2МФ и 12Х18Н12Т – соответственно 630 °С и 640 °С. Глубина окисления стали 12Х1МФ в воздушной среде за время 10^5 ч при температуре 585 °С составляет примерно 0,5 мм. Однако развитие процесса газовой коррозии зависит от нескольких факторов, среди которых основным является вид сжигаемого топлива. Например, глубина коррозии изделия из стали 12Х1МФ при температуре 585 °С за 10^5 ч для антрацитового штыба составляет 0,7 мм, нагаровского угля – 0,55 мм, экибастузского угля – 0,85 мм, мазута марки 100 – 0,8 мм, природного газа – 0,34 мм.

Устойчивость против коррозии повышается при введении в состав сталей *хрома (Cr)*, *алюминия (Al)* и *кремния (Si)*. Эти элементы образуют непрерывную прочную оксидную пленку и повышают электродный потенциал, т.е. увеличивают электроположительность стали. Алюминий и кремний повышают хрупкость стали, поэтому их применяют реже хрома. Сталь, содержащая 12–14% Cr устойчива против коррозии в атмосфере, морской воде, ряде кислот, щелочей и солей. Кроме хрома в состав коррозионно-стойких сталей вводят также другие элементы – чаще никель. С ростом содержания хрома коррозионная стойкость сталей растет.

Скорость коррозии характеризуется качественными и количественными показателями. К первым относят: изменение внешнего вида поверхности металла; изменение его микроструктуры и др. Количественными показателями служат: время до появления первого коррозионного очага, число коррозионных очагов за определенный промежуток времени; уменьшение толщины металла, отнесенное к единице времени и т.п.

Коррозионные испытания. Для характеристики коррозионных свойств материалов обычно проводят их испытания на стойкость против общей коррозии, межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания.

Испытания на общую коррозию. Испытания на общую коррозию проводят на образцах с большим отношением поверхности к объему. Коррозионную среду выбирают с учетом условий эксплуатации материала. Испытания проводят в жидкости при постоянном или многократно повторяемом переменном нагружении образцов в кипящем соляном растворе, в парах или окружающей атмосфере.

Наиболее часто применяют пятибалльную систему оценки общей коррозии (табл. 2.4). Критерием коррозионной стойкости является скорость коррозии ($V_{кор}$, мм/год).

Табл.2.4. Пятибалльная шкала коррозионной стойкости металлов

Балл	Скорость коррозии $V_{кор}$, мм/год	Категория стойкости металла
1	Не более 0,10	Сильнстойкие
2	0,10–1,00	Стойкие
3	1,10–3,00	Пониженнстойкие
4	3,10–10,0	Малостойкие
5	Более 10,0	Нестойкие

Кроме глубины проникновения, оценку коррозионной стойкости можно проводить по десятибалльной шкале потери массы образца за определенный период времени на единицу площади K , г/(м²·ч).

Пересчет обоих показателей проводят по формуле

$$V_{кор} = 8,76 K / \gamma,$$

где $V_{кор}$ скорость коррозии, мм/год;

γ – плотность, г/см³;

K – потеря массы образца, г/(м²·ч).

Испытания на межкристаллитную коррозию (ГОСТ 6032–2003).

Этот стандарт устанавливает методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК) металла из коррозионно-стойких сталей и сплавов, в том числе двухслойных, аустенитного, ферритного, аустенитно-ферритного, аустенитно-мартенситного классов, а также их сварных соединений и наплавленного металла.

В зависимости от химического состава стали и сплава и их назначения выбирают один из следующих методов испытания на стойкость к МКК: АМУ, АМУФ, ВУ, ДУ, В, Б. В условных обозначениях методов буквы обозначают:

А,Б,В,Д – буквенное наименование методов;

М – присутствие в растворе для испытаний металлической меди;

Ф – присутствие в растворе для испытаний иона фтора;

У – ускоренные испытания.

Испытания проводят на плоских образцах, изготовленных из вырезок зон основного металла или сварного шва. Стандартом допускается также изготовление цилиндрических образцов из проволоки, цилиндрических заготовок диаметром не более 10 мм. Количество образцов (от 4 до 8 штук) зависит от метода испытаний на МКК.

Размеры образцов должны обеспечивать возможность:

– изгиба на угол $90^\circ \pm 5^\circ$ плоского образца, сегмента, цилиндра или патрубка диаметром до 10мм, проволоки;

– сплющивания кольцевых образцов;

– осмотра поверхности изгиба на участке, ширина которого позволяет выявить межкристаллитные трещины с учетом возможного влияния кромок.

Для оценки стойкости к межкристаллитной коррозии сталей ферритного, аустенитного и аустенитно-ферритного классов обычно применяют метод АМУ.

Перед испытаниями образцы из хромистых сталей подвергают провоцирующему нагреву при температуре 1100 °С в течение 30 ч, а хромоникелевые аустенитные – при температуре около 700 °С в течение до 60 ч.

Сущность метода АМУ заключается в том, что образцы выдерживают в кипящем водном растворе сернистой меди или серной кислоты в присутствии металлической меди.

Для проведения испытаний применяют следующие реактивы: кислоту серную, медь сернистую; воду дистиллированную, медь в виде стружки, кислоту соляную и кислоту азотную.

Раствор для испытаний готовят следующим образом: к 1000 ± 3 см³ воды добавляют сернистую медь ($50 \pm 0,1$)г, небольшими порциями серную кислоту (250 ± 3) см³ и до загрузки образцов в колбу с раствором добавляют медную стружку в количестве, обеспечивающем всесторонний контакт с образцами и отсутствие контакта между образцами.

Испытания проводят в стеклянной колбе с обратным холодильником. Допускается загрузка образцов одной и той же марки в несколько рядов при условии, что ряды образцов, между которыми находится медная стружка, не

будут соприкасаться друг с другом. Загрузка образцов различных марок сталей в одну и ту же колбу не допускается.

Затем колбу заполняют раствором для испытаний, нагревают и непрерывно кипятят. Продолжительность выдержки в кипящем растворе составляет $8,00 \pm 0,25$ ч.

После выдержки в кипящем растворе образцы промывают водой и просушивают. При отложении на образцах слоя меди, несмываемого струей воды, его удаляют, промывая образцы в 20% – 30%-ном растворе азотной кислоты при температуре $20^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$.

По окончании испытаний для обнаружения МКК образцы изгибают на оправке на угол $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$, либо подвергают травлению специальными реактивами и металлографическому исследованию. Отсутствие трещин на поверхности образца свидетельствует о его стойкости к МКК.

Испытания на коррозионное растрескивание. Коррозионное растрескивание представляет собой разрушение металла при одновременном действии коррозионно-активной среды и растягивающих напряжений.

Испытания на коррозионное растрескивание проводят при нагружении образца в коррозионной среде, соответствующей служебным условиям эксплуатации детали. Среда не должна вызывать общей коррозии и оказывать воздействие на ненагруженные образцы металла. Для аустенитных хромоникелевых сталей примером такой среды может служить кипящий раствор смеси солей MgCl_2 , NaCl и NaNO_3 . Агрессивность сред должна быть не меньше той, в которой должны служить испытываемые материалы.

Ферритные стали имеют максимальную стойкость к коррозионному растрескиванию, а аустенитные – минимальную.

Основные виды коррозии энергетического оборудования. Специфическими видами коррозии энергетического оборудования являются: стояночная, язвенная, подшламовая, газовая высокотемпературная, водородная, термоусталостная, коррозия под напряжением и межкристаллитная коррозия.

Стояночная коррозия является одним из типов электрохимической коррозии. Эта коррозия происходит при останове котла. Причиной возникновения стояночной коррозии является воздух, попадающий в трубу, частично заполненную водой. На границе раздела воды и воздуха происходят коррозионные процессы, следствием которых являются язвину. Микроструктура металла практически не изменяется и остаточная деформация на поврежденных местах не наблюдается. Чаще всего стояночная коррозия происходит в металле законсервированного оборудования, в полости которого проникают вода и воздух. Поэтому для своевременной защиты металла от стояночной кор-

розии необходимы следующие мероприятия: высушивание оборудования, применение защитных антикоррозионных пленок, создание инертной или восстановительной атмосферы и др.

Язвенная коррозия. Если поражение металла от воздействия коррозии происходит в отдельных точках поверхности металла, то такую коррозию называют язвенной. Язвы являются не только видимыми дефектами, но и концентраторами напряжений. При активном развитии язвенной коррозии, сопровождающейся скоплением язв, в металле могут образовываться трещины.

Подшламовая коррозия. Язвы могут образовываться и развиваться на внутренней поверхности труб под слоем отложений в контакте с пароводяной смесью. Язвы заполняются продуктами коррозии и трудно обнаруживаются. Такой тип коррозии еще называют подшламовой. В пористом слое отложений происходит постоянное повышение концентрации солей, в результате чего образуется коррозионный электролит. Язвы подшламовой коррозии являются опасными дефектами, которые могут привести к образованию трещин.

Газовая высокотемпературная коррозия. Этому типу коррозии подвержены трубы ширмовых и конвективных пароперегревателей, находящихся в окислительной среде топочных газов. Интенсивность газовой коррозии зависит от состава топочных газов, их скорости движения и температуры. В топке котла и газоходах газовая коррозия наружных поверхностей труб и стоек пароперегревателей происходит под воздействием кислорода, диоксида углерода, водяных паров, сернистых и других газов. Газовая коррозия труб поверхностей нагрева включает в себя физико-химические процессы взаимодействия топочных газов и наружных отложений с оксидными пленками и металлом.

Термоусталостная коррозия. При воздействии изменяющихся и повторяющихся во времени термических напряжений проявляется термическая усталость. Термические напряжения возникают при наличии перепада температур в сечении металла или по толщине стенки трубы из-за различного теплового расширения нагретых и менее нагретых слоев металла, а также при высоких скоростях нагрева и охлаждения котла.

Термическая усталость в сочетании с коррозией (термоусталостная коррозия) может привести к образованию кольцевых или продольных трещин, а затем и к разрушению. Поверхность разрыва разрушившихся труб от термоусталостной коррозии носит хрупкий характер без заметных следов пластической деформации.

Легированные и жаропрочные стали лучше сопротивляются термоусталостной коррозии, чем углеродистые стали.

Коррозия под напряжением. Распространенным типом электрохимической коррозии является коррозионное растрескивание или коррозия под напряжением. Этот тип коррозии возникает на поверхности деталей, находящихся под нагрузкой или имеющих остаточные напряжения. При наличии коррозионной среды образуются тонкие трещины, проходящие в основном по телу зерен-кристаллитов. В этом случае коррозию называют транскристаллитной. Если трещины проходят по границам зерен-кристаллитов, то коррозию называют межкристаллитной.

Межкристаллитная коррозия – это наиболее опасный вид электрохимической коррозии. Она почти незаметна с поверхности и распространяется вглубь металла по границам зерен.

Межкристаллитной коррозии подвержены многие стали, которые в коррозионно-агрессивных средах имеют высокую стойкость к общей коррозии. Из применяемых в теплоэнергетике сталей, межкристаллитной коррозии подвержены хромоникелевые, хромоникельмолибденовые, хромоникельмарганцевые коррозионностойкие стали аустенитного, ферритного, аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов, а также высоколегированные никелевые сплавы.

Основной причиной межкристаллитной коррозии коррозионностойких материалов является нагрев при обработке давлением или сварке, а также длительная эксплуатация оборудования при температурах выше 450С°, что приводит к электрохимической гетерогенности между приграничными участками и объемом зерен.

В результате межкристаллитной коррозии нарушается связь между зернами, металл теряет свою прочность и пластичность, при постукивании по металлу пропадает характерный металлический звук и после приложения нагрузки металл легко разрушается.

Межкристаллитная коррозия обусловлена диффузионными процессами в структуре стали, приводящими к образованию карбидов хрома по границам зерен и одновременным обеднением хромом участков, непосредственно прилегающих к границам зерен. Скорость диффузии зависит от содержания углерода в стали.

Стойкость материала против межкристаллитной коррозии повышают выбором режима термообработки, снижением содержания примесей, легированием элементами, предотвращающими образование нежелательных фаз по границам зерен.

Эффективным средством, подавляющим межкристаллитную коррозию, является максимальное снижение содержания углерода и введением в сталь таких элементов как титан или ниобий, обладающих большим сродством с

углеродом, чем хром.

Методы борьбы с коррозией. Многообразие процессов коррозии и условия ее проявления обуславливают широкий диапазон способов защиты от этого явления.

К основным способам защиты борьбы с коррозией относят следующие:

- легирование, т.е. образование сплава устойчивого против коррозии;
- модификация коррозионной среды (удаление коррозионно-активных газов O_2 , CO_2);
- изменение электрохимического потенциала защитного материала по отношению к среде на границе фаз (катодная, анодная защита);
- нанесение защитных покрытий и пленок (хромирование, алитирование, борирование, силикатные эмали, лакокрасочные материалы, гуммирование, полимерные покрытия).

Эрозионная стойкость. В основе *эрозии* лежит разрушение поверхностного слоя металла под воздействием, ударяющихся в него твердых частиц, капель или потока жидкости, а также потока пара. Если эрозия происходит в воде или влажном паре, то проявляется сложный коррозионно-эрозионный процесс, так как при ударе потока или капелек влаги разрушается оксидная пленка.

Эрозионному износу в той или иной степени подвержены конструкционные материалы турбин, парогенераторов, теплообменников, запорной и регулирующей арматуры, насосов и другого оборудования.

Эрозионный износ возможен на наружной и внутренней поверхностях труб и деталей. При эрозионном процессе поверхность металла становится рельефной, в результате чего утонение стенок труб неравномерно. Утонение стенок может привести к потере прочности и разрушению трубы. Разрушение под воздействием эрозии носит хрупкий характер и не вызывает микроструктурных изменений в металле.

В общем случае эрозионный износ может происходить от воздействия пароводяной среды и твердых частиц топлива.

При работе энергетического оборудования наблюдается три вида эрозионного износа: капельная эрозия, кавитационная эрозия и абразивная эрозия.

Капельная эрозия – это разрушение поверхности металла оборудования под действием потока влажного пара. Наиболее интенсивно изнашиваются от этой эрозии рабочие и направляющие лопатки последних ступеней паровых турбин. Основными мероприятиями, применяемыми на ТЭС, повышающими стойкость материалов к капельной эрозии являются:

- правильный выбор начальных параметров пара, обеспечивающих

умеренную влагу в конце процесса расширения пара;

- применение внутриканальной сепарации (измельчения частиц влаги);
- выполнение противоэрозионной защиты лопаток (стеллитовые наплавки); *стеллит – твердый сплав на кобальтовой основе, содержащий Cr, W, Si, Mo и др. металлы;*
- выполнение лопаток из титановых сплавов.

Кавитационная эрозия – разрушение потоком воды. Кавитация – это процесс образования и быстрого исчезновения пузырьков паров жидкости вследствие локального изменения давления в потоках жидкости. При исчезновении пузырьков поверхность испытывает локальный гидравлический удар. Вначале удары вызывают локальную пластическую деформацию металла, а затем под воздействием многократных ударов возникают очаги усталостного разрушения и отслаивание поверхностного слоя.

Кавитационной эрозии наиболее часто подвержены детали питательных насосов высокого и сверхкритического давления, регулирующая и запорная арматура питательного пароводяного тракта.

Практически появление кавитации при работе насоса можно обнаружить по характерному потрескиванию в области всасывания. Под действием кавитации поверхности деталей становятся шероховатыми, губчатыми.

Мероприятия по борьбе с кавитационной эрозией:

- нанесение защитных покрытий;
- термическая обработка – поверхностная закалка;
- выполнение противоэрозионной защиты (стеллитовые наплавки);
- предупреждение кавитационных режимов (в технической документации на насосы должна быть обязательно указана допустимая высота всасывания (или допустимый кавитационный запас).

Абразивная эрозия энергетического оборудования может происходить под действием частиц золы и твердого топлива и частиц магнетита.

Эрозии частицами золы подвержены стальные газоходы, конвективные пароперегреватели, экономайзеры, воздухоподогреватели, элементы устройств пылеприготовления и золоудаления котлов, работающих на твердом топливе. Процесс износа при таком разрушении зависит от размера, формы и свойств твердых частиц, а также от скорости и угла их соударения с поверхностью элементов оборудования.

Основными мероприятиями, позволяющими увеличить стойкость к данному виду эрозии, являются:

- рациональная компоновка газоходов котла;
- рациональное размещение поверхностей нагрева;

– снижение скорости уходящих газов.

Эрозии частицами магнетита подвержены лопатки первых ступеней ЧВД и ЧСД паровых турбин в местах ввода пара.

Природа эрозионно-абразивного износа, по мнению большинства исследователей, заключается в ударном воздействии абразивных частиц с поверхностью лопаток.

Основным источником абразивных частиц являются поверхности труб основного и промежуточного пароперегревателей котла, коллекторов котла и паропроводов, на которых естественным образом образуются окислы, в частности магнетит (Fe_3O_4). В процессе эксплуатации слой окислов увеличивается и, достигнув критической толщины, начинает отслаиваться. Наиболее легко окисляются трубы, выполненные из перлитных сталей. Чем выше температура пара, тем интенсивнее идет процесс коррозии. Имеются примеры из практики, когда снижение температуры пара приводило к прекращению износа. Отслаиванию окислов также способствуют переходные режимы работы, при которых в паропроводах действуют циклические температурные напряжения.

Для повышения стойкости к абразивному износу частиц магнетита существует ряд мероприятий, основными из которых являются: правильный выбор материала паропроводов; увеличение зазора между рабочими и направляющими лопатками; сепарация пара; нанесение на поверхность лопаток износостойких покрытий.

Конструкционная прочность металла и ее критерии. *Конструкционная прочность* – комплекс прочностных свойств, которые находятся в наибольшей корреляции со служебными свойствами данного элемента оборудования, обеспечивают длительную и надежную работу материала в условиях эксплуатации.

На конструкционную прочность влияют следующие факторы:

- конструкционные особенности детали (форма и размеры);
- механизмы различных видов разрушения детали;
- состояние материала в поверхностном слое детали;
- процессы, происходящие в поверхностном слое детали, приводящие к отказам при работе.

Необходимым условием создания качественных конструкций при экономном использовании материала является учет дополнительных критериев, влияющих на конструкционную прочность. Этими критериями являются надежность и долговечность.

Надежность – свойство изделий, выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение тре-

буемого времени или сопротивление материала хрупкому разрушению. Критериями, определяющими надежность, являются температурные пороги хладоломкости, сопротивление распространению трещин, ударная вязкость, характеристики пластичности, живучесть.

Долговечность – способность детали сохранять работоспособность до определенного состояния. Долговечность определяется усталостью металла, процессами износа, коррозии и другими, которые вызывают постепенное разрушение и не влекут аварийных последствий, то есть условиями работы. Критериями, определяющими долговечность, являются усталостная прочность, износостойкость, сопротивление коррозии, контактная прочность.

ТЕМА 2.3. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Сталь – сплав железа с углеродом и другими элементами при содержании углерода не более 2,14 %.

Стали классифицируют по назначению, микроструктуре, химическому составу, способу выплавки.

По *назначению* стали делят на три основные группы:

- конструкционные;
- стали с особыми свойствами;
- инструментальные.

Для энергетического оборудования используют в основном стали первых двух групп. Конструкционные стали применяют для изготовления строительных металлоконструкций, деталей машин и аппаратов для работы при нормальной или невысоких температурах (не выше 450 °С) и в агрессивных средах. Конструкционные стали (ГОСТ 4543-71) делятся на качественные, высококачественные – в конце марки ставится буква А и особовысококачественные – две буквы А.

Так, сталь марки 30ХГС – качественная, 30ХГСА – высококачественная, 15Х2НМФАА – особовысококачественная.

Стали с особыми свойствами предназначены для работы в каких-либо специальных условиях, например, при повышенных температурах, в агрессивных средах и пр.

По *микроструктуре* стали подразделяют на классы: *перлитный* – основная структура перлит; *мартенситный* – основная структура мартенсит; *мартенситно-ферритный* – в структуре кроме мартенсита содержится не менее 10 % феррита; *ферритный* – основная структура феррит; *аустенитно-мартенситный* – количество аустенита и мартенсита в структуре может меняться в широких пределах; *аустенитно-ферритный* – кроме аустенита

содержится и феррит (феррита более 10 %); *аустенитный* – основная структура аустенит.

По способу производства (выплавке) стали делят на мартеновские, бессемеровские (конвертерные) и электростали.

Около 70% углеродистых сталей выплавляют в мартеновских печах. Широкое применение *мартеновского процесса* объясняется возможностью переработки не только чугуна, но и металлического лома, а также отходов производства. В мартеновская сталь отличается высоким качеством, в ней практически полностью удаляются вредные примеси.

Бессемеровская сталь получается в бессемеровском конвертере из жидкого чугуна при продувке через него воздуха. Бессемеровская сталь отличается невысоким качеством. Она насыщена газами (особенно азотом), загрязнена примесями, недостаточно очищена от серы и фосфора. Поэтому этот способ изживает себя и ему на смену приходит *кислородно-конвертерный способ*. Он отличается от бессемеровского тем, что вместо воздуха для продувки используется технически чистый кислород. Получаемая сталь называется кислородно – конвертерной, по качеству она равноценна мартеновской стали и значительно превосходит бессемеровскую. Положительными особенностями кислородно-конвертерной стали являются: однородность химического состава, низкое содержание азота, серы и фосфора, высокие механические свойства при комнатной и минусовых температурах. В кислородных конвертерах можно получать стали всех марок выплавляемых в мартеновских печах.

Электросталь, выплавляемая в электрических печах, по качеству превосходит все другие виды стали. Производство стали в эл.печах позволяет наиболее полно удалить из нее серу и фосфор, а также кислород. В эл.печах выплавляют преимущественно легированные стали. Однако этот способ производства стали очень дорогостоящий.

По *химическому составу* стали подразделяют на углеродистые и легированные.

Углеродистые стали являются основным металлическим конструкционным материалом, доля которых составляет порядка 90% всего объема производимых сталей. Углеродистые стали широко применяются в теплоэнергетике для изготовления малонагруженных несущих элементов конструкций, каркасов котлоагрегатов, трубопроводов, сосудов и т.п. Основные причины столь широкого применения углеродистых сталей: удовлетворительное сочетание прочности и пластичности, хорошие технологические свойства, сравнительно низкая стоимость.

Железо и углерод являются основными компонентами углеродистых

сталей. Содержание железа в этих сталях составляет порядка 97–99,5%, а содержание углерода – менее 2%.

Углерод даже при небольшом изменении его содержания в стали сильно влияет на ее свойства, поэтому эти стали и получили название углеродистых сталей.

Кроме железа и углерода в углеродистых сталях присутствуют вредные примеси (сера, фосфор, кислород, азот, водород и др.), наличие и количество которых обусловлено способом выплавки стали. В состав углеродистых сталей также могут входить случайные примеси (никель, медь, хром и др.), содержащиеся в исходных шихтовых материалах. Вместе с тем в этих сталях присутствуют и специально вводимые примеси (марганец, кремний, алюминий и др.), которые предназначены для раскисления сталей, т.е. для освобождения от лишнего кислорода.

Содержание основных элементов и влияние их на структуру и свойства углеродистых сталей.

Углерод – элемент в основном определяющий свойства углеродистых сталей. С увеличением углерода возрастает временное сопротивление, предел текучести и твердость стали, снижаются пластические показатели и ударная вязкость.

Марганец – вводят в любую сталь для раскисления, т.е. для устранения вредных включений закиси железа. Марганец повышает прочность стали и сильно увеличивает прокаливаемость. Содержание марганца в углеродистой стали отдельных марок может достигать 0,8%.

Кремний – подобно марганцу является раскислителем, но действует более эффективно. В спокойной углеродистой стали содержится от 0,12 до 0,4% кремния, что заметно повышает твердость и прочность стали.

Сера – вредная примесь. Содержание серы не должно превышать 0,05%, так как она сильно ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость стали.

Фосфор – вредная примесь. Наличие фосфора в стали резко снижает ее пластичность стали и вызывает хладноломкость. Допускается не более 0,04%.

Кислород, азот, водород – также являются вредными примесями, которые приводят к повышению хрупкости стали, снижают ее пластичность и ударную вязкость.

Классификация и маркировка углеродистых сталей.

Углеродистые стали классифицируют по содержанию углерода, способу раскисления, назначению и качеству.

По *содержанию углерода* стали подразделяют на:

- низкоуглеродистые (менее 0,3%);
- среднеуглеродистые (от 0,3 до 0,7%);
- высокоуглеродистые (свыше 0,7%).

Большое влияние на свойства сталей оказывает *способ раскисления*, в зависимости от полноты которого стали классифицируют на *спокойные*, *полуспокойные* и *кипящие*. Современные способы производства стали завершаются получением жидкого металла. При любом способе производства к концу процесса в стали значительное количество кислорода содержится в виде геммоксида железа. Этот кислород необходимо удалить, иначе пластичность стали будет невысокой, и сталь нельзя будет обрабатывать прокаткой, ковкой или прессованием.

Спокойная сталь раскислена наиболее хорошо – марганцем, кремнием и алюминием. Затвердевание ее происходит спокойно, без выделения газов. Слиток спокойной стали затвердевает с образованием усадочной раковины, которую отрезают. Однако выход годного при таком способе раскисления всего 85–90%. Алюминий не только раскисляет сталь, но и способствует измельчению зерна. Мелкозернистая сталь при невысоких температурах (до 450°С) обладает более высоким пределом текучести (σ_T), лучшими пластическими свойствами и ударной вязкостью.

Кипящая сталь раскислена не полностью – только марганцем. Слиток кипящей стали затвердевает без усадочной раковины, поэтому выход годного 95–100%. Кипящие стали дешевле спокойных, однако по качеству они им уступают. Они обладают повышенной газонасыщенностью. Кипящей выплавляют только малоуглеродистую сталь, содержащую до 0,25% углерода.

Сталь, занимающая по степени раскисления промежуточное положение между спокойной и кипящей, называется *полуспокойной*. Она раскислена марганцем и алюминием., ее можно выплавлять с содержанием углерода до 0,40–0,45%. Выход годного этой стали составляет 90–95%. Она может заменить как кипящую, так и спокойную сталь. Для изготовления элементов теплоэнергетического оборудования допускается применение только спокойных или полуспокойных сталей.

По *назначению* углеродистые стали подразделяют на *конструкционные* и *инструментальные*.

По *качеству* стали классифицируют на стали:

- обыкновенного качества;
- качественные;
- высококачественные.

Качество стали зависит от металлургического процесса ее производства; оно определяется содержанием в стали газов кислорода, водорода, азота и вредных примесей (серы и фосфора). Чем меньше содержание вредных примесей, чем уже пределы изменения механических свойств и содержания химических элементов, тем выше качество стали

Углеродистая сталь обыкновенного качества. Углеродистая сталь обыкновенного качества поставляется по ГОСТ 380-2005 и изготавливается в электропечах, мартеновских печах или конвертерах. Из углеродистой стали изготавливается сортовой прокат: швеллеры, уголки, балки, лист, трубы, проволока и т.п.

В котлостроении низкоуглеродистая сталь, поставляемая по ГОСТ 380, применяется для элементов котлов, не нагруженных внутренним давлением, а также в виде листа и проката элементов котлов и трубопроводов, работающих при относительно низких температурах и давлениях.

Углеродистую сталь обыкновенного качества (ГОСТ 380-2005) изготавливают следующих марок: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, 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 стали (с увеличением номера возрастает содержание углерода в стали). Кроме того, стандарт предусматривает изготовление сталей с повышенным содержанием марганца (0,8–1,1%). Такие стали имеют марки Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст5Гпс. В конце марки стоят буквы «кп», «пс», «сп», которые указывают на способ раскисления: «кп» – кипящая; «пс» – полуспокойная; «сп» – спокойная.

С повышением условного номера марки стали возрастает предел прочности, предел текучести и снижается пластичность. Повышение содержания углерода в стали ухудшает свариваемость, поэтому при создании строительных конструкций из сталей Ст5 и Ст6 сварку не применяют.

Кипящие стали (Ст1кп, Ст2кп, Ст3кп), содержащие повышенное количество кислорода, имеют порог хладноломкости на 30 – 40 °С выше, чем спокойные стали (Ст1сп, Ст2сп, Ст3сп и др.). Поэтому для ответственных сварных конструкций, а также для конструкций, работающих при низких температурах, применяют спокойные стали.

Если в сертификате на изделие не указан способ раскисления, то его можно косвенно определить по содержанию кремния (S_i):

- до 0,07% – кипящая;
- от 0,07 до 0,17% – полуспокойная;
- от 0,17 до 0,37% – спокойная.

