

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ  
ПОЛИМЕРОВ»

**Г.Н. Теплухин**  
**А.В. Гропянов**  
**М.Н. Жукова**

# **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Учебное пособие

2-е издание, исправленное и дополненное

Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника»,  
по специальностям 140104 «Промышленная теплоэнергетика» и  
140105 «Энергетика теплотехнологий»

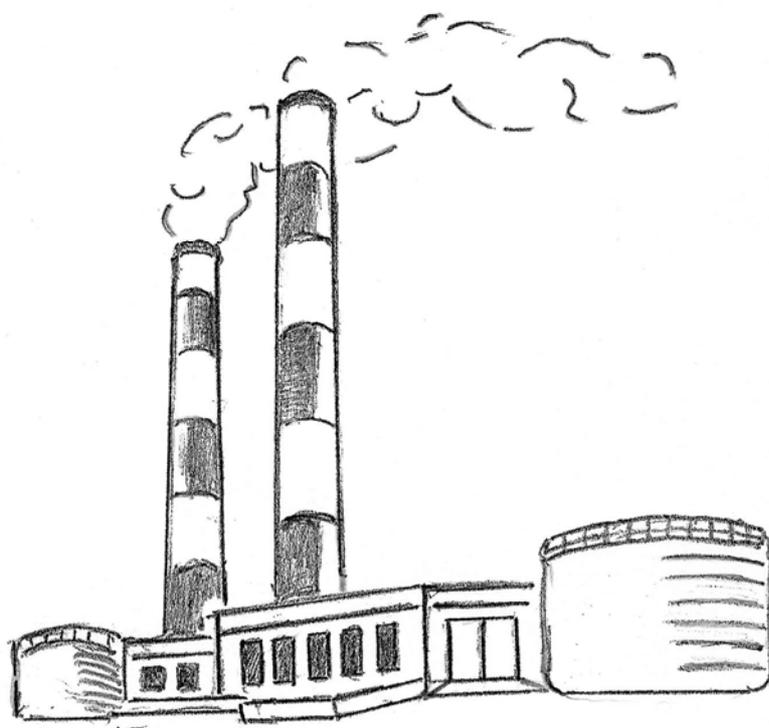
Санкт-Петербург

2011

**Г.Н. ТЕПЛУХИН  
А.В. ГРОПЯНОВ  
М.Н. ЖУКОВА**

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
В ЭНЕРГЕТИКЕ**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург**

**2011**

УДК 676.05-03: 536.495 (075.8)

Т 344

ББК 35.77-03я73

Теплухин Г.Н., Гропянов А.В., Жукова М.Н. Высокотемпературные материалы в энергетике: учебное пособие. – 2-е изд-е, испр. и доп.-/СПбГТУРП.- СПб., 2011.-125 с.: ил. 50.

–ISBN 978-5-91646-37-7

Рассмотрено поведение металлических материалов в условиях высоких температур. Изложены основы оценки повреждаемости, методы испытаний и исследований, влияние технологических факторов на структуру и свойства, вопросы, связанные с конструктивной прочностью металлических материалов. Даны сведения о неметаллических материалах, используемых в условиях высоких температур: огнеупорах, теплоизоляционных и специальных керамических материалах.

Учебное пособие предназначено для студентов направления 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника» дневной формы обучения.

Рецензенты: кафедра исследования структуры и свойств материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (зав. кафедрой, доктор технических наук, профессор Е.Л. Гюлиханданов);  
ведущий инженер государственного унитарного предприятия ЦНИИКМ «Прометей», кандидат технических наук Ю.П. Добренякин.

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

ISBN 978-5-91646-37-7

© Г.Н. Теплухин, А.В. Гропянов,  
М.Н. Жукова, 2011

© Санкт-Петербургский  
государственный технологический  
университет растительных полимеров, 2011

## ВВЕДЕНИЕ

Теплоэнергетическое оборудование работает в сложных условиях, испытывая при этом:

- высокие постоянные и циклически изменяющиеся температуры;
- значительные постоянные и переменные, в том числе циклически изменяющиеся напряжения;
- воздействие среды (водяной пар, перегретый, насыщенный и влажный, радиация), вызывающей химическое, механическое и радиационное повреждение металла.

Воздействие температуры может вызвать окалинообразование, трансформацию структуры металла и деградацию его механических характеристик. Образование окалины на поверхности изделий может привести к уменьшению их сечения, а значит, к потере прочностных характеристик теплоагрегатов в целом. Поэтому окалинообразование не допускается.

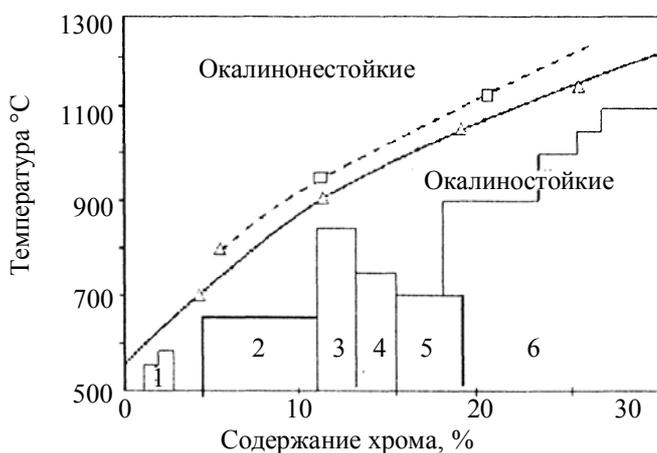


Рис. 1. Кривая окалиностойкости:

□ - - □ - - □ - влияние никеля на окалиностойкость хромистых сталей;

1 – низколегированные теплоустойчивые стали;

2 – хромистые теплоустойчивые стали;

3 – жаропрочные стали с интерметаллидным упрочнением;

4 – жаропрочные стали с карбидным упрочнением;

5 – гомогенные жаропрочные стали;

6 – окалиностойкие стали

На рис. 1 приведены температурные области применения легированных теплоустойчивых, жаропрочных и окалиностойких сталей. По рисунку видно, что решающую роль в повышении окалиностойкости играет хром.

Как известно, свойства металлов, длительно работающих при высоких температурах, значительно изменяются:

- обычно снижаются прочность и твердость;
- часто металл становится хрупким;
- интенсивнее протекают коррозионные процессы;
- возникают и развиваются ползучесть, релаксация и т.п.

Изменение напряжений в теплоэнергетическом оборудовании лучше всего рассмотреть на примере работы турбин, и в частности, турбинных лопаток. Силы, действующие в турбине, вызывают в ее деталях различные напряжения – как постоянные, так и переменные по величине и знаку.

Детали испытывают напряжения растяжения, сжатия, изгиба, кручения и т.д.

Рабочие турбинные лопатки находятся под действием центробежных сил, создающих в них переменные по высоте профиля напряжения, максимум которых обычно находится в основании пера, но при наличии бандажа может оказаться и в другом месте пера, например, непосредственно под бандажом (рис. 2).

Под действием газовых сил в лопатках возникают изгибающие напряжения  $\sigma_{изг}$ , максимальные в основании пера. Рабочие лопатки имеют температуру, переменную по высоте и сечению. Величина градиентов

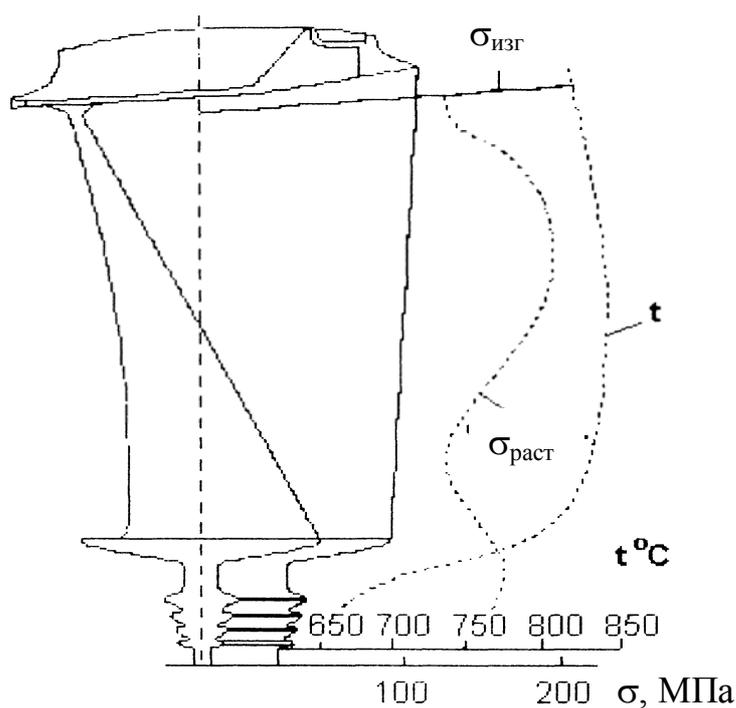


Рис. 2. Распределение напряжений  $\sigma$  и температуры  $t$  по длине рабочей лопатки турбины

температур зависит от параметров потока и геометрических размеров лопаток. Градиенты температур по сечению резко возрастают во время пусков и остановов, создавая заметное поле температурных напряжений. В закрученных лопатках, обеспечивающих лучшие условия обтекания газа и, следовательно, более высокий КПД, растягивающие напряжения от центробежных сил распределены по поперечному сечению неравномерно: в центральной части напряжения – выше значений средних напряжений, у кромок – ниже. Замковая часть лопатки (елочный или Т-образный хвост) имеет значительные концентраторы напряжений; каждый зуб подвергается действию напряжений среза, смятия и изгиба.

Многочисленное воздействие циклически повторяющихся переменных напряжений при изменении температуры может вызвать в металле термическую усталость, снижающую срок его службы.

Водяной пар и вода, непосредственно соприкасающиеся с металлическими деталями, содержат соли, кислоты, щелочи, способные при известных условиях вызвать значительное коррозионное разрушение металла. С повышением температуры интенсивность коррозии весьма заметно возрастает. Особенно сильно разрушается под действием коррозии металл рабочих лопаток турбин.

температур зависит от параметров потока и геометрических размеров лопаток. Градиенты температур по сечению резко возрастают во время пусков и остановов, создавая заметное поле температурных напряжений. В закрученных лопатках, обеспечивающих лучшие условия обтекания газа и, следовательно, более высокий КПД, растягивающие напряжения от центробежных сил распределены по поперечному сечению неравномерно: в центральной части напряжения – выше значений средних напряжений, у кромок – ниже. Замковая часть лопатки (елочный или Т-

Поток пара в зоне низкого давления турбины несет взвешенные и движущиеся с большими скоростями капельки воды, образующейся в процессе расширения и конденсации пара. Непрерывно повторяющиеся удары капель воды по поверхности деталей вызывают эрозионное разрушение металла, которому особенно подвержены рабочие лопатки последних ступеней.

Не все детали турбин и другого энергетического оборудования работают в одинаково тяжелых условиях. Поэтому к вопросу выбора металла для каждой из них следует подходить по-разному. Заметим, что одноименные детали в агрегатах различной мощности работают не в одинаковых условиях. Более того, к деталям однородным, например, к рабочим лопаткам, работающим в одной турбине, предъявляются различные требования в зависимости от ступени лопаток.

В связи с развитием ядерной энергетики приходится учитывать особенности воздействия облучения, например, распухание металла.

Таким образом, важнейшими требованиями к работникам энергетического машиностроения, занимающимся выбором металла, его термической обработкой, испытаниями и оценкой пригодности, являются требования конкретного учета условий работы деталей, анализа характера и величины испытываемых деталями напряжений, оценки температурных условий, влияния среды и т.п.

## **1. ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Под повреждаемостью понимают способность металлов и сплавов понижать служебные характеристики при работе под напряжением в условиях высоких температур, а также при их предшествующей технологической обработке. В связи с этим назовем снижение служебных характеристик материалов, происходящее при изготовлении деталей, технологической повреждаемостью, а в процессе высокотемпературной эксплуатации – эксплуатационной.

О пригодности конструкционных материалов к конкретным условиям работы судят по комплексу свойств, полученных при исследовании образцов, а также по результатам натурных испытаний. Например, пригодность сталей и сплавов для работы в составе тепловых энергетических установок оценивают по комплексу характеристик, полученных при исследовании ползучести, длительной прочности и пластичности, а также релаксации напряжений в интервале возможных рабочих температур, коррозионной стойкости и жаростойкости в рабочих средах, усталости в условиях циклических нагрузок или теплосмен. Для оценки работоспособности конструкционных материалов основных узлов атомных реакторов требуется еще больший объем эксперимента и проведение стендовых испытаний. Это обусловлено тем, что нейтронное облучение ускоряет

процесс ползучести, усиливает временную зависимость длительной прочности, резко снижает кратковременную и длительную пластичность в широком интервале температур, повышает критическую температуру вязко-хрупкого перехода, снижает коррозионную стойкость, вызывает набухание.

Опыт эксплуатации показывает, что несмотря на увеличение объема эксперимента, принятый комплекс исследований недостаточно полно оценивает сопротивляемость изделий разрушению в процессе их службы. Известно много случаев преждевременного разрушения изделий, хотя принятые материалы удовлетворяли всем требованиям.

Исследования разрушений показывают, что в тепловой и ядерной энергетике большинство повреждений не сопровождаются пластической деформацией, и появление их связывают или с преждевременным истощением пластичности в условиях ползучести при высоких температурах, или с развитием процесса межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания.

### **1.1. Технологическая повреждаемость**

Повреждения металла при его обработке, не выявленные при контроле за технологическим процессом, могут существенно понизить работоспособность деталей. В качестве примера рассмотрим изменение состава поверхностного слоя и наклеп.

Обеднение поверхностного слоя штамповок (например, турбинных лопаток) хромом происходит во время их нагрева под штамповку или термическую обработку. Обедненный хромом поверхностный слой может образоваться и в случае производства лопаток методом литья из-за малых припусков на механическую обработку, когда термическая обработка осуществляется без применения контролируемых атмосфер или вакуума. Глубина такого слоя может достигать 2 мм. Характеристики прочности этого слоя будут пониженными.