Качественная углеродистая сталь. Для изготовления более ответственных деталей котлов и трубопроводов применяются качественные углеродистые стали общего назначения, изготавливаемые по ГОСТ 1050-2013. К ним предъявляются более жесткие требования по содержанию вредных примесей по сравнению со сталями обыкновенного качества. Сталь поставляемая по ГОСТ 1050-2013, изготавливается в основных конвертерах с продувкой кислородом сверху, в мартеновских и электрических печах.

В соответствии с ГОСТ 1050-2013 в обозначениях качественной углеродистой стали не пишутся буквы Ст, а в начале марки приводятся цифры, указывающие содержание углерода в сотых долях процента, и далее могут следовать буквы «кп» и «пс». Если эти буквы отсутствуют, то это означает, что сталь является спокойной. Марки стали углеродистой качественной: 05кп, 08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 11кп, 15кп, 15пс, 15, 18кп, 20кп, 20пс, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 50А, 55, 58, 60.

Также в соответствии с ГОСТ 1050-2013 изготавливаются качественные углеродистые стали с повышенным содержанием марганца (Mn) и в маркировку дополнительно вводится буква «Г». Марки стали углеродистой качественной с повышенным содержанием марганца: 15Г, 20Г, 25Г, 30Г, 35Г, 40Г, 45Г, 50Г, 10Г2, 30Г2, 35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2.

Качественная углеродистая сталь для ответственных деталей котлов, трубопроводов и сосудов, работающих под давлением, изготавливается по ГОСТ 5520-79, имеет аналогичные обозначения и отличаются только добавлением после цифры буквы К, например 20К.

По содержанию углерода качественные углеродистые стали подразделяются на: низкоуглеродистые, среднеуглеродистые и высокоуглеродистые конструкционные. В сварных конструкциях применяются только низкоуглеродистые стали.

Качественные углеродистые стали широко используются в машиностроении и приборостроении. Например, стали марок 05кп, 08кп, 10кп обладают высокой пластичностью в холодном состоянии и хорошо штампуются. Из этих сталей изготавливают детали сложной формы: крышки, трубки и т.п. Стали марок 15, 20, 25 в нормализованном состоянии применяются для изготовления патрубков, штуцеров, болтов, фланцев, трубчатых пучков, теплообменных аппаратов и других деталей турбин. Стали 35, 45 имеют более высокую прочность, а после термического улучшения у них появляется хороший запас пластичности. Из них изготавливают валы, шатуны, зубчатые колеса и другие детали, воспринимающие циклические нагрузки.

Углеродистые инструментальные стали по ГОСТ 1435-99 маркируются

следующим образом: первая буква «У» обозначает слово «углеродистая», а далее идут цифры, которые указывают содержание углерода в десятых процента (а не в сотых, как у качественных). При повышенном содержании марганца (0,35–0,58) ставится буква Г. Если сталь высококачественная в маркировку добавляется буква «А». Низкое содержание вредных примесей в высококачественных сталях дополнительно удорожает и усложняет их производство. Поэтому обычно высококачественными сталями бывают не углеродистые, а легированные стали.

Область применения некоторых марок углеродистых сталей приведена в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Область применения некоторых марок углеродистых сталей

Марка стали	Вид поставки	Назначение	$t_{\text{раб}},$ °C
<i>Сталь углеродистая обыкновенного качества</i>			
Ст2сп, Ст2пс	Листовой, сортовой, фасонный прокат, трубы	Малонагруженные элементы конструкций, работающие при постоянных нагрузках и положительных температурах: до 150°C (элементы котлов), до 300°C (сосуды, трубопроводы), газопроводы	150-300
Ст2кп	То же	То же, но при температурах до 200°C (сосуды, трубопроводы)	200
Ст3сп	Листовой, сортовой, фасонный прокат, трубы, поковки, сталь для армирования железобетонных покрытий	Несущие элементы конструкций, работающие при температурах выше нуля (сталь групп А,Б,В), а также при переменных нагрузках (сталь группы В категории 5) в температурном диапазоне -40÷ +425°C. Сосуды под давлением – 425°C, трубопроводы 300°C; трубные элементы котла 200°C; каркасы; газопроводы.	200-425
Ст3кп	То же, кроме поковок	Второстепенные малонагруженные и несущие конструкции, в диапазоне температур -40÷ +400°C; элементы котлов 0÷ +150°C; до 200°C – сосуды, трубопроводы.	200-400
Ст3Гпс	Листовой, сортовой, фасонный прокат	Несущие элементы конструкции, работающие при переменных нагрузках в диапазоне -40÷ +425°C	
<i>Сталь углеродистая качественная</i>			
10	Листовой, сортовой, фа-	Элементы сварных конструкций и корпуса, трубные пучки теплообменных аппаратов,	425-450

	сонный прокат, трубы, поковки	трубопроводы, змеевики и др. детали, работающие при температуре $-40 \div +425^{\circ}\text{C}$, к которым предъявляются требования высокой пластичности. Поверхности нагрева котлов, работающие при температуре до 450°C .	
20	То же	Детали сварных конструкций с большим объемом сварки, трубопроводы, змеевики, трубы перегревателей и коллекторов, работающие при температурах $-40 \div +450^{\circ}\text{C}$ под давлением. Поверхности нагрева котлов, работающие при температуре до 450°C .	450
50	Поковки	Валки горячей прокатки, шестеренные валы, колеса, венцы, диски, оси и т.д.	
15К 20К	Листовой прокат	Сварные узлы паровых котлов и сосудов, корпуса цилиндров и камеры горения газовых турбин и др., работающие до 450°C , сосуды до 475°C .	450-475

ТЕМА 2.4. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ.

Легирование – это процесс введение в сталь химических элементов в заданных концентрациях в целях изменения ее строения и свойств.

Легировующими элементами называют химические элементы, специально вводимые в сталь для изменения ее строения и свойств. Соответственно, стали содержащие легирующие элементы их называют *легированными сталями*. При этом если содержание кремния превышает 0,4% или марганца 0,8%, то они также относятся к легирующим элементам.

Концентрация некоторых легирующих элементов может быть очень мала. В количестве до 0,1% вводят *Nb* и *Ti*, а содержание бора обычно не превышает 0,005%.

Легирование производят с целью изменения механических (прочности, пластичности, вязкости), физических (электропроводности, магнитных характеристик, радиационной стойкости) и химических (коррозионной стойкости в разных средах) свойств.

Необходимый комплекс свойств обычно обеспечивается не только легированием, но и термической обработкой, позволяющей получать наиболее оптимальную структуру металла. Применение легирующих элементов существенно влияет на себестоимость сталей. *Легированные стали дороже углеродистых, и поэтому применять их без термообработки неэкономично.*

Основными легирующими элементами являются *Cr, Ni, Mn, Si, W, Mo, V, Al, Cu, Ti, Nb, Zr, B*.

Чаще всего легируют не одним, а несколькими элементами, например *Cr* и *Ni*, получая хромоникелевую сталь, *Cr* и *Mn* – хромомарганцевую, *Cr* и *Mo* – хроммолибденовую, *Cr, Ni, Mo, V* – хромоникельмолибденванадиевую.

Легирующие элементы, вступая во взаимодействие с железом и углеродом, могут участвовать в образовании **различных фаз** в легированных сталях:

- легированного **феррита** – твердого раствора легирующего железа в Fe_{α} ;
- легированного **аустенита** – твердого раствора легирующего железа в Fe_{γ} ;
- легированного **цементита** – твердого раствора легирующего железа в цементите или при увеличении содержания легирующего элемента сверх определенного предела – специальных карбидов.

К числу аустенитообразующих элементов относятся *Ni, Mn, Co, Mo, Cu, C, Nb*. При содержании этих легирующих элементов выше определенного количества сталь в интервале температур от комнатной до перехода в жидкое состояние имеет структуру легированного аустенита. Такие стали называют – *аустенитными*.

Стали легированные ферритообразующими элементами (*Cr, Si, Mo, V, Ti, W, Nb, Zr*) в большом количестве – *ферритные стали*.

При комбинированном легировании – *аустенитно-ферритные стали*.

Влияние легирующих элементов на структуру и свойства легированных сталей.

Молибден (*Mo*) – эффективно повышает прочность стали при высоких температурах и вводится в стали обычно совместно с хромом, который повышает стойкость карбидов, препятствуя графитизации стали в процессе длительной эксплуатации. Молибден вводят в состав некоторых аустенитных сталей для повышения коррозионной стойкости. Окалиностойкость молибден не повышает. Содержание молибдена в пределах от 0,15% до 1,2%.

Хром (*Cr*) вводится в низколегированные стали для повышения устойчивости карбидов и для улучшения окалиностойкости. Хром недорог и недефицитен (от 0,5% до 2,5%).

Никель (*Ni*) – дорогой и дефицитный легирующий элемент вводится в аустенитные жаропрочные стали в количестве не менее 9% для получения аустенитной структуры. Вместе с никелем вводится хром. Никель повышает коррозионную стойкость аустенитных сталей. В перлитную сталь идущую на изготовление барабанов, вводится никель в количестве около 1% для повы-

шения предела текучести и улучшению сопротивления хрупкому разрушению.

Ванадий (*V*) способствует повышению прочности в условиях длительной эксплуатации при высоких температурах. Ванадий измельчает зерно стали и образует очень устойчивые карбиды. Присадка ванадия в количестве 0,2-0,4%

Алюминий (*Al*) в конструкционных сталях применяют как раскислитель; уменьшает склонность к росту зерна аустенита; в высоколегированных сталях и сплавах используют для увеличения жаростойкости (окалиностойкость).

Кремний (*Si*) в количестве 0,4 % остается в стали после раскисления (технологическая примесь), при большем содержании – легирующий элемент; повышает прочностные и снижает пластические свойства, увеличивает жаростойкость (окалиностойкость) стали.

Марганец (*Mn*) в количестве до 0,8 % остается в стали после раскисления и уменьшения вредного влияния серы (технологическая примесь), при большем содержании – легирующий элемент; способствует стабилизации аустенитной структуры, увеличивает прочность и прокаливаемость стали; снижение пластичности стали наблюдается при содержании марганца более 1,5 %. В высоколегированных жаропрочных сталях марганец применяют для частичной замены дефицитного никеля.

Введение в стали совместно **кремния и марганца** повышают хладостойкость сталей, кремнемарганцовистые стали часто называют *хладостойкими*.

Бор (*B*) вводится в сталь в небольшом количестве (0,002-0,005%) для повышения прочности при высоких температурах. Присадка бора улучшает свариваемость сталей.

Титан и ниобий (*Ni, Nb*) в малоуглеродистых сталях снижают склонность к охрупчиванию из-за образования мартенсита, так как связывают с углеродом труднорастворимые карбиды, тем самым, понижая содержание углерода в аустените.

Вольфрам (*W*) вводится в аустенитные стали для повышения жаропрочности. Он дорог и дефицитен.

Медь (*Cu*) в количестве 0,15–0,25 % повышает сопротивление стали атмосферной коррозии; при содержании 1,5–2 % несколько повышает твердость и прочность отожженной стали.

Классификация легированных сталей. Легированные стали классифицируют по нескольким признакам: по химическому составу, содержанию легирующих элементов, структуре и назначению.

По *химическому составу* в зависимости от общего количества легирующих элементов стали подразделяют на никелевые, хромистые, хромоникелевые, хромомолибденовые, кремнемарганцовыстае, хроммолибденванадиевые и т.д.

В зависимости *от содержания легирующих элементов* легированные стали делятся на три группы:

- низколегированные (менее 2,5%);
- среднелегированные (от 2,5 до 10%);
- высоколегированные (более 10%).

Классификация *по микроструктуре* несколько условна. Характерные для конкретного класса структуры получаются в результате различных режимов термической обработки: ферритные, перлитные, мартенситные и аустенитные.

Стали *ферритного* класса содержат мало углерода, свыше 13% хрома или более 2,5% кремния, применяются как нержавеющие или инструментальные.

Стали *перлитного* класса наиболее распространены. Структура сталей этого класса после нормализации или отжига состоит из феррита и перлита или перлита и карбидов. Такие стали содержат мало легирующих примесей. Все они относятся к низко- и среднелегированным сталям, обладают хорошей обрабатываемостью режущим инструментом. Многие стали перлитного класса, содержащие 0,15–0,20% углерода, хорошо свариваются.

Стали *мартенситного* класса закаляются на мартенсит при охлаждении на воздухе и относятся в основном к среднелегированным сталям. Эта сталь обычно легирована большим количеством различных элементов (хром, никель и др.). Массовая доля углерода в этих сталях повышенная. Стали наиболее широко применяются для изготовления пружин, крепежа.

Стали *аустенитного* легированы большим количеством (до 30%) легирующих элементов (никель, хром, марганец и др.). Содержание углерода колеблется в широких пределах. Их применяют для изготовления пароперегревателей, паропроводов, арматуры на сверхвысокие и сверхкритические параметры пара. В электротехнике используются, как немагнитные, в химическом машиностроении – как нержавеющие.

По *назначению* легированные стали могут быть разделены на три основных класса:

- конструкционные;
- инструментальные;
- стали с особыми свойствами.

Каждый из этих классов подразделяется на подклассы более узкого на-

значения.

Маркировка легированных сталей. Для маркировки легированных сталей принята буквенно-цифровая система. Каждый легирующий элемент обозначается прописной русской буквой: марганец – **Г**, кремний – **С**, хром – **Х**, никель – **Н**, молибден – **М**, вольфрам – **В**, ванадий – **Ф**, титан – **Т**, алюминий – **Ю**, мель – **Д**, ниобий – **Б**, кобальт – **К**, бор – **Р**, фосфор – **П**, цирконий – **Ц**.

Легирующий элемент обычно обозначают первой буквой его названия, но это не всегда соблюдается. Например, молибден, марганец и медь начинаются на букву **М**. Поэтому молибден обозначается буквой **М**, а два остальных буквами, входящими в их название: медь – **Д**, марганец – **Г**.

Цифры, стоящие за буквами примерное содержание легирующих элементов в %. Если менее 1% , то цифра не ставится. При содержании от 1% до 2% ставится цифра 1.

Двузначное число вначале марки – среднее содержание углерода в сотых долях %. При содержании углерода менее 0,8% ставится цифра 0,8.

Некоторые группы сталей содержат дополнительные обозначения: марки шарикоподшипниковых сталей начинаются с буквы **Ш**, быстрорежущих – **Р**, электротехнических – **Э**, автоматных – **А**, сталей для постоянных магнитов – **Е**.

Для повышения качества и улучшения механических свойств некоторые марки сталей подвергают вторичному переплаву. В маркировке стали вводится указание вида вторичного переплава следующей аббревиатурой после буквенных и цифровых обозначений: переплав в вакуумных дуговых печах – (ВДП) **ВД**; плазменная выплавка – **ПТ**, электрошлаковый переплав – (ЭШП) **Ш**; электронно-лучевой переплав – **ЭЛП**; плазменно-дуговой переплав – **ПДП**; обычная дуговая плавка – **ОДП**. Качественные легированные стали содержат не более 0,035% серы и 0,035% фосфора, а высококачественные не более 0,025% серы и 0,025% фосфора.

Буква **Р** также используется для обозначения стали роторов турбин, например сталь 25Х1М1ФА иногда обозначают **Р2** или **Р2МА**.

Буква **А** в середине марки стали означает, что сталь легирована азотом (14Г1АФ), а в конце марки низко- и среднелегированных сталей означает, что сталь является высококачественной, т.е. с меньшим содержанием вредных примесей (12Х1М1ФА).

Буква **У** в конце марки низколегированных сталей обозначает, что сталь улучшенная, т.е. прошла термообработку – нормализацию или отпуск (17Г1СУ).

По другому могут быть обозначены некоторые опытные и исследова-

тельские стали. Так стали выплавленные на заводе «Электросталь» обозначаются буквами ЭИ (электросталь исследовательская), ЭП (электросталь пробная), а затем указывается порядковый номер, например, ЭИ257 (12X14Н14В2М), ЭИ268 (14X17Н2), ЭП182 (20X1М1Ф1ПТ).

Область применения легированных сталей. Легированные стали, используемые для изготовления поверхностей нагрева и паропроводов должны обладать возможно более высокой жаропрочностью, хорошей деформационной способностью при длительной эксплуатации, коррозионной стойкостью, а также технологичностью при сварке.

В отечественном котлостроении для изготовления труб паропроводов, пароперепускных труб и коллекторов применяются, стали 20, 12X1МФ и 15X1МФ. Используется также молибденовая сталь 16М.

В котлах среднего и низкого давления все поверхности нагрева, коллекторы и трубопроводы изготавливались из углеродистой стали 10 и 20.

Долгое время трубопроводы питательной воды всех котлов низкого, высокого и среднего давления изготавливались также из стали 20. Однако с повышением температуры питательной воды и давления прочность стали 20 оказалась недостаточной – трубопроводы получались слишком толстостенными и тяжелыми. Поэтому стали применяться трубопроводы, выполненные из низколегированной стали 15ГС.

При переходе на высокое давление пара и температуру перегрева выше 450°С в поверхностях нагрева и трубопроводах начали использовать стали 15М и 20М, содержащие около 0,5% молибдена, который эффективно повышает прочность сталей при высоких температурах. В последнее время использование стали 16М прекращено из-за ее склонности к графитизации. Вместо ее стали применять стали 15ХМ и 15МХ. Сталь 12ХМ можно применять при температуре стенки до 510°С, а сталь 15ХМ – до 550°С.

Сталь 12X1МФ применяется для поверхностей нагрева, камер и паропроводов, а сталь 15X1МФ только для камер и паропроводов. (температура 570°С давление пара 255 МПа).

Перспективными материалами для труб поверхностей нагрева котлов, работающих на малоагрессивных топливах при высоких температурах, могут быть аустенитные хромоникелевые стали 12X14Н18В2БР (ЭИ 695Р), 12X16Н14 В2БР (ЭП17) и 12X16МВ2БР (ЭП184).

В табл.2.6 приведены области применения в теплоэнергетике некоторых легированных сталей.

Таблица 2.6. Область применения некоторых марок легированных сталей

Марка стали	Вид поставки	Назначение	$t_{\text{раб.}}^{\circ}\text{C}$
<i>Низколегированные перлитные стали</i>			
16ГНМА	Толстолистовой прокат	Бараны паровых котлов высоких параметров пара, корпусное оборудование, работающее под давлением	450
12ХМ	То же, поковки	Трубы пароперегревателей, паропроводы и коллекторы высокого давления, работающие при температуре 530°C, сосуды с температурой среды 540°C, поковки для паровых котлов и паропроводов, детали цилиндров газовых турбин	530-540
15ХМ	Трубы, поковки, сортовой прокат	Паропроводы и пароперегреватели, сосуды, работающие под давлением	550
12Х1МФ	Трубы, поковки, сортовой прокат	Коллекторы котлов, паропроводы и корпусное оборудование высокого и сверхвысокого давления для работы при температуре до 570°C, поверхности нагрева котлов при температуре 585°C.	570-585
15Х1М1Ф	Трубы, поковки	Коллекторы котлов и паропроводы высокого и сверхвысокого давления	575
12Х2МФБ 12Х2МФСР	Трубы	Поверхности нагрева паровых котлов (пароперегреватели)	585
12Х2М	Листовой прокат, поковки, трубы	Корпусное оборудование, пучки трубок теплообменников, работающие при температуре до 500°C, паропроводы с рабочей температурой 545°C	545
25Х1МФ	Поковки, прутки, полосы	Плоские пружины, болты и др. крепежные детали	520-550
15Х2МФ	Толстолистовой прокат	Корпуса реакторов	360
20Х1М1Ф1БР	Поковки, прутки, полосы	Крепежные детали турбин и фланцевые соединения паропроводов и аппаратов	500-580
<i>Стали мартенситного и мартенситно-ферритного классов</i>			
жаростойкие			
15Х6СЮ	Трубы, детали котельных установок		800

40X9C2	Трубы рекуператоров, теплообменники, колосники	850
12X13	Детали турбин, трубы, колосники	700
жаропрочные		
15X5M 15X5BФ	Детали насосов, задвижки, крепеж	600
12X8BФ	Трубы печей, аппаратов и коммуникаций нефтезаводов	500
15X11MФ	Рабочие и направляющие лопатки паровых турбин	580
20X13 12X13	Лопатки паровых и газовых турбин, клапаны, болты и трубы	500 550
09X16H4Б	Трубы пароперегревателей и трубопровода установок сверхвысокого давления	650
Аустенитные жаропрочные		
10X11H20T3P	Детали турбин (поковки, сортовой прокат)	700
37X12H8T8MФБ	Диски турбин	630
09X14H16Б	Трубы пароперегревателей и трубопроводы установок сверхвысокого давления, листовой прокат	650
09X14H19B2BP1	Роторы, диски и лопатки турбин	700
08X15H24B4TP	Рабочие и направляющие лопатки, крепежные детали, диски газовых турбин	700
09X16H15M3Б	Трубы пароперегревателей и трубопроводов высокого давления	350
12X18H9	Трубы, детали печной арматуры, теплообменники	800
12H18H9T 12H18H10T 12H18H12T	Детали выхлопных систем, трубы, листовые детали	600
10X23H18	Трубы, арматура	1000
20X23H18	Газопроводы, камеры сгорания, нагревательные элементы	100
Стали ферритного класса		
12X17, 08X17T, 08X18T1	Теплообменники трубы	900
15X18CЮ	Трубы пиролизных установок	1050
15X25T	Теплообменники	1050
15X28	Трубы пиролизных установок, теплообменники	1110- 1150

Базовые стали и сплавы, стойкие к эксплуатационным воздействиям в теплоэнергетике.

В теплоэнергетике используются конструкционные материалы, способные выдерживать механические нагрузки в течение длительного времени при высоких (до 600°C) и повышенных (более 600°C) температурах. Стали и сплавы, предназначенные для работы в таких тяжелых условиях, подразделяются на *теплостойкие*, работающие в нагруженном состоянии при температурах до 600°C в течение заданного времени и *жаропрочные стали и спла-*

вы, работающие в течение определенного времени при температурах выше 600 °С.

Теплостойкие стали. Теплостойкие стали широко применяются в энергетическом машиностроении для изготовления оборудования и трубопроводов. Срок службы оборудования и трубопроводов, изготовленных из теплостойких сталей, должен составлять 10^5 – $2 \cdot 10^5$ ч. Поэтому эти стали должны обладать требуемыми значениями пределов текучести и длительной прочности в течение всего периода эксплуатации.

При сравнительно невысоких температурах (до 450 °С) и давлениях (до 6 МПа) используют углеродистые стали марок 15К, 16К, 18К, 20К и 22К. Эти стали различаются содержанием углерода, причем при увеличении его содержания повышаются характеристики прочности и несколько снижаются характеристики пластичности. Они применяются для изготовления барабанов котлов низкого давления и поставляются в виде листов толщиной 4–60 мм. Изготавливают барабаны из стальных листов путем вальцовки обечаек или штамповки полуобечаек с последующей их сваркой продольными и кольцевыми швами. Продольные швы свариваются электрошлаковой сваркой под слоем флюса, а кольцевые – автоматической многослойной сваркой. Днища штампуются и привариваются к корпусу барабана автоматической сваркой под слоем флюса. В связи с этим стали для барабанов котлов должны хорошо обрабатываться вальцовкой, штамповкой и свариваться. Углеродистые котельные стали с содержанием углерода до 0,24 % подвергаются закалке и высокому отпуску, что позволяет сохранить стабильность структуры в течение длительного срока эксплуатации. Однако с течением времени в структуре этих сталей может происходить сфероидизация карбидов и графитизация, что сказывается на механических свойствах. В этом случае структура и свойства стали могут быть восстановлены термической обработкой. Рекомендуемыми режимами восстановительной термической обработки являются нормализация при температуре 900–920 °С с выдержкой 0,5 ч и последующий высокий отпуск при температуре 630–650 °С.

В табл.2.7 приведены механические свойства стальных листов некоторых марок углеродистых котельных сталей.

Теплостойкие легированные стали подразделяют на низколегированные и среднелегированные перлитные стали. Эти стали предназначены для длительной эксплуатации при температуре 450–480 °С. Из них изготавливают паропроводы, пароперегревательные трубы и барабаны котлов. Легирующие элементы вводятся в стали для упрочнения. Вместе с тем хром и молибден способствуют повышению коррозионной стойкости в воде и насыщенном паре. Повышение прочности при легировании достигается за счет

упрочнения феррита и образования мелкодисперсных карбидов. Однако при повышении прочности несколько ухудшаются пластические свойства и свариваемость. При сварке листов большой толщины из низколегированных сталей необходим сопутствующий подогрев, а после сварки дополнительно проводят высокий отпуск во избежание образования трещин. В табл. 2.8 представлены механические свойства стальных листов из низколегированных сталей.

Таблица 2.7. Механические свойства стальных листов углеродистых котельных сталей

Марка	Толщина листа, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²
15К	до 20	225	372	27	69
	21–40	216	372	26	64
	41–60	206	372	25	59
20К	До 20	245	402	25	59
	21–40	235	402	24	54
	41–60	225	402	23	49
22К	до 60	265	431	22	59
	более 60	265	431	22	59

Таблица 2.8. Механические свойства теплостойких низколегированных сталей

Марка	Толщина листа, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²
16ГС	4–10	323	490	21	59
	10–20	314	480	21	
	20–33	294	470	21	
	33–60	284	461	21	
	60–160	274	451	18	
09Г2С1	4–10	343	490	21	59
	10–20	323	470	21	
	20–33	304	461	21	
	33–60	284	451	21	
	60–80	274	441	21	
	80–160	264	431	21	
10Г2С1	4–10	374	510	21	59
	10–20	353	500	21	
	20–33	343	490	21	
	33–60	333	470	21	
	60–160	314	451	21	
12МХ	4–50	245	440	22	59
	50–100	235	431	20	49

	100–160	225	421	18	39
16ГНМА	115	323	500	20	78
10Х2М	8–50	294	392	20	98
12Х1МФ	4–40	294	410	21	78
10ХСНД	16–33	392	529	19	–
	33–40	392	510	19	

Чем меньше толщина листа, тем выше прочностные свойства стали (предел текучести и временное сопротивление). Это объясняется тем, что тонкие листы в большей степени подвергаются обжатию и быстрее охлаждаются на воздухе или в закалочных средах при проведении термической обработки. Стальные листы большой толщины, например, из стали 16ГНМА, используются для изготовления обечаек и днищ барабанов котлов высокого давления. Сталь перлитного класса 12Х1МФ используется для изготовления паропроводов. Типичная термическая обработка этой стали состоит в нормализации и высоком отпуске.

Теплостойкие высоколегированные стали предназначены для эксплуатации при температурах 450–600 °С. За счет большего содержания легирующих элементов эти стали обладают более высокой жаростойкостью по сравнению с низко- и среднелегированными перлитными сталями при примерно одинаковом уровне характеристик жаропрочности. Наиболее типичными теплостойкими легированными сталями являются стали мартенситного и мартенситно-ферритного классов. Мартенситные стали содержат примерно 5–10 % *Cr*, а мартенситно-ферритные 10–13 % *Cr*. Эти стали используются для изготовления дисков, валов, лопаток, уплотнительных втулок, клапанов, паровых турбин.

Для повышения сопротивления ползучести в высокохромистые теплостойкие стали дополнительно вводят *Mo*, *W*, *V*, *Nb*, *Ti*. При высоком содержании хрома (10–13 %) и других ферритообразующих элементов и малом содержании углерода стали становятся мартенситно-ферритными.

В табл.2.9 представлены механические свойства некоторых марок теплостойких высоколегированных сталей.