Другой пример изменения состава поверхностного слоя — науглероживание поверхностного слоя труб из хромоникелевой стали типа X18N10 при их волочении с использованием графитовой смазки приводит к снижению коррозионной стойкости.

Наклеп поверхностного слоя вызывает остаточные напряжения. В малопластичных материалах в наклепанном слое в процессе эксплуатации могут образоваться трещины.

Металлургические дефекты (трещины, закаты, плены), не обнаруженные потребителем, могут служить причиной увеличения эксплуатационной повреждаемости. Завод-изготовитель энергетического оборудования должен быть уверен в отсутствии металлургических и других дефектов. С этой целью на предприятии должна быть разработана система контроля качества продукции, предусматривающая обнаружение металлургических дефектов и технологических повреждений, допущенных

поставщиком или самим предприятием в процессе изготовления изделий. Для этой цели предусматривают методы макро – и микроанализа (известны студентам по курсу "Материаловедение"), а также дефектоскопии.

## 1.2 . Дефектоскопия металлов

Из-за несовершенства технологии изготовления или в результате эксплуатации в тяжелых условиях в изделиях появляются различные дефекты – нарушения сплошности или однородности материала, отклонения от заданного химического состава или структуры, а также от заданных размеров. Дефекты изменяют физические свойства материала (плотность, электропроводность, магнитные, упругие свойства и др.). В основе существующих методов дефектоскопии лежит исследование физических свойств материалов при воздействии на них рентгеновских, инфракрасных, ультрафиолетовых и гамма-лучей, радиоволн, ультразвуковых колебаний, магнитного и электростатического полей и др.

Для обнаружения дефектов в заготовках и деталях используются разнообразные методы:

для выявления поверхностных дефектов:

- визуальная дефектоскопия;
- магнитная и электромагнитная дефектоскопия;
- капиллярная дефектоскопия;

для выявления внутренних дефектов:

- просвечивание рентгеновскими и гамма - лучами;
- ультразвуковая дефектоскопия;

для выявления ликвации в распределении вредных примесей – серы и фосфора:

- макроскопический анализ.

Кроме перечисленных методов дефектоскопии, известны и другие: радиодефектоскопия, инфракрасная, электроиндукционная, термоэлектрическая, трибоэлектрическая, электростатическая и др.

Наиболее простым методом дефектоскопии является **визуальный** – невооруженным глазом или с помощью оптических приборов (например, лупы). Для осмотра внутренних поверхностей, глубоких полостей и труднодоступных мест используют специальные трубки с призмами и миниатюрными осветителями (диоптрийные трубки) и телевизионные трубки. Визуальная дефектоскопия позволяет обнаруживать только поверхностные дефекты (трещины, плены и др.) в металлических изделиях и внутренние дефекты в изделиях из стекла или прозрачных для видимого света пластмасс. Минимальный размер дефектов, обнаруживаемых невооруженным глазом, составляет 0,1 — 0,2 мм, а при использовании оптических систем — десятки микрометров.

**Магнитная и электромагнитная дефектоскопия** применяется для обнаружения дефектов с помощью ферромагнитных порошков и суспензий (магнитная порошковая дефектоскопия) или электромагнитных и электронных приборов.

Магнитной порошковой дефектоскопии подвергаются исключительно ферромагнитные материалы. Метод очень прост (рис. 3), трудоемкость его по сравнению с другими методами невелика. Магнитным методом можно выявлять дефекты, если они выходят на поверхность детали или залегают на небольшой глубине (не более 2-3 мм). Недостатком метода является трудность определения величины распространения трещины вглубь металла.

Для проведения испытаний необходимо хорошо отшлифованную или отполированную деталь поместить в магнитное поле, либо предварительно намагнитить. В этих условиях края трещин (дефектов), имеющих в детали, можно рассматривать как полюсы небольшого магнита. Если поверхность намагниченной детали залить реактивом, в котором имеется ферромагнитный порошок, то частицы порошка будут скапливаться у границ трещин, как у полюсов магнита. Таким образом, трещины выявляются в виде черных линий на светлой металлической поверхности детали.

В качестве реактива может быть использована железная пудра, взвешенная в керосине или денатурате.

Так, для приготовления масляно-керосиновой суспензии употребляется смесь: 60 % трансформаторного или веретенного масла и 40 % керосина. В 1 л суспензии разводится 100 г порошка. Для получения более контрастного изображения дефектов на поверхность контролируемых изделий наносят окрашенные порошки.

Во многих случаях наличие дефектов в изделиях при электромагнитных методах дефектоскопии выявляется с помощью электрических приборов, а именно: по отклонению стрелки на измерительном приборе, при помощи звукового сигнала, по кривым на электронно-лучевых трубках, фиксацией на магнитной ленте и т.д.

**Капиллярные методы** (люминесцентный, керосиново-меловой, цветной) используют эффект заполнения легко смачивающими жидкостями (растворами) узких полостей – щелей, трещин.

**Люминесцентная дефектоскопия** (рис. 4) применяется для обнаружения не видимых невооруженным глазом поверхностных дефектов в любых материалах: металлах и их сплавах, пластмассах, керамических изделиях и т.п. Внутренние дефекты, скрытые под поверхностью материала и не выходящие на поверхность, этим методом обнаружить невозможно. Во многих случаях контроля качества немагнитных материалов люминесцентный метод является единственным методом дефектоскопии.

Лучшим люминофором для дефектоскопии является нориол, приготовляемый из некоторых сортов нефти и представляющий собой концен-

трат углеводорода. Люминофор употребляется в смеси: 50 % керосина, 25 % нориола и 25 % бензина.

Для возбуждения свечения обычно применяют ультрафиолетовые лучи, для получения которых используются ртутно-кварцевые и ртутные лампы.

Люминесцентная дефектоскопия проводится по следующей схеме:

- очищают поверхность исследуемого металла от загрязнений в бензиновой ванне;
- наносят на изделие люминесцирующее вещество (раствор люминофора) кистью с последующей выдержкой на воздухе, чтобы раствор мог заполнить все дефекты на поверхности;
- удаляют раствор с поверхности детали путем обтирания ветошью или струёй воды. В трещинах, благодаря капиллярным силам сцепления, раствор сохраняется;
- припудривают деталь порошком оксида магния или углекислого магния (или смесью их). Сухие порошки способны извлекать люминесцирующую жидкость из дефектов на поверхность изделия. Избыток порошка стряхивают или сдувают;
- помещают подготовленную таким образом деталь под источник ультрафиолетового света с фильтром и осматривают в затемненном или полутемном помещении. Обнаруженные дефектные места изделия можно сфотографировать.

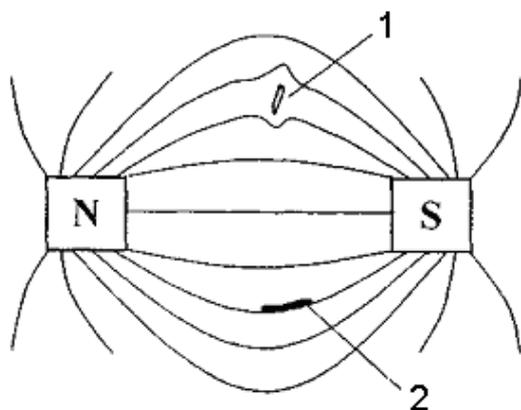


Рис. 3. Принцип магнитной дефектоскопии:

1-дефект поперек магнитного поля;  
2-дефект вдоль магнитного поля

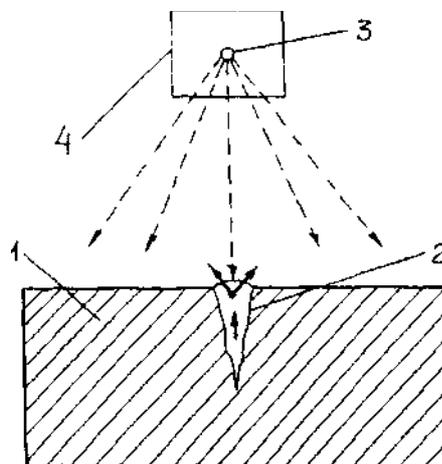


Рис.4. Схема люминесцентного метода контроля: 1-деталь; 2- поверхностная трещина; 3 – ультрафиолетовый осветитель; 4- фильтр

При помощи люминесцентного метода можно выявлять поверхностные трещины в металлах шириной не менее 0,01 мм и глубиной не менее 0,02 – 0,03 мм. При очень интенсивном освещении ртутно-кварцевыми лампами можно обнаружить и более мелкие трещины глубиной 0,002 –

0,001 мм. Существует метод, позволяющий производить количественную оценку дефектов, в частности, определять их глубину.

Для определения сквозных дефектов в полых деталях также можно применять люминесцирующие жидкости. Раствор наносят кистью на внутреннюю поверхность детали, а через некоторое время осматривают внешнюю поверхность и по свечению устанавливают наличие сквозных трещин или пористости. Надежные результаты этот метод дает при толщине металла не более 6 – 7 мм.

Большой чувствительностью по сравнению с обычным люминесцентным методом без магнитных порошков обладает *магнитолюминесцентный метод*, выявляющий поверхностные дефекты в ферромагнитных изделиях.

Для выявления поверхностных трещин и пор издавна применяют *керосиново-меловой метод*. Для проведения керосиново-меловой пробы проверяемую поверхность смачивают керосином, а затем, после удаления керосина, покрывают мелом. Керосин, выделяющийся из трещин, пор и т.д. смачивает мел, и в районе дефектов образуются темные пятна. Однако различие между участками сухого и смоченного мела невелико, и метод недостаточно точен.

В последние годы для выявления поверхностных дефектов стальных изделий, трещин и пористости сварных швов, а также изделий из цветных металлов, нержавеющей аустенитных сталей, пластмасс и т.п. в заводской практике широко применяется так называемый *цветной метод* дефектоскопии (метод красок). На контролируемую поверхность материала наносится слой подкрашенной жидкости, например, следующего состава: 80 % керосина, по 10 % трансформаторного масла и скипидара и краска “судам”; жидкость проникает в трещины, избыток удаляется с поверхности изделия, на чистую поверхность наносят абсорбирующий порошок или суспензию каолина в воде. Подкрашенная жидкость выходит на поверхность и тем самым выявляет место расположения трещин. Метод не требует источника ультрафиолетовых лучей, затемнения помещения и специального оборудования. Таким путем можно провести дефектоскопию в монтажных условиях. При помощи цветного метода выявляются поверхностные трещины с раскрытием не менее 0,01 мм и при глубине не менее 0,03-0,04 мм.

*Дефектоскопия просвечиванием* рентгеновскими лучами (рис. 5) и гамма-лучами радиоактивных изотопов используется для выявления внутренних макроскопических дефектов, их местоположения, размеров и формы в отливках и сварных швах.

Источником рентгеновского излучения обычно служат рентгеновские трубки различных типов.

Искусственная радиоактивность элементов вызывается бомбардировкой ядер теми или иными частицами. Часть нейтронов, получаемых в урановых реакторах, идет на облучение различных веществ с целью получе-

ния искусственных радиоактивных изотопов. К радиоактивным изотопам, применяемым для промышленного просвечивания, относятся: кобальт-60, иридий-192, цезий-127 и др. Наиболее распространенным источником гамма-излучения для дефектоскопии является кобальт-60.

Выявление внутренних пороков в материалах при помощи просвечивания основано на способности рентгеновских и гамма-лучей неодинаково проникать через различные материалы и поглощаться ими в зависимости от толщины, рода материала и энергии излучения. Дефекты фиксируются на пленке в виде действительных изображений. Рентгеновская дефектоскопия позволяет надежно контролировать стальные детали толщиной до 60-80 мм.

Гамма-дефектоскопия дает возможность обнаруживать внутренние дефекты в стальных изделиях толщиной до 300 мм, а в сплавах алюминия и магния – до 500 мм. Для просвечивания стальных изделий больших сечений (до 400-500 мм и более) применяются стационарные установки.

**Ультразвуковая дефектоскопия** (рис. 6) позволяет определить наличие внутренних дефектов в металле, их расположение на глубине до 10 м. Разнообразные дефекты: раковины, трещины, включения и пр. обнаруживаются быстро, контроль можно осуществлять почти на любой стадии производственного процесса.

Ультразвуковая дефектоскопия основана на способности ультразвуковых волн отражаться от границы раздела двух сред, что дает возможность по отраженным волнам определять наличие, размеры и местоположение дефектов, а часто и их характер.

Наибольшее распространение получили так называемые ультразвуковые дефектоскопы.

**Макроскопический анализ.** На эксплуатационных свойствах металла существенно сказывается возникающая в процессе затвердевания ликвация – химическая неоднородность в распределении по сечению изделий примесей и легирующих элементов. Для выявления макроликвации в сталях таких вредных примесей, как фосфор и сера, используют макроскопический анализ – исследование невооруженным глазом или с помощью лупы специально подготовленных поверхностей или отпечатков с них. Для проведения макроанализа заготовку приходится разрезать по срединному сечению. Нередко ограничиваются отрезанием необходимой его части (например, используют отрезок рельса, часть слитка).

Для определения *ликвации фосфора* применяется 10–12 %-й раствор двойной соли хлорной меди и аммония ( $\text{CuCl}_2 \cdot \text{NH}_4\text{Cl}$ ).

Макрошлиф, предварительно обезжиренный спиртом, подготовленной поверхностью погружается на 10 – 15 с в раствор. Выпавший на поверхность слой губчатой меди немедленно смывается ватой под струей воды. Появление меди на поверхности происходит за счет реакции замещения меди железом в водном растворе хлорной меди и аммония.

После удаления слоя меди потемневшие места макрошлифа представляют собою участки, обогащенные фосфором. Действие реактива основано на более сильном разьедаении участков стали, обогащенных фосфором.

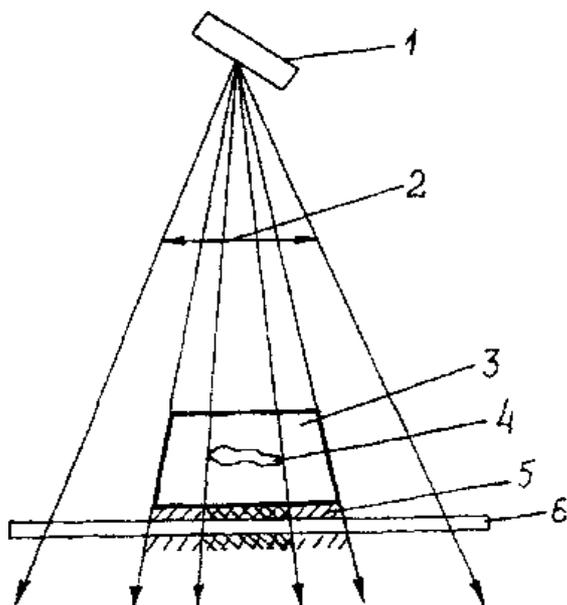


Рис. 5. Схема рентгеновского просвечивания: 1 – источник рентгеновского излучения; 2- пучок рентгеновских лучей; 3- деталь; 4- внутренний дефект в детали; 5 - невидимое глазом рентгеновское изображение за деталью; 6 -регистратор рентгеновского изображения

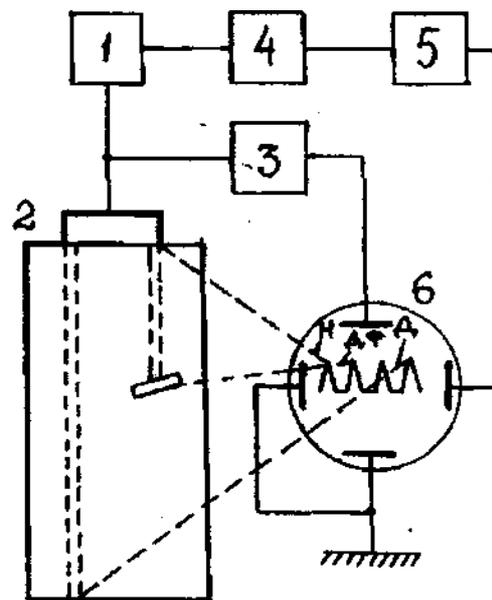


Рис. 6. Блок-схема ультразвукового эходефектоскопа: 1 - генератор электрических импульсов; 2 - пьезоэлектрический преобразователь (искательная головка); 3 - приемо-усилительный тракт; 4 - хронизатор; 5 - генератор развертки; 6 - электронно-лучевая трубка; Н- начальный сигнал; Д- донный эхосигнал; ДФ - эхосигнал от дефекта

Для определения ликвации серы на поверхность обезжиренного макрошлифа необходимо плотно наложить лист фотобумаги, предварительно смоченный в растворе серной кислоты в течение 3 мин и слегка просушенный между листами фильтровальной бумаги. Необходимо следить, чтобы не осталось пузырьков воздуха между поверхностью макрошлифа и фотобумагой, а также чтобы фотобумага при накладывании не сдвигалась с места. Наложённая фотобумага выдерживается на поверхности макрошлифа около 5 мин, после чего снимается, фиксируется в растворе гипосульфита в течение 10 мин и промывается в воде. Участки фотобумаги, окрасившиеся после накладывания на макрошлиф в темно-коричневый цвет, соответствуют участкам, обогащенным сернистыми включениями.

Действие реактива основано на следующем. Имеющаяся в стали сера связана в химические соединения FeS и MnS. Эти сульфиды вступают в химические реакции с серной кислотой:  $MnS + H_2SO_4 = MnSO_4 + H_2S$ .

Выделяющийся сероводород реагирует с бромистым серебром фотобумаги:  $2AgBr + H_2S = 2HBr + Ag_2S$ .

### 1.3. Классификация повреждений металлов в условиях эксплуатации при повышенных температурах

Основные виды эксплуатационной повреждаемости могут быть представлены:

- изменением структуры;
- исчерпанием долговечности и длительной пластичности;
- изменением механических свойств;
- изменением вида кривых ползучести;
- коррозионными повреждениями;
- изменением электропроводности;
- появлением трещин и изменением скорости их распространения;
- изменением декремента затуханий колебаний;
- изменением усталостной выносливости;
- коррозионной усталостью.

В настоящем и последующих подразделах основные виды повреждений будут рассматриваться более подробно.

### 1.4. Исчерпание долговечности и изменение механических свойств

Учитывая большие трудности, исчерпание долговечности обычно рассматривают в связи только с каким-либо одним видом повреждения: длительной прочностью, ползучестью, усталостью или термической усталостью. Энергетическое оборудование может работать в стационарных (без перерыва) и нестационарных условиях.

В качестве первого приближения обычно предполагают, что процесс исчерпания долговечности (накопление повреждений) при ползучести  $P'_1$  и усталости  $P'_2$  в случае стационарных условий работы определяется из соотношений:

$$P'_1 = \frac{\tau}{\tau_p}, \quad P'_2 = \frac{n}{N_0},$$

где  $\tau$  – продолжительность испытания;

$\tau_p$  – время до разрушения;

$n$  – число циклов;

$N_0$  – число циклов до разрушения.

Для нестационарных условий

$$P'_1 = \sum_i \phi / \phi_{p_i}; \quad P'_2 = \sum_i n_i / N_{0i}.$$

Для оценки повреждения материала при ползучести используются следующие характеристики пластичности (рис. 7):

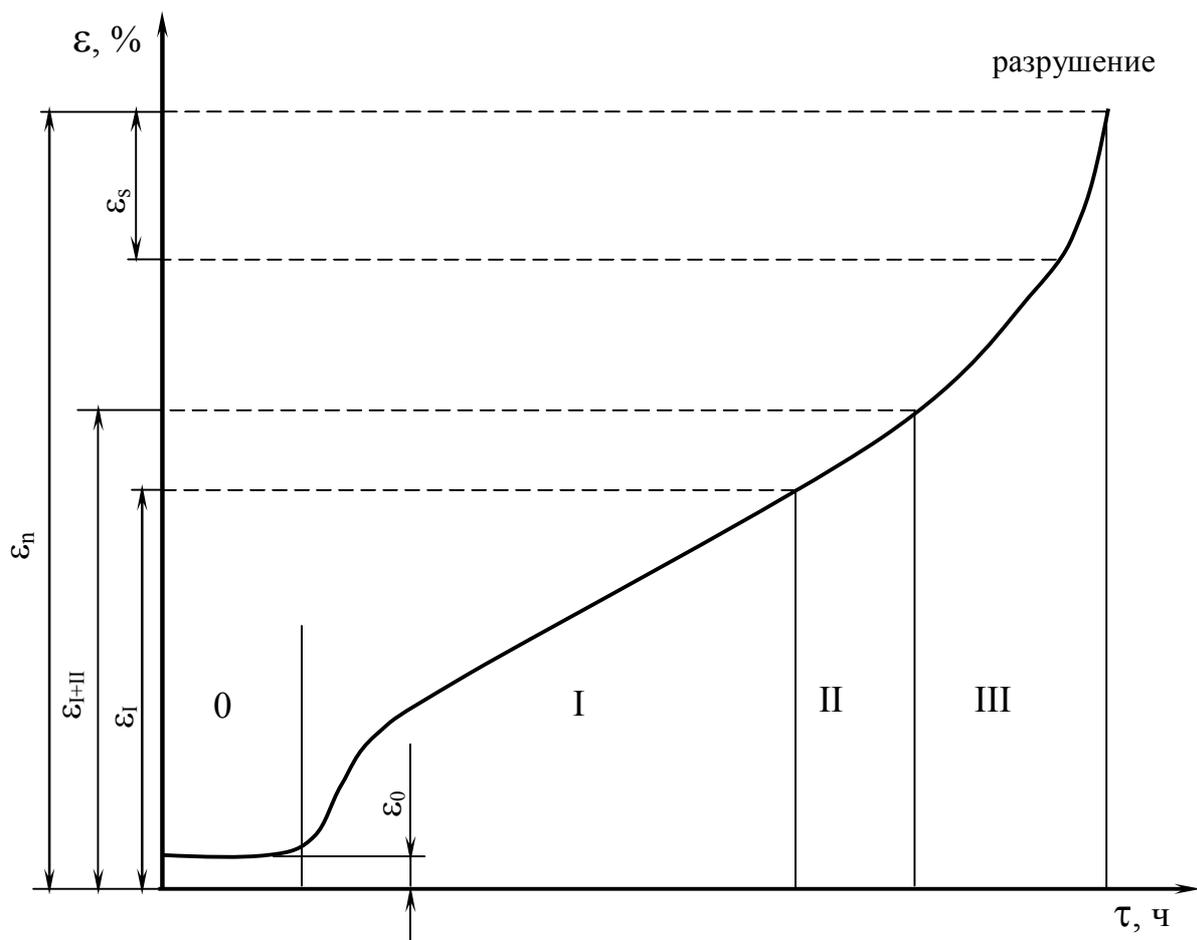


Рис. 7. Схематическая кривая ползучести  $\varepsilon = \Delta l/l_0$ :  
 0 – участок нагружения  
 I – участок не установившейся ползучести  
 II – участок установившейся ползучести  
 III – участок перед разрушением

- 1)  $\varepsilon_n - \varepsilon_0$  — деформация ползучести, накопленная перед разрушением;
- 2)  $\varepsilon_{I+II} - \varepsilon_0$  — деформация ползучести, накопленная до наступления стадии ускоренной ползучести;
- 3)  $\varepsilon_n - \varepsilon_0 - \varepsilon_s$  — деформация ползучести, накопленная перед разрушением за вычетом удлинения на заключительном этапе ползучести  $\varepsilon_s$ .

Таким образом, повреждаемость оценивается в первом, втором и третьем случаях соответственно:

$$P'_e = \frac{e}{\varepsilon_n - \varepsilon_0}; \quad P''_e = \frac{e}{\varepsilon_{I+II} - \varepsilon_0}; \quad P'''_e = \frac{e}{\varepsilon_n - \varepsilon_0 - \varepsilon_s}.$$

Это позволяет контролировать и в любое время оценивать меру исчерпания ресурса работы оборудования.

Повреждение металла сопровождается изменением его кратковременных механических свойств (рис. 8). В процессе ползучести происхо-

дит также снижение микротвердости в зоне образца с максимальными напряжениями, что объясняется разрыхлением металла перед образованием макро- и микротрещин.

Повреждения от термоциклических нагрузок приводит к сниже-



Рис. 8. Изменение механических свойств (схема)

нию не только характеристик кратковременных механических свойств, но и длительной прочности.

### 1.5. Образование и распространение трещин

В процессе работы энергетического оборудования возможно образование микро- и макротрещин. Изучение характера трещин обычно проводят методами металлографического анализа. Различают микротрещины межзеренные (рис. 9а,б), внутризеренные (рис. 9в) и имеющие смешанный характер распространения (рис. 9г). Рассмотрим некоторые закономерности образования трещин. При статическом нагружении отмечена зависимость характера развития трещин от класса стали. Так, в сталях пер-

литного класса, используемых при температурах ниже 550 °С, характер распространения трещин зависит от длительности нагружения и времени до разрушения: менее 100 ч – внутризеренный; более 100 ч — межзеренный. В сталях **феррито-мартенситного** класса трещины при рабочих температурах образуются и развиваются транскристаллитно. В **аустенитных** сталях и сплавах на никелевой основе трещины, в основном, развиваются межзеренно. При **ползучести** микротрещины зарождаются на поверхности образцов уже на ранних стадиях.

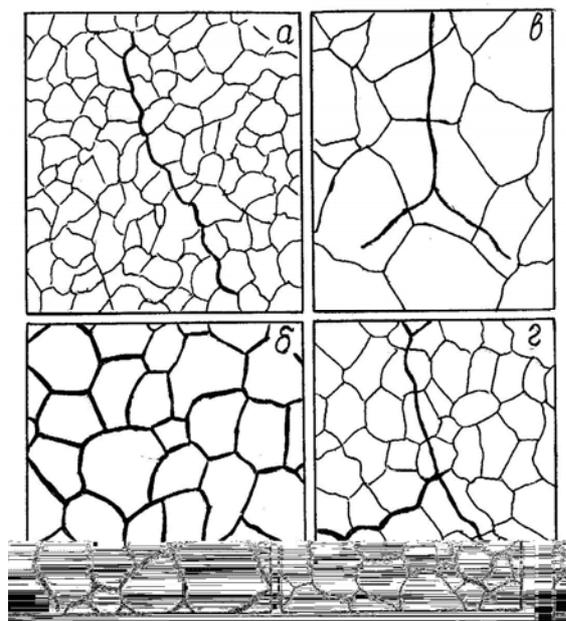


Рис. 9. Трещины в металлах и сплавах (схема):

*а – межзеренная;*

*б – интеркристаллитная (межкристаллитная, межзеренная);*

*в – транскристаллитная*

*г – смешанный характер распространения*

При циклическом нагружении или изменении температуры характер разрушения зависит от максимальной температуры и продолжительности цикла (рис. 10). Скорость распространения трещин зависит от типа сплава и условий нагружения, от особенностей структурного состояния (характер границ, выделений и т.д.). При исследовании причин поломки деталей полезно знать, как меняется характер разрушения различных сталей и сплавов от вида нагружения и длительности его действия. Перерывы в испытании обычно уменьшают скорость распространения трещин в связи с процессами пассивации металла у кончика трещины.

Скорость развития трещин при ползучести зависит от деформационной способности металла: в пластичных материалах деформация зерна ликвидирует перенапряжения, в связи с чем рост трещин может прекратиться; в хрупких разрушение происходит вскоре после образования трещины.

## 1.6. Окисление и коррозионная повреждаемость

Детали турбин и другого энергетического оборудования могут подвергаться воздействию компонентов, входящих в состав топлива (соединений углерода и серы, ванадия, свинца и др.); продуктов его сгорания; компонен-

тов, засасываемых вместе с воздухом (пыль, брызги морской воды); теплоносителей, используемых для охлаждения (щелочные металлы).