Таблица 2.9. Механические свойства и режимы термической обработки некоторых теплостойких высоколегированных сталей

Марка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²	Режимы термической обработки
Мартенситные стали					
40X10C2M	735	930	10	20	Закалка 1010–1050 °С, охлаждение на воздухе или в масле; отпуск 720–780 °С, охлаждение в масле
15X11MФ	490	690	15	59	Закалка 1030–1060 °С, охлаждение в масле; отпуск 700–740 °С, охлаждение в масле
18X11MНФБ	590	740	15	59	Закалка 1080–1130 °С, охлаждение на воздухе или в масле; отпуск 660–770 °С, охлаждение на воздухе
20X13	635	830	10	60	Закалка 1000–1050 °С, охлаждение на воздухе или в масле; отпуск 660–770 °С, охлаждение на воздухе или в масле
Мартенситно-ферритные стали					
18X12BMБФР	490	740	12	39	Закалка 1050–1150 °С, охлаждение в масле; отпуск 650–700 °С, охлаждение на воздухе
14X17H2	835	1080	10	49	Закалка 975–1040 °С, охлаждение в масле; отпуск 275–350 °С, охлаждение на воздухе
12X13	410	590	20	88	Закалка 1000–1050 °С, охлаждение на воздухе или в масле; отпуск 700–790 °С, охлаждение на воздухе

Жаропрочные стали и сплавы. Жаропрочные аустенитные стали обладают более высокой жаропрочностью, чем перлитные, мартенситные и мартенситно-ферритные, которые могут эксплуатироваться при температурах выше 600 °С. Основными легирующими элементами этих сталей являются хром и никель. Кроме того, в эти стали вводят дополнительно ферритооб-

разующие элементы *Mo, Nb, Ti, Al, W*, которые образуют карбиды и промежуточные фазы, в результате чего повышается жаропрочность.

По способу упрочнения рассматриваемые стали подразделяются на три группы:

- твердые растворы, не упрочняемые термической обработкой;
- твердые растворы с карбидным упрочнением;
- твердые растворы с интерметаллидным упрочнением.

Стали *первой группы* (10X18H12T, 08X15H24B4TP; 09X14H19B2BP) используются для изготовления труб пароперегревателей и паропроводов, арматуры и рассчитаны на длительную работу (не менее 10^5 ч) при температуре 650–700 °С. Кроме того, эти стали хорошо поддаются горячей пластической деформации и сварке, благодаря высокому содержанию никеля при низком содержании углерода. Термическая обработка сталей состоит из закалки при температуре 1050–1200 °С. Жаропрочность сталей можно повышать холодной деформацией и термической обработкой в условиях эксплуатации при рабочих температурах более низких, чем температура рекристаллизации.

Стали *второй группы* (40X15H7Г7, Ф2МС, 45X1411 40X15M7Г7Ф2М, 37X12H8Г8МФБ) используются для изготовления дисков, бандажных колец, лопаток турбин и других деталей, которые эксплуатируются при температурах 650–750 °С и высоких напряжениях. Термическая обработка этих сталей состоит из закалки (при температуре 1050–1200 °С с последующим старением и температуре 600–850 °С. Иногда применяют двойное (ступенчатое) старение. Первая низкотемпературная ступень старения происходит при температуре 500–600 °С, а вторая высокотемпературная ступень – 800–850 °С. Ступенчатое старение обеспечивает наилучшее сочетание прочностных и пластических свойств. При закалке происходит растворение карбидов в твердом растворе (аустените) с их последующим выделением в мелкодисперсном виде при старении. Карбидообразующие легирующие элементы *Nb, W* связывают часть углерода в специальные карбиды, что повышает жаропрочность.

Стали *третьей группы* с интерметаллидным упрочнением (10X11H20T3P, 10X11H23T3MP) используются для изготовления дисков и лопаток турбин компрессоров, сварных конструкций, крепежных деталей. Термическая обработка и ее режимы практически такие же, как и для сталей с карбидным упрочнением. Эти также содержат небольшое количество углерода и дополнительно легированы *Ti, Mo, Al, P*. Титан и алюминий образуют основную упрочняющую фазу, бор упрочняет границы зерен аустенита, молибден легирует твердый раствор, повышая энергию межатомной связи.

В табл.2.10 приведены режимы термической обработки и механические

свойства некоторых марок жаропрочных аустенитных используемых в теплоэнергетике

Таблица 2.10. Режимы термической обработки и механические свойства некоторых марок жаропрочных аустенитных используемых в теплоэнергетике

Марка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	КСУ, Дж/см ²	Режимы термической обработки
Стали первой группы					
08X15H24B4TP	450	750	18	80	Закалка 1130–1150°С, охлаждение на воздухе; старение 730–750°С, охлаждение на воздухе
09X14H19B2BP	220	550	35	140	Аустенизация 1140–1160°С, охлаждение на воздухе или в воде
Стали второй группы					
40X15H7Г7Ф2МС	600	900	10	30	Закалка 1170–1190 °С, охлаждение в воде или на воздухе; старение 780–820°С, 8–10 ч
45X14H14B2M	320	720	20	50	Отжиг 820°С, постепенное охлаждение
Стали третьей группы					
10X11H20T3P	600	900	15	30	Закалка 1100–1170°С, охлаждение на воздухе или в масле; старение 700–750 °С, 15–24 ч
10X11H23T3MP	700	1000	10	30	Закалка 950–1050°С, охлаждение в масле; старение 730–780 °С, 16 ч; старение 600–650 °С, 10–16 ч, охлаждение на воздухе

Жаропрочные сплавы на железоникелевой и никелевой основе являются жаростойкими. Типичными примерами являются сплавы ХН35ВТ, ХН35ВТЮ, ХН35ВТР (табл.2.11). Эти сплавы применяются в основном для изготовления деталей газовых турбин энергетических установок, двигателей самолетов и других элементов летательных аппаратов. Из этих сплавов изготавливают диски, сопловые и рабочие лопатки турбин, камеры сгорания. Рабочие температуры сопловых лопаток газовых турбин достигают 1150 °С. Агрессивные газовые потоки, движущиеся с большой скоростью в переменном

режиме, вызывают не только газовую коррозию, но и переменные механические и термические напряжения, приводящие высокотемпературной термической усталости.

Типичными жаропрочными сплавами на никелевой основе являются сплавы ХН77ТЮР и ХН70ВМТЮ. После закалки и старения эти сплавы приобретают высокие кратковременные и жаропрочные механические свойства (см. табл. 2.11). На рис. 2.7 представлена диаграмма длительной прочности жаропрочного никелевого сплава ХН77ТЮР.

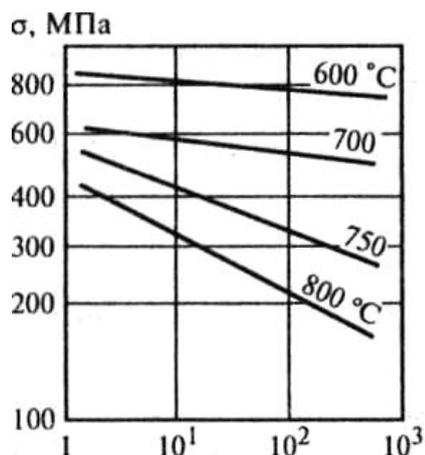


Рисунок 2.7 Диаграмма длительной прочности жаропрочного никелевого сплава ХН77ТЮР

Жаропрочные никелевые сплавы подразделяются на деформируемые и литейные. Жаропрочные свойства деформируемых сплавов формируются при термической обработке. Литейные сплавы по составу сходны с никелевыми, но содержат большее количество алюминия и титана. Жаропрочные свойства литейных сплавов несколько выше, чем свойства деформируемых сплавов. Типичным литейным жаропрочным никелевым сплавом является сплав марки ЖС6К (11% *Cr*, 2,75% *Ti*, 5,5% *Al*, 4% *Mo*, 4,5% *Co*, 2% *Fe*, 5% *W*, 0,16% *C*, 0,02% *B*, 0,4% *Mn* и 0,4% *Si*, остальное *Ni*).

При производстве жаропрочных никелевых сплавов проводят тщательный контроль содержания вредных примесей, в число которых входят *Pb*, *Bi*, *Sb*, *S* и др. Снижение содержания вредных примесей положительно сказывается на жаропрочных и технологических свойствах рассматриваемых сплавов. Деформируемые сплавы должны иметь достаточную пластичность для обработки давлением, а литые сплавы – хорошую жидкотекучесть и низкую пористость. В табл.2.11 приведены режимы термической обработки и механические свойства некоторых жаропрочных сплавов на железоникелевой и никелевой основе.

Таблица 2.11 Механические свойства и режимы термической обработки некоторых жаропрочных сплавов на железоникелевой и никелевой основе

Марка	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²	Режимы термической обработки
Сплавы на железоникелевой основе					
ХН35ВТ	588	735	15	59	Аустенизация 1130–1150°C, охлаждение в воде; старение 850–900°C, охлаждение на воздухе; старение 700°C 10–50 ч, охлаждение на воздухе
ХН35ВТЮ	650	950	6	30	Закалка 1180–1200°C, охлаждение на воздухе; закалка 1040–1060°C, охлаждение на воздухе; старение 750–800°C, охлаждение на воздухе
ХН35ВТР	400	750	20	80	Закалка 1130–1150°C, охлаждение на воздухе; старение 750°C, 24 ч, охлаждение на воздухе
Сплавы на никелевой основе					
ХН77ТЮР	665	980	13	29	Закалка 1080–1120°C, охлаждение на воздухе; старение 750–790°C, 16ч, охлаждение на воздухе
ХН70ВМЮТ	588	980	20	59	Закалка 1150°C 3 ч, охлаждение в масле; отпуск 800°C, 20 ч, охлаждение на воздухе

Жаростойкие стали и сплавы. По жаростойкости стали принято делить на шесть групп: вполне стойкие, стойкие, достаточно стойкие, относительно стойкие, малостойкие, нестойкие. В большинстве случаев стали, применяемые теплоэнергетике относятся к первой и второй группам.

Поиск путей повышения жаростойкости теплоэнергетических материалов – это важная проблема. Одним из успешно используемых путей ее решения является изменение состава и строения образующейся оксидной пленки таким образом, чтобы сделать ее более плотной и поэтому труднопроницаемой для совершающих диффузию атомов кислорода и металла. Необходимые изменения состава и строения оксидной пленки могут быть достигнуты

путем введения в состав стали элементов, обладающих большим, чем железо сродством к кислороду и образующих плотные оксидные пленки. Установлено, что такими элементами являются хром (Cr), алюминий (Al) и кремний (Si). Они образуют на поверхности стальных изделий плотные защитные пленки, состоящие из оксидов типов $(Cr,Fe)_2O_3$, $(Al,Fe)_2O_3$, $(Si,Fe)O_2$.

Классификация и применение жаростойких сталей и сплавов. Существует следующая классификация жаростойких сталей и сплавов, применяемых в теплоэнергетике:

- ферритные хромистые и хромоалюминиевые стали;
- мартенситные хромокремнистые стали;
- аустенитные стали;
- жаростойкие сплавы.

Ферритные хромистые и хромоалюминиевые стали. Жаростойкость этих сталей в основном зависит от содержания в них хрома; чем его больше, тем выше жаростойкость. При более высокой температуре эксплуатации для обеспечения требуемой жаростойкости требуется большее количество хрома. Это объясняется тем, что интенсивность коррозии существенно возрастает при увеличении температуры (рис. 2.8). Например, при введении в сталь до 5% Cr обеспечивается ее окалиностойкость при $700^\circ C$.

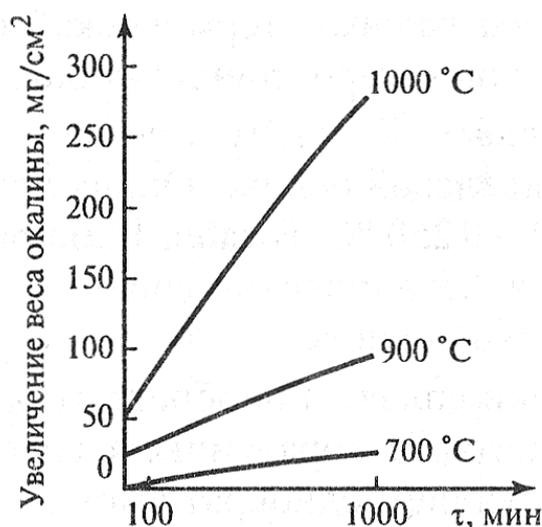


Рисунок 2.8. Влияние температуры на скорость окисления металла

В табл. 2.12 приведены механические свойства и режимы термической обработки некоторых жаростойких сталей этого класса. Все они являются однофазными сплавами, представляющими собой твердый раствор хрома и некоторых других элементов в Fe_α , т.е. высоколегированный феррит.

Таблица 2.12 Механические свойства и режимы термической обработки некоторых жаростойких сплавов и сталей

Марка	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	δ_5 , %	КСУ, Дж/см ²	Режимы термической обработки
Ферритные хромистые и хромоалюминиевые					
12X17	320	520	28	–	Отжиг 780°C, охлаждение на воздухе
15X25Т	295	440	20	20	Отжиг или отпуск 740–780°C, охлаждение на воздухе или в воде
15X18СЮ	300	500	220	–	Отжиг 800–850°C, охлаждение на воздухе или в воде
Мартенситные хромокремнистые стали					
40X9С2	440	740	15	–	Отжиг 850–870°C, охлаждение в воде
40X10С2М	680	960	19	30	Закалка 1010–1050°C, охлаждение в масле; отпуск 720–780°C, охлаждение в масле
30X13Н7С2	800	1200	8	20	Закалка 1050°C, охлаждение в воде; отжиг 680–880°C, охлаждение в печи
Аустенитные стали					
12X18Н10Т	230	560	46	–	Закалка 1050–1100°C, охлаждение на воздухе
09X14Н16Б	250	570	35	210	Закалка 1140–1160°C, охлаждение в воде
36X18Н25С2	550	55	17	50	Закалка на 1200°C, охлаждение в воде; старение 800°C, 8 ч
Жаростойкие сплавы					
ХН60Ю	340	690	57	250	Аустенизация 1200°C, выдержка 40 мин
ХН78Т	300	700	30	–	Нагрев 1000°C, охлаждение на воздухе

Мартенситные хромокремнистые стали. Эти стали хорошо сопротивляются газовой коррозии в продуктах сгорания различных видов топлива. Кроме того, они обладают высокой износостойкостью при трении и ударных нагрузках. В табл.2.12 приведены режимы термической обработки и механические свойства мартенситных хромокремнистых жаростойких сталей.

Аустенитные стали не имеют преимуществ в жаростойкости перед сталями ферритного класса, особенно высокохромистыми. Но вместе с тем эти стали обладают одновременно высокими жаростойкими и жаропрочными свойствами за счет наличия в них достаточно высокого содержания никеля. При увеличении содержания никеля до 20% стоимость таких сталей резко возрастает. Однако, несмотря на это, они широко используются в теплоэнергетике, так как обладают не только высокими жаростойкостью и жаропрочностью, но и хорошей технологичностью, например, при обработке давлением и сварке. Длительная эксплуатация этих сталей при повышенных рабочих температурах не приводит к охрупчиванию. Но при высоком содержании хрома (более 20 %) в структуре сталей с течением времени образуется α -фаза, приводящая к постепенному охрупчиванию.

К недостаткам аустенитных сталей относится их невысокое сопротивление газовой коррозии в сернистых газах.

После закалки аустенитные стали приобретают структуру твердого раствора с решеткой ГЦК. Вводимые в стали титан (Ti), ниобий (Nb), кремний (Si) улучшают их эксплуатационные свойства. Так, титан и ниобий предотвращают развитие в стали межкристаллитной коррозии. Это объясняется тем, что названные элементы являются более сильными карбидообразователями, чем хром и образуют по границам зерен карбиды TiC или NbC . В связи с этим поверхность зерен, содержащих свыше 12% хрома, сохраняет положительное значение электрохимического потенциала, что предотвращает коррозию. Кремний, вводимый в жаростойкие стали, придает им более высокую жаропрочность в среде с повышенным содержанием серы.

Механические свойства и режимы термической обработки и некоторых жаростойких сталей аустенитного класса приведены в табл. 2.12.

Жаростойкие сплавы. К таким сплавам относятся сплавы на железоникелевой и никелевой основе. Они сохраняют жаростойкость при температуре 1050–1250 °С. В табл. 2.12 приведены механические свойства и режимы термической обработки типичных жаростойких сплавов на никелевой основе.

В результате закалки сплавы приобретают однофазную структуру пересыщенного твердого раствора в никеле содержащихся в них компонентов. При последующем однократном или двукратном старении из раствора выпадают частицы интерметаллидов, затрудняющие передвижение дислокаций под воздействием нагрузки, что и обеспечивает упрочнение данных сплавов.

Жаростойкие сплавы применяются для изготовления ответственных деталей газовых турбин (камер сгорания, жаровых труб), газопроводных систем, различной аппаратуры, работающих при температурах до 1250 °С.

Кроме высокого сопротивления газовой коррозии (окалиностойкости) данные сплавы хорошо штампуются, прокаливаются и свариваются, обладают сопротивлением термической усталости и достаточно пластичны в холодном и горячем состояниях.

Коррозионно-стойкие стали и сплавы. Стали, стойкие к электрохимической коррозии, называются *коррозионно-стойкими (нержавеющими)*. Стойкость стали к коррозии достигается введением в нее элементов, образующих на поверхности плотные, прочно связанные с основой защитные пленки, препятствующие непосредственному контакту стали с агрессивной средой, а также повышающие ее электрохимический потенциал. Так, введение более 12–14 %Cr резко изменяет электрохимический потенциал стали ϕ с отрицательного на положительный и делает ее коррозионно-стойкой в атмосфере и в других рабочих средах (рис. 2.9, а).

Скорость коррозии, выраженная показателем глубины K_r , мм/г (отношение уменьшения толщины металлического образца к его массе) также резко снижается при содержании $Cr > 12\%$ (рис. 2.9, б).

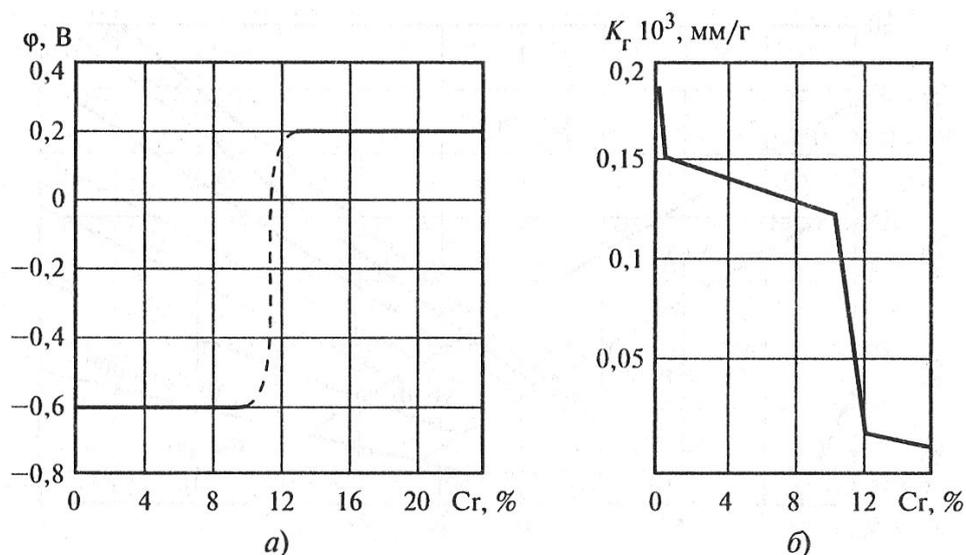


Рисунок 2.9. Влияние содержания хрома на потенциал и скорость коррозии

Хромистые стали (13 %Cr) содержат менее 0,4% углерода. При таком соотношении этих элементов в хромистых сталях при нагреве и охлаждении происходят фазовые превращения $\alpha \leftrightarrow \gamma$. Хром может существенно повышать температуру критических точек стали A_{c1} и A_{c3} , при которых происходят фазовые превращения.

В коррозионно-стойкие стали кроме основного легирующего элемента Cr вводят и другие легирующие элементы. Так Si, Al, Mo, W, Nb, Ti, V как ферритообразующие, а Ni, Mn, Co, Cu как аустенито-образующие. Таким образом, коррозионно-стойкие стали являются сложнелегированными. Для оп-

ределения фазового состояния таких сталей используют структурную диаграмму Шеффлера (рис. 2.10).

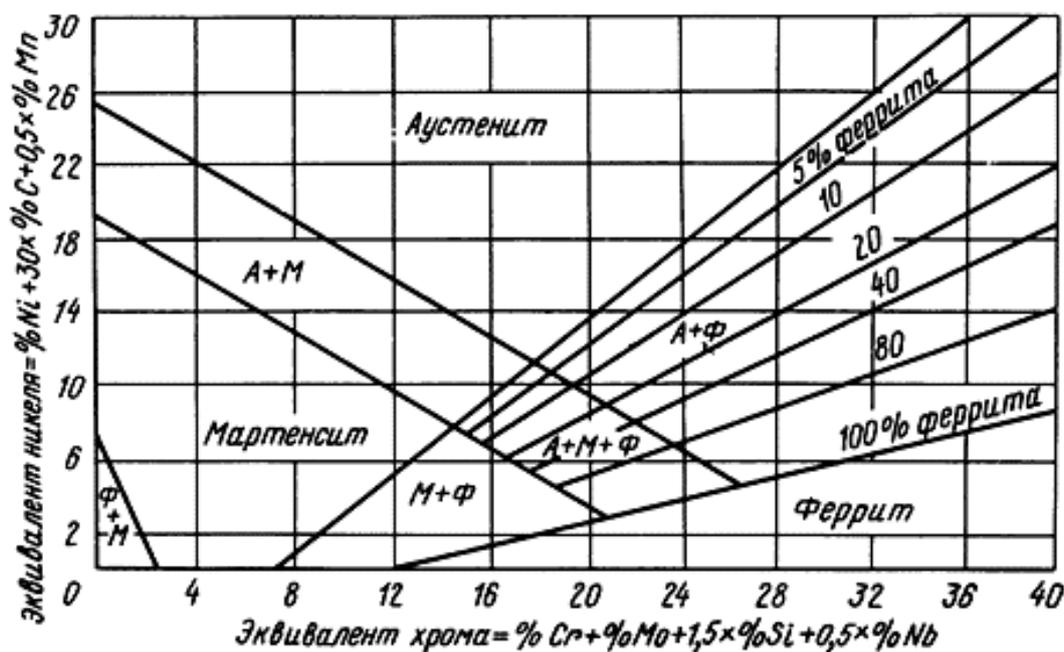


Рисунок 2.10. Структурная диаграмма хромоникелевых коррозионно-стойких сталей

На этой диаграмме осью ординат является эквивалент никеля, оказывающего аустенитообразующее действие, а осью абсцисс – эквивалент хрома, оказывающего ферритообразующее действие. Эквиваленты никеля (\mathcal{E}_{Ni}) и хрома (\mathcal{E}_{Cr}) рассчитываются по следующим формулам:

$$\mathcal{E}_{Ni} = \% Ni + 30 \times \% C + 0,5 \times \% Nb;$$

$$\mathcal{E}_{Cr} = \% Cr + \% Mn + 1,5 \% Si + 0,5 \% Nb.$$

Диаграмма Шеффлера позволяет определить к какому структурному классу относится коррозионно-стойкая сталь. Для этого необходимо рассчитать значения \mathcal{E}_{Ni} и \mathcal{E}_{Cr} и, отложив их соответственно на осях ординат и абсцисс, найти точку пересечения.

В табл.2.13 представлены режимы термической обработки и механические свойства хромистых коррозионно-стойких сталей.

Таблица 2.13 Механические свойства и режимы термической обработки некоторых коррозионно-стойких сплавов и сталей

Марка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²	Режимы термической обработки
Хромистые ферритные					
08X13	410	590	20	98	Закалка 1000–1050°C, охлаждение в масле; отпуск 700–800 °C, охлаждение в масле
15X25T	295	440	20	–	Отжиг 730–770°C
Хромистые ферритно-мартенситные					
12X13	410	590	20	88	Закалка 1000–1050°C, охлаждение на воздухе или в масле; отпуск 700–790°C, охлаждение в воде
20X13	440	650	16	78	Закалка 1000–1050°C, охлаждение на воздухе или в масле; отпуск 660–770°C, охлаждение на воздухе, в масле или в воде
Хромистые мартенситные					
30X13	588	735	12	34	Закалка 1000–1050°C, охлаждение в масле; отпуск 720–750°C, охлаждение на воздухе
40X13	750	950	9	32	Закалка 1000–1050°C, охлаждение на воздухе; отпуск 600°C, охлаждение на воздухе
Хромоникелевые аустенитные					
17X18H9	215	570	40	–	Закалка 1050–1100°C, охлаждение на воздухе, в масле или в воде
08X18H10T	196	470	40	–	Закалка 1020–1100°C, охлаждение на воздухе, в масле или в воде
Хромоникелевые аустенитно-ферритные					
08X22H6T	343	539	20	78	Закалка 1000–1050°C, охлаждение в воде
08X21H6M2T	345	590	20	59	Закалка 1000–1050°C, охлаждение в воде

Хромоникелевые аустенитно-мартенситные					
09X17H7Ю	750	850	12	50	Закалка 1030–1070°C, охлаждение на воздухе; 2-кратный отпуск 740–760°C, охлаждение на воздухе
07X16H6	900	1100	12	70	Закалка 975–1000°C, охлаждение в воде или на воздухе; обработка холодом –70° (выдержка 2 ч); старение 350–426°C 1 ч
08X16H9M2	220	540	40	80	Аустенизация 1050–1100°C, охлаждение на воздухе или в воде

Коррозионно-стойкие стали разделяют на две основные группы: хромистые и хромоникелевые.

В зависимости от основной структуры, полученной при нормализации, **хромистые стали** разделяют на:

- ферритные;
- ферритомартенситные;
- мартенситные.

Хромистые стали *ферритного* класса используют для изготовления теплообменного оборудования. При увеличении содержания хрома их коррозионная стойкость повышается. Зерна этих сталей сильно увеличиваются при нагреве 650°C, что является нежелательным явлением. Кроме того существуют трудности в обеспечении свариваемости и коррозионной стойкости сварных швов. Для измельчения зерна и повышения сопротивления межкристаллитной коррозии сталь легируют титаном. Стали этого класса содержат мало углерода (08X13, 12X17), пластичны и хорошо обрабатываются давлением. Элементы оборудования, изготовленные из этих сталей, длительно работают при температурах до 450°C.

Хромистые стали *ферритно-мартенситного* и *мартенситного* классов обладают более высокими прочностными свойствами по сравнению со сталями ферритного класса. Наиболее технологичной является ферритно-мартенситная сталь 12X13, которая обладает более высокой пластичностью, хорошо сваривается и применяется для изготовления сварных конструкций. Сталь 20X3 широко применяется для изготовления лопаток паровых турбин и компрессоров, работающих при температурах до 450°C.

Хромистые мартенситные стали (30X13, 40X13) закалывают при температуре 1000–1050°C, а затем подвергают отпуску. После термической об-

работки в стали сохраняется мартенситная структура, что существенно повышает твердость и коррозионную стойкость. Однако эти стали менее пластичны, подвергаются только горячей обработке давлением, а при сварке могут давать трещины. Сталь 30Х13 используется для изготовления валов, болтов, шестерен, пружин и других деталей, которые работают в условиях высоких напряжений, коррозионно-агрессивной среды и при нагреве до 450°С.

В табл.2.13 представлены режимы термической с механические свойства хромистых коррозионно-стойких

Хромоникелевые коррозионно-стойкие стали подразделяют на:

- аустенитные;
- аустенитно-ферритные;
- аустенитно-мартенситные.

Для определения фазового состава таких сталей используют диаграмму Шеффлера (рис. XX).

Хромоникелевые аустенитные стали обладают высокой коррозионной стойкостью при повышенных температурах в окислительных средах. Эти стали хорошо обрабатываются давлением и свариваются, но плохо обрабатывается резанием. После закалки при 1050°С в этих сталях образуется аустенитная структура они приобретают хорошее сочетание механических свойств и коррозионной стойкости.

При среднем уровне прочности $\sigma_b = 500\text{--}600$ МПа и высокой пластичности $\delta_5 = 35\text{--}45$ % эти стали хорошо поддаются наклепу холодной пластической деформацией. Такие свойства аустенитных сталей позволяют их широко использовать как конструкционные материалы не только в теплоэнергетике, но и в судостроении, химической промышленности для изготовления трубопроводов, оболочек, емкостей и т.п.

Однако некоторые марки, например 12Х18Н19, 17Х18Н19, склонны к межкристаллитной коррозии (МКК). После нагрева закаленных сталей до температуре 400°С и последующей выдержке более 100 мин может появляться МКК. Этот опасный вид коррозии развивается из-за уменьшения по границам зерен содержания хрома, который выделяется в виде карбидов. В результате концентрация хрома снижается до такого уровня (менее 11%), при котором не обеспечивается необходимая коррозионная стойкость. Схема температурно-временного протекания МКК показана на рис. 2.11. Заштрихованная часть рисунка соответствует области проявления МКК.