В связи с изложенным различают следующие виды коррозии:

- окисление на воздухе;
- в атмосфере топочных газов;
- в продуктах сгорания сернистого топлива;
- ванадиевая коррозия;
- сульфидная коррозия в условиях контакта с солями морской воды;
- в условиях контакта с оксидами железа;
- коррозионное растрескивание;
- межкристаллитная и язвенная коррозия;
- коррозия в условиях контакта со щелочными металлами.

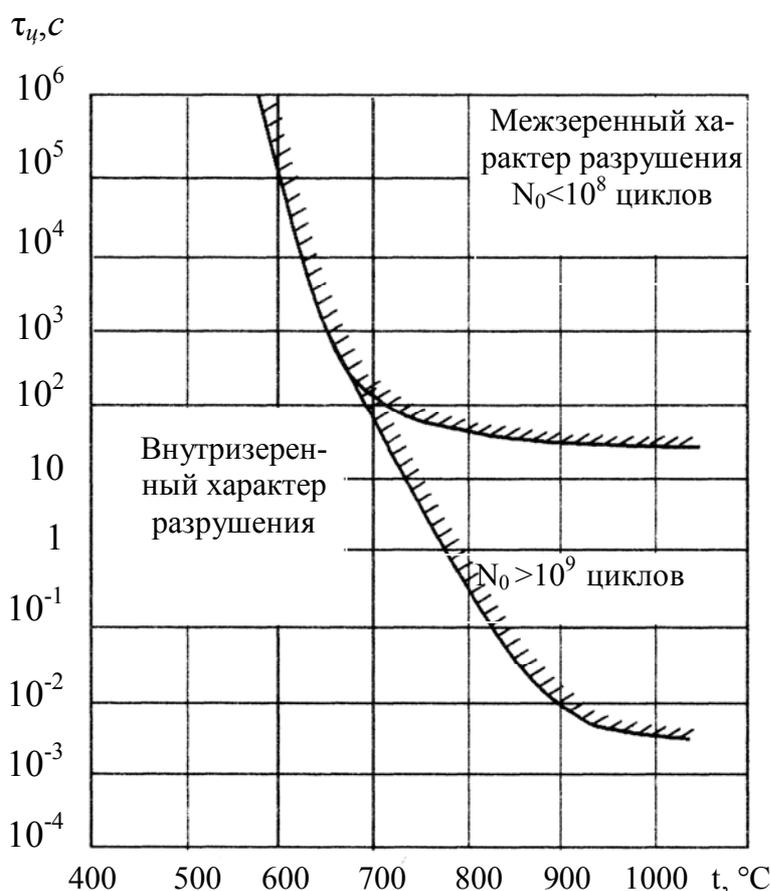


Рис. 10. Характер разрушения сплавов на никелевой основе в зависимости от температуры, частоты и количества циклов механического нагружения

**Окисление на воздухе.** Это процесс взаимодействия металла с кислородом воздуха, которому могут подвергаться поковки валов роторов и других деталей в процессе их изготовления и термической обработки, а также электронагреватели печей. В результате взаимодействия с кислородом про-

исходит образование и рост окалины, а также изменение состава и увеличение глубины подоксидных слоев. Слой окалины является своеобразным барьером, препятствующим перемещению кислорода воздуха в металл. Так, в жаропрочных сплавах, например, ХН78Т, с увеличением толщины окалины возрастает роль диффузии легирующих элементов металла: подоксидные слои обогащаются никелем; окалина обогащается оксидами хрома. При этом ее защитные свойства повышаются. Процесс объясняется большим коэффициентом диффузии хрома в окалине по сравнению с остальными элементами. Однако при существенном увеличении продолжительности высокотемпературной выдержки никель из подоксидных слоев также переходит в окалину, которая обогащается оксидом никеля. Содержание хрома в окалине при этом снижается. В результате защитные свойства окалины ухудшаются.

Микрорентгеноспектральные исследования сплава ХН78Т свидетельствуют о следующем содержании хрома в окалине: 1050 °С – 7000 ч – 7,3 % ; 1150 °С – 8000 ч – 5,0 %.

Степень обеднения подоксидных слоев легирующими элементами определяется химическим составом сплава. В сплавах ХН70Ю и ХН60Ю, содержащих 2,5 – 3,0 % Al, обеднение подоксидного слоя алюминием не обнаружено. Установлено, что наиболее благоприятное влияние на замедление процесса окисления оказывают Al, Cr, и Ta. Молибден и ванадий на окалиностойкость (жаростойкость) оказывают отрицательное влияние. Внешняя растягивающая нагрузка ускоряет окисление вследствие разрушения окалины и ускорения процесса диффузии. Аналогичное воздействие оказывает периодическое охлаждение.

**Коррозия в продуктах сгорания сернистого топлива** наблюдается у сплавов на никелевой основе (например, ХН78Т, ХН77ВТЮР, ХН70Ю) вследствие взаимодействия никеля с эвтектикой Ni + Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>, температура плавления которой 643 °С (образование Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> происходит в результате взаимодействия никеля и адсорбированной на поверхности сплава серы). При температурах выше 643 °С образовавшаяся эвтектика находится в жидком состоянии и может либо испаряться, либо механически удаляться с поверхности металла, в результате чего на ней образуются язвы (углубления).

Для затруднения образования в этих сплавах легкоплавкой эвтектики вводят хром, что способствует при взаимодействии с серой возникновению другой эвтектики CrS + Cr, плавящейся при температуре 1350 °С. Сернистый хром (CrS) препятствует диффузии хрома и серы, предохраняя таким образом металл от окисления. Это вторая роль хрома в никелевых сплавах.

Для заметного окисления металла требуется высокая концентрация серы в газе. Поэтому процессы сернистой коррозии определяются, с одной стороны, содержанием хрома в металле, с другой – концентрацией серы в газе. Так, например, было установлено, что добавление к воздуху 5 % CO<sub>2</sub>, 15 % H<sub>2</sub>O и 0,03 % SO<sub>2</sub> не вызывает ускорения процесса окисления жаро-

прочных сплавов на никелевой основе с 10~20 % Cr по сравнению с окислением в воздушной среде.

**Коррозионное растрескивание (КР)** вызывается совместным действием коррозионной среды и напряжений. В отличие от МКК, процесс КР

аустенитных сталей реализуется в виде трещин, образующихся при низких температурах. Трещины развиваются внутри зерна.

Схема процесса КР может быть представлена следующим образом. Сначала вследствие электрохимической коррозии на поверхности металла образуются небольшие узкие трещины в виде отдельных углублений. По мере развития трещины у ее вершины создается концентрация напряжений и, как правило, местная пластическая деформация, которая может вызвать развитие процесса хрупкого разрушения. Вызывают растрескивание растворы хлоридов, кислот, сероводорода, нитратов, щелочей, вода и пар при повышенных температурах.

Процесс коррозионного растрескивания усиливают:

- повышение содержания углерода. Например, сталь 37Х12Н8Г8МФБ с 0,4 % С более склонна к КР, чем 12Х18Н10 с 0,12 % С;
- неравномерная пластическая деформация, возникающая, например, при погипе труб, нарезании на них резьбы.

Коррозионное растрескивание снижается:

- с увеличением содержания никеля. Сплавы на никелевой основе совсем не подвержены этому недостатку;
- с уменьшением размера зерна.

**Щелочные металлы** в ряде случаев используют для охлаждения лопаток турбоагрегатов. В связи с этим существует проблема совместимости жаропрочных сплавов со щелочными металлами.

Поведение жаропрочных сплавов на железной и никелевой основах при высоких температурах в контакте со щелочными металлами Na, K, Li и с эвтектикой Na+K изучено многими исследователями в условиях как постоянных, так и переменных температур.

Результаты этих исследований свидетельствуют о том, что щелочные металлы, достаточно очищенные от кислорода, являются для этих сплавов относительно малоагрессивной средой.

## 1.7. Коррозионная усталость

Коррозионная среда, действующая одновременно с циклическими напряжениями, способствует интенсификации процесса зарождения субмикроскопических и микроскопических нарушений сплошности металла и зарождению трещин усталости. Выносливость металла в воздушной среде заметно выше, чем в пресной и морской воде или в других коррозионных средах.

Основными особенностями коррозионной усталости являются:

- отсутствие физического предела усталости (рис. 11);

- отсутствие корреляции с прочностными характеристиками при статическом и циклическом нагружении на воздухе;
- преимущественно межзеренное распространение трещин;
- сильное влияние частоты нагружения;
- уменьшение чувствительности к концентраторам напряжений;
- повышение усталостной прочности при увеличении размеров детали.

Основными способами повышения сопротивляемости коррозионной усталости являются:

- применение материалов с большой коррозионной стойкостью;
- протекторная защита. В качестве протекторов можно использовать металлы и сплавы, имеющие более отрицательный электродный потенциал, чем защищаемый. Для сталей такими металлами, например, являются Mg, Al и др. Недостаток протекторной защиты – сравнительно быстрый расход протектора;
- нанесение покрытий. Например, для лопаток компрессоров из сталей перлитного класса наибольшее распространение получило Ni-Cd покрытие.

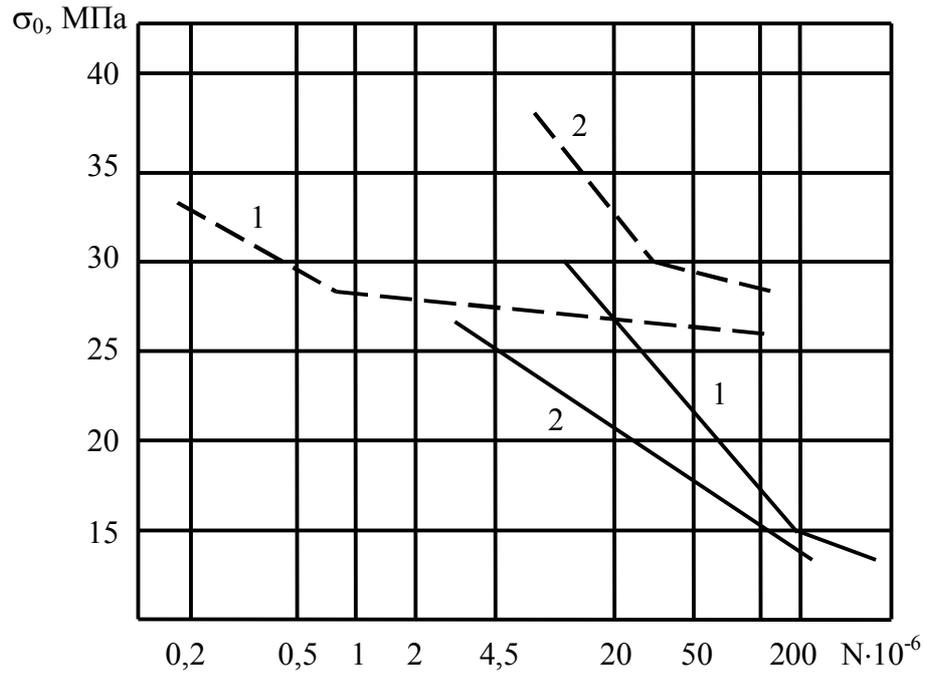


Рис. 11. Сопротивление коррозионной усталости сталей 13X11H2B2MФ (1), 20X13 (2): в морской тумане (—); в морской воде (----)

## 2. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Для оценки тех или иных свойств металлических материалов производят комплекс высокотемпературных испытаний, многие из которых существенно отличаются от привычных, известных из курса "Сопротивление материалов".

### 2.1. Кратковременные испытания на растяжение

Методика кратковременных испытаний на растяжение при высоких температурах стандартизована и предусматривает использование коротких (длиной  $5,67\sqrt{F_0}$ ,  $F_0$  – площадь поперечного сечения) или длинных (длиной  $11,3\sqrt{F_0}$ ) цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 5,6 мм или 10 мм. Головки образцов имеют резьбу. Рабочая часть образцов должна иметь шероховатость не менее  $R_a 0,63$  (рис. 12). Можно испытывать и плоские образцы толщиной 0,5 – 10 мм и шириной 10 – 20 мм. Образцы до температуры испытаний следует нагревать медленно (не менее 1 ч), затем дать выдержку 20-30 мин.

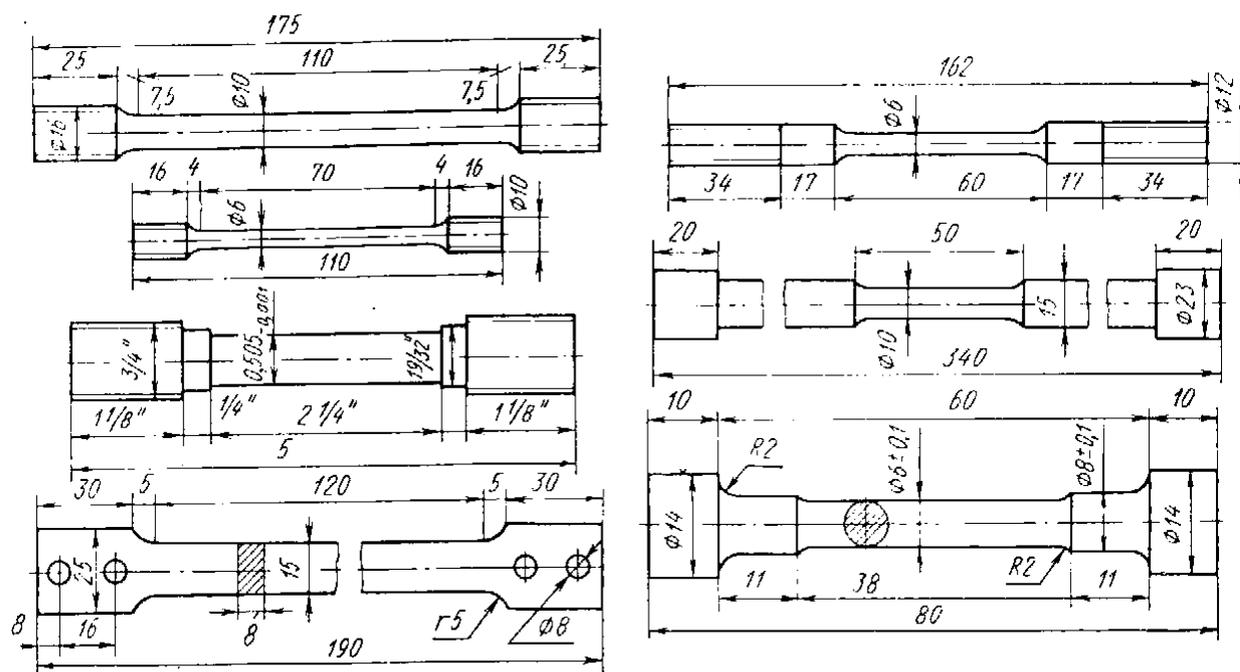


Рис. 12. Образцы для испытаний металлов на растяжение при повышенных температурах

Преимущественно нагрев образцов осуществляется в электропечах. Однако иногда используют и другие способы нагрева: в ванне с расплавом солей или металлов; в печах с газовой средой; пропусканием электрического тока через испытуемый образец.

Колебание температур по длине образцов обычно допускают не более  $\pm 5$  °С. Температуру измеряют либо непосредственно на образцах, либо в пространстве печи. Если позволяет длина образца, то температуру желательно измерять не в одной, а в двух или трех точках рабочей его части.

Измерение деформации образца в процессе испытаний в случае недоступности непосредственных измерений производят следующим способом:

- зеркальными экстензометрами. Призмы зеркал экстензометра устанавливаются вне печи на специальных удлинительных планках, закрепленных на образце при помощи хомутов, болтов или призм;

- индикаторами. Индикаторы обычного (цена деления 0,01 мм) или прецизионного (0,001-0,002 мм) типов монтируют вне печи. Деформацию образца при растяжении передают при помощи удлинителей. Ввиду возможности перекосов при установке измерительных приборов и связанной с этим вероятной ошибки на один образец устанавливают два индикатора, а деформацию определяют как среднюю по показателям приборов;

- автоматическая запись. Этот метод наиболее прост и надежен при достаточно большом масштабе диаграммы растяжения. Пределы прочности и текучести по диаграмме определяются таким же образом, как и при испытании на растяжение в условиях комнатной температуры.

## **2.2. Исследование длительной пластичности (деформационной способности)**

До недавнего времени явление хрупкости изучали главным образом применительно к пониженным (менее 0 °С) температурам, при которых пластичность и вязкость многих металлов снижается. В некотором критическом интервале температур, различном для сталей разного состава и термической обработки, металл переходит из вязкого в хрупкое состояние (рис. 13). Температуру этого перехода называют критической температурой хрупкости или порогом хладноломкости. Установлено, что уровень порога хладноломкости зависит от вида напряженного состояния, скорости деформации, формы и размеров изделия. Способность металла к деформированию без разрушения уменьшается при концентраторах напряжений у острых кромок, отверстий и др.

В настоящее время твердо установлено, что в процессе длительного нагружения в условиях ползучести при высоких температурах показатели пластичности металлов и сплавов снижаются – в них развивается хрупкость. Практически все жаропрочные сплавы на железной и никелевой основах в условиях длительной работы при температурах более 450-500 °С в той или иной мере проявляют склонность к хрупким разрушениям. Анализ данных испытаний на длительную прочность свидетельствует о том, что при указанных температурах деформация с увеличением времени до разрушения для многих металлов снижается до 1-4 %, а в некоторых случаях до долей процента, что совершенно недопустимо.

Для исследования деформационной способности материалов профессор А.В. Станюкович предложил использовать данные испытаний на длительную прочность, полученные при постоянных скоростях деформации. Испытания проводят на разрывных или универсальных машинах относительно небольшой разрывной силы (12 тс) или на машинах ЦКТИ им. И.И. Ползунова. По результатам этих испытаний строят зависимости относительного удлинения от скорости деформации для различных температур (рис. 14). Точка пересечения касательной к правой ветви U – образных кривых с осью абсцисс характеризует температуру минимальной пластичности  $t_{\min}$ .

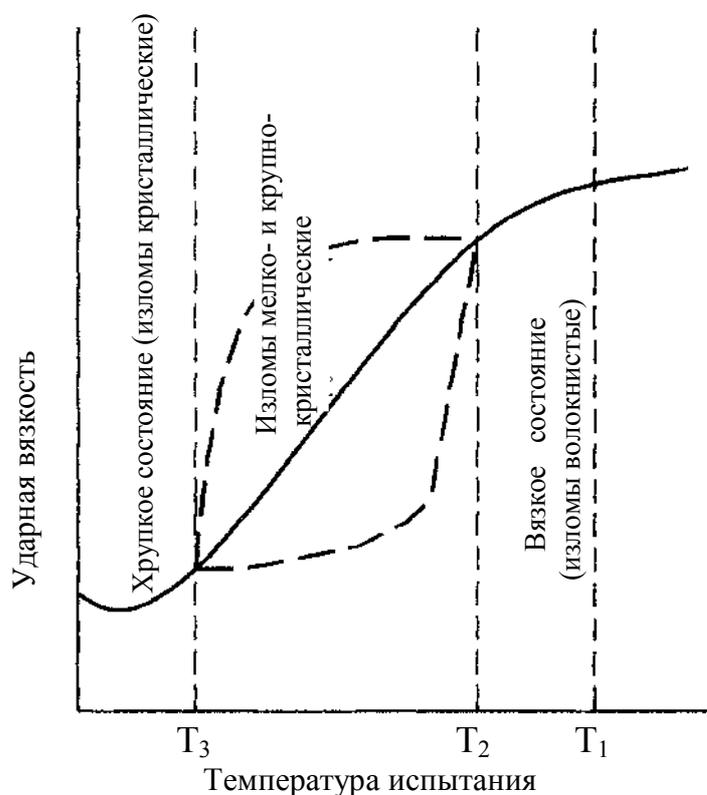


Рис.13. Схематическая диаграмма изменения ударной вязкости в зависимости от температуры испытания образцов  $T_1 > T_2 > T_3$

$T_1$  – верхний порог хрупкости;

$T_2$  – температура начала сильного разброса показаний ударной вязкости;

$T_3$  – нижний порог хрупкости

### 2.3. Испытания на термическую усталость

Детали любых турбин работают в условиях нестационарных температурных факторов. Трубы поверхностей нагрева котлов энергетических блоков подвергаются периодической очистке струей воды (дальнобойная водяная очистка – ДВО). Таких примеров много.

Известно, что металл имеет свойство изменять размеры в зависимости от температуры. Это при определенных условиях работы деталей (например, испытывающих односторонний нагрев; толстостенные трубы, имеющие разницу температур по сечению) может вызвать термические напряжения. Тер-

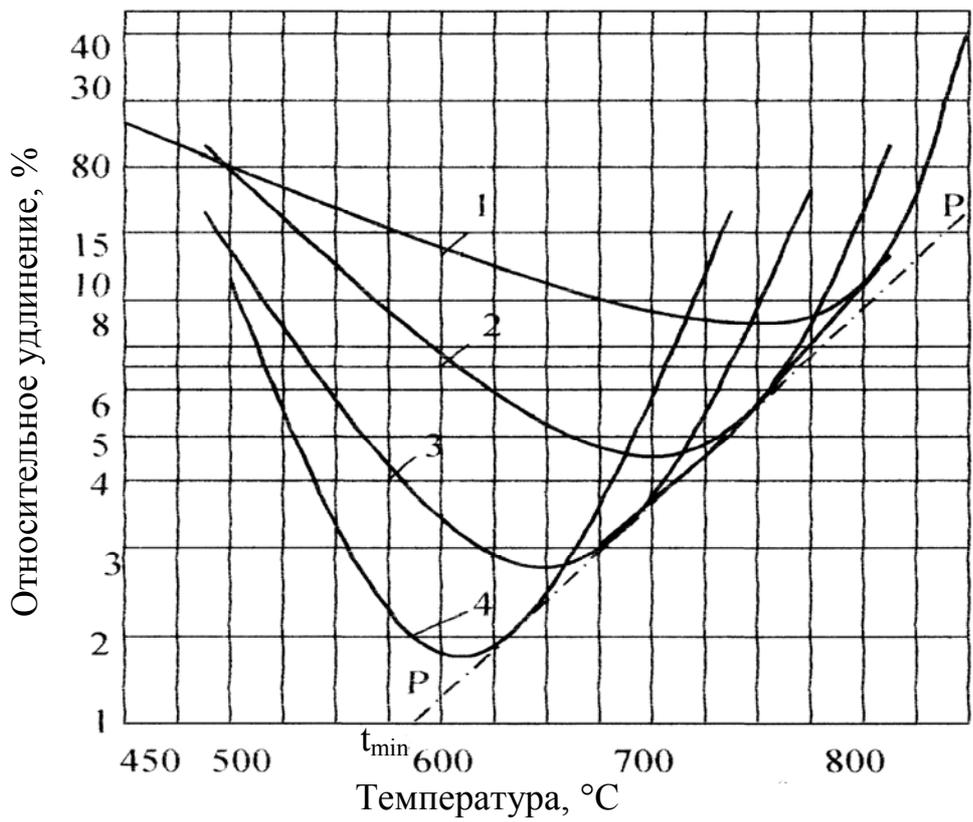


Рис.14. Изменение относительного удлинения стали ЭИ612(ХН35ВТ) в зависимости от температуры при различных скоростях деформации: 1 -  $U=180$  %/ч; 2 -  $U=3,6$  %/ч; 3 -  $U=0,6$  %/ч; 4 -  $U=6,67 \cdot 10^{-2}$  %/ч

мические напряжения могут возникать и по другим причинам:

- неблагоприятные конфигурации деталей;
- различные коэффициенты линейного расширения структурных составляющих металла и др.

В результате термических напряжений в металле могут возникнуть трещины. Явление образования трещин в металле, на который действуют циклически возникающие напряжения при периодически изменяющихся температурах, называется **термической усталостью**.

Термическая усталость относится к категории малоциклового усталости (число циклов изменений температуры до образования трещин не превышает тысяч или десятков тысяч циклов). Длительность термического цикла при различных условиях может изменяться от нескольких секунд до сотен часов.

Трещины термической усталости наблюдаются на входных и выходных кромках рабочих и сопловых лопаток турбин, в камерах сгорания газотурбинных установок, на поверхности нагрева барабанов паровых котлов, на корпусах атомных реакторов, на трубах поверхностей нагрева паротурбинных установок.

**Способность металла выдерживать определенное число циклов изменения температуры без образования трещин называется сопротивлением термической усталости (термостойкостью, сопротивлением тепловой**

усталости, термическим ударам).

Различают две группы испытаний на термическую усталость:

- с оценкой величины термических напряжений во время цикла;
- без такой оценки.

Методика испытаний на термическую усталость сводится к следующему. Образцы подвергают нагреву (индукционному, электроконтактному, печному, в расплавах металлов или солей и т.д.). Скорость нагрева и охлаждения образцов, температурный интервал циклического изменения температуры широко варьируются в зависимости от условий работы изучаемого изделия.

Формы и размеры образцов разнообразны, однако стараются использовать образцы, приближенные по форме к изделию. Обычно используют плоские образцы небольшой толщины. Часть их делают с концентраторами напряжений – отверстиями, вырезами. В качестве примера на рис. 15 приведен образец, приблизительно имитирующий кромку рабочей лопатки газовой турбины.

Критерием для оценки сопротивления металла термической усталости (термостойкости) обычно служит количество циклических изменений температуры, после которого впервые обнаруживаются трещины.

Существует определенная разница температур тонкой кромки и утолщенной части у образцов этого типа, что позволяет вычислить напряжения на тонкой кромке.

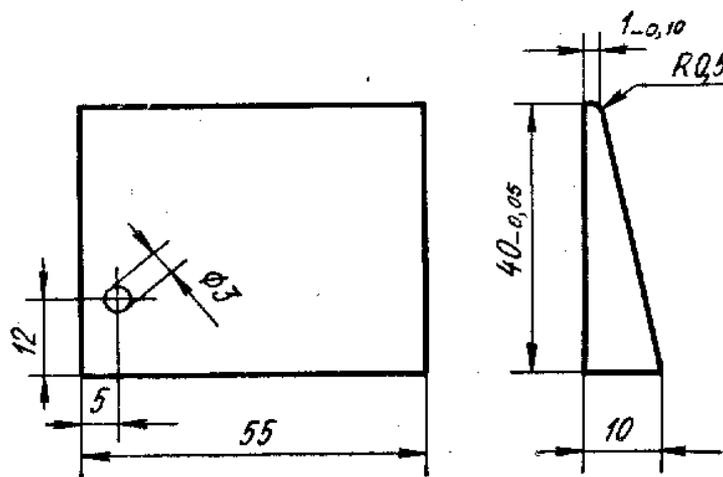


Рис. 15. Клиновидный образец, приблизительно имитирующий кромку лопатки газовой турбины

## 2.4. Исследование склонности к тепловой и отпускной хрупкости

**Тепловая хрупкость.** При длительном воздействии высоких температур некоторые стали приобретают хрупкость, которая в обычных условиях работы им не свойственна. Если такую сталь после нескольких сотен или тысяч часов эксплуатации испытать на ударную вязкость при обычной температуре, то окажется, что она резко снизилась по сравнению с исходной. Это явление получило название тепловой хрупкости.

В сталях перлитного и мартенситного классов тепловая хрупкость (ТХ) развивается при 400-600 °С, и проявляется она не только в снижении ударной вязкости, но также относительного удлинения и сужения, а в ряде случаев и прочностных характеристик.

Тепловая хрупкость объясняется расслоением твердых растворов по химическому составу у поверхности границ зерен.