Для снижения МКК аустенитных сталей применяют различные способы, связанные с дополнительным легированием или с нормальными режимами термической обработки. Так, введение в сталь титана, который является более активным карбидообразователем, чем хром, снижает обеднение границ

зерен хромом. Закалка сталей при температуре 1050–1100°C обеспечивает переход хрома в твердый раствор, а стабилизирующий отжиг при температуре 850°C способствует выделению карбидов титана и сохранению хрома в твердом растворе.

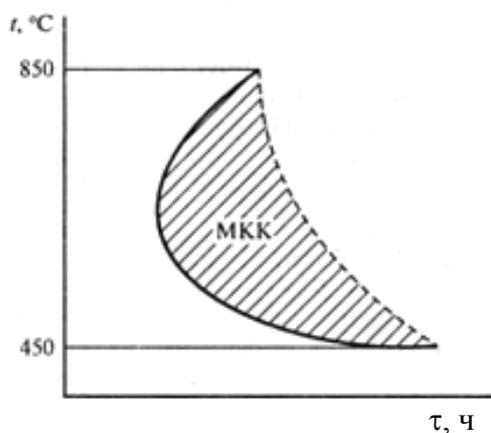


Рисунок 2.11. Влияние температуры и времени выдержки на появление и развитие межкристаллитной коррозии

Для снижения МКК аустенитных сталей применяют различные способы, связанные с дополнительным легированием или с нормальными режимами термической обработки. Так, введение в сталь титана, который является более активным карбидообразователем, чем хром, снижает обеднение границ зерен хромом. Закалка сталей при температуре 1050–1100°C обеспечивает переход хрома в твердый раствор, а стабилизирующий отжиг при температуре 850°C способствует выделению карбидов титана и сохранению хрома в твердом растворе.

Под воздействием коррозионной среды и растягивающих напряжений в паропроводах из аустенитных сталей происходит коррозионное растрескивание металла. Растягивающие остаточные напряжения могут создаваться при изготовлении деталей или в процессе их эксплуатации под воздействием рабочих нагрузок. Для устранения такого вида разрушения металла необходимо уменьшать остаточные напряжения отжигом, или создавать на поверхности изделий сжимающие напряжения.

Хромоникелевые *аустенитно-ферритные стали* содержат меньшее количество никеля, чем аустенитные стали. Вместе с тем они обладают высоким сопротивлением коррозии и превосходят аустенитные стали по некоторым механическим и технологическим свойствам. Например, более высокий предел текучести, хорошую свариваемость и способность деформироваться в режиме сверхпластичности. После закалки в воде при температуре 1000–1050°C эти стали приобретают структуру, состоящую из равномерно распределенных между собой зерен аустенита и феррита с содержанием последнего 40–60 %. При последующем старении происходит упрочнение стали за счет

выделения промежуточных фаз, образованных легирующими элементами (*Ni, Al, Ti, Mo* и др.) из аустенита и феррита. При этом содержание хрома в аустените и феррите не изменяется, и коррозионная стойкость стали не снижается.

К числу недостатков этих сталей следует отнести нестабильность свойств при незначительном колебании химического состава в пределах одной марки стали и охрупчивание при нагреве. При этом необходимо отметить, что лишь длительные нагревы этих сталей выше 400°C вызывают охрупчивание, а кратковременные нагревы не опасны. Поэтому предельная рабочая температура при длительной эксплуатации сварных соединений из аустенитно-ферритных сталей должна быть ниже 400°C.

В табл.2.13 представлены механические свойства и режимы термической обработки некоторых аустенитно-ферритных сталей.

Аустенитно-мартенситные стали обладают не только коррозионной стойкостью, но и повышенной прочностью и хорошей свариваемостью. Для обеспечения высоких коррозионных и механических свойств эти стали подвергаются закалке при температуре 945°C с последующими обработкой холодом при температуре -70 °C и старением при температуре 350–450°C. После закалки сталь приобретает аустенитную структуру, которая имеет высокую пластичность и способность деформироваться. Обработка холодом вызывает превращение 80% аустенита в мартенсит. Заключительной стадией является старение, приводящее к дополнительному упрочнению стали за счет выделения в мартенсите дисперсных фаз типа Ni_3Al .

Дополнительно предварительно закаленная сталь может быть упрочнена пластической деформацией (наклепом) с последующим старением при температуре 450–480°C.

Аустенитно-мартенситные стали имеют преимущества в прочности при температуре 450–480°C перед аустенитными, но уступают последним в коррозионной стойкости.

В табл.2.13 представлены механические свойства и режимы термической обработки некоторых марок аустенитно-мартенситных сталей.

Тема 2.5. ЧУГУНЫ

Чугунами называют железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода более 2,14%. Чугуны также как и стали широко используются в металлических конструкциях.

Ряд исследований доказывает, что еще за шесть веков до нашей эры отливки из серого и белого чугунов были известны в Китае, где благодаря природным особенностям руд можно было получать чугун с высоким содержанием фосфора (до 7%) и низкой тем-

пературой плавления (около 950 °С).

В России и Западной Европе производство чугунного литья началось в средние века. В 16 веке, при Василии III и Иване Грозном оно началось развиваться в Москве и в окрестностях Тулы. С тех пор чугунное производство непрерывно расширяется и совершенствуется. В Петровскую эпоху в связи с развитием уральской металлургии, Россия по выпуску чугуна превзошла все страны мира.

В середине 19 века развивается производство фасонного чугунного литья. В это же время были проведены основные исследования чугуна (ученые изучили влияние углерода, легирования и термической обработки на свойства чугуна).

Качественно чугуны ничем не отличаются от углеродистых сталей, но имеют количественное отличие в химическом составе.

Конструкционный чугун для производства отливок в машиностроении имеет следующий химический состав, %: 2,14–4,50 углерода, 1,5–3,5 кремния, 1,0–1,5 марганца, не более 0,3% фосфора, не более 0,15% серы, остальное – железо.

Углерод в составе чугуна (в металлической основе) имеет низкую прочность. Места его залегания можно считать нарушениями сплошности металла. По мере округления графитных включений их отрицательная роль снижается, и механические свойства чугуна растут. Например, серый чугун с пластинчатой формой графита имеет низкие характеристики механических свойств, так как пластинки графита играют роль концентраторов напряжений в отливке. Однако серый чугун имеет и преимущества благодаря смазывающему действию графита, он обладает хорошими антифрикционными свойствами. Серый чугун обладает хорошей жидкотекучестью, малой усадкой, хорошо гасит вибрации и резонансные колебания. Высокопрочный чугун благодаря компактной форме графита имеет повышенные механические свойства.

Кремний способствует графитизации чугуна (графит будет находится не в связанном, а в свободном состоянии).

Марганец нейтрализует вредное влияние серы, образуя с ней тугоплавкое соединение MnS .

Фосфор повышает литейные свойства чугуна.

Сера является вредной примесью, ухудшает литейные свойства, снижает температуру краснотекучести чугуна, повышает склонность к трещинообразованию.

Широкое распространение чугуна в промышленности обусловлено оптимальным сочетанием различных свойств: технологических (литейных, обрабатываемости резанием), эксплуатационных (износостойкости, сопротивляться сжатию, способностью поглощать колебания) и технико-экономических показателей.

Из общего количества выплавляемого в металлургическом производстве около 20% чугуна используется для изготовления литых заготовок деталей (литья). Остальные 80% в виде передельных и специальных чугунов используются для последующей переработки в сталь. Таким образом, чугун имеет существенные отличия от основного конструкционного материала – стали.

Свойства чугунов. Чугун отличается по составу – более высоким содержанием углерода и других постоянных примесей, по технологическим свойствам – лучшими литейными качествами (жидкотекучестью, усадкой), не поддается ковке и значительно дешевле стали. Еще одно важное отличие чугуна (кроме белого) от стали – это наличие в его структуре графитовых включений.

Чугуны обладают более низкой температурой плавления по сравнению со сталями (хорошими литейными свойствами) потому из чугунов можно получать отливки более сложной формы. Среди других достоинств чугунов следует отметить высокую твердость, прочность и износостойкость. Благодаря наличию графитовых включений и высокой циклической вязкости чугуны имеют низкую склонность к надрезам. Из-за чего, присутствующие в любой отливке надрезы (отверстия, углы, резкие переходы, неметаллические включения и пр.) в очень малой степени понижают ее конструкционную прочность. В то время как в стальной отливке надрезы приводят к существенному снижению конструкционной прочности детали. Таким образом, большая чувствительность к надрезам делает иногда бесцельным применение высококачественных сталей.

Вместе с тем чугуны обладают низкой пластичностью и высокой хрупкостью, из-за чего плохо поддаются обработке давлением. В литой структуре чугунов может содержаться значительное количество дефектов в виде ликвационных неоднородностей, пор и микротрещин. Чугунные детали, работающие при высоких температурах, подвергаются окалинообразованию и росту (увеличению объема). При неблагоприятных условиях увеличение может достигать 30-50%. Поэтому рабочие температуры чугунов относительно невысокие.

Классификация чугунов. Углерод в чугуне может находиться в растворенном и связанном состоянии (в виде химического соединения – цемента Fe_3C), а также в свободном состоянии – в виде графита. При этом форма графита и структура металлической основы определяют виды чугуна и их свойства.

Классификация чугуна производится по следующим признакам.

1. По *состоянию углерода* – *свободный* или *связанный*. По этому принципу различают белый чугун, в котором весь углерод находится в свя-

занном состоянии в виде цементита, и половинчатый чугун, в котором основное количество углерода более 0,8% находится в виде цементита, а остальное в свободном в виде графита.

2. По **форме включений** графита подразделяется на:

– *белый чугун*, в котором весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита Fe_3C .

– *серый чугун*, в котором весь углерод находится в свободном состоянии в виде пластинчатого графита;

– *ковкий чугун*, полученный из белого путем отжига, имеет хлопьевидную форму графита;

– *высокопрочный чугун* имеет шаровидную форму графита.

– *отбеленный чугун*, в котором основная масса металла имеет структуру серого чугуна, а поверхностный слой – белого;

Виды включений графита в сером, ковком и высокопрочном чугунах представлены на рис.2.12.

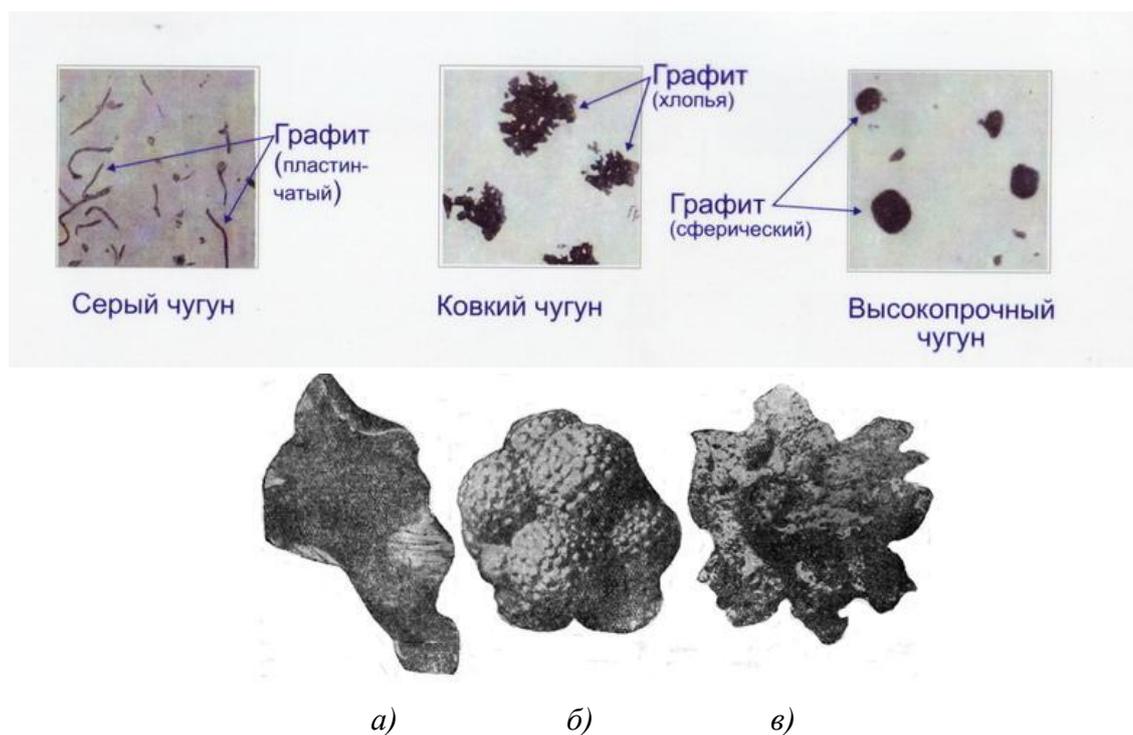


Рисунок 2.12. Классификация чугуна по форме графитных включений:
а – пластинчатый графит, *б* – шаровидный графит, *в* – хлопьевидный графит

Белый чугун. Получается из расплава, при сравнительно быстром охлаждении, препятствующему процессу графитизации. Белый чугун хорошо сопротивляется износу и очень плохо поддается механической обработке. Белый чугун в машиностроении и, вообще в промышленности используется

очень редко. Из отливок белого чугуна получают ковкий чугун путем графитизирующего отжига. Белые чугуны не имеют специальной маркировки.

Серый чугун. Серый чугун в изломе имеет серый цвет вследствие того, что весь углерод или часть его выделяется в виде графита. В зависимости от распада цементита различают ферритный, перлитно-феррит и перлитный серые чугуны (рис.2.13).

Свойства серого чугуна зависят от структуры металлической основы и от формы, размера и количества графитных включений. Чем меньше в металлической основе феррита, тем выше прочность чугуна. Лучшими механическими свойствами обладает чугун со структурой перлита, содержащий графит в виде мелких чешуек. Серые чугуны являются самым дешевым литейным материалом. Они неплохо обрабатываются резанием, хорошо сопротивляются износу и трению, быстро гасят вибрации.

Согласно ГОСТ 1412-85 серый чугун маркируют буквами «С» – серый и «Ч» – чугун. Число после буквенного обозначения показывает среднее значение предела прочности при растяжении в кгс/мм². ГОСТ предусматривает следующие марки серых чугунов: СЧ10, СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ21, СЧ24, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45. Для увеличения прочности и улучшения механических свойств в серый чугун добавляют специальные модификаторы (алюминий, ферросилиций, силикокальций и пр.) В маркировке добавляется символ «*», например, СЧ35*.

В литературе встречается маркировка серых чугунов по старому ГОСТу, где кроме предела прочности на растяжение указан и предел прочности при изгибе, например, СЧ15-32, где 32 – это предел прочности при изгибе, кг/мм².

Серые чугуны нашли применение в станкостроении (станины, суппорты, бабки), автотракторостроении (блоки цилиндров, поршневые кольца, тормозные барабаны), в химическом машиностроении, при производстве компрессоров, насосов, воздуходувок.

В теплоэнергетике серые чугуны находят применение при изготовлении низкотемпературных корпусов ЦНД небольших паровых турбин, корпусов подшипников, диафрагм, выходных патрубков, сопловых коробок. Из серого чугуна также изготавливают элементы котлов: экономайзеры, ребристые трубы, фасонные детали, коллекторы и пр., работающие при температуре до 250°С.

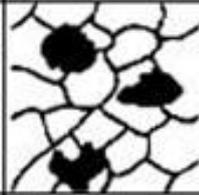
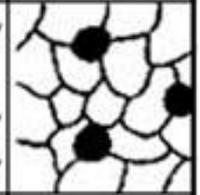
Металлическая основа	Класс чугуна		
	Серый	Ковкий	Высокопрочный
Феррит			
Феррит+перлит			
Перлит			

Рисунок 2.13. Классификация чугуна по структуре металлической основы и форме графитных включений (схемы структур)

Высокопрочный чугун. Отличительной особенностью высокопрочного чугуна являются его высокие механические свойства, обусловленные наличием в структуре шаровидного графита. Получение шаровидного графита достигается модифицированием расплава серого чугуна присадками, содержащими магний, церий и другие редкоземельные металлы. Высокопрочные группы в соответствии с ГОСТ 7293-85 имеют следующие марки: ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100. Цифра, следующая за цифрами ВЧ, означает предел прочности на разрыв в кг/мм². По старому ГОСТу в маркировке добавлялась цифра относительного удлинения в процентах.

Эти чугуны обладают высокой жидкотекучестью, линейная усадка – около 1%. Литейные напряжения в отливках несколько выше, чем для серого чугуна. Из-за высокого модуля упругости достаточно высокая обрабатываемость резанием. Обладают удовлетворительной свариваемостью.

В зависимости от распада цементита различают ферритный, перлитно-феррит и перлитный высокопрочные чугуны (рис.2.13).

Высокопрочный чугун широко используют в автомобильной промышленности (шатуны, шестерни главной передачи, ступицы, коленчатые валы), в тяжелом машиностроении, в сельхозмашиностроении (ступицы колес, рычаги и педали, шкивы, стойки корпусов плугов). Высокопрочный чугун явля-

ется наиболее перспективным литейным сплавом, с помощью которого можно успешно решать проблему снижения массы конструкции при сохранении их высокой надежности и долговечности

Высокопрочный чугун широко используют в автомобильной промышленности (шатуны, шестерни главной передачи, ступицы, коленчатые валы), в тяжелом машиностроении, в сельхозмашиностроении (ступицы колес, рычаги и педали, шкивы, стойки корпусов плугов). Высокопрочный чугун является наиболее перспективным литейным сплавом, с помощью которого можно успешно решать проблему снижения массы конструкции при сохранении их высокой надежности и долговечности

Из высокопрочного чугуна изготавливают корпуса и рабочие колеса насосов, вкладыши опорных подшипников, направляющие втулки, уплотнительные кольца и пр. Из высокопрочного чугуна также изготавливают элементы котлов: экономайзеры, ребристые трубы, фасонные детали, коллекторы и пр., работающие при температуре до 350°C.

Ковкий чугун. Ковкий чугун отличается от высокопрочного тем, что в его структуре графит имеет хлопьевидную форму. Если название «высокопрочный» означает более высокую прочность, то название «ковкий» не означает, что его можно ковать, а свидетельствует о лучших пластических свойствах. По свойствам он занимает промежуточное положение между сталью и серым чугуном.

Ковкие чугуны маркируются по пределу прочности на разрыв и относительному удлинению. ГОСТ 1215-79 предусматривает следующие марки ковких чугунов: КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12, КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2 и КЧ80-1,5, где буквы КЧ – ковкий чугун, первые цифры указывают предел прочности на разрыв в кг/мм², последние – относительное удлинение в процентах.

Металлическая основа ковких чугунов может быть ферритной, перлитной или феррито-перлитной (см. рис.2.13).

Для получения ковкого чугуна необходимо белый чугун подвергнуть термической обработке – отжигу. Применяют два способа графитизирующего отжига. Согласно первому способу отжиг производится при температуре 950–1000°C (рис.2.14, а). В результате такого отжига разлагается только цементит ледебурита и металлическая основа чугуна получается перлитной. Такой чугун называют перлитным. Согласно второму способу отжиг проводят в две стадии: первая стадия при температуре 930°C, а вторая при температуре 720–740°C (рис.2.14, б). В процессе второй стадии отжига разлагается цементит перлита и металлическая основа получается ферритной. При неполном разложении перлита получается ферритно-перлитный чугун.

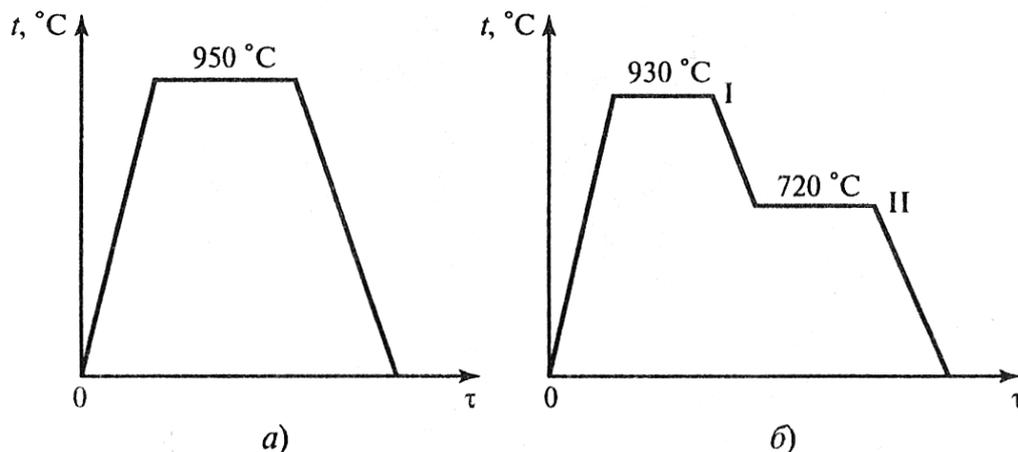


Рис.2.14. Графики режима отжига белого чугуна для получения ковкого

Ковкий чугун применяют в условиях ударных и вибрационных нагрузок. Максимальная рабочая температура ковкого чугуна 350°C.

Ковкие чугуны находят применение в сельхозмашиностроении (шестерни, звенья цепей, звездочки), в авто- и тракторостроении (задние мосты, ступицы), вагоно- и судостроении.

Отбеленные и легированные чугуны. *Отбеленные* – отливки, поверхность которых состоит из белого чугуна, а внутри серый или высокопрочный чугун. В составе чугуна 2,8...3,6 % углерода, и пониженное содержание кремния –0,5...0,8 %. Имеют высокую поверхностную твердость (950...1000 НВ) и очень высокую износостойкость. Используются для изготовления прокатных валов, вагонных колес с отбеленным ободом, шаров для шаровых мельниц.

Для улучшения свойств чугунов их легируют. В зависимости от назначения различают износостойкие, антифрикционные, жаростойкие, коррозионно-стойкие легированные чугуны.

Износостойкие чугуны обозначают буквами ИЧ и они маркируются по содержанию легирующих элементов аналогично сталям. Например, чугун марки ИЧХ4Г7Д содержит 4% хрома, 7% марганца, 1% меди. Износостойкие чугуны применяют для изготовления лопаток дробебетных турбин, шаров для мельниц, деталей пневмотранспорта.

Антифрикционные чугуны имеют в маркировке букву А. Они изготавливаются на основе серых, ковких и высокопрочных чугунов. Серые маркируются АСЧ-1, высокопрочные – АВЧ-1 с легирующими добавками хрома, никеля, титана, меди.

Жаростойкие чугуны, стойкие к окислению, в маркировке имеют букву Ж, например, ЖЧХ-0,8, ЖЧХ-15, ЖЧХ-2,5. Жаростойкие чугу-

ны предназначены для изготовления деталей колосниковых решеток и деталей для различных печей (мартеновские, доменные, различные котлы). Эти чугуны могут быть легированы алюминием, кремнием, никелем, хромом.

Коррозионно-стойкие чугуны легируют хромом, никелем, медью, молибденом и кремнием. Они стойки в щелочах, растворах соды, морской воде. Наиболее распространенными являются чугуны марок ЧХ1, ЧНХТ, ЧНХМД, ЧНГХ.

Для чугунов можно применять термическую обработку.

Тема 2.6. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Медь и ее сплавы. Медь – металл, имеющий красный цвет на поверхности и розовый цвет в изломе. Медь имеет гранцентрированную кубическую решетку, с периодом $a=0,36074$ нм. Плотность меди $8,94$ г/см³, температура плавления 1083°C .

Медь имеет высокую теплопроводность и находится по этому свойству на втором месте после серебра. Медь является коррозионно-стойким металлом и хорошо обрабатывается давлением. К недостаткам меди относятся высокая плотность, большая усадка при литье, горячеломкость, сложность обработки резанием и высокая стоимость.

Характерным свойством меди является ее высокая электропроводность, поэтому она находит широкое применение в электротехнике.

Примеси оказывают сильное влияние на свойства меди. В зависимости от количества примесей медь имеет следующие обозначения: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М1 (99,9% Cu), М2 (99,7% Cu), М3 (99,5% Cu) и М4 (99 % Cu). В обозначениях бескислородной меди применяемой в электротехнике в обозначение добавляют букву *б* (М00*б*, М0*б*)

Прочность меди в литом состоянии невелика ($\sigma_{0,2}= 35$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 160$ МПа), но пластичность достаточно высокая ($\delta_5 = 25\%$). Медная проволока, полученная холодным деформированием, имеет более высокую прочность ($\sigma_{\text{в}}= 450$ МПа), но низкую пластичность ($\delta_5 = 5\%$).

В качестве конструкционного материала медь применяется редко. Повышение механических свойств достигается созданием различных сплавов на основе меди.

Различают две группы медных сплавов: *латуни* – сплавы меди с цинком, *бронзы* – сплавы меди с другими (кроме цинка) элементами.

Латуни. Латуни могут иметь в своем составе от 5 до 50% цинка. Повышение содержания цинка, например, до 45 % приводит к увеличению пре-

дела прочности до 450 МПа. Максимальная пластичность имеет место при содержании цинка около 37 %.

При сплавлении меди с цинком образуется ряд твердых растворов (α , δ , γ , ε) (рис.2.15).

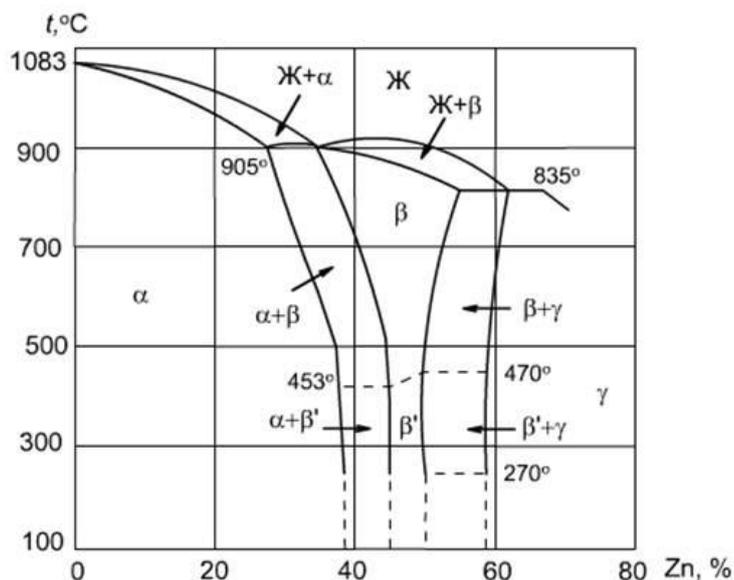


Рисунок. 2.15. Диаграмма состояния медь – цинк

Из диаграммы состояния медь – цинк видно, что в зависимости от состава имеются однофазные латуни, состоящие из α – твердого раствора, и двухфазные ($\alpha+\beta$) – латуни.

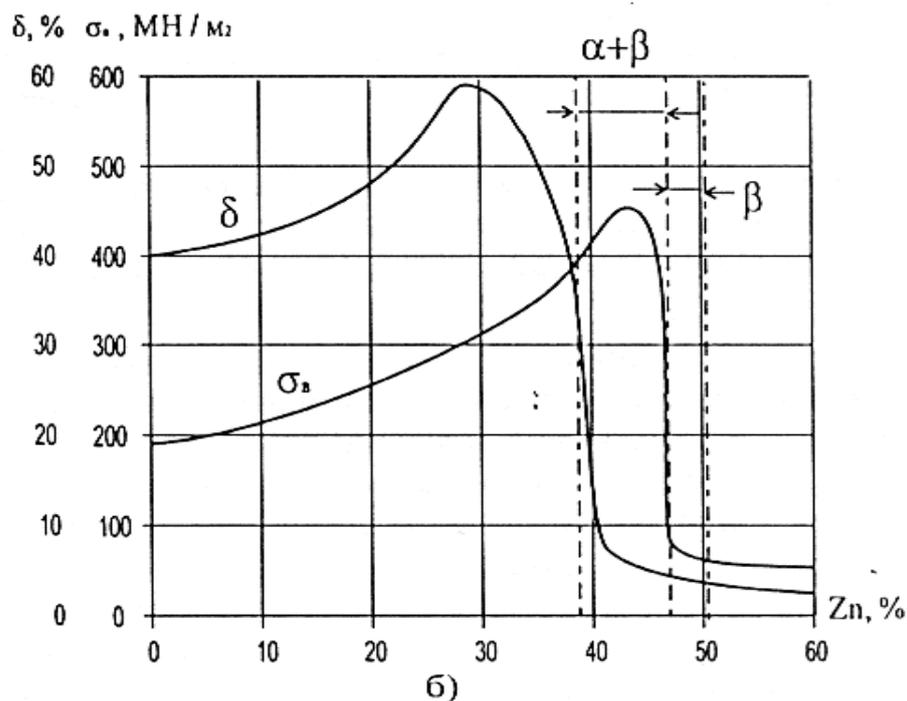


Рисунок.2.16. Механические свойства латуни

По способу изготовления изделий различают латуни *деформируемые* и *литейные*.

Деформируемые латуни маркируются буквой Л, за которой следует число, показывающее содержание меди в процентах, например, в латуни Л62 содержится 62 % меди и 38 % цинка. Если кроме меди и цинка, имеются другие элементы, то ставятся их начальные буквы (О – олово, С – свинец, Ж – железо, Ф – фосфор, Мц – марганец, А – алюминий, Ц – цинк, Н – никель, К – кремний). Количество этих элементов обозначается соответствующими цифрами после числа, показывающего содержание меди, например, сплав ЛМЖ55-3-1 содержит 55 % меди, 3 % марганца, 1 % железа и 41 % цинка.

Однофазные α – латуни используются для изготовления деталей деформированием в холодном состоянии. Широкое распространение в теплоэнергетике получили латуни марок Л62 и Л68, которые поставляют в виде листов, лент, труб и проволоки. Они хорошо обрабатываются давлением (холодной штамповкой или глубокой вытяжкой). Из этих латуней изготавливают уплотнительные сегменты турбин, трубки конденсаторов и регенеративных подогревателей низкого давления, детали масло- и воздухоохладителей и т.п. Латуни марок Л90 и Л96, имеющие структуру α -твердого раствора, обладают высокими пластичностью, теплопроводностью и коррозионной стойкостью.

Для изготовления деталей деформированием при температуре выше 500°C используют $(\alpha+\beta)$ – латуни. Из двухфазных латуней изготавливают листы, прутки и другие заготовки, из которых последующей механической обработкой изготавливают детали. Обрабатываемость резанием улучшается присадкой в состав латуни свинца, например, латунь марки ЛС59-1, которую называют «автоматной латунью» и используют для изготовления винтов, гаек, шайб на станках-автоматах.

Латуни имеют хорошую коррозионную стойкость, которую можно повысить дополнительно присадкой олова. Латунь ЛЮ70-1 стойка против коррозии в морской воде и называется «морской латунью».

Добавка никеля и железа повышает механическую прочность до 550 МПа.

Литейные латуни также маркируются буквой Л. После буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинк) и каждого последующего ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, латунь ЛЦ16К4 содержит 16 % цинка, 4 % кремния, 80 % меди.

Наилучшей жидкотекучестью обладает латунь марки ЛЦ16К4. К литейным латуням относятся латуни типа ЛС, ЛК, ЛА, ЛАЖ, ЛАЖМц. Литей-

ные латуни не склонны к ликвации, имеют сосредоточенную усадку, отливки получаются с высокой плотностью.

Латуни являются хорошим материалом для конструкций, работающих при отрицательных температурах.

Бронзы. Сплавы меди с другими элементами кроме цинка называются *бронзами*.

Бронзы подразделяются на деформируемые и литейные.

При маркировке деформируемых бронз на первом месте ставятся буквы Бр, затем буквы, указывающие, какие элементы, кроме меди, входят в состав сплава. После букв идут цифры, показывающие содержание компонентов в сплаве. Например, марка БрОФ10-1 означает, что в бронзу входит 10 % олова, 1 % фосфора, остальное – медь.

Маркировка литейных бронз также начинается с букв Бр, затем указываются буквенные обозначения легирующих элементов и ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, бронза БрОЗЦ12С5 содержит 3 % олова, 12 % цинка, 5 % свинца, остальное – медь.

Оловянные бронзы. При сплавлении меди с оловом образуются твердые растворы. Эти сплавы очень склонны к ликвации из-за большого температурного интервала кристаллизации. Благодаря ликвации сплавы с содержанием олова выше 5 % имеют в структуре эвтектоидную составляющую Э($\alpha+\beta$), состоящую из мягкой и твердой фаз. Такое строение является благоприятным для деталей типа подшипников скольжения: мягкая фаза обеспечивает хорошую прирабатываемость, твердые частицы создают износостойкость. Поэтому оловянные бронзы являются хорошими антифрикционными материалами.

Оловянные бронзы имеют низкую объемную усадку (около 0,8 %), поэтому используются в художественном литье.

Наличие фосфора обеспечивает хорошую жидкотекучесть.

Оловянные бронзы подразделяются на деформируемые и литейные.

В *деформируемых бронзах* содержание олова не должно превышать 6 %, для обеспечения необходимой пластичности, БрОФ6,5-0,15.

В зависимости от состава деформируемые бронзы отличаются высокими механическими, антикоррозионными, антифрикционными и упругими свойствами, и используются в различных отраслях промышленности. Из этих сплавов изготавливают прутки, трубы, ленту, проволоку.

Литейные оловянные бронзы, БрОЗЦ7С5Н1, БрО4Ц4С17, применяются для изготовления пароводяной арматуры и для отливок антифрикционных деталей типа втулок, венцов червячных колес, вкладышей подшипников.

Алюминиевые бронзы, БрАЖ9-4, БрАЖ9-4Л, БрАЖН10-4-4.

Бронзы с содержанием алюминия до 9,4 % имеют однофазное строение α - твердого раствора. При содержании алюминия 9,4...15,6 % сплавы системы медь – алюминий двухфазные и состоят из α - и γ - фаз.

Оптимальными свойствами обладают алюминиевые бронзы, содержащие 5...8 % алюминия. Увеличение содержания алюминия до 10...11 % вследствие появления γ – фазы ведет к резкому повышению прочности и сильному снижению пластичности. Дополнительное повышение прочности для сплавов с содержанием алюминия 8...9,5 % можно достичь закалкой.

Положительные особенности алюминиевых бронз по сравнению с оловянными:

- меньшая склонность к внутрикristаллической ликвации;
- большая плотность отливок;
- более высокая прочность и жаропрочность;
- меньшая склонность к хладоломкости.

Основные недостатки алюминиевых бронз:

- значительная усадка;
- склонность к образованию столбчатых кристаллов при кристаллизации и росту зерна при нагреве, что охрупчивает сплав;
- сильное газопоглощение жидкого расплава;
- самоотпуск при медленном охлаждении;
- недостаточная коррозионная стойкость в перегретом паре.

Для устранения этих недостатков сплавы дополнительно легируют марганцем, железом, никелем, свинцом.

Из алюминиевых бронз изготавливают относительно мелкие, но высокоответственные детали типа шестерен, втулок, фланцев литьем и обработкой давлением. Из бронзы БрА5 штамповкой изготавливают медали и мелкую разменную монету.

Кремнистые бронзы, БрКМц3-1, БрК4, применяют как заменители оловянных бронз. Они немагнитны и морозостойки, превосходят оловянные бронзы по коррозионной стойкости и механическим свойствам, имеют высокие упругие свойства. Сплавы хорошо свариваются и подвергаются пайке. Благодаря высокой устойчивости к щелочным средам и сухим газам, их используют для производства сточных труб, газо- и дымопроводов.

Свинцовые бронзы, БрС30, используют как высококачественный антифрикционный материал. По сравнению с оловянными бронзами имеют более низкие механические и технологические свойства.

Бериллиевые бронзы, БрБ2, являются высококачественным пружинным материалом. Растворимость бериллия в меди с понижением температуры значительно уменьшается. Это явление используют для получения высоких

упругих и прочностных свойств изделий методом дисперсионного твердения. Готовые изделия из бериллиевых бронз подвергают закалке от 800°С, благодаря чему фиксируется при комнатной температуре пересыщенные твердый раствор бериллия в меди. Затем проводят искусственное старение при температуре 300...350°С. При этом происходит выделение дисперсных частиц, возрастают прочность и упругость. После старения предел прочности достигает 1100...1200 МПа.

Алюминий и его сплавы. Алюминий – легкий металл с плотностью 2,7 г/см³ и температурой плавления 660°С. Имеет гранцентрированную кубическую решетку. Обладает высокой тепло- и электропроводностью. Химически активен, но образующаяся плотная пленка оксида алюминия Al_2O_3 , предохраняет его от коррозии.

Механические свойства: предел прочности 150 МПа, относительное удлинение 50 %, модуль упругости 700 МПа.

Алюминий высокой чистоты маркируется *A99* (99,999 % Al), *A8*, *A7*, *A6*, *A5*, *A0* (содержание алюминия от 99,85 % до 99 %).

Технический алюминий хорошо сваривается, имеет высокую пластичность. Из него изготавливают строительные конструкции, малонагруженные детали машин, используют в качестве электротехнического материала для кабелей, проводов.

Алюминиевые сплавы. *Принцип маркировки алюминиевых сплавов.* В начале указывается тип сплава: Д – сплавы типа дюралюминов; А – технический алюминий; АК – ковкие алюминиевые сплавы; В – высокопрочные сплавы; АЛ – литейные сплавы.

Далее указывается условный номер сплава. За условным номером следует обозначение, характеризующее состояние сплава: М – мягкий (отожженный); Т – термически обработанный (закалка плюс старение); Н – нагартованный; П – полунагартованный

- По технологическим свойствам сплавы подразделяются на три группы:
- деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой;
 - деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой;
 - литейные сплавы.

Методами порошковой металлургии изготавливают спеченные алюминиевые сплавы (САС) и спеченные алюминиевые порошковые сплавы (САП).

Деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой. Прочность алюминия можно повысить легированием. В сплавы, не упрочняемые термической обработкой, вводят марганец или магний. Атомы этих элементов существенно повышают его прочность, снижая пластичность.

Обозначаются сплавы: с марганцем – АМц, с магнием – АМг; после обозначения элемента указывается его содержание (АМгЗ).

Магний действует только как упрочнитель, марганец упрочняет и повышает коррозионную стойкость.

Прочность сплавов повышается только в результате деформации в холодном состоянии. Чем больше степень деформации, тем значительно растет прочность и снижается пластичность. В зависимости от степени упрочнения различают сплавы нагартованные и полунангартованные (АМгЗП).

Эти сплавы применяют для изготовления различных сварных емкостей для горючего, азотной и других кислот, мало- и средненагруженных конструкций.

Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой. К таким сплавам относятся дюралюмины (сложные сплавы систем алюминий – медь – магний или алюминий – медь – магний – цинк). Они имеют пониженную коррозионную стойкость, для повышения которой вводится марганец.

Дюралюмины обычно подвергаются закалке с температуры 500°С и естественному старению, которому предшествует двух-, трехчасовой инкубационный период. Максимальная прочность достигается через 4...5 суток.

Широкое применение дюралюмины находят в авиастроении, автомобилестроении, строительстве.

Высокопрочными стареющими сплавами являются сплавы, которые кроме меди и магния содержат цинк. Сплавы В95, В96 имеют предел прочности около 650 МПа. Основным потребителем – авиастроение (обшивка, стрингеры, лонжероны).

Ковочные алюминиевые сплавы АК, АК8 применяются для изготовления поковок. Поковки изготавливаются при температуре 380...450°С, подвергаются закалке от температуры 500...560°С и старению при 150...165°С в течение 6...15 часов.

В состав алюминиевых сплавов дополнительно вводят никель, железо, титан, которые повышают температуру рекристаллизации и жаропрочность до 300°С.

Изготавливают поршни, лопатки и диски осевых компрессоров, турбореактивных двигателей. Химический состав деформируемых алюминиевых сплавов приведен в табл. 2.14.

Таблица 2.14. Химический состав деформируемых алюминиевых сплавов, % (ГОСТ 4784)

Марка сплава	Основные компоненты				Прочие компоненты
	Mg	Si	Mn	Cu	
АМц	–	–	1,0-1,6	–	–
АМг	2,0-2,8	–	0,15-0,40	–	–
Д1	0,4-0,8	–	0,4-0,8	3,8-4,8	–
Д6	0,65-1,0	–	0,5-1,0	4,6-5,2	–
Д16	1,2-1,8	–	0,3-0,9	3,8-4,9	–
Д18	0,2-0,5	–	–	2,2-3,0	–
АК4	1,4-1,8	0,5-1,2	–	1,9-2,5	1,0-1,5Ni 1,1-1,6Fe
АК8	0,4-0,8	0,6-1,2	0,4-1,0	3,9-4,8	–

Литейные алюминиевые сплавы. К литейным сплавам относятся сплавы системы алюминий – кремний (силумины), содержащие 10...13 % кремния.

Присадка к силуминам магния, меди содействует эффекту упрочнения литейных сплавов при старении. Титан и цирконий измельчают зерно. Марганец повышает антикоррозионные свойства. Никель и железо повышают жаропрочность.

Литейные сплавы маркируются от АЛ2 до АЛ20. Силумины широко применяют для изготовления литых деталей приборов и других средне- и малонагруженных деталей, в том числе тонкостенных отливок сложной формы.

Химический состав алюминиевых литейных сплавов приведен в табл. 2.15

Таблица 2.15. Химический состав алюминиевых литейных сплавов, % (ГОСТ 2685)

Марка сплава	Основные компоненты				Прочие компоненты
	Mg	Si	Mn	Cu	
АЛ2	–	10,0-13,0	–	–	–
АЛ3	0,2-0,8	4,0-6,0	0,2-0,8	1,5-3,5	–
АЛ4	0,17-0,30	8,0-10,5	0,25-0,5	–	–
АЛ5	0,35-0,60	4,5-5,5	–	1,0-1,5	–
АЛ9	0,2-0,4	6,0-8,0	–	–	–

Титан и его сплавы. *Титан* – металл светло-серого цвета – в зависимости от температуры имеет две аллотропические модификации. Низкотемпературная модификация с ГПУ решеткой (α -титан), существует до температуры 882°C, а выше этой температуры – высокотемпературная модификация с ОЦК решеткой (β -титан). Плотность титана составляет 4,5 г/см³, температура плавления – 1665 °С.

Важными свойствами титана являются высокая удельная прочность в сочетании с высокой пластичностью и хорошая коррозионная стойкость. Однако титан плохо обрабатывается резанием и имеет низкие антифрикционные свойства.

Постоянными примесями титана являются *Fe, Si, C, O, N, H* и др. Технический титан маркируется буквами и цифрами: ВТ 1-00 (95,53 % *Ti*), ВТ1-0 (99,48 % *Ti*), ВТ1-1 (99,44 % *Ti*). Чем меньше нулей в обозначении титана, тем больше содержится в нем примесей, которые оказывают сильное влияние на механические и другие свойства. Небольшое содержание кислорода, азота и углерода повышает твердость и прочность титана, но при этом снижает пластичность, коррозионную стойкость и ухудшает свариваемость и обрабатываемость давлением.

Технический титан ВТ1-1 с суммарным содержанием примесей 0,6–0,7% имеет следующие механические свойства: $\sigma_{02} = 380\text{--}500\text{МПа}$, $\sigma_{\text{в}} = 450\text{--}600\text{МПа}$, $\delta_5 = 20\text{--}25\%$, НВ 200–210. При меньшем суммарном содержании примесей твердость и прочность титана снижаются, а пластичность повышается.

Сплавы титана. В отличие от технического титана титановые сплавы обладают более высокими прочностью при комнатной температуре, жаропрочностью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью, хладостойкостью, что предопределило широкое применение титановых сплавов в промышленности. Например, из сплавов титана изготавливают диски и лопатки турбин и компрессоров авиационных двигателей, гребные винты морских судов, баллоны для сжиженных газов, а также емкости для агрессивных химических сред.

Структура титановых сплавов представляет собой твердые растворы легирующих элементов в α - и β -модификациях титана. Легирующие элементы подразделяются в зависимости от их влияния на температуру полиморфного превращения титана на две группы: элементы, расширяющие область существования α -фазы и повышающие температуру превращения (*Al, Ga, Ge, La, C, O, N*) и элементы, сужающие α -область и повышающие температуру полиморфного превращения (*V, Nb, Ta, W, Mo, Cr, Mn, Fe, Co, Si, Ag* и др.). Поскольку легирующие элементы влияют на стабилизацию аллотропической

модификации титана, то сплавы титана в зависимости от их стабильной структуры подразделяют на три группы: α -сплавы, ($\alpha + \beta$)-сплавы (двухфазные) и β -сплавы.

Титановые сплавы также классифицируют, например, по технологии производства (деформируемые, литейные, порошковые) или по механическим свойствам (обычной прочности, высокопрочные, жаропрочные и др.)

В *деформируемых титановых сплавах* с α -структурой основным легирующим элементом, влияющим на свойства, является алюминий. При содержании алюминия примерно 5 % существенно повышаются прочность, жаропрочность, жаростойкость и снижается плотность сплава.

Деформируемые титановые сплавы упрочняются легированием и пластической деформацией и не упрочняются термической обработкой. Такие сплавы подвергают только рекристаллизационному отжигу. Наиболее распространенным является сплав ВТ5, который хорошо сваривается и обрабатывается давлением, жаропрочен и кислотостоек. Добавка олова (примерно 2,5 %) улучшает технологические и механические свойства сплава, который обозначается ВТ5-1.

К группе сплавов с α -структурой относятся также псевдо- α -сплавы, имеющие в основном α -структуру и небольшое количество β -фазы (1–5 %) вследствие дополнительного легирования марганцем. Такими сплавами, например, являются сплавы ОТ4, ВТ4, которые обладают более высокой пластичностью.

Основным недостатком сплавов с α -структурой является склонность к хрупкости, если в сплаве содержится более 0,02 % водорода.

Деформируемые титановые сплавы с ($\alpha + \beta$)-структурой упрочняются термической обработкой, состоящей из закалки и старения. Типичными являются сплавы марок: ВТ3-1, ВТ6, ВТ8 и др. Чем больше β -фазы содержится в сплаве, тем сильнее он упрочняется. Повышенной прочностью обладают сплавы ВТ14, ВТ15 и ВТ16.

При старении сплава образуются две дополнительные упрочняющие фазы, одна из которых вызывает хрупкость. Установлено, что при температуре старения примерно 500 °С охрупчивающая фаза не образуется. Поэтому рекомендуется выполнять старение сплава при температуре, при которой образуется только одна дополнительная упрочняющая мелкодисперсная фаза.

Изделия из титановых сплавов с α - и ($\alpha + \beta$)-структурой могут длительное время работать при температурах 500 °С (ВТ20) и 550–600 °С (ВТ18). Жаропрочность титановых сплавов повышается при легировании *Zr, Al, Mo, Si*.

Деформируемые титановые сплавы с β -структурой не нашли широкого промышленного применения, несмотря на высокую прочность при комнатной температуре. Недостатками этих сплавов являются плохая свариваемость, высокая стоимость из-за необходимости легирования дорогостоящими элементами (*V, Mo, Nb, Ta*). В промышленности применяется сплав ВТ15, который еще называют псевдо- β -сплавом. Он имеет в основном β -структуру с небольшим количеством α -фазы. Этот сплав хорошо штампуются и поставляется в виде поковок, полос и прутков.

В табл. 2.16 приведены механические свойства и режимы термической обработки некоторых деформируемых титановых сплавов.

Таблица 2.16. Механические свойства и режимы термической обработки некоторых деформируемых титановых сплавов

Марка сплава	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	КСУ, Дж/см ²	Режимы термической обработки
ВТ5	600–850	700–950	10–15	30–60	Отжиг при 740–760 °С
ВТ5-1	650–850	750–950	10–15	40–90	Отжиг при 860–880 °С
ОТ4	550–650	700–900	12–20	35–65	Отжиг при 670–720 °С
ВТ4	700–800	850–1050	15–22	35–65	Отжиг при 700–750 °С
ВТ14	1080–1300	1150–1400	6–10	25–35	Закалка от 860–880 °С; старение при 500 °С
ВТ15	1180–1400	1300–1500	3–6	25–30	Закалка от 760–800 °С; старение при 450–480 °С
ВТ16	1100–1200	1250–1450	4–6	40–60	Закалка от 790 °С; старение при 500 °С
ВТ3-1	850–1100	1000–1200	10–16	30–60	Изотермический отжиг при 850 и 670 °С
ВТ8	850–1050	850–1050	9–16	30–60	Закалка от 900–950 °С; старение при 500–480 °С

Литейные титановые сплавы. Эти сплавы имеют хорошие литейные свойства (высокие жидкотекучесть и плотность отливок, малые усадку и склонность к образованию горячих трещин). Однако из-за активного взаимодействия титана с газами и формовочными материалами необходимо производить их плавку и разливку в вакууме или в среде нейтральных газов. По сравнению с деформируемыми сплавами литейные сплавы имеют низкую стоимость, меньшую прочность, пластичность и выносливость.

Для фасонного литья применяют сплавы ВТ5Л, ВТ14Л и ВТ3-1Л, химический состав которых в основном совпадает с химическим составом аналогичных деформируемых сплавов. Однако сплав ВТ14Л дополнительно со-

держит *Fe* и *Cr*. Упрочнение этих сплавов термической обработкой не применяется, так как она резко снижает пластичность. Специальные литейные сплавы ВТЛ1 и ВТ21Л, содержащие до 5–6,6 % *Al*, имеют наибольшую прочность ($\sigma_{\text{в}}=1000\text{--}1100\text{МПа}$).

Наилучшими технологическими свойствами из рассмотренных литейных титановых сплавов обладает сплав ВТ5Л, имеющий достаточно высокую прочность и ударную вязкость. Фасонные отливки из сплава ВТ5Л работают при температуре до 400°C.

Литейные титановые сплавы используются для изготовления заготовок труб и различных фасонных отливок.

В табл. 2.17 представлены химический состав и механические свойства литейных титановых сплавов.

Таблица 2.17. Механические свойства и режимы термической обработки некоторых литейных титановых сплавов

Марка	<i>Al</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>	Прочие элементы	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²
ВТ5Л	5	–	–	–	–	700–900	6–12	30–35
ВТ3-1Л	5,5	2,0	2,0	–	0,2 <i>Si</i>	1000–1100	4–6	30
ВТЛ1	5,0	–	–	–	1,0 <i>Si</i>	900–1000	5–10	15
ВТ21Л	6,6	0,35	0,7	1,2	5,0 <i>Zr</i> , 0,35 <i>Fe</i>	1000–1100	4–7	20

Порошковые титановые сплавы. Современные технологии порошковой металлургии позволяют получать титановые сплавы примерно с теми же механическими и эксплуатационными свойствами, что и у деформируемых сплавов. Однако стоимость и время изготовления изделий из порошковых сплавов существенно ниже (до 50 %), чем из литых или деформируемых сплавов.

Титановый порошковый сплав ВТ6, который получают горячим изотермическим прессованием, имеет прочность ($\sigma_{\text{в}} = 970\text{ МПа}$) и пластичность ($\delta_5 = 16\%$), свойственные и для деформируемого титанового сплава. Если сравнивать порошковый сплав ВТ6 с аналогичным деформируемым сплавом после закалки и старения, то первый несколько уступает по прочности, но превосходит в пластичности.

Антифрикционные материалы. *Антифрикционность* – способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и малую скорость изнашивания сопряженных деталей.

Антифрикционные сплавы используются в подшипниках скольжения, вследствие чего эти сплавы называют *подшипниковыми*. К ним предъявляются следующие требования по физико-механическим и технологическим свой-

ствам: сплавы должны обладать высокой теплопроводностью для быстрого отвода тепла от трущихся поверхностей достаточно высокими механическими свойствами в условиях воздействия знакопеременных и ударных нагрузок. Из технологических свойств особое значение имеют износостойкость, коррозионная стойкость в смазывающей среде, адгезия со стальной поверхностью вкладыша подшипника. Кроме того, сплав должен иметь хорошую жидкотекучесть и невысокую температуру плавления для более качественного выполнения процесса заливки подшипника.

Такое сочетание свойств можно получить у двухфазных сплавов, у которых одна фаза – твердые кристаллы, а другая – мягкая основа. Мягкая основа сплава обеспечивает хорошую прирабатываемость подшипника к валу, твердые включения служат опорными точками для трущихся частей вала.

Небольшая поверхность соприкосновения вала и вкладыша уменьшает трение, а имеющиеся просветы между валом и мягкой основой обеспечивают хорошую подачу смазки и ее равномерное распределение (рис. 2.17).

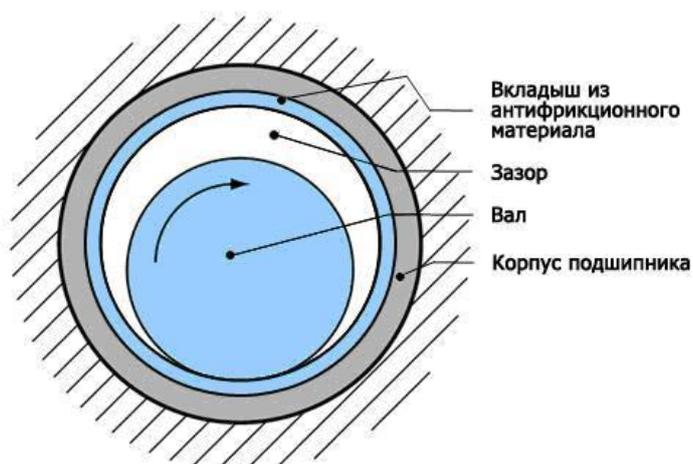


Рисунок 2.17. Схема подшипника скольжения

Для вкладышей подшипников в качестве антифрикционных материалов применяют баббиты, алюминиевые антифрикционные сплавы, бронзы, а также чугуны и металлокерамические материалы.

Баббиты (по имени И.Б. Бэббита, америкаизобретателя) представляют собой сплавы на основе свинца или олова, так же имеющие мягкую основу и твердые включения. Баббиты имеют низкую твердость (НВ 12–32), невысокую температуру плавления (240– 320°С) и обладают высокими антифрикционными свойствами. Баббиты на основе дорогостоящего олова используют для изготовления подшипников скольжения ответственного назначения.

По химическому составу баббиты подразделяют на:

- оловянные;
- оловянно-свинцовые;

– свинцовые.

В оловянных баббитах наилучшим образом сочетаются антифрикционные, физико-механические и технологические свойства. Основой этих баббитов является олово, а добавками – сурьма и медь. Структура баббита представляет собой α -твердый раствор сурьмы в олове, который является мягкой основой сплава, темного цвета. В мягкую основу сплава вкраплены твердые кристаллы β' -фазы, образованные на основе химического соединения Sn и Sb . В сплав добавляется небольшое количество меди (1,5–6,5 %) для устранения ликвации плотности. Медь образует в сплаве фазу Cu_3Sn в виде твердых включений в мягкой основе.

Оловянно-свинцовые баббиты содержат меньшее количество олова в отличие от оловянных. Мягкой основой этих баббитов является эвтектика, состоящая из кристаллов α -твердого раствора (Sn , Sb и Cu в Pb) и β -фазы ($SnSb$). Твердые включения составляют избыточные кристаллы β -фазы и частицы интерметаллидных фаз Cu_3Sn и Cu_2Sb .

Примером оловянно-свинцовых баббитов является баббит марки Б16. Он применяется как заменитель баббита Б83 для изготовления менее быстроходных подшипников и при отсутствии ударных нагрузок, так как имеет повышенную склонность к хрупкому разрушению.

Свинцовые баббиты являются наиболее дешевыми сплавами. Добавками этих баббитов являются кальций (Ca) и натрий (Na), которые образуют со свинцом α -твердые растворы. Однако растворимость кальция в свинце мала и он присутствует в сплаве в основном в виде химического соединения Pb_3Ca , частицы которого являются твердыми включениями. Эти баббиты обладают низкой адгезией к стальному вкладышу подшипника и поэтому их заливают очень тонким слоем или крепят механическим путем.

Примером свинцовых баббитов являются баббиты марок БК, БК2.

В табл. 2.18 представлен химический состав и механические свойства баббитов

Таблица 2.18. Химический состав баббитов

Марка баббита	Sn	Pb	Sb	Cu	Ca	Na	$\sigma_{0,2}$, МПа	НВ
Б83	Остальное	–	10–12	5,5–6,5	–	–	67	28
Б16	15–17	Остальное	15–17	1,5–2,0	–	–	76	30
БК2	1,5–2,1	Остальное	–	–	0,3–0,5	0,2–0,4	80	20

Алюминиевые антифрикционные сплавы подразделяются на две группы. К первой группе относятся сплавы алюминия с медью, сурьмой, никелем и другими элементами, образующие твердые интерметаллидные фазы $CuAl_2$, $AlSb$, $NiAl_3$ и пр., распределенные в мягкой алюминиевой основе. Примером является сплав АСМ, содержащий 3,5–6,5 % *Sb* и 0,3–0,7 % *Mg*. Этот сплав технологичен, обладает высокой коррозионной стойкостью, рекомендуется для валов с повышенной твердостью шейки. Ко второй группе относятся сплавы алюминия с оловом. Содержание олова в сплаве может составлять 9–23 %. В структуре этих сплавов содержатся менее твердые включения эвтектического сплава. Они хорошо работают в условиях сухого или полужидкого трения, используются для производства тяжело нагруженных подшипников и обладают высоким пределом выносливости. Примером является сплав АО20-1, содержащий 17–23 % *Sn* и 0,7–1,2% *Cu*. Алюминиевые сплавы применяют как заменители оловянных и свинцовых баббитов.