Определение склонности металла к тепловой хрупкости осуществляется путем нагрева и выдержки в опасном интервале температур, изготовления и испытания ударных образцов, сравнения полученных результатов с исходными.

**Отпускная хрупкость.** Отпускную хрупкость (ОХ) разделяют на необратимую и обратимую (рис. 16). Необратимая отпускная хрупкость (отпускная хрупкость 1-го рода) устраняется при повторном нагреве и поэтому в данном курсе особого интереса не представляет. В дальнейшем под ОХ будем понимать отпускную хрупкость 2-го рода (обратимую ОХ). В отличие от тепловой хрупкости обратимая ОХ наблюдается в закаленных сталях сразу же после их отпуска при 500 – 650 °С. Непременным условием при этом является медленное охлаждение. Так же, как и тепловая, отпускная хрупкость обнаруживается при испытании на ударную вязкость. Все показатели твердости, прочности и пластичности остаются без изменения. Иногда наблюдается уменьшение относительного сужения. При быстром охлаждении после отпуска хрупкость не обнаруживается.

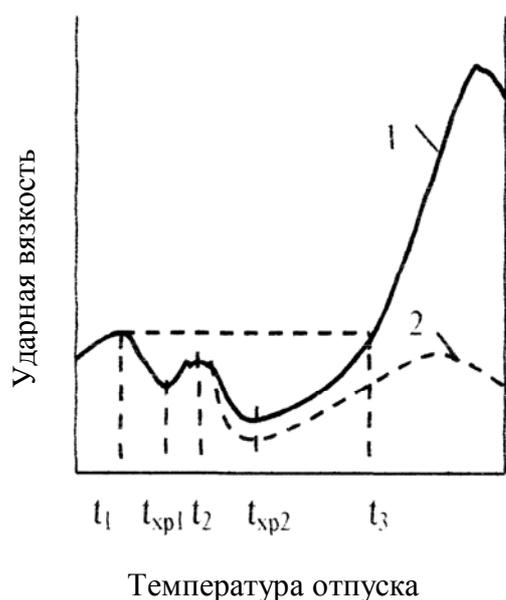


Рис.16. Необратимая и обратимая отпускная хрупкость:

- 1 – охлаждение после отпуска в воде;
- 2 – охлаждение после отпуска с печью;
- $t_1$ — $t_2$  - интервал проявления необратимой отпускной хрупкости;
- $t_3$  - граничная температура среднего отпуска;
- $t_{xp1}$  - температура максимального проявления необратимой отпускной хрупкости;
- $t_{xp2}$  - температура максимального проявления обратимой отпускной хрупкости

Отпускная хрупкость наблюдается в хромистых и марганцовистых сталях. Некарбидообразующие элементы (Ni, Si) её усиливают. Существенное снижение ОХ достигается введением в сталь молибдена или вольфрама.

## 2.5. Исследование ползучести

Многие детали современных машин (паровые и газовые турбины, паровые котлы, авиационные и реактивные двигатели, ракеты и т.д.) работают в условиях высоких температур. При длительной работе металла при высоких температурах в нем может развиваться ползучесть.

Ползучестью называют свойство металлов медленно и непрерывно пластически деформироваться с течением времени при постоянном напряжении (нагрузке) и постоянной температуре. У углеродистых и легированных сталей ползучесть наблюдается начиная с 350-400 °С. По современным представлениям, ползучесть металла рассматривают как результат ряда одновременных процессов, упрочняющих (наклеп, дисперсионное твердение и т.д.) и разупрочняющих металл (отдых и рекристаллизация, коагуляция упрочняющей дисперсной фазы и т.д.).

Ползучесть опасна тем, что может привести к недопустимым остаточным изменениям расчетных размеров деталей. Например, между лопатками и корпусом паровой турбины должен быть небольшой зазор. Если вследствие ползучести хотя бы одна лопатка увеличится настолько, что закроет этот зазор, то в связи с трением лопатки о корпус может произойти авария турбины. Значительное развитие ползучести может привести и к разрушению металла.

Задача экспериментальной оценки сопротивления металла ползучести состоит в определении напряжения, вызывающего допустимую величину остаточной деформации детали за срок ее службы. Величину допустимой остаточной деформации устанавливают в зависимости от условий эксплуатации оборудования и точности сохранения размеров деталей (табл.1).

Таблица 1

Допустимая деформация и скорость ползучести

Деталь	Допустимая степень деформации, %	Срок службы, ч	Допустимая скорость ползучести, %/ч
Детали моторов	0,1-1	50-1000	—
Трубы пароперегревателей	2,0	20000	$1 \cdot 10^{-4}$
Паропроводы	0,3	100000	$3 \cdot 10^{-6}$
Цилиндры паровых турбин	0,3	100000	$1 \cdot 10^{-6}$

Испытания на ползучесть проводят на специальных машинах, в которых длительное время поддерживают постоянные нагрузку и температуру образца. Обычно это машины с рычажным нагружением усилием до 5000 кг, что позволяет испытывать образцы диаметром до 10 мм (рис. 17). Температуру

образца измеряют термопарой, а постоянство температуры поддерживают с помощью электронного потенциометра. Через определенные промежутки времени (например, через 2 ч или через 4 ч) измеряют деформацию с помощью индикаторов с ценой деления от 0,01 до 0,001 мм.

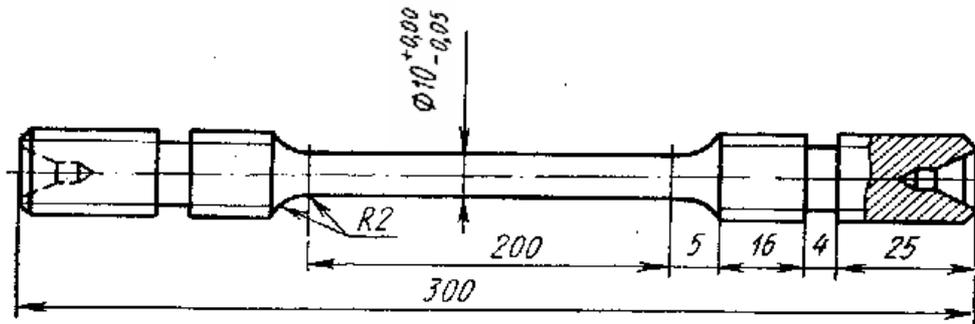


Рис. 17. Образец для испытаний материалов на ползучесть

Длительность испытания образца на ползучесть зависит от срока службы детали или конструкции:

- при кратковременном сроке службы деталей до 10000 ч база испытания образцов принимается равной сроку службы ( $\tau_{исп} = \tau_{сл}$ );
- при длительном сроке службы деталей 100000 ч и более база испытания образцов принимается равной 10000 ч ( $\tau_{исп} = 10000$  ч).

По результатам испытаний строят кривые ползучести в координатах относительное удлинение – время (рис. 18). Отрезок *Oa* соответствует дефор-

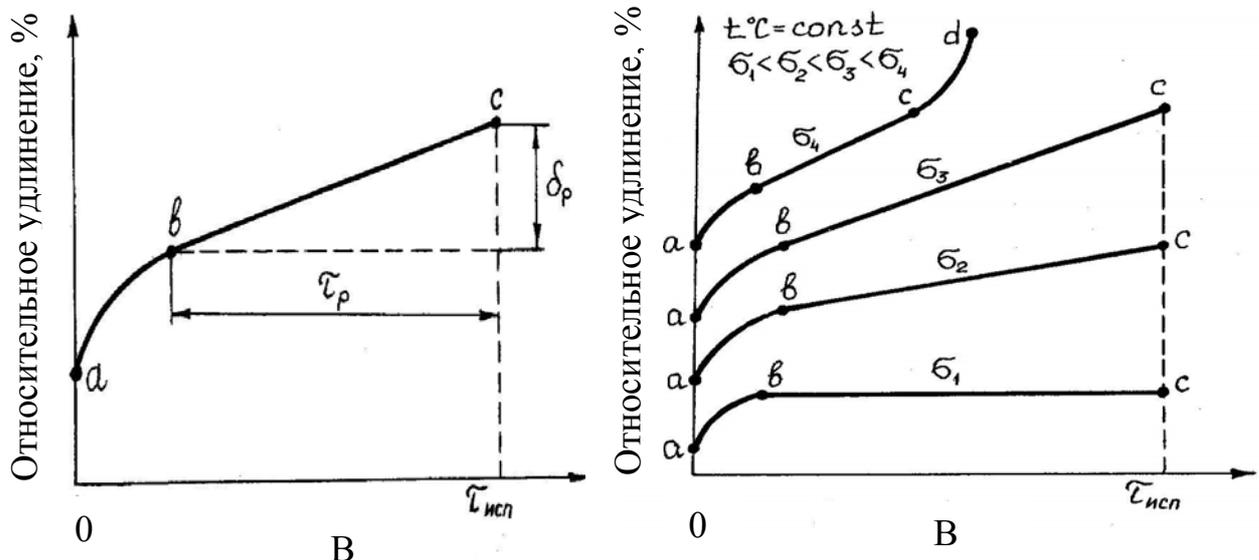


Рис 18. Кривая ползучести

Рис. 19. Кривые ползучести при различных напряжениях

мации образца в момент нагружения. Участок *ав* называют участком неустановившейся ползучести; участок *вс* – участком установившейся ползучести (участок равномерной ползучести), на котором скорость ползучести прибли-

зительно постоянная. На кривой ползучести определяют участок установившейся ползучести и скорость равномерной ползучести на этом участке:  $V_p = \delta_p / \tau_p$ , %/ч, где  $\delta_p$  – относительная деформация на участке установившейся ползучести, %;  $\tau_p$  – продолжительность этого участка, ч.

Чем выше напряжение и температура, тем интенсивнее ползучесть (больше скорость равномерной ползучести) и, следовательно, больше деформация детали за равный промежуток времени (рис. 19). При высоких напряжениях, обычно недопустимых в конструкциях, наблюдается участок  $cd$  с увеличивающейся скоростью ползучести, заканчивающийся разрушением в точке  $d$  (рис. 19, кривая ползучести при  $\sigma_4$ ).

Критерием для оценки сопротивления материала ползучести служит так называемый условный предел ползучести – напряжение, вызывающее определенную скорость ползучести или определенную суммарную деформацию детали за намечаемый срок ее службы.

При кратковременном сроке службы детали (до 10000 ч) деформация образца за срок службы при данном напряжении может быть определена непосредственно по результатам испытаний. За условный предел ползучести в этом случае принимают напряжение, вызывающее заданную степень деформации за срок службы, например,  $\sigma_{1/100}^{750}$  – 1000 ч при 750 °С.

Для определения предела ползучести при заданной температуре проводят обычно испытания трех образцов при разных напряжениях  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , строят кривые ползучести и определяют накопившуюся деформацию за срок службы ( $\tau_{исп} = \tau_{сл}$ )  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ . Построив график зависимости напряжение – деформация в логарифмических координатах (рис. 20), по допустимой дефор-

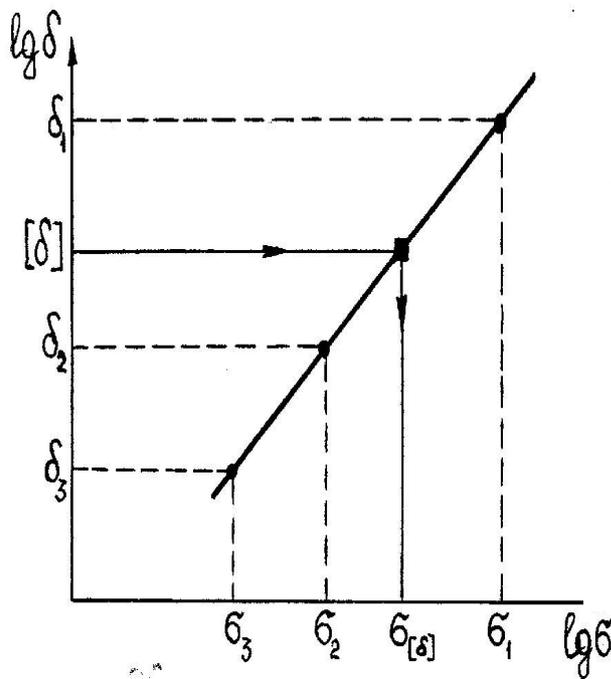


Рис. 20. Определение условного предела ползучести путем интерполяции экспериментальных данных

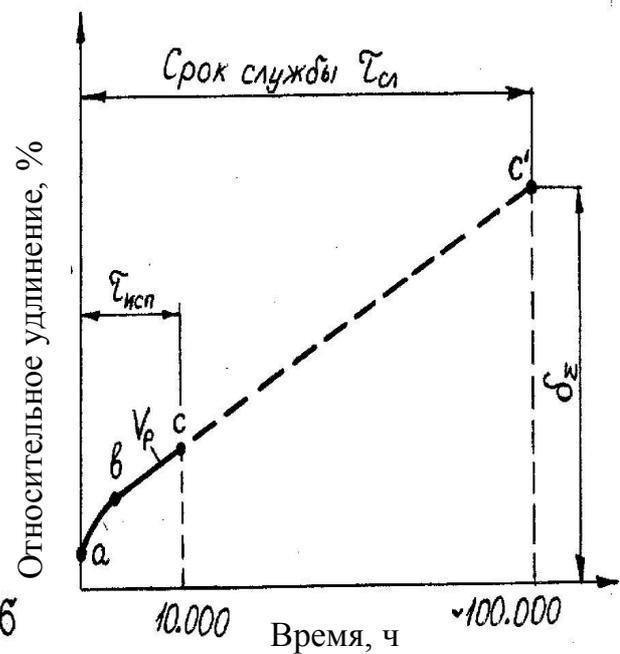


Рис. 21. Схема экстраполяции кривой ползучести для определения деформации за срок службы

магии  $[\delta]$  определяют величину условного предела ползучести  $\sigma_{[\delta]}$  путем линейной интерполяции. Полученные данные уточняют при испытании еще одного – двух образцов при напряжении  $\sigma_{[\delta]}$ .