Антифрикционные бронзы. Наибольшее распространение получили оловянные бронзы с содержанием олова свыше 8%. По структуре они представляют собой основную массу твердого раствора олова в меди (мягкая фаза) и твердые частицы соединения Cu_3Sn . Для экономии олово частично заменяется свинцом и цинком. Бронза марки БрОФ10-1 – прекрасный антифрикционный сплав, применяется для ответственных подшипников, так как допускает большие удельные давления. Широкое применение находят оловянно-свинцовые и свинцовые бронзы (например, БрОС 8-12, БрС-30) для заливки подшипников двигателей внутреннего сгорания.

Антифрикционные чугуны отличаются низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью. Различают антифрикционный чугун серый – марок АЧС с пластичным графитом, ковкий – марок АЧК и высокопрочный – марок АЧВ. Пористость чугуна способствует впитыванию масла, а графит служит смазочным материалом и существенно снижает коэффициент трения. Из антифрикционных чугунов изготавливают подшипники, втулки топливных насосов, направляющие клапанов, поршневые автомобильные кольца. При повышенных скоростях скольжения и высоких давлениях применяют чугуны марок АЧВ с плотной перлитной структурой и незначительными выделениями свободного графита (табл.2.19).

Таблица 2.19. Химический состав антифрикционных чугунов

Марка чугуна	Содержание элементов, %					
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	Прочие
АЧС-1	3,2–3,6	0,6–1,2	1,3–2,0	0,15–0,3	0,12	2,5–3,0
АЧК-1	2,3–3,0	0,6–1,2	0,5–1,0	0,2	0,08	–
АЧВ-1	2,8–3,5	0,5–1,2	1,8–2,7	0,2	0,1	–

РАЗДЕЛ 3. РЕСУРС МЕТАЛЛА ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ ТЭС

Тема 3.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О РЕСУРСЕ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Под *ресурсом эксплуатации* понимают время наработки технического объекта от начала эксплуатации до наступления предельного состояния.

Для оборудования и трубопроводов ТЭС *предельное состояние* наступает тогда, когда их прочность снижается до уровня, при котором коэффициенты запаса прочности становятся ниже нормативных значений. Предельное состояние оценивают по различным параметрам, среди которых наиболее типичными являются:

- утонение стенки сосуда или трубопровода под воздействием коррозии, эрозии или другого вида износа до размеров, не предусмотренных технической документацией;
- необратимые изменения форм, вызванные пластическими деформациями, не предусмотренные технической документацией;
- образование дефектов в металле в виде повышенного скопления пор, переходящего в микро- и макротрещины.

Для количественной оценки параметров, характеризующих предельное состояние, используют меру ресурса. *Мерой ресурса* может быть время эксплуатации, за которое изменение формы и геометрических параметров конструкции достигает недопустимых значений. Кроме того, за меру ресурса принимают предельно допустимое количество циклов термосилового нагружения конструкции, при котором обеспечивается сопротивление усталости с сохранением нормативных коэффициентов запаса прочности.

В энергетике используют следующие понятия срока службы и ресурса эксплуатации технического объекта, конструкции или ее элементов.

Назначенный срок службы объекта – календарная продолжительность работы объекта до окончания его эксплуатации, измеряемая в единицах

календарного времени. Назначенный срок службы связан с темпами научно-технического прогресса и социально-экономическими условиями в данной отрасли.

Назначенный ресурс – эксплуатационная наработка объекта, определяемая с учетом назначенного срока службы. Назначенный ресурс измеряется в единицах наработки (число режимов эксплуатации, предельные величины коррозии, износа и т.п.).

Остаточный ресурс – продолжительность эксплуатации объекта от данного момента времени до наступления предельного состояния.

Индивидуальный остаточный ресурс – остаточный ресурс конкретного элемента конструкции, находящегося в эксплуатации.

Парковый ресурс – продолжительность эксплуатации однотипных по конструкции, маркам стали и условиям эксплуатации объектов, в пределах которой обеспечивается их безаварийная работа при соблюдении требований действующей нормативной документации.

Парковый ресурс паровых турбин зависит от давления свежего пара, электрической мощности и количества пусков и составляет 100–270 тыс.ч. В табл.3.1 приведены значения паркового ресурса паровых турбин различных заводов-изготовителей.

Таблица 3.1. Парковый ресурс турбин в зависимости от давления свежего пара и мощности

Завод-изготовитель	Давление свежего пара, МПа	Мощность, МВт	Парковый ресурс	
			тыс. ч.	количество пусков
ЗАО «Уральский турбинный завод» (ТМЗ)	< 9	< 50	270	900
	13–24	50–250	220	600
ОАО «Ленинградский металлургический завод» (ЛМЗ)	< 9	< 100	270	900
	13–24	50–300	220	600
	24	50–1200	100	300
МПО «Турбоатом»	< 9	<50	270	900
	13	160	200	600
	24	300	170	450
	24	500	100	300

Примечание. Ресурс всей турбины определяется ресурсом наиболее ответственных элементов – роторов высокого и среднего давления.

В зависимости от марки стали и рабочей температуры парковый ресурс крепежа изменяется от 100 до 220 тыс. ч; парковый ресурс паропроводов энергоблоков мощностью 100–200 МВт равен 100 тыс. ч.

В табл.3.2 приведены значения паркового ресурса элементов котлоагрегатов в зависимости от используемых марок стали и рабочей температуры.

Таблица 3.2. Парковый ресурс элементов котлоагрегатов в зависимости от используемых марок стали и рабочей температуры

Наименование элемента котлоагрегата	Марка стали	Рабочая температура, °С	Парковый ресурс, тыс. ч.
Необогреваемые участки труб	12Х1МФ	> 545	200
	15ХШ1Ф	546–570	150
Необогреваемые участки труб	12МХ	> 530	250
Гибы	12МХ	> 530	200
Необогреваемые участки труб	15ХМ	> 530	300
Гибы	15ХМ	>530	200
Поверхности нагрева	12Х1МФ	> 585	100
	12Х2МФСР	>600	
	12Х18Н12Т	>640	
Барабаны	22К	–	300
	16ГНМ		
	16ГНМА		

Обеспечение ресурса на стадии проектно-конструкторских работ.

Работы по обеспечению ресурса на этой стадии состоят из следующих основных этапов.

1. Определение условий эксплуатации проектируемой конструкции на основе расчетов теплогидравлических и физических процессов, результатов стендовых экспериментов и анализа условий эксплуатации прототипов.

2. Определение назначенного срока службы конструкции с учетом темпов технического прогресса, морального старения оборудования, а также социально-экономических и экологических факторов.

3. Определение формы и базовых габаритных размеров конструкции с учетом возможности ее изготовления, транспортирования, обеспечения надежности и ремонта.

4. Выбор материала конструкции и технологии ее изготовления. Основными параметрами при выборе материала являются химический состав, структура технологические и механические свойства. Технологические свойства должны обеспечить возможность изготовления конструкции и применение термической обработки, сварки, обработки давлением, резания. Механические свойства должны обеспечить прочность конструкции в течение всего срока эксплуатации.

5. Определение процессов повреждения и критериев прочности. К процессам, приводящим к образованию повреждений металла относятся пластическая деформация, разрушение, усталость, ползучесть, коррозия, эрозия и износ. В зависимости от процессов повреждения выбирают критерии прочности для обоснования ресурса. Критериями прочности могут быть сопротивление пластическим деформациям и разрушению (по вязкому или хрупкому механизмам), ползучести, усталости, коррозии и эрозии.

6. На основании результатов, полученных на этапе 5, с учетом данных этапа 2 определяют назначенный ресурс конструкции.

7. Основные размеры конструкции определяют с учетом критериев сопротивления пластическим деформациям и разрушению. Кроме того, к рассчитанным размерам стенок деталей и конструкций делают добавки, учитывающие утонение за счет коррозии или износа.

8. Уточнение геометрии конструкции в целях обеспечения ее прочности по критерию сопротивления циклическим нагрузкам. Расчеты дополняют испытаниями моделей или стендов, имитирующих сложные условия эксплуатации конструкции.

9. Обосновывается назначенный ресурс эксплуатации конструкции с учетом результатов, полученных на предыдущих этапах.

Обеспечение ресурса на стадиях изготовления и монтажа оборудования и трубопроводов. Ресурс оборудования и трубопроводов зависит от качества выполнения работ на стадиях изготовления и монтажа, на которых предприятие-изготовитель и монтажная организация осуществляют пооперационный контроль качества. Для полуфабрикатов предусмотрены следующие основные виды контроля:

- химического состава металла;
- состояния поверхности;
- геометрических размеров;
- микроструктуры металла;
- механических и технологических свойств;
- дефектов неразрушающими методами.

Рассмотрим некоторые виды контроля на примере барабана котельного агрегата, как одного из наиболее ответственных элементов энергоустановки. Барабаны изготавливают из стальных листовых вальцованных или штампованных обечаек, имеющих два продольных сварных шва, выполненных электрошлаковой сваркой. Днища барабанов изготавливают штамповкой из листовых заготовок. Соединяют обечайки между собой и с днищами также с по-

мощью сварки. Типичными сталями, используемыми для изготовления обечаяек, днищ и крышек являются котельные стали марок 22К, 20К, 15К, 16ГС, 09Г2С, 16ГНМА.

Исходя из рабочего давления пара в барабане, запаса прочности и механических свойств металла, рассчитывают внутренний диаметр и толщину стенки барабана. Например, барабаны котлоагрегатов для эксплуатации под рабочим давлением до 16 МПа, изготавливаемые из стали 16ГНМА, имеют внутренний диаметр 1600 мм и толщину стенки 115 мм.

Обечайки и днища барабанов после штамповки и вальцовки подвергаются тщательному осмотру. На поверхности обработанного металла не допускаются трещины, раковины и расслоения. Обнаруженные вмятины и риски глубиной до 3 мм устраняют шлифовкой. Овальность обечаяек не должна превышать 1 %. При сборке барабана сварные швы должны быть не продолжением друг друга, а смещены на расстояние не менее двукратной толщины листа. Необходимо учитывать, что в местах пересечения сварных швов возникают максимальные остаточные напряжения и дефекты. Следует избегать наличие отверстий, опор рядом со сварными швами, которые могут создавать дополнительную концентрацию напряжений.

Особое внимание при изготовлении барабанов котлов уделяется качеству самих сварных соединений. Сварочные материалы и методы сварки должны обеспечивать механические свойства сварного шва после термической обработки не ниже свойств основного металла. Контроль сварных соединений включает в себя внешний осмотр, металлографические исследования, дефектоскопию, гидравлические испытания и определение механических свойств. Для определения механических свойств сварного шва барабана изготавливают контрольную пластину таким образом, чтобы сварной шов на пластине был продолжением продольного сварного шва на барабане. Пластина для контроля кольцевого шва сваривается отдельно. Из каждой контрольной пластины вырезают два образца для испытания на растяжение, два образца для испытания на изгиб и три образца для испытания на ударную вязкость.

Стыковые сварные соединения барабанов проходят контроль ультразвуковой и магнитопорошковой дефектоскопией. Дополнительно места пересечения сварных швов контролируются радиографией. Такому же контролю подвергаются швы приварки штуцеров к барабану. Если в сварных швах обнаруживают трещины, несплавления, шлаковые включения, поры, то такие швы бракуются и подлежат ремонту. В процессе ремонта производят

выборку дефектных мест с последующей подваркой. После ремонта сварные швы снова проходят контроль.

Металлографические исследования проводят для контроля микроструктуры сварных швов, а также выявления трещин, пор, раковин, непроваров и шлаковых включений. Для проверки прочности и плотности сварных соединений производят гидравлические испытания барабана под давлением, превышающем на 25 % рабочее.

Обеспечение ресурса на стадии эксплуатации. Задача обеспечения ресурса на стадии эксплуатации оборудования и трубопроводов ТЭС заключается, прежде всего, в оперативной диагностике структурно-механического состояния металла. Оперативная диагностика предусматривает проведение контроля металла непосредственно в деталях и конструкциях с помощью переносных или портативных приборов.

В существующей практике обследования структурно-механического состояния металла, например трубопроводов, неразрушающему контролю подлежат отдельные точки, расположенные в основном в зонах гибов, тройников и сварных соединений. Однако исходные дефекты металла металлургического или технологического происхождения, не выявленные на стадии изготовления, в объеме трубопровода распределены случайно. Они могут находиться в деталях конструкции и развиваться под воздействием эксплуатационных факторов.

Существующая методика оперативной диагностики структурно-механического состояния металла оборудования и трубопроводов состоит из четырех основных этапов.

1-й этап. Выполняется 100%-ный неразрушающий контроль металла объекта контроля физическими методами, например методом магнитной коэрциметрии. Кроме того, могут быть использованы методы акустической эмиссии и тепловой. По результатам неразрушающего контроля физическим методом выявляются аномальные зоны или точки, в которых наблюдаются концентраторы напряжений.

2-й этап. В выявленных аномальных зонах или точках производится подготовка поверхности для неразрушающего металлографического контроля и последующего безобразцового контроля механических свойств по характеристикам твердости. При необходимости более детального исследования микроструктуры в лабораторных условиях снимаются реплики с контролируемых точек.

3-й этап. Выполняются обработка и анализ результатов неразрушающего контроля, полученных физическим, металлографическим и безобразцовым методами. Сравниваются значения физического параметра, анализируется микроструктура, рассчитываются значения характеристик твердости, предела текучести, временного сопротивления, отношения предела текучести к временному сопротивлению и другие параметры. Затем выявляются зоны и точки, в которых произошли недопустимые изменения в микроструктуре и механических свойствах металла, появились дефекты в виде массового скопления пор и образовавшихся трещинок. При отрицательных результатах неразрушающего контроля всеми методами рекомендуется произвести контрольную вырезку или взятие пробы для более детального исследования всего комплекса механических свойств и микроструктуры на образцах в лабораторных условиях.

4-й этап. Выдаются рекомендации по технологии восстановления микроструктуры и механических свойств деградировавшего металла, устранению дефектов, замене деталей оборудования или опасных участков трубопроводов. На этом же этапе прогнозируют дальнейшие изменения механических свойств металла путем сопоставления, с результатами ранее проведенных обследований.

Рассматриваемая методика используется при диагностике металла длительно работающих оборудования и трубопроводов ТЭЦ.

Прогнозирование остаточного ресурса. В процессе длительной эксплуатации оборудования и трубопроводов тепловых электростанций возникает необходимость в прогнозировании или уточнении остаточного ресурса. Существуют различные подходы и методики прогнозирования остаточного ресурса, основанные на использовании температурных, геометрических, силовых, деформационных и других параметров, контролируемых в процессе эксплуатации. Ниже приведены методики прогнозирования остаточного ресурса.

Прогнозирование остаточного ресурса металла по температурным параметрам. Температура эксплуатации является одним из основных параметров, от которого зависит работоспособность металла оборудования и трубопроводов ТЭС. Если температура эксплуатации превышает заданные расчетные значения, то срок службы оборудования и трубопроводов может существенно снизиться. Даже небольшое превышение температуры (на 5°C снижает долговечность ферритно-перлитных сталей на 35–45 %, а аустенитных – на 25–30% (рис. 3.1).

Превышение температуры эксплуатации может происходить во время нестационарных режимов работы энергоблоков при пусках, остановках, увеличении производительности. В условиях пиковых режимов, когда резко возрастает потребность в электроэнергии, температура эксплуатации металла может превысить расчетную на 20°C и более. Однако необходимо знать и учитывать не только абсолютное превышение температуры, но и продолжительность эксплуатации при перегреве. При этом важно контролировать суммарную длительность эксплуатации на наиболее высоких ступенях перегрева металла, если происходило многократное превышение температуры.

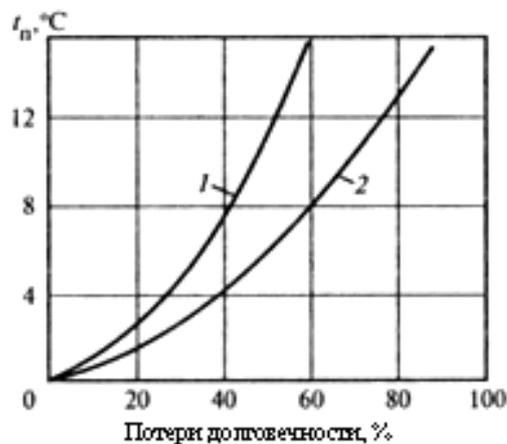


Рисунок 3.1. Потери долговечности сталей в зависимости от температуры перегрева t_p : 1 – аустенитные стали; 2 – ферритно-перлитные стали

Если известны значения длительности эксплуатации на высокотемпературных ступенях перегрева τ_{B1} , τ_{B2} , τ_{B3} , τ_{Bj} , то можно определить соответствующие эквивалентные значения времени для этих ступеней $\tau_{э1}$, $\tau_{э2}$, $\tau_{э3}$, $\tau_{эj}$ в переводе на номинальную температуру $T_{ном}$. Для этого используют параметрическую зависимость Ларсена-Миллера, которую можно представить следующим образом:

$$T_{ном} (c + \lg \tau_{э}) = T_{B} (c + \lg \tau_{B}) .$$

Графическое изображение параметрической зависимости Ларсена-Миллера представлено на рис. 3.2.

Зависимость Ларсена–Миллера в данном случае позволяет определить при постоянном действующем напряжении время до разрушения металла при номинальной температуре $T_{ном}$ по данным испытания до разрыва при температуре перегрева T_B в течение времени τ_B . Коэффициент c в формуле Ларсена-

Миллера является постоянным для отдельных классов сталей. Для сталей перлитного класса $c = 24$, для сталей аустенитного класса $c = 16$.

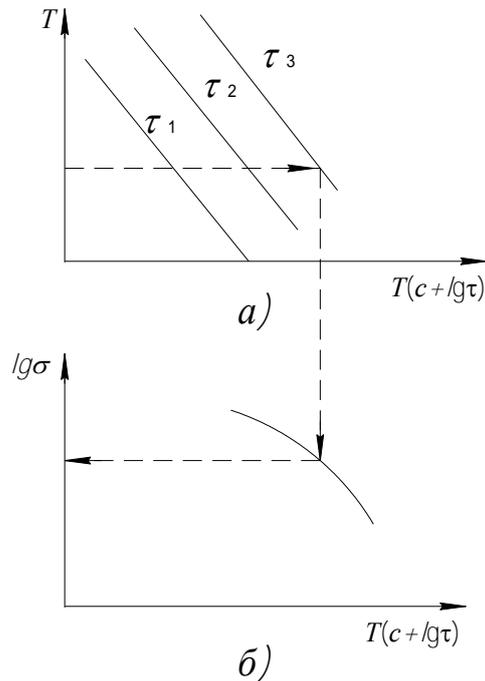


Рисунок 3.2. Графическое изображение параметрической зависимости Ларсена-Миллера

Суммарная приведенная длительность эксплуатации τ_c в результате пересчета на номинальную температуру:

$$\tau_c = \tau_{\text{НОМ}} + \sum_{i=1,2,3,\dots,n} \tau_{\text{э}i}$$

где $\tau_{\text{НОМ}}$ – длительность эксплуатации при номинальной температуре $T_{\text{НОМ}}$;

$\Sigma \tau_{\text{э}i}$ – увеличение длительности эксплуатации при номинальной температуре за счет перегревов.

Степень остаточного ресурса работы металла $\Delta\tau$ можно представить в следующем виде:

$$\Delta\tau = (\tau_c - \tau_\phi) / \tau_c,$$

где τ_ϕ – фактическое время эксплуатации.

Расчетное время до разрушения металла τ_p будет

$$\tau_p = (\tau_p)_{\text{НОМ}} (1 - \Delta\tau)_{\text{НОМ}} (\tau_\phi / \tau_c)$$

где $(\tau_p)_{\text{НОМ}}$ – время до разрушения металла при номинальной температуре.

Прогнозирование остаточного ресурса по геометрическим параметрам. Согласно этой методике сначала проводится ультразвуковая толщинометрия стенок труб и выбираются участки с наибольшей толщиной окалины. Из этих труб делаются вырезки из 3–5 контрольных участков длиной не менее 200 мм. Из каждого контрольного участка отрезают с двух сторон образцы в виде полых цилиндров высотой 20–25 мм для изготовления шлифов. Внутреннюю поверхность цилиндров заливают сплавом Вуда (легкоплавкий сплав на основе висмута, содержит 50% висмута, 25% свинца, 12,5% олова, и 12,5% кадмия), что позволяет сохранить слой окалины. Одну торцевую сторону цилиндра обрезают на токарном станке, а затем шлифуют, полируют и протравливают в 3%-ном спиртовом растворе соляной кислоты. Подготовленная для исследования поверхность имеет вид плоского кольца. Измеряют максимальную толщину окалины и по результатам 8–10 измерений вычисляют ее среднее значение h_c . Глубину коррозии ΔS принимают равной $\Delta S = 0,48h_c$.

По значениям ΔS и фактической продолжительности работы энергооборудования τ_ϕ определяют эквивалентную температуру эксплуатации на внутренней поверхности трубы с помощью номограммы (рис.3.3).

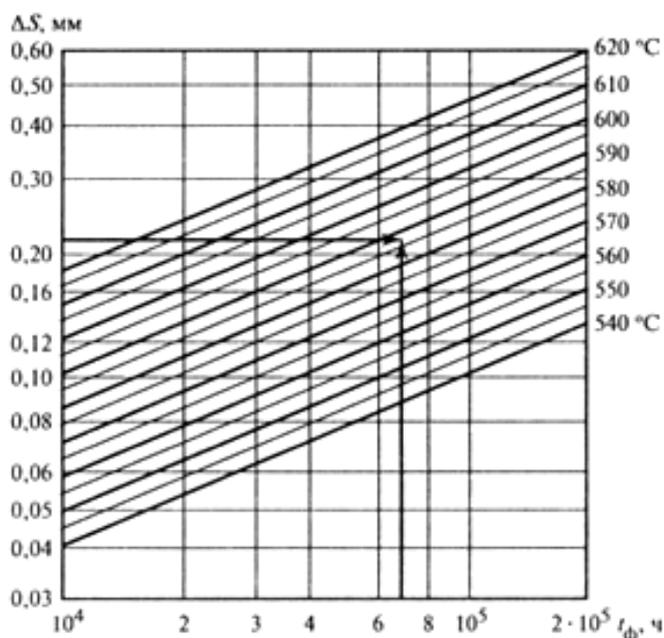


Рисунок 3.3. Номограмма для определения эквивалентной температуры эксплуатации на внутренней поверхности трубы из стали 12X1МФ

Рабочее напряжение σ_p рассчитывают по номинальному давлению внутри трубы $p_{\text{ном}}$ и фактической толщине стенки S :

$$\sigma_p = (p_{\text{ном}} / 200)(D_n - S) / S,$$

где D_n – наружный диаметр трубы.

Используя параметрическую диаграмму Ларсона-Миллера (рис.3.2), определяют время до разрушения τ_p по эквивалентной температуре $T_{\text{экв}}$ и рабочему напряжению σ_p . Ресурс надежной работы τ_n принимают равным $0,8\tau_p$. Остаточный ресурс равен $\tau_{\text{ост}} = \tau_{\text{ном}} - \tau_{\text{ф}}$.

Продление ресурса эксплуатации теплоэнергетического оборудования и трубопроводов. Проблема продления ресурса эксплуатации теплоэнергетического оборудования и трубопроводов ТЭС с сохранением показателей надежности и безопасности в последнее время весьма актуальна. Срок эксплуатации большинства энергоблоков отечественных тепловых электростанций к настоящему времени достиг или начал превышать проектный ресурс 100 тыс. ч. Накопленные научно-практические результаты показали, что проектный ресурс котлов, турбин и трубопроводов может быть существенно увеличен. Были разработаны нормативные документы, регламентирующие порядок контроля металла и продления срока службы основных элементов котлоагрегатов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций.

После исчерпания паркового ресурса проводится комплексная диагностика узлов и деталей энергоустановок, которая заключается в следующих мероприятиях.

- Анализ технической документации и условий эксплуатации объекта за весь предшествующий срок службы.
- Учет ежегодной наработки оборудования, температуры металла и давления пара за котлом, на входе в турбину и в секциях коллектора, изменения давления и числа пусков из различных тепловых состояний.
- Установка измерительных приборов для оценки температурных режимов эксплуатации элементов оборудования, работающих в условиях ползучести.
- Проведение визуального контроля и дефектоскопии, измерение толщины стенок трубопроводов, определение химического состава, микроструктуры и механических свойств металла.

– Выполнение уточненного расчета на прочность по фактическим механическим свойствам, геометрическим параметрам и дефектам элементов оборудования и трубопроводов, и на основании этого рассчитывают их индивидуальный ресурс. Заключение о возможности продления ресурса дает специализированная организация, которая утверждается Госпромнадзора Республики Беларусь.

Установлено, что индивидуальный ресурс может в среднем составлять 1,35–1,5 паркового ресурса. При определении индивидуального ресурса затраты составляют 10–20 % стоимости нового оборудования. Эти затраты идут на проведение комплексного обследования, замену отдельных деталей, не обеспечивающих требуемой эксплуатационной надежности. После исчерпания индивидуального ресурса затраты по поддержанию работоспособности оборудования и трубопроводов будут возрастать ускоренными темпами. Сначала увеличатся затраты на контроль структурно-механического состояния металла, а затем – на ремонт или замену изношенных деталей. Поэтому в такой ситуации необходима объективная оценка технико-экономических показателей, которая должна дать ответ о целесообразности дальнейшего обеспечения и продления ресурса или о необходимости замены изношенных оборудования и трубопроводов. На рис. 3.4 представлена схема мероприятий при продлении ресурса эксплуатации оборудования и трубопроводов.

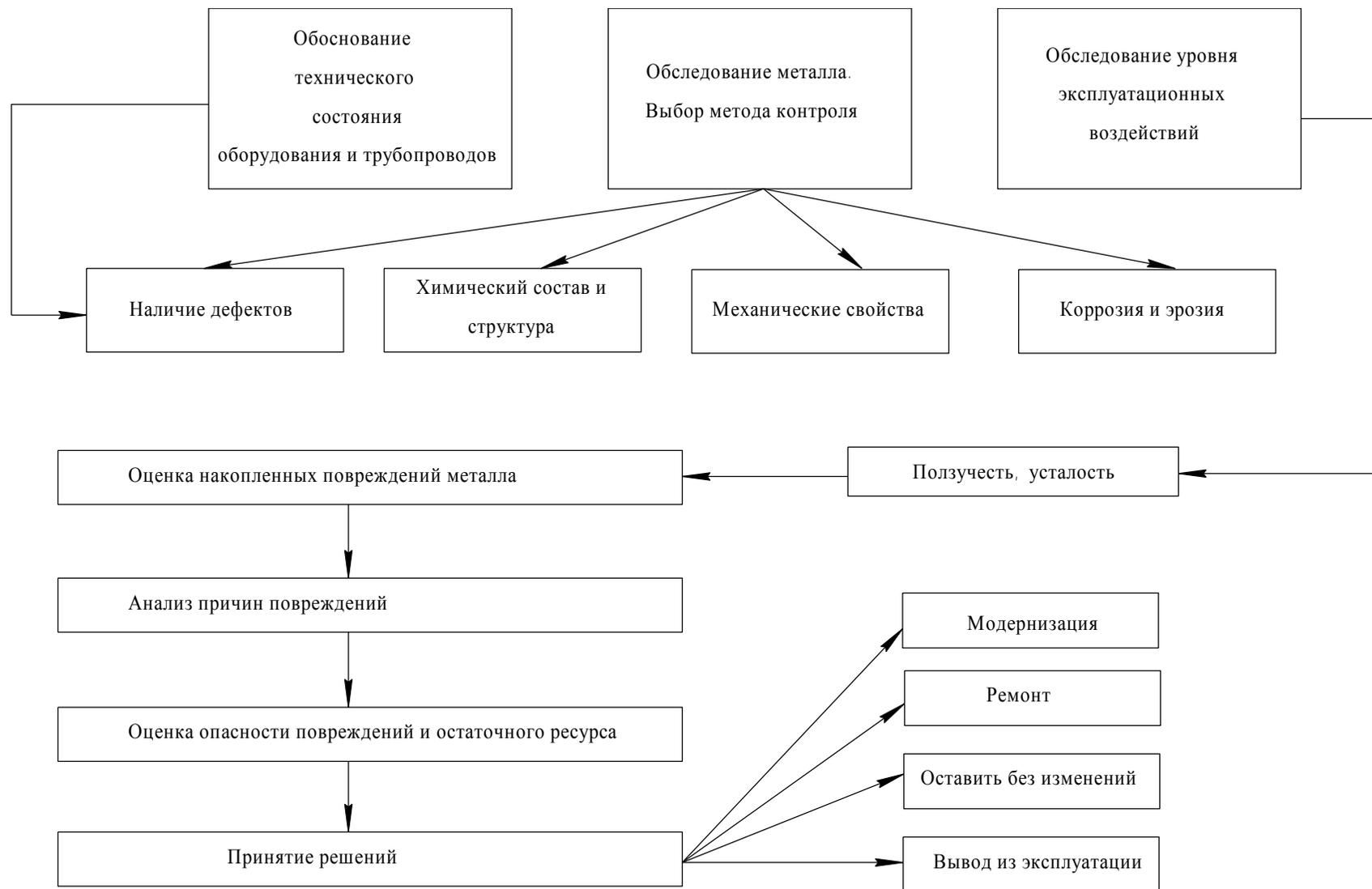


Рисунок 3.4. Схема мероприятий при продлении ресурса эксплуатации теплоэнергетического оборудования и трубопроводов

Тема 3.2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РЕСУРСА И ЗАЩИТА МЕТАЛЛА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Восстановление ресурса металла паропроводов термической обработкой. Для оборудования и трубопроводов ТЭС расчетный срок службы составляет в основном 10^5 ч. Такой срок службы устанавливается, исходя из накопления пластической деформации до определенной величины (обычно 1%) в процессе ползучести и снижения длительной прочности металла. Так, на некоторых паропроводах, изготовленных из сталей марок 12МХ, 15ХМ и эксплуатировавшихся при температуре 530–535 °С, к концу расчетного срока эксплуатации 10^5 ч были обнаружены трещины на гйбах, из-за чего паропроводы пришлось демонтировать и заменить на другие. Однако для таких паропроводов, эксплуатирующихся при температурах 500–510 °С, возможно продление ресурса сверх расчетного. При более высоких запасах прочности, учитываемых при проектировании и, как следствие, при большей толщине стенок трубопроводов, также возможно повышение длительности эксплуатации.

В процессе ползучести происходят значительные изменения структуры и механических свойств металла, кроме того повреждения в виде пор постепенно приводят к образованию трещин.

На рис. 3.5, *а* показана схема образования поры на границе проскальзывания зерен. Верхнее зерно под действием силы P смещается на некоторое расстояние по отношению к нижнему, которое удерживается в неподвижном состоянии силой P_1 , действующей в направлении, обратном действию силы P , в результате чего происходит образование поры. Поры могут быть образованы также на стыке трех зерен по следующей схеме (рис. 3.5, *б*). Два левых зерна под действием силы P давят на правое зерно, которое удерживается в неподвижном состоянии силой P_1 , в результате происходит образование клиновидной поры за счет скольжения левых зерен в разных направлениях по правому зерну.

Если параметры, характеризующие поврежденность и механические свойства металла ниже значений, установленных в нормативных документах, то возникает вопрос о необходимости демонтажа и замены трубопроводов. Однако эти мероприятия являются материалоемкими, трудоемкими и, как следствие, дорогостоящими. Кроме того, проблема может усложниться дефицитом на поставку новых труб вместо демонтированных. В связи с этим предложен способ восстановления структуры и механических свойств деградировавшего металла трубопроводов путем термической обработки. Этот способ получил на-

звание «восстановительная термическая обработка» – ВТО.

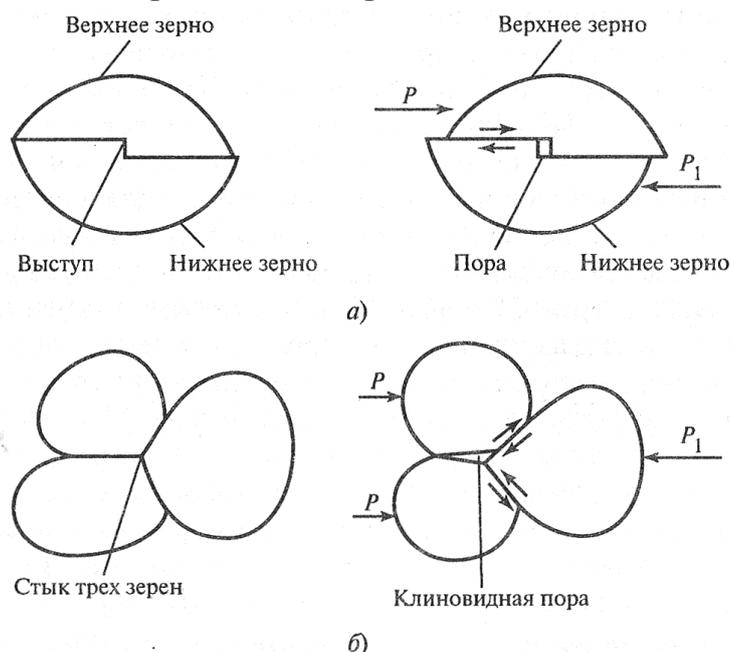


Рисунок 3.5. Схемы образования пор в металле при скольжении на стыке двух (а) и трех зерен (б)

Восстановительная термическая обработка позволяет достичь поставленных целей при условии обеспечения таких режимов термической обработки, при которых происходит полная фазовая перекристаллизация в металле. А как известно, глубокие фазовые превращения могут произойти в стали при нагреве выше критической температуры A_{c3} , выдержке при этой температуре и охлаждении с заданной скоростью. При такой термической обработке карбиды растворяются, и легирующие элементы переходят из карбидов обратно в твердый раствор. При нагреве до температуры 950–1100°С происходит не только обогащение твердого раствора легирующими элементами, но и заращивание пор на поверхности и в объеме металла. Полученная оптимальная микроструктура, состоящая из феррита и промежуточной перлитной составляющей (бейнита), обеспечивает необходимые кратковременные механические свойства и жаропрочность стали. Заращивание пор при ВТО чаще называют «залечиванием», которое может происходить спеканием, выпадением вторичных и третичных фаз, образованием новых фаз при фазовой перекристаллизации. Установлено, что однократный нагрев теплостойкой стали до температуры 950–1110°С и выдержкой в течение 30 мин обеспечивает залечивание пор размером до 4 мкм. Однако, если образование пор развилось до такой степени, что привело к появлению трещин, то устранить такие дефекты путем ВТО невозможно. Поэтому при принятии решения о проведении ВТО необходимо убедиться в том, что на-

копление повреждений в металле находится на уровне образования пор, предшествующего образованию микротрещин. В этом случае возможно путем ВТО восстановить структуру и механические свойства металла, которые будут близки к исходным.

В табл. 3.6 приведены рекомендуемые режимы ВТО для теплоустойчивых паропроводных сталей. Следует отметить, что скорость охлаждения при нормализации для образования требуемой микроструктуры стали после ВТО должна быть не менее 5°С/ мин. В исходном состоянии (до эксплуатации) структура рассматриваемых сталей состоит из феррита, перлита и бейнита. Феррит упрочнен растворенными в нем не только углеродом, но и такими легирующими элементами, как молибден, хром, ванадий. В зернах феррита имеются мелкозернистые карбиды этих элементов, которые препятствуют передвижению дислокаций и повышают сопротивление пластической деформации. В процессе эксплуатации происходит коагуляция мелких карбидов, количество карбидных частиц уменьшается, а размеры и расстояние между ними увеличиваются. В результате становится меньше препятствий для передвижения дислокаций и снижается сопротивление пластической деформации. Феррит обедняется легирующими элементами из-за перехода их в карбидную фазу. При длительности эксплуатации 10⁵ ч структура стали практически полностью состоит из феррита и карбидов. Эти процессы влияют на уровень механических свойств.

Таблица 3.3. Рекомендуемые режимы восстановительной термообработки для теплоустойчивых сталей

Марка стали	Температура нагрева при нормализации, °С	Время выдержки при нормализации, мин	Скорость охлаждения при нормализации, °С/мин	Температура отпуска, °С	Время выдержки при отпуске, ч
12МХ	950—1030	20—40	Более 5	680—730	0,5—1
15ХМ	980—1060	20—60	»	680—730	0,5—1
12Х1МФ	980—1080	20—60	»	700—750	0,5—3
15Х1М1Ф	980—1080	20—60	»	710—750	5—10

Чтобы вернуть структуру и механические свойства на исходный уровень необходимо обоснованно выбрать режим ВТО при нагреве, выдержке и охлаждении восстанавливаемого металла.

Для установления характера структуры, полученной после ВТО, используют термокинетическую диаграмму охлаждения.

На рис.3.7 представлена термокинетическая диаграмма стали 12Х1МФ, на которой изображены различные расчетные кривые охлаждения. Каждой кривой охлаждения соответствует своя структурная зона. При расчете кривых охлаждения учитывают геометрические параметры труб и способы охлаждения, обеспечивающие заданную скорость охлаждения. Обычно охлаждают трубы или с тепловой изоляцией (кривая 1), используя один слой листового асбеста, или без тепловой изоляции (кривая 2). Применяют также и спреерное отклонение, резко снижающее время охлаждения (кривая 3).

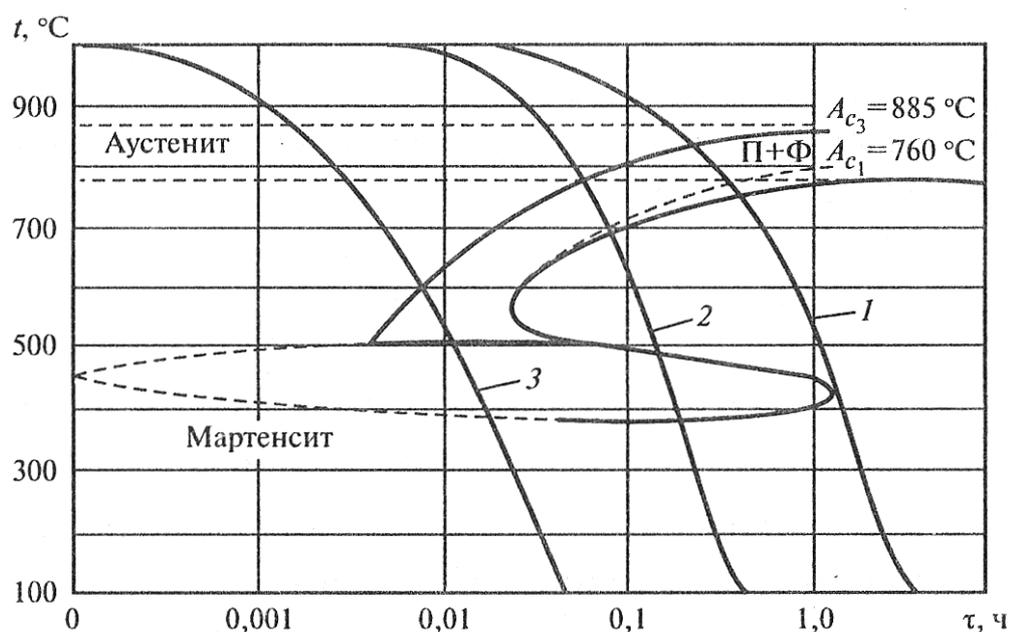


Рисунок 3.7. Термокинетическая диаграмма стали 12Х1МФ с изображением расчетных кривых охлаждения: 1 – охлаждение с тепловой изоляцией; 2 – без тепловой изоляции; 3– спреерное охлаждение

После ВТО предел текучести σ_{02} и временное сопротивление σ_b значительно повышаются, а относительное удлинение δ_5 немного снижается при температуре 20 °С и в большей степени при температуре 560°С, хотя и остается на достаточно высоком уровне.

Наглядное представление о влиянии ВТО на жаропрочность стали дают диаграммы длительной прочности (рис. 3.8). Образцы из стали 12Х1МФ были испытаны на длительную прочность в исходном состоянии стали, после старения при температуре 590°С в течение 6000 ч без напряжения, старения и напряжении 70 МПа в течение 6000 ч, а также после старения под напряжением и ВТО. Экспериментальные точки, соответствующие образцам в исходном со-

стоянии и образцам после ВТО, расположены примерно вдоль одной и той же линии, что свидетельствует о восстановлении длительной прочности стали в результате ВТО.

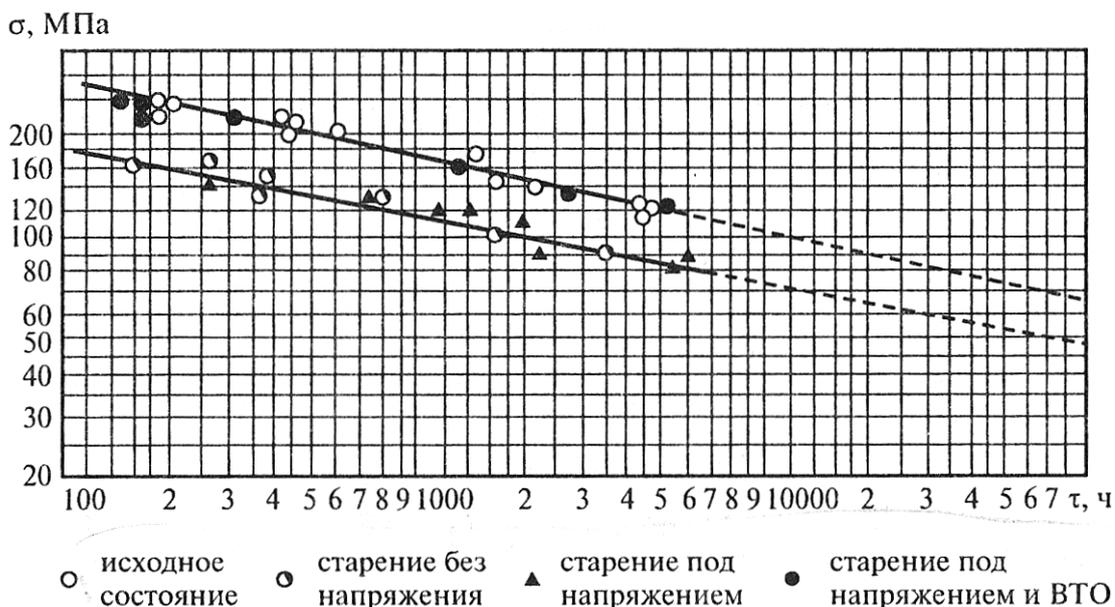


Рисунок 3.8. Влияние ВТО на длительную прочность патрубков из стали 12Х1МФ

В настоящее время накоплен большой опыт применения ВТО паропроводов ТЭС. Известными научно-производственными организациями страны (ВТИ, ВНИАМ, ОРГРЭС и др.) разработаны различные способы ВТО и технические средства для их реализации:

- нагрев паропровода без его демонтажа с помощью подвижного или неподвижного индуктора;
- нагрев демонтированного элемента паропровода на ремонтной площадке ТЭЦ или на ремонтном предприятии подвижным индуктором;
- нагрев в специальной печи завода или ремонтного предприятия демонтированного элемента паропровода.

При разработке этих способов ВТО были проведены исследования тепловых процессов при нагреве трубопроводов с помощью индукторов, выполнены расчеты необходимой мощности источника напряжения, скорости перемещения индуктора и других факторов.

На рис. 3.9 представлена схема устройства для проведения ВТО участка трубопровода с помощью подвижного индуктора.

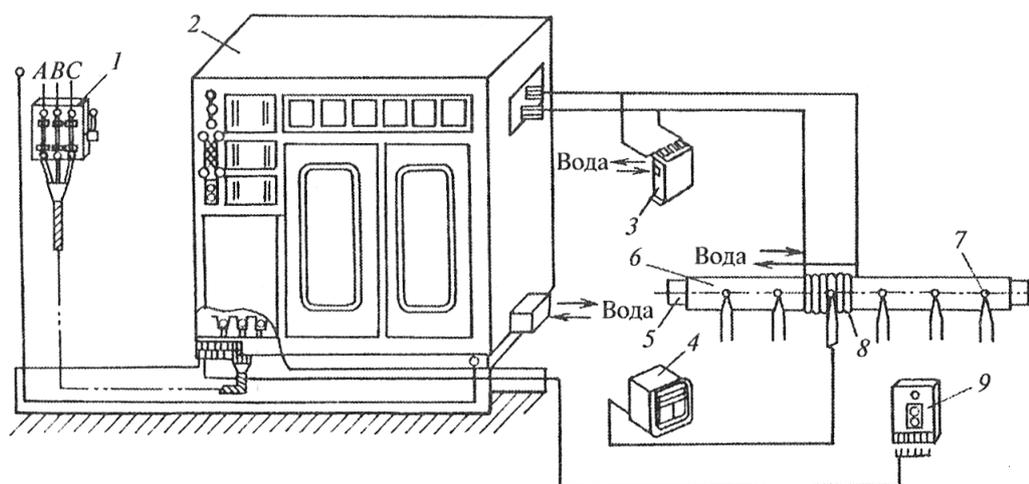


Рисунок 3.9. Схема устройства для проведения ВТО паропровода:
 1 – рубильник; 2 – тиристорный преобразователь; 3 – конденсатор; 4 – прибор для контроля температуры; 5 – трубопровод; 6 – слой асбеста; 7 – термопара; 8 – индуктор; 9 – пульт управления

Восстановительная термообработка теплоэнергетического оборудования проводится в соответствии со стандартом организации СО 153-34.17.459-2003.

Восстановление ресурса металла роторов. Одним из эффективных способов восстановления ресурса металла роторов турбин является снятие поврежденного поверхностного слоя. Использование этого способа целесообразно в зонах концентрации напряжений, где под воздействием эксплуатационных нагрузок (статических и циклических) существует наибольшая вероятность зарождения трещин. Однако для реализации этого способа необходимо экспериментальное обоснование технологии определения оптимальной толщины снимаемых слоев поврежденного металла.

Исследования, выполненные сотрудниками ВТИ, показали, что основное накопление повреждений в металле длительно работающих роторов происходит в поверхностном слое толщиной до 2 мм. В этом слое изменение структурно-механического состояния металла происходит в зависимости от расстояния от поверхности ротора. Это подтверждено результатами определения микротвердости металла на разном удалении от поверхности. Было установлено, что на глубине 20 мкм микротвердость существенно ниже, чем на глубине 50 мкм, что связано с разупрочнением металла. Однако при удалении от поверхности ротора на глубину более 50 мкм происходит еще большее снижение микротвердости на расстоянии примерно 2000 мкм, что также свидетельствует о разупрочнении металла.

Предположим, что восстановить ресурс металла можно снятием поверхностного слоя толщиной 2 мм, но снятие такого слоя может отрицательно сказаться на прочности конструкции в целом. Поэтому целесообразно периодически снимать более тонкий слой металла, что и было подтверждено экспериментально сотрудниками МЭИ(ТУ). Эксперименты, выполненные на дисковых моделях из роторной стали, показали, что при знакопеременном термоциклическом нагружении при температуре 300–500°С образование трещин в концентраторе напряжений наблюдалось при 233 теплосмен. При периодическом трехкратном удалении слоя металла толщиной 150–200 мкм через каждые 100 циклов образование трещин не наблюдалось. После третьего удаления слоя диск нагружали до образования трещин. Продолжительность последнего этапа нагружения составила 206 циклов. Таким образом, при поэтапном трехкратном удалении поверхностного слоя модель выдержала 300 циклов и еще дополнительно 206 циклов нагружения, т.е. произошло почти двухкратное повышение долговечности роторной стали. Это можно объяснить тем, что при периодическом снятии тонкого поверхностного слоя толщиной 100 – 200 мкм разупрочненная зона постепенно смещается вглубь детали.

Снятие поверхностного слоя целесообразно проводить в период исчерпания паркового ресурса. В результате удаления тонкого поврежденного поверхностного слоя происходит частичное восстановление ресурса, так как замедляется стадия образования трещины в металле.

Такой способ восстановления ресурса металла роторов не только эффективен, но и не требует больших дополнительных затрат, поскольку при дефектоскопическом контроле удаляют слой окалины и поверхностный слой металла толщиной 300–500 мкм с помощью хонинговальной головки. В результате этой операции происходит также и частичное восстановление ресурса металла.

Установлено, что снятие тонкого поверхностного слоя целесообразно проводить в следующих потенциально опасных зонах ротора: тепловых канавках концевых, промежуточных и диафрагменных уплотнений на участках ротора, где температура металла превышает 450°, а также на галтелях дисков, работающих в той же области температур.

Восстановление ресурса металла лопаток паровых турбин. Металл лопаток паровых турбин должен длительное время работать в тяжелых условиях под воздействием рабочих нагрузок и пара при температуре около 250 °С. На рис. 3.10 представлена схема разреза ступени паровой турбины, которая состоит из сопловой решетки 2, закрепленной в диафрагме 7, и рабочих лопаток 3, закрепленных на диске 4. Диафрагма установлена в корпусе 5 и имеет уплот-

нение 6 для уменьшения потерь давления пара. Диск 4 с рабочими лопатками 3 установлен на валу 7.

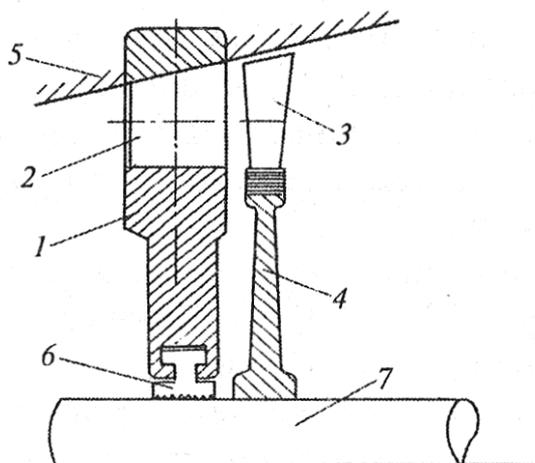


Рисунок 3.10. Схема разреза ступени паровой турбины:

1 – диафрагма, 2 – сопловая решетка, 3 – рабочая лопатка, 4 – диск, 5 – корпус, 6 – уплотнение, 7 – вал

В сопловых решетках каждой из диафрагм поток пара ускоряется в сопловых каналах и приобретает необходимое направление для безударного входа в каналы между рабочими лопатками. Усилия, развиваемые потоками пара на рабочих лопатках, вращают диск и связанный с ним вал.

Для изготовления лопаток турбин широко используются стали, легированные хромом и молибденом: 12Х13, 15Х11МФ и др. Эти стали могут работать при высоких температурах, обладают высокими механическими свойствами, коррозионной стойкостью и окалиностойкостью.

Типичными эксплуатационными повреждениями рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин являются эрозионное изнашивание в сочетании с усталостью металла входных кромок лопаток и с отрывом стеллитовых пластинок. Эти пластинки предназначены для защиты кромок лопаток, так как стеллит обладает высокими твердостью (НВ450) и коррозионно-эрозионной стойкостью.

Восстановление металла изношенных лопаток обычно выполняют нанесением высоконикелевой аустенитной наплавки без последующей термической обработки с обязательной приваркой стеллитовых пластинок. Такой способ восстановления металла лопаток наряду со своими достоинствами имеет существенный недостаток, заключающийся в образовании сварного соединения с резкой химической, структурной и механической неоднородностью металла в отдельных зонах. Это может явиться причиной преждевременного повреждения металла и выхода восстановленных лопаток из строя.

В связи с этим сотрудниками ВТИ была предложена новая комбинированная технология восстановления лопаток турбин за счет получения однородного по структурному классу металла высокохромистой стали на всем протяжении кромки. Эта технология состоит в приварке вставок из высокохромистой стали к лопатке и последующем нанесении высокохромистой наплавки на входную кромку (рис.3.11).

Термическая обработка лопатки состоит в высоком отпуске при температуре 670–700°C. Отпуск проводится в электропечи шахтного типа, где лопатки подвешивают вертикально лопастями вниз. Скорость равномерного нагрева лопаток при отпуске до необходимой температуры составляет 200–250°C/ч. После выдержки в течение 0,5 ч лопатки охлаждаются в отключенной электропечи до температуры 20–30°C. Высокий отпуск проводится после наплавки и приварки стеллитовых пластинок.

Затем поверхность лопаток обрабатывается механическим способом шлифовальными машинками до металлического блеска. Поверхность угловых швов в местах приварки стеллитовых пластинок также обрабатывается шлифовальной машинкой. Такая технология восстановления металла лопаток обеспечивает более высокую эрозионную и усталостную прочность за счет получения на всей протяженности кромки лопатки однородной по структурному классу высокохромистой мартенситно-ферритной стали. Эта технология позволяет восстановить металл, поврежденный на глубине 10 мм и более.

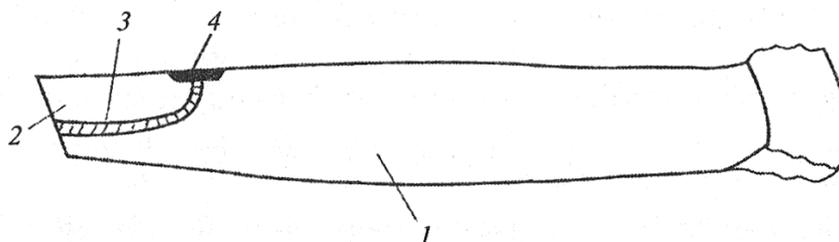


Рисунок 3.11. Схема восстановления металла лопатки комбинированным способом:

1 – восстанавливаемая лопатка; 2 — привариваемая вставка; 3 – аустенитный высоконикелевый шов; 4 – многослойная высокохромистая наплавка

Защита металла от коррозии и эрозии. Существуют различные способы борьбы с коррозией и эрозией металла. В основе этих способов лежат следующие мероприятия:

– использование сталей высокой коррозионной и эрозионной стойкости, что может быть достигнуто рациональным легированием и необходимыми режимами термической обработки;

- обеспечение правильного топочного, топливного и водно-химического режимов;
- применение защитных покрытий;
- введение в коррозионную среду замедлителей коррозии (ингибиторов);
- химико-термическая обработка.

Топочный процесс в котлах должен быть организован так, чтобы сжигались полностью активные газы в факеле и устранялись зоны с восстановительной атмосферой около экранов. Путем снижения локальных тепловых потоков можно уменьшить интенсивность выпадения отложений оксидов железа. Водно-химические мероприятия улучшают качество питательной воды, т.е. снижают количество отложений оксидов железа, которые удаляются с поверхностей труб периодической химической промывкой.

Эффективным средством защиты от коррозии является легирование сталей, так как хром, кремний и алюминий окисляются более интенсивно, чем железо и образуют защитные окисные пленки. Путем непрерывной диффузии легирующих элементов к поверхностному слою, где они взаимодействуют с кислородом, непрерывно поддерживается защитное свойство пленки.

Для защиты металла от коррозии широко используются защитные покрытия.

Металлические покрытия. Электрохимический способ нанесения гальванических покрытий обеспечивает получение тонкого защитного слоя из никеля, цинка, олова и других металлов, хорошо сопротивляющихся коррозии. Такие покрытия наносят методом погружения деталей в расплав защитного металла. Перед нанесением покрытия проводится очистка поверхности изделий от загрязнений, а затем поверхность обрабатывают механическим, химическим и электрохимическим способами. Металл покрытий расплывается в жидкой фазе в виде капель и осаждается на поверхность изделий.

Широко распространен способ нанесения покрытий газотермическим, плазменным, детонационным и вакуумным напылением.

В целях увеличения коррозионно-эрозионной стойкости деталей часто наносят покрытия в плазме из нитрида титана. Тонкий слой (5–10 мкм) из таких покрытий эффективно защищает, например лопатки паровых турбин. Перед нанесением покрытия поверхность лопатки механически обрабатывается и очищается от загрязнений в ультразвуковой ванне. Затем производится удаление физически и химически адсорбированных газов путем ионного травления. По-

сле этого происходит формирование покрытий при взаимодействии поверхности детали с ускоренными в электрохимическом поле ионами испаряемого материала (титана) в среде плазмообразующего и реакционного газов.