Срок службы стационарного энергетического оборудования (турбины, паровые котлы) исчисляется десятками лет (100000 ч и более). Естественно, что при таком длительном сроке службы непосредственно опытным путем определить деформацию невозможно. Для определения деформации прибегают к линейной экстраполяции, полагая, что скорость деформации на участке равномерной ползучести сохраняется постоянной в течение всего последующего срока службы (рис. 21).

За условный предел ползучести в этом случае принимают напряжение, вызывающее заданную равномерную скорость ползучести. Например,  $\sigma_{2 \cdot 10^{-6}}^{700}$  – напряжение, вызывающее  $V_p = 2 \cdot 10^{-6} \%$ /ч при  $700^\circ\text{C}$ .

Допустимую скорость  $[V_p]$  можно определить, зная допустимую степень остаточной деформации и срок службы (см. табл. 1).

Для определения пределов ползучести в некотором интервале рабочих температур проводят серию испытаний при нескольких (3 – 4) разных напряжениях. Для каждого образца строят кривую ползучести и определяют скорость равномерной ползучести.

По результатам обработки всех кривых ползучести строят сводный график в координатах напряжение – логарифм  $V_p$  (левая часть) и напряжение – температура (правая часть) – рис. 22.

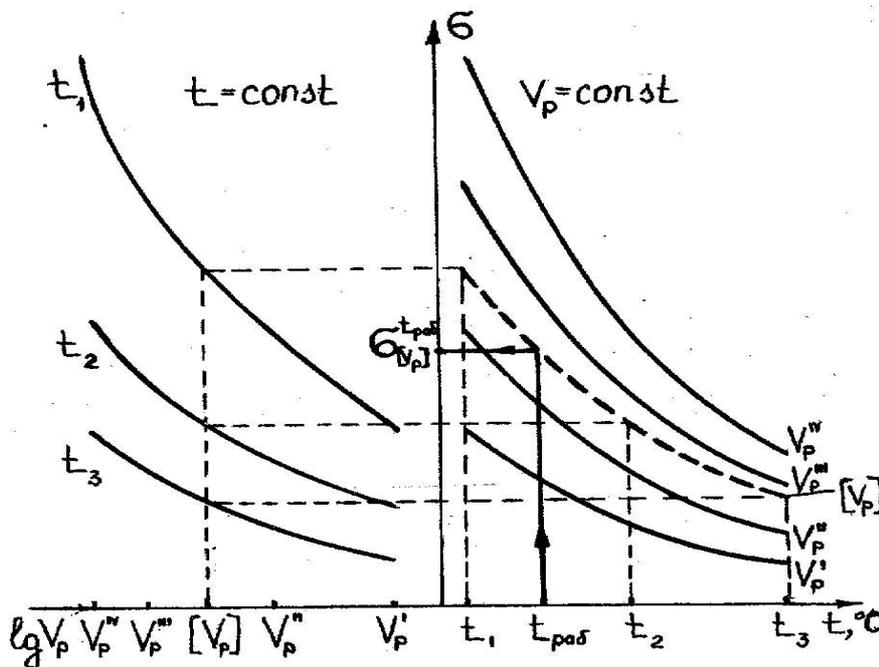


Рис. 22. Определение условного предела ползучести

Эти графики используются конструкторами для определения величины соответствующих условных пределов ползучести по допустимой скорости равномерной ползучести  $[V_p]$  при заданной рабочей температуре  $t_{\text{раб.}}$ , как показано на рис. 22.

## 2.6. Исследование длительной прочности

Механические характеристики, полученные при обычных испытаниях растяжением, продолжающихся всего лишь несколько минут ( до 20 . . . 30 мин), могут быть пригодными только для оценки поведения металлов при сравнительно невысоких температурах ( например, для углеродистых сталей до 300 – 350 °С, легированных сталей до 350 – 400 °С, цветных металлов от 0 до 150 – 250 °С). При более высоких температурах характеристики прочности и пластичности сталей и сплавов очень сильно зависят от продолжительности самого процесса испытания (продолжительности действия нагрузки ). В связи с отмеченным, выше указанных температурных интервалов кратковременные прочностные характеристики в значительной мере являются условными, и не они являются определяющими при расчете деталей на прочность. В таком случае напряжение, которое вызывает разрушение металла при высоких температурах, находится в зависимости от продолжительности приложения нагрузки, т.е. разрушающее напряжение имеет временной характер. Чем выше температура, тем ниже разрушающее напряжение при одинаковом времени его действия.

Напряжение, вызывающее разрушение при определенной температуре за установленное время, называют длительной прочностью. Таким образом, при высоких температурах работоспособность металла в составе нагруженных конструкций определяется двумя основными факторами: рабочей температурой и сроком службы изделия.

Расчетное время работы энергетических установок различно и обычно характеризуется следующими величинами:

- 1-я и 2-я ступени ракеты, выводящей спутник на орбиту, - несколько секунд;
- баллистическая ракета – несколько минут;
- авиационная турбина – 100 – 3000 ч;
- судовая турбина – 10 – 50 тыс. ч;
- паросиловое оборудование различных стационарных электростанций – 100 – 200 тыс. ч.
- стационарные атомные электростанции – до 400 тыс. ч;

Рабочие напряжения в кратковременно действующих энергетических установках значительно выше, чем в стационарных тепловых и, тем более, ядерных энергетических установках, так как в первом случае практически отсутствует фактор времени.

Для оценки сопротивления сталей и сплавов разрушению при действии постоянной нагрузки и высокой температуры проводят испытания на длительную прочность. По результатам испытаний определяют предел длительной прочности – напряжение, которое вызывает разрушение металла при определенной температуре за установленный срок службы.

Использование для обработки экспериментальных данных двойных

логарифмических координат  $\lg \sigma - \lg \tau$  дает возможность установить экстраполированные пределы длительной прочности, т.е. определить один из основных расчетных критериев жаропрочности конструкционных материалов. Однако необходимо учитывать, что в действительности в двойных логарифмических координатах зависимость времени до разрушения от действующего напряжения приближенно выражается прямой, имеющей, к тому же, перегиб книзу (рис. 23). Значение места перелома кривых длительной прочности в двойных логарифмических координатах имеет большое практическое значение при установлении предела длительной прочности (особенно при экстраполяции от сравнительно небольшого времени до разрушения).

Наличие перелома на прямой длительной прочности в координатах  $\lg \sigma - \lg \tau$  ранее связывали с изменением характера разрушения сталей и сплавов, т.е. с переходом от внутризеренного (транскристаллитного) разрушения к межзеренному (интеркристаллитному). Такое толкование этого явления позже было отвергнуто. Не подтвердилась и связь перелома со структурны-

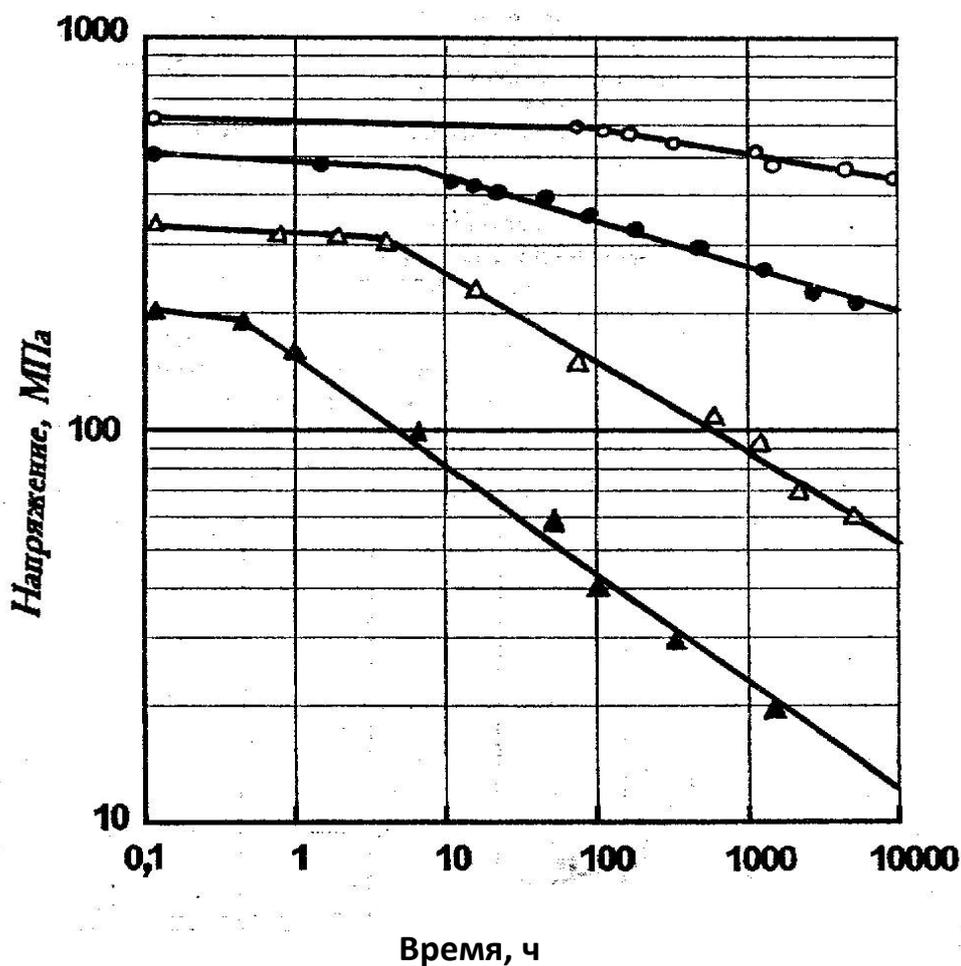


Рис. 23. Длительная прочность стали 08X18H10T при различных температурах

ми превращениями (с коагуляцией и изменением расположения карбидной фазы, с выделением новых вторичных фаз и обеднением твердого раствора легирующими элементами и др.).

На основе работ кафедры металловедения Санкт – Петербургского государственного Политехнического университета отвергается физический смысл переломов кривых длительной прочности в двойных логарифмических координатах. Наличие их связывается с применением для обработки результатов эксперимента именно двойных логарифмических координат.

Временная зависимость длительной прочности в простых координатах  $\sigma - \tau$ , отображающих истинное изменение ее, в первом приближении, может быть охарактеризована кривой с двумя участками: участком резкого снижения длительной прочности при небольшом времени до разрушения (до 100-200 ч) и последующим относительно пологим участком (рис. 24). Особенно резкое падение длительной прочности происходит при времени до разрушения в пределах до 1-2 ч. Это присуще как аустенитным сталям и сплавам, так и другим теплоустойчивым и жаропрочным сплавам. С увеличением же времени до разрушения темп падения прочности замедляется.

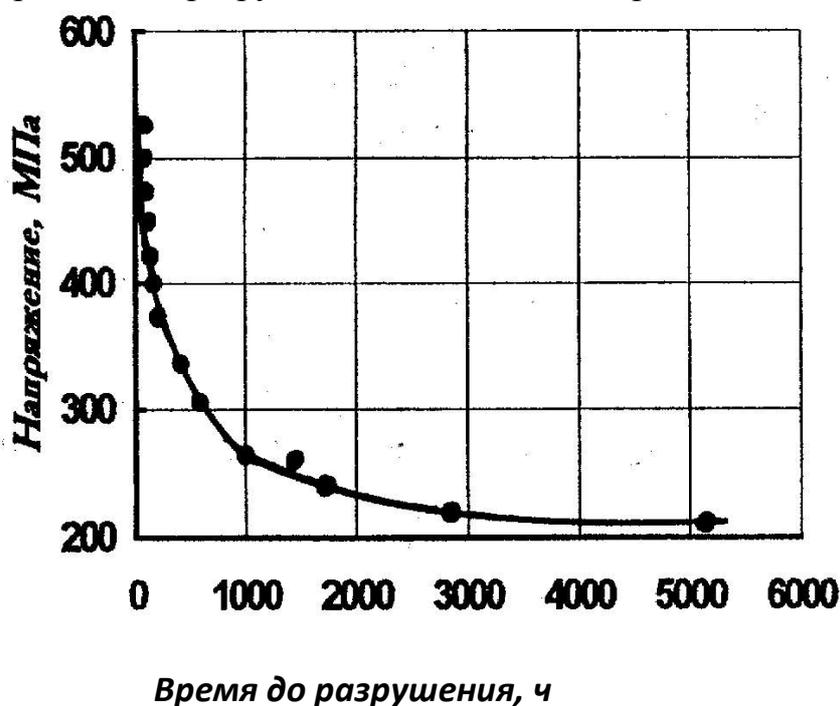


Рис. 24. Временная зависимость длительной прочности (сталь 06X17Г17ДАМБ при температуре 650 °C)

Разупрочнение металла во времени, т.е. проявление временной зависимости прочности выше определенной температуры в основном связывается с зарождением и развитием трещин, которые ослабляют металл в результате уменьшения сечения и концентрации напряжений. В таком случае резкое падение прочности при относительно небольшом времени до разрушения свидетельствует о более интенсивном накоплении повреждений при приложении высоких напряжений. Резкое снижение прочности при этом следует связывать с переходом деформации с тела зерна на его границы, т.е. с увеличением межзеренной повреждаемости.

**Методика испытаний на длительную прочность.** Испытания проводят на стандартных образцах (чаще всего цилиндрических диаметром 5 мм и расчетной длиной 25 мм), устанавливаемых в испытательную машину, снабженную нагружающим устройством, нагревательной печью с терморегулятором и приборами для измерения температуры. Испытывают обычно

10-15 образцов при одной температуре, но разных уровнях приложенных напряжений. Для каждого образца, в зависимости от приложенной нагрузки (напряжения), определяют время до разрушения ( $\tau$ , ч) и относительные удлинение и сужение после длительного испытания. Для энергетических установок с длительным сроком службы время до разрушения испытываемых образцов доводят до 10-15 тыс. ч.

По полученным при различных температурах экспериментальным данным строят кривые длительной прочности в двойных логарифмических координатах ( $\lg \sigma - \lg \tau$ ), а также кривые длительной пластичности ( $\lg \sigma - \lg \tau$ ).