Полимерные покрытия наносят газоплазменным, вихревым и электростатическим напылением. В качестве полимерных материалов используют полиэтилен, поливинилхлорид, фторопласты и т.п. Температура при напылении составляет 650–700 °С. При этой температуре порошкообразный полимер размягчается и при ударе о поверхность детали, предварительно нагретой до температуры плавления полимера, сцепляется с ней, образуя сплошное полимерное покрытие.

Ингибиторы используют для замедления коррозии металла при хранении и транспортировании тепломеханического оборудования. В качестве ингибитора может быть использован гидразин N_2H_4 , который способствует образованию прочной магнетитовой защитной пленки Fe_3O_4 .

При очистке котлов и теплообменной аппаратуры от накипи применяют кислотную промывку. Например, при солянокислотной промывке используют ингибиторы, состоящие из смеси высших пиридиновых оснований.

Химико-термическая обработка деталей позволяет изменить химический и фазовый составы поверхностного слоя металла за счет диффузии элементов, увеличивающих коррозионную стойкость. Например, диффузионное насыщение поверхностного слоя цинком (цинкование), алюминием (алитирование) защищает детали от атмосферной коррозии.

Электронный учебно-методический комплекс

Практический раздел

МАТЕРИАЛЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

2. Темы практических занятий

Минск 2016 г.

2 ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Тематика практических занятий

1. Обзор и анализ нормативных документов, регламентирующих выбор конструкционных материалов теплоэнергетического оборудования ТЭС.
2. Оценка свариваемости углеродистых и низколегированных сталей путем определения эквивалента углерода.
3. Расчет на прочность основных элементов котлов, сосудов и трубопроводов. Обзор нормативных документов.
4. Определение допускаемых напряжений, расчетной температуры и расчетного давления при проведении расчетов на прочность трубопроводов, котлов и сосудов.
5. Расчет толщины стенки прямых труб и гибов.
6. Расчет толщины стенки цилиндрических частей барабанов и камер.
7. Поверочный расчет на усталость элементов теплоэнергетического оборудования ТЭС.
8. Определение паркового ресурса трубопроводов.
9. Оценка характеристик ползучести, длительной прочности и термоусталости роторов.
10. Расчет ресурса и остаточного ресурса диска в условиях коррозионного растрескивания.
11. Расчет на длительную прочность рабочих лопаток паровых и газовых турбин.
12. Расчет удлинения лопатки при ползучести.
13. Расчет температурных напряжений в элементах корпуса.
14. Определение объема и периодичности контроля литых деталей турбин высокого и сверхкритического давления с трещинами.

При выполнении практических заданий студенты могут пользоваться методическими материалами к практическим занятиям из разработанного автором учебно-методического пособия: Контроль и диагностика теплового оборудования ТЭС: учебно-методическое пособие для студентов дневной формы обучения специальности 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции» / А.Г.Герасимова, Н.Б. Карницкий. – Минск: БНТУ, 2009. – 123с.

Электронный учебно-методический комплекс

Раздел контроля знаний

МАТЕРИАЛЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

3. Вопросы к зачету, контрольные тесты

Минск 2016 г.

3 ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ, КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

3.1 ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Особенности материаловедения в теплоэнергетике и его задачи.
2. Основные критерии выбора материалов для оборудования ТЭС.
3. Понятия о металлах, их классификация и свойства.
4. Основные типы кристаллических решеток и дефекты кристаллического строения.
5. Понятия о диаграммах состояния сплавов и их построение.
6. Классификация сталей.
7. Углеродистые стали. Классификация, маркировка и область применения.
8. Чугуны. Классификация, маркировка, область применения.
9. Влияние легирующих элементов на свойства сталей.
10. Классификация и маркировка легированных сталей.
11. Основные виды и технология термической обработки сталей.
12. Химико-термическая обработка.
13. Термомеханическая обработка.
14. Цветные металлы и сплавы в теплоэнергетике.
15. Антифрикционные подшипниковые сплавы.
16. Условия работы металла тепломеханического оборудования ТЭС под воздействием конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов.
17. Основные типы эксплуатационных повреждений металла в теплоэнергетике и причины их возникновения.
18. Изменения, происходящие в структуре и свойствах металла в процессе эксплуатации.
19. Требования, предъявляемые к металлу оборудования ТЭС.
20. Основные служебные свойства металлов тепломеханического оборудования ТЭС.
21. Понятие жаропрочности и ее основные характеристики.
22. Основные факторы, влияющие на жаростойкость металлов.
23. Основные виды коррозии металла энергетического оборудования.
24. Виды эрозионного износа металла оборудования ТЭС.
25. Конструкционная прочность металла и ее критерии.
26. Теплостойкие стали.
27. Жаропрочные стали и сплавы.
28. Жаростойкие стали и сплавы.

29. Коррозионно-стойкие стали и сплавы.
30. Общие понятия о ресурсе эксплуатации оборудования.
31. Обеспечение ресурса на стадии проектно-конструкторских работ.
32. Обеспечение ресурса на стадиях изготовления и монтажа оборудования и трубопроводов.
33. Обеспечение ресурса на стадии эксплуатации.
34. Прогнозирование остаточного ресурса металла по температурным параметрам. Зависимость Ларсона-Миллера.
35. Нормы и методы расчета на прочность металла оборудования ТЭС.
36. Прогнозирование остаточного ресурса металла по геометрическим параметрам.
37. Схема мероприятий при продлении ресурса эксплуатации оборудования и трубопроводов.
38. Восстановление ресурса металла паропроводов термической обработкой.
39. Восстановление ресурса металла роторов паровых турбин.
40. Восстановление ресурса металла лопаток паровых турбин.
41. Защита металла от коррозии и эрозии.

3.2 КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

МАТЕРИАЛЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №1

<p>1. Основой для выбора конструкционных материалов являются:</p> <ul style="list-style-type: none">а) физические свойства;б) химические свойства;в) механические свойства;г) технологические свойства.	<p>2. Расчет конструкции на прочность проводят по:</p> <ul style="list-style-type: none">а) допустимым напряжениям;б) пределу текучести;в) относительному удлинению;г) ударной вязкости.
<p>3. Способность материала сопротивляться коррозии при высоких температурах называется:</p> <ul style="list-style-type: none">а) жаропрочность;б) окислостойкость;в) длительная прочность;г) жаростойкость.	<p>4. Неоднородность химического состава в различных зонах детали называется:</p> <ul style="list-style-type: none">а) раковина;б) магнетит;в) ликвация;г) мартенсит.
<p>5. Различие свойств в кристалле металла в зависимости от направления называется:</p> <ul style="list-style-type: none">а) аллотропия;б) полиморфизм;в) анизотропия;г) политропия.	<p>6. К низкоуглеродистым сталям относятся, стали с содержанием углерода:</p> <ul style="list-style-type: none">а) до 1,0 %;б) до 0,25%;в) от 0,25 до 0,5%;г) до 2,14%.
<p>7. Рабочая температура углеродистых качественных сталей:</p> <ul style="list-style-type: none">а) до 300°C;б) до 600°C;в) до 450°C;г) до 150°C.	<p>8. Стали, легированные большим количеством легирующих элементов с повышенным содержанием углерода относятся к:</p> <ul style="list-style-type: none">а) перлитному классу;б) мартенситному классу;в) аустенитному классу;г) ферритному классу.
<p>9. Какой материал наиболее предпочтителен для изготовления трубок поверхностей нагрева регенеративных подогревателей низкого давления:</p> <ul style="list-style-type: none">а) 12ХМ;б) 16ГНМА;в) ЛО-62-1;г) СЧ15-32.	<p>10. Какой из видов коррозии можно определить методом шумодиагностики :</p> <ul style="list-style-type: none">а) язвенную;б) стояночную;в) межкристаллитную;г) подшламовую.

МАТЕРИАЛЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №2

<p>1. Удаление из сталей кислорода в процессе изготовления:</p> <p>а) дегазация; б) раскисление; в) цементация; г) рекристаллизация.</p>	<p>2. Основными критериями конструкционной прочности металлов являются:</p> <p>а) надежность; б) жаростойкость; в) временное сопротивление; г) долговечность.</p>
<p>3. Способность одного и того же химического элемента при различной температуре иметь различную кристаллическую структуру называется:</p> <p>а) анизотропия; б) полиморфизм; в) аллотропия; г) политропия.</p>	<p>4. Основные механические свойства металлов и сплавов определяют путем испытаний на:</p> <p>а) ударную вязкость; б) твердость; в) длительную прочность; г) растяжение.</p>
<p>5. Сталь 12ХМ относится к классу:</p> <p>а) ферритному; б) мартенситному; в) перлитному; г) аустенитному.</p>	<p>6. Для повышения коррозионной стойкости стали легируют:</p> <p>а) никелем; б) хромом; в) алюминием; г) вольфрамом.</p>
<p>7. Какие материалы используются для изготовления лопаток паровых турбин ЧНД:</p> <p>а) Вст4кп5; б) ВТ22; в) 20Х13; г) 10Х18Н12Т.</p>	<p>8. Сплав меди с цинком называется:</p> <p>а) бронза; б) латунь; в) магнетит; г) силумин.</p>
<p>9. Самопроизвольное затухающее падение напряжения в материале с течением времени называется:</p> <p>а) рекристаллизация; б) нормализация; в) релаксация; г) отдых.</p>	<p>10. Парковый ресурс турбин определяется ресурсом:</p> <p>а) рабочих лопаток; б) роторов высокого давления; в) роторов низкого давления; г) направляющего аппарата.</p>

Электронный учебно-методический комплекс

Вспомогательный раздел

МАТЕРИАЛЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

4. Учебная программа

Минск 2016 г.

4 УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

Белорусский национальный технический университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе,
довузовской подготовке,
социальным вопросам и спорту
Белорусского национального
технического университета

 О.К. Гусев

21.06.2016г.

Регистрационный № УД- 3942-79/уч.

МАТЕРИАЛЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Учебная программа учреждения высшего образования

по учебной дисциплине для специальности

1- 43 01 04 «Тепловые электрические станции»

Минск 2016

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта
ОСВО 1-43 01 04 – 2013

СОСТАВИТЕЛЬ:

А.Г.Герасимова, доцент кафедры «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук, доцент

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

В.А. Седнин, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и тепло-техника» Белорусского национального технического университета, доктор технических наук, профессор;

М.В. Кудин, начальник научно-исследовательской части гражданской авиации УО «Белорусская государственная академия авиации», кандидат технических наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета
(протокол № 10 от 08. 04. 2016 г.)

Заведующий кафедрой



Н.Б.Карницкий

Методической комиссией энергетического факультета Белорусского национального технического университета
(протокол № 8 от 28.04. 2016 г.)

Председатель методической комиссии



Е.Г.Пономаренко

Научно-методическим советом Белорусского национального технического университета (протокол № 5 секции №1 от 31.05. 2016г.)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа «Материалы оборудования ТЭС» разработана для специальности 1- 43 01 04 «Тепловые электрические станции».

Целью преподавания дисциплины «Материалы оборудования ТЭС» является приобретение студентами знаний о конструкционных материалах, используемых для изготовления элементов теплоэнергетического оборудования, правильный выбор и эксплуатация которых позволяет решать задачи увеличения надежности, долговечности и экономичности теплоэнергетического оборудования ТЭС. Основной задачей преподавания дисциплины является подготовка специалистов для проектно-конструкторской, исследовательской деятельности и эксплуатационной работы на всех типах ТЭС.

Особое внимание в программе уделено изучению современных требований к выбору материалов, условиям эксплуатации и основным служебным свойствам теплоэнергетического оборудования ТЭС, вопросам оценки и продления ресурса металла оборудования.

Учебная дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении таких дисциплин, как: «Физика», «Материаловедение», «Вспомогательное оборудование ТЭС», «Турбины ТЭС» и «Парогенераторы ТЭС».

Знания и умения, полученные студентами при изучении данной дисциплины, необходимы при освоении последующих специальных дисциплин и дисциплин специализации, связанных с проектированием, монтажом, ремонтом и диагностикой теплоэнергетического оборудования тепловых электростанций.

В результате изучения дисциплины «Материалы оборудования ТЭС » студент должен:

знать:

- классификацию сталей и сплавов и принципы маркировки сталей в РФ и по международному стандарту;
- материалы, применяемые при изготовлении элементов оборудования ТЭС;
- воздействие эксплуатационных механических и тепловых нагрузок на стали для тепломеханического оборудования ТЭС;
- воздействие эксплуатационных механических и тепловых нагрузок на стали для тепломеханического оборудования ТЭС;
- основные служебные свойства конструкционных материалов в теплоэнергетике.
- механические свойства и структуру сталей, и изменение их в процессе изготовления, монтажа, ремонта и эксплуатации оборудования.

уметь:

- выполнять комплекс нормативно-технических требований, охватывающих материалы оборудования ТЭС;
- выбрать материал элемента оборудования для данных конкретных условий работы оборудования;
- определить комплекс необходимых свойств материала, обеспечивающих надежную работу оборудования в заданных условиях;

- оценить конструкционную прочность методами механики разрушения.

владеть:

- навыками расчетов на прочность основных элементов трубопроводов, колов и сосудов, работающих под давлением;
- методиками определения остаточного ресурса основных элементов турбин, трубопроводов, колов и сосудов, работающих под давлением.

Освоение данной учебной дисциплины обеспечивает формирование следующих компетенций:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

СЛК-6. Уметь работать в коллективе.

ПК-20. Готовить доклады, материалы к презентациям.

ПК-24. Анализировать тенденции развития техники и технологий.

ПК-26. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективам развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

ПК-27. Работать с научной, технической и патентной литературой.

Согласно учебным планам на изучение учебной дисциплины отведено:

- для очной формы получения высшего образования всего 50 ч., из них аудиторных - 28 часов;

- для заочной формы получения высшего образования всего 50 ч., из них аудиторных - 12 часов.

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий приведено ниже.

Таблица 1.

Очная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации
4	8	14	-	14	зачет

Таблица 2.

Заочная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации
5	9	10	-	2	зачет

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

Тема 1.1. Металловедение и его особенности в теплоэнергетике. Общие сведения о металлах и сплавах

Металловедение – наука о металлах. Особенности металловедения в теплоэнергетике и его задачи. Конструкционная прочность. Общие принципы выбора материалов.

Понятия о металлах, их классификации и свойствах. Энергетическое состояние металлов. Основные типы кристаллических решеток. Анизотропия в кристаллах. Полиморфизм металлов. Дефекты кристаллического строения. Формирование структуры металла при кристаллизации. Методы исследования строения металлов и сплавов.

Понятие о металлических сплавах. Виды двойных сплавов. Понятия о диаграммах состояния сплавов и их построение. Понятия о диаграммах состояния сплавов и фазах. Основные типы диаграмм состояния двойных сплавов. Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния.

Тема 1.2. Механические свойства металлов и методы их определения

Общие понятия о нагрузках, напряжениях и деформациях. Механические свойства металлов и классификация методов механических испытаний. Механические свойства, определяемые при статическом нагружении. Испытания на растяжение. Испытания на твердость. Испытания на трещиностойкость. Механические свойства, определяемые при динамическом нагружении. Испытания на ударную вязкость. Испытания на хладноломкость и критическую температуру хрупкости. Механические свойства, определяемые при циклическом нагружении. Испытания на усталость. Разрушение при усталости. Безобразцовый метод оценки механических свойств металлов. Влияние нагрева на механические свойства металлов.

Тема 1.3. Элементы теории и технологии термической, химико-термической и термомеханической обработок металла

Основные превращения в стали при нагреве и охлаждении в области критических точек. Изотермический распад аустенита. Превращения в аустените при непрерывном охлаждении. Мартенситное превращение. Основные виды и технология термической обработки стали. Химико-термическая обработка. Термомеханическая обработка.

Раздел II. МЕТАЛЛЫ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ИХ ОСНОВНЫЕ СЛУЖЕБНЫЕ СВОЙСТВА

Тема 2.1. Условия работы и основные служебные свойства металлов в теплоэнергетике

Условия работы металла в теплоэнергетике под воздействием конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов. Основные типы эксплуатационных повреждений металла и причины их возникновения. Изменения, происходящие в структуре и механических свойствах металла в процессе эксплуатации. Требования, предъявляемые к металлу в теплоэнергетике.

Тема 2.2. Основные служебные свойства металлов в теплоэнергетике

Основные служебные свойства металлов в теплоэнергетике: Жаропрочность. Основные критерии жаропрочности: ползучесть, длительная прочность и релаксация напряжений. Металловедческие факторы, влияющие на жаропрочность. Жаростойкость. Факторы, влияющие на жаростойкость.

Коррозионно-эрозионная стойкость. Общие сведения о коррозии и эрозии металла. Основные типы коррозии металла теплоэнергетического оборудования. Виды эрозии теплоэнергетического оборудования. Конструкционная прочность металла и ее критерии.

Тема 2.3. Углеродистые стали и чугуны в теплоэнергетике

Классификация и маркировка углеродистых сталей. Классификация сталей по международному стандарту. Реестр соответствия марок сталей разных стран.

Углеродистые стали. Стандарты на углеродистую сталь для изготовления труб, поковок, листов и сосудов. Влияние производства стали на механические свойства и качество готовых изделий. Углеродистые стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные. Область их применения.

Свариваемость углеродистых сталей. Оценка свариваемости углеродистых сталей.

Разновидности чугунов: серый, ковкий и высокопрочный их свойства, характеристики и область применения. Чугунные отливки, применяемые для изготовления элементов котлов, сосудов и трубопроводов и турбин.

Тема 2.4. Легированные стали и сплавы, стойкие к эксплуатационным воздействиям в теплоэнергетике

Понятие о легировании сталей. Классификация легированных сталей. Низколегированные стали. Влияние различных легирующих элементов на свойства стали. Стандарты на легированные стали применяемые в теплоэнергетике.

Низколегированные кремнемарганцовистые стали. Теплоустойчивые стали. Молибденовые, хромомолибденовые и хромомолибденванадиевые стали, их достоинства и недостатки. Жаропрочные стали и сплавы. Жаростойкие стали и сплавы. Коррозионно-стойкие стали и сплавы.

Тема 2.5. Цветные металлы и сплавы в теплоэнергетике

Цветные металлы и сплавы в энергетике. Медь и ее сплавы. Основные свойства меди. Сплавы меди с цинком, или латуни. Бронзы.

Алюминий и его сплавы. Основные свойства алюминия и его сплавов. Классификация алюминиевых сплавов. Область применения.

Титан и его сплавы. Основные свойства титана и его сплавов. Литейные, деформируемые и порошковые титановые сплавы. Область применения титана и его сплавов в теплоэнергетике. Антифрикционные подшипниковые сплавы.

Раздел III . РЕСУРС МЕТАЛЛА ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ ТЭС И МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Тема 3.1. Ресурс металла оборудования и трубопроводов ТЭС

Общие понятия о ресурсе эксплуатации оборудования и трубопроводов ТЭС. Обеспечение ресурса металла на стадиях проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации энергоустановок. Обеспечение ресурса на стадии проектно-конструкторских работ. Обеспечение ресурса на стадиях изготовления и монтажа оборудования и трубопроводов. Обеспечение ресурса на стадии эксплуатации. Прогнозирование остаточного ресурса. Характеристики жаропрочности как параметры диагностики ресурса металла. Продление ресурса эксплуатации оборудования и трубопроводов

Восстановление ресурса металла паропроводов термической обработкой. Восстановление ресурса металла роторов. Восстановление ресурса металла лопаток паровых турбин. Защита металла от коррозии и эрозии.

Тема 3.2. Расчет на прочность элементов котлов, сосудов и трубопроводов

Нормативный метод расчета. Коэффициенты запаса прочности и допускаемые напряжения. Расчетные давления и температура. Расчет на прочность труб поверхностей нагрева и трубопроводов, нагруженных внутренним давлением. Расчет на прочность барабанов и камер. Расчет на прочность тройников и конических переходов. Расчет на прочность выпуклых, плоских днищ и заглушек.

Тема 3.3. Оценка конструкционной прочности деталей турбин

Критерии конструкционной прочности и надежности турбомашин. Оценка прочности лопаток турбин. Расчет на длительную прочность рабочих лопаток паровых и газовых турбин. Расчет удлинения лопатки при ползучести. Термоусталость рабочих и направляющих лопаток.

Прочность дисков и роторов. Оценка ползучести, длительной прочности и термоусталости роторов. Расчет ресурса и остаточного ресурса диска в условиях коррозионного растрескивания.

Прочность элементов статора. Методы расчета напряжений и деформаций корпусов. Расчет температурных напряжений в элементах корпуса.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
очная форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	8 семестр							
1.	Общие сведения о металлах и сплавах							
1.1	Металловедение и его особенности в теплоэнергетике. Общие сведения о металлах и сплавах	1						
1.2	Механические свойства металлов и методы их определения	1						Контрольная работа
1.3	Элементы теории и технологии термической, химико-термической и термомеханической обработок металла	1						Реферат
2.	Металлы в теплоэнергетике и их основные служебные свойства							
2.1	Условия работы и основные служебные свойства металлов в теплоэнергетике	1						
2.2	Основные служебные свойства металлов в теплоэнергетике	2						Контрольная работа
2.3	Углеродистые стали и чугуны в теплоэнергетике	2	2					
2.4	Легированные стали и сплавы, стойкие к эксплуатационным воздействиям в теплоэнергетике	2						
2.5	Цветные металлы и сплавы в теплоэнергетике	1						
3.	Ресурс металла оборудования и трубопроводов ТЭС и методы расчета							Контрольная

9

	на прочность теплоэнергетического оборудования							работа
3.1	Ресурс металла оборудования и трубопроводов ТЭС	1	2					Реферат
3.2	Расчет на прочность элементов котлов, сосудов и трубопроводов	1	6					Контрольная работа
3.3	Оценка конструкционной прочности деталей турбин	1	4					Контрольная работа
	Итого за семестр	14	14					зачет
	Всего аудиторных часов		28					

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
заочная форма получения высшего образования¹

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	8 семестр							
1.	Общие сведения о металлах и сплавах							
1.1	Металловедение и его особенности в теплоэнергетике. Общие сведения о металлах и сплавах	1						
1.2	Механические свойства металлов и методы их определения							Контрольная работа

¹ Темы учебного материала, не указанные в Учебно-методической карте, отводятся на самостоятельное изучение студента.

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Список литературы

Основная литература

1. Матюнин, В.М. *Металловедение в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов* / В.М. Матюнин. – М.: МЭИ, 2008. – 328 с.
2. Кочетов, А.Д. *Курс лекций по материаловедению в теплоэнергетике* / А.Д. Кочетов, А.А. Гончаров. – М.: МЭИ., 2004. – 107с.
3. Солнцев, Ю.П. *Материаловедение: Учебник для вузов* / Ю.П.Солнцев, Е.И.Пряхин, Ф. Войкут. – М.: МИСИС, 1999. – 600с.
4. Антикайн, П.А. *Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов* / П.А.Антикайн. – 4-е изд. – М.: Энергоиздат, 2001. – 440с.
5. Масленков, С.Б. *Стали и сплавы для высоких температур: Справочное изд. в 2-х кн.* / С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова. – М.: Металлургия, 1991. – 832с.

Дополнительная литература

5. *Теплоэнергетика и теплотехника: Общие вопросы: Справочная серия: В 4 кн.* / под общ. ред. чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – 4-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007 – 528 с.: ил. – Кн.1.
6. Костюк, А.Г. *Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов* / А.Г.Костюк. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476с.

Средства диагностики результатов учебной деятельности

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале в соответствии с критериями, утвержденными Министерством образования Республики Беларусь.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- устный и письменный опрос во время практических занятий;
- проведение текущих контрольных работ (заданий) по отдельным темам;
- защита выполненных в рамках самостоятельной работы индивидуальных заданий;
- собеседование при проведении индивидуальных и групповых консультаций;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;
- сдача зачета по дисциплине.

Перечень тем практических занятий

1. Оценка свариваемости углеродистых и низколегированных сталей путем определения эквивалента углерода.

2. Расчет на прочность основных элементов котлов, сосудов и трубопроводов. Обзор нормативных документов.
3. Определение допускаемых напряжений, расчетной температуры и расчетного давления при проведении расчетов на прочность трубопроводов, котлов и сосудов.
4. Расчет толщины стенки прямых труб и гибов.
5. Расчет толщины стенки цилиндрических частей барабанов и камер.
6. Проверочный расчет на усталость.
7. Определение паркового ресурса трубопроводов.
8. Оценка ползучести, длительной прочности и термоусталости роторов.
9. Расчет ресурса и остаточного ресурса диска в условиях коррозионного растрескивания.
10. Расчет на длительную прочность рабочих лопаток паровых и газовых турбин.
11. Расчет удлинения лопатки при ползучести.
12. Расчет температурных напряжений в элементах корпуса.

Тематика рефератов

1. Основные требования к конструкции сварных соединений и технологии сварки.
2. Сварочные материалы и оборудование.
3. Термическая обработка сварных соединений. Основные дефекты и контроль качества сварных соединений.
4. Гибка труб и основные технические требования к гибам.
5. Трубопроводы тепловых электростанций. Изменение структуры и контроль за паропроводами.
6. Эксплуатационная надежность барабанов энергетических котлов.
7. Термоусталость рабочих и направляющих лопаток и роторов турбин.
8. Ползучесть и длительная прочность рабочих лопаток, роторов и элементов корпуса турбомашин.
9. Тепловые расширения паровой турбины.
10. Коррозионный и эрозионный износ в турбомашинах.
11. Трещинообразование и трещиностойкость роторов в условиях коррозионной среды.
12. Анализ причин повреждений котлов, турбин и трубопроводов и некоторые типичные дефекты.
13. Усталость металлов, усталостное разрушение, механизм усталостного разрушения.
14. Хрупкое разрушение элементов котлов, турбин, сосудов и трубопроводов. Факторы, способствующие хрупкому разрушению.

Перечень контрольных вопросов для самостоятельной работы студентов

1. Особенности материаловедения в теплоэнергетике и его задачи.

2. Основные критерии выбора материалов для оборудования ТЭС.
3. Понятия о металлах, их классификация и свойства.
4. Основные типы кристаллических решеток и дефекты кристаллического строения.
5. Понятия о диаграммах состояния сплавов и их построение.
6. Классификация сталей.
7. Углеродистые стали. Классификация, маркировка и область применения.
8. Чугуны. Классификация, маркировка, область применения.
9. Влияние легирующих элементов на свойства сталей.
10. Классификация и маркировка легированных сталей.
11. Основные виды и технология термической обработки сталей.
12. Химико-термическая обработка.
13. Термомеханическая обработка.
14. Цветные металлы и сплавы в теплоэнергетике.
15. Антифрикционные подшипниковые сплавы.
16. Условия работы металла тепломеханического оборудования ТЭС под воздействием конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов.
17. Основные типы эксплуатационных повреждений металла в теплоэнергетике и причины их возникновения.
18. Изменения, происходящие в структуре и свойствах металла в процессе эксплуатации.
19. Требования, предъявляемые к металлу оборудования ТЭС.
20. Основные служебные свойства металлов тепломеханического оборудования ТЭС.
21. Понятие жаропрочности и ее основные характеристики.
22. Основные факторы, влияющие на жаростойкость металлов.
23. Основные виды коррозии металла энергетического оборудования.
24. Виды эрозионного износа металла оборудования ТЭС.
25. Конструкционная прочность металла и ее критерии.
26. Теплостойкие стали.
27. Жаропрочные стали и сплавы.
28. Жаростойкие стали и сплавы.
29. Коррозионно-стойкие стали и сплавы.
30. Общие понятия о ресурсе эксплуатации оборудования.
31. Обеспечение ресурса на стадии проектно-конструкторских работ.
32. Обеспечение ресурса на стадиях изготовления и монтажа оборудования и трубопроводов.
33. Обеспечение ресурса на стадии эксплуатации.
34. Прогнозирование остаточного ресурса металла по температурным параметрам. Зависимость Ларсона-Миллера.
35. Нормы и методы расчета на прочность металла оборудования ТЭС.
36. Прогнозирование остаточного ресурса металла по геометрическим параметрам.

37. Схема мероприятий при продлении ресурса эксплуатации оборудования и трубопроводов.
38. Восстановление ресурса металла паропроводов термической обработкой.
39. Восстановление ресурса металла роторов паровых турбин.
40. Восстановление ресурса металла лопаток паровых турбин.
41. Защита металла от коррозии и эрозии.

**Методические рекомендации по организации и выполнению
самостоятельной работы студентов**

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- решение индивидуальных задач в аудитории во время проведения практических занятий под контролем преподавателя в соответствии с расписанием;
- подготовка рефератов по индивидуальным темам, в том числе с использованием патентных материалов.