Затем определяют пределы длительной прочности за требуемое время, которое обозначается следующим образом:  $\sigma_{\tau}^t$ , где

-  $\sigma$  – напряжение, вызывающее разрушение металла при данной температуре за требуемый срок службы, МПа;

-  $t$  – рабочая температура, °С;

-  $\tau$  – срок службы, ч.

Например,  $\sigma_{5000}^{700} = 150$  МПа означает, что сталь или сплав при температуре 700 °С на базе 5000 ч имеет предел длительной прочности, равный 150 МПа.

При определении предела длительной прочности для длительного срока службы детали проводят экстраполяцию опытных данных на требуемый срок службы.

Как было указано выше, в двойных логарифмических координатах  $\lg \sigma - \lg \tau$  имеет место линейная зависимость между напряжениями и временем до разрушения. Поэтому при обработке результатов испытаний на длительную прочность используют метод математической статистики для определения положения прямой длительной прочности и поля разброса опытных данных. Статистическую обработку экспериментальных данных проводят на компьютере.

## 2.7. Определение циклической вязкости

Под циклической вязкостью понимают способность металлов в необратимой форме, не разрушаясь, поглощать механическую энергию при взаимодействии переменных, циклически повторяющихся напряжений.

Величина циклической вязкости характеризуется работой, необратимо поглощаемой металлом на единицу объема за один полный цикл нагружения. Эту работу обычно определяют при изучении свободного затухания колебаний образца, записанного при помощи осциллографа (рис. 25).

На полученной кривой затухания колебаний выбирают участок, имеющий  $n$  полных циклов колебаний, измеряют амплитуды колебаний  $a_1$  и  $a_n$  и устанавливают величину логарифмического декремента затухания

$$\delta = \frac{\ln a_1 - \ln a_n}{n - 1} = \frac{1}{n - 1} \ln \frac{a_1}{a_n} .$$

Если обозначить через  $W$  энергию одного упругого колебания, а через  $\Delta W$  потерю энергии на деформацию за 1 цикл, то отношение  $\psi = \frac{\Delta W}{W}$  будет характеризовать рассеяние энергии (циклическую вязкость). Энергия колебания прямо пропорциональна квадрату его амплитуды  $W = k \cdot a^2$ ,  $\Delta W = dka^2 = 2kada$ ; откуда  $\psi = \frac{2kada}{ka^2} = 2 \frac{da}{a} = 2\delta$ . Таким образом, циклическая вязкость равна удвоенному логарифмическому декременту затухания колебаний  $\Psi = 2\delta$ .

Исследования циклической вязкости черных металлов показали, что:

- величина циклической вязкости не зависит от предела выносливости;
- более высокой работоспособностью при переменных циклических нагрузках и наличии концентраторов напряжений обладает тот металл, циклическая вязкость которого больше;
- чугун имеет весьма значительную циклическую вязкость;
- цветные металлы и сплавы, как правило, имеют малую циклическую вязкость.

## 2.8. Испытания на прочность при циклически изменяющихся напряжениях

Высокие температуры оказывают существенное влияние на прочность металла, работающего в условиях циклического нагружения.

Предел выносливости конструкционных сталей и сплавов с повышением температуры снижается тем больше, чем значительнее приложении нагрузки. Поэтому характеристики предела выносливости при высоких температурах в известной мере условны и зависят от продолжительности испытания, т.е. от количества циклов нагружения и их частоты.

База испытаний, равная  $1 \cdot 10^6$  циклов, принятая при нормальной температуре, недостаточна. Для высокотемпературных испытаний рекомендуется база, равная  $5 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^8$  циклам.

Чтобы сократить число испытаний предварительно определяют границы «вилки» нагрузок (рис. 26), что позволяет иметь ориентировочное представление о величине предела выносливости.

Для предварительного приближенного определения этой величины обычно используют расчетный метод, основанный на результатах статических испытаний на растяжение. Например, для стали 12X13 при температурах до  $500^\circ\text{C}$  предел выносливости определяют из соотношения

$$\sigma_{-1t} = 0,25(\sigma_{vt} + \sigma_{Tt}) + 50 \text{ МПа},$$

где  $\sigma_{vt}$  и  $\sigma_{Tt}$  – пределы прочности и текучести стали при температуре испытания  $t$ .

На рабочих лопатках и других деталях турбин, работающих при повышенных температурах и переменных напряжениях, действительный предел выносливости ниже найденного при испытании образцов. В основном это

объясняется отрицательным влиянием на предел выносливости концентраторов напряжений, которых, как правило, не лишены реальные детали (острые кромки, малые переходные радиусы, отверстия под бандажную проволоку, риски на поверхности и т.д.).

Испытания на усталость при высоких температурах производят на разнообразных машинах, а следовательно, используются образцы различной формы и размеров.

Установки МВУ - 1 (ЦНИИТМАШ) позволяют производить испытания на усталость при консольном изгибе одновременно 40 образцов при температурах до 800 °С.

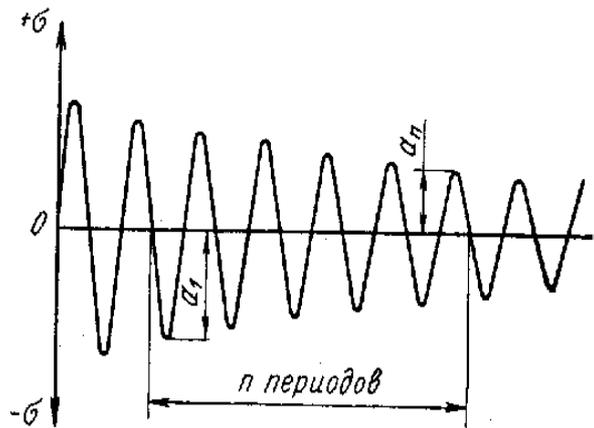


Рис. 25. Кривая затухания колебаний

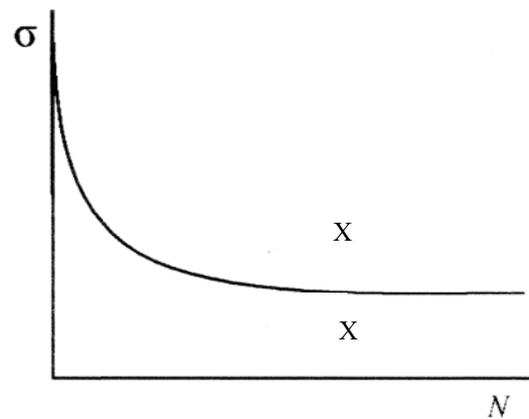


Рис. 26. Определение границ "вилки"

На рис. 27 показан характер снижения предела усталости  $\sigma_{-1}$  и предела длительной прочности  $\sigma_{дл}$  с повышением температуры. Каждому сплаву свойственна определенная температура равнопрочности  $t_x$  при действии статических и циклических напряжений. Длительная прочность снижается более интенсивно, чем предел выносливости, определенный при той же длительности испытаний.

В условиях эксплуатации, при которых рабочая температура выше температуры равнопрочности, предел выносливости металла для оценки его надежности представляет значительно меньший интерес, чем длительная прочность.

## 2.9. Испытания на релаксацию

В теплоэнергетических установках, работающих при высоких температурах, имеется много упругонапряженных звеньев, в которых явления релаксации напряжений ограничивают длительность их службы. Это прежде всего различные фланцевые соединения, крепежные детали которых предварительным упругим натягом обеспечивают необходимую плотность. В результате протекания релаксации предварительный натяг в болтах или шпильках с течением времени ослабевает, и требуемая плотность соединения нарушается. Релаксации напряжений подвержены и многие другие звенья, например,

пружины и напряженные посадочные соединения, для которых релаксация допустима только в узких заданных пределах.

**Релаксацией называется явление самопроизвольного снижения напряжений.** Причиной релаксации напряжений при высоких температурах является ползучесть, которая, в отличие от обычной ползучести, протекает не при постоянном, а при уменьшающемся напряжении.

Для описания явления релаксации напряжений нагрузим образец растягивающей силой, которая вызывает напряжения, меньшие предела упругости материала.

Упругая деформация  $\epsilon_0$  в момент нагружения:  $\epsilon_0 = \frac{Y_0}{E}$ , где  $\sigma_0$  – напряжение в момент времени  $\tau = 0$ ;  $E$  – модуль упругости. Зафиксируем размеры растянутого образца, жестко закрепив его концы. С течением времени в растянутом образце начнется ползучесть, появится остаточная деформация, которая будет расти за счет уменьшения упругой деформации  $\epsilon_e = \frac{Y_\tau}{E}$ , где  $\sigma_\tau$  – текущее релаксирующее напряжение в момент времени  $\tau$ .

Так как полная деформация во времени вследствие жесткого закрепления концов образца не меняется, будет происходить ее перераспределение, а именно увеличение  $\epsilon_c$  и уменьшение  $\epsilon_e$ , что может быть записано в виде следующего равенства:  $\epsilon_0 = \epsilon_c + \epsilon_e = \text{const}$ , где  $\epsilon_0$  — полная деформация;  $\epsilon_c$  – остаточная деформация;  $\epsilon_e$  – упругая деформация.

Представив предыдущее уравнение в виде  $\frac{\sigma_0}{E} = \epsilon_c + \frac{\sigma_\tau}{E} = \text{const}$ ,

заметим, что если остаточная деформация  $\epsilon_c$  растет во времени, то напряжение  $\sigma_\tau$  падает. В начальный период релаксации напряжения снижаются быстро, затем скорость этого снижения падает (рис. 28).

Предельной величиной  $\epsilon_c$  при релаксации, которая практически не достигается, является  $\epsilon_c = \epsilon_0 = \frac{Y_0}{E}$ , при этом  $\sigma_\tau = 0$ , так как  $\epsilon_e = \frac{\sigma_\tau}{E} = 0$ .

Для обеспечения нужной плотности соединений при изготовлении болтов и других крепежных деталей следует выбирать материалы, стойкие против релаксации напряжений. Для осуществления такого выбора материалы испытываются на релаксацию напряжений.

Релаксационная стойкость материала при температуре  $t$  может быть оценена одной из следующих характеристик:

1. величиной падения напряжения за время  $\tau$  в абсолютных единицах

$$\Delta y_\phi^t = y_0^t - y_\phi^t;$$

2. падением напряжения за время  $\tau$  в относительных и безразмерных величинах

$$\Delta y_\phi^t = \frac{y_0^t - y_\phi^t}{y_0^t};$$

3. величиной безразмерного отношения

$$R_{\phi}^t = \frac{y_{\tau}^t}{y_0^t} \cdot 100 \%$$

Недостаток всех приведенных характеристик заключается в существовании зависимости величины падения напряжения  $\Delta y_{\phi}^t$  от начального напряжения  $y_0^t$ . Символ  $t$  показывает, что все соотношения относятся к постоянной температуре.

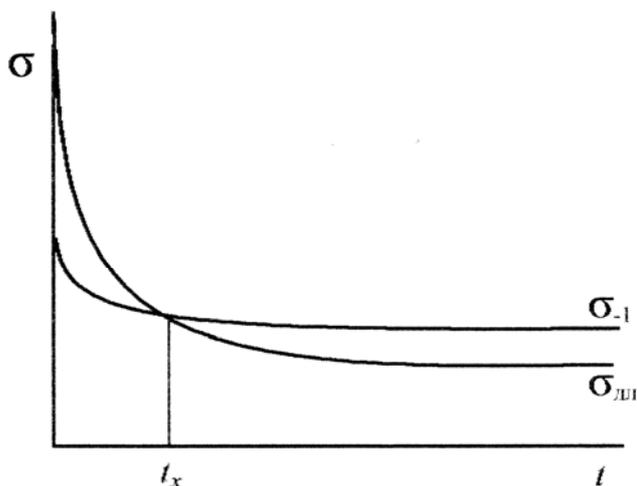


Рис. 27. Характер изменения предела усталости  $\sigma_{-1}$  и предела длительной прочности  $\sigma_{дл}$ .

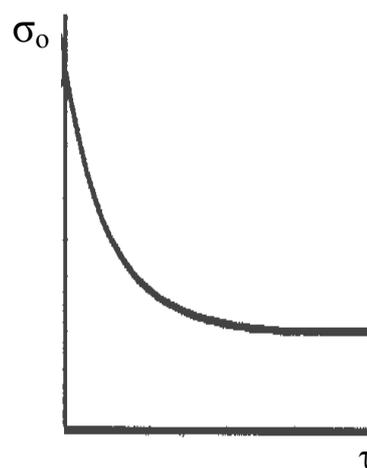


Рис. 28. Кривая релаксации

При длительной службе крепежных деталей (например, болтов, шпилек и др.) при высоких температурах предварительный натяг скрепленных элементов вследствие протекания релаксации напряжений снижается ниже допустимого. Чтобы предотвратить нарушение плотности соединения, приходится периодически подтягивать болты и шпильки. Повторное нагружение должно производиться с расчетом падения напряжения в скрепляющих элементах во времени до величины, несколько превышающей напряжение, при котором происходит потеря плотности. Обычно это напряжение равно 100-120 МПа. В современных стационарных установках для подтягивания большинства крепежных деталей требуется довольно длительная остановка агрегатов, вследствие чего подтягивание должно быть приурочено к моменту ревизии оборудования, производимой не чаще одного раза в год. Из изложенного следует, как важно повышать релаксационную стойкость крепежных деталей.

Широко распространен метод изучения релаксации при изгибающих напряжениях на кольцевых образцах И.А. Одингга (рис. 29). Напряжения в образце создают путем введения в прорезь  $CC$  клина  $K$ . Кольцо с клином помещают в печь с заданной температурой на определенное время, затем извлекают из печи и охлаждают. Клин удаляют и измеряют раскрытие кольца. Напряжения на наружных волокнах расчетной части образца прямо пропорциональны величине раскрытия кольца  $\Delta$ .

Если эти напряжения таковы, что образец претерпевает только упругую деформацию, то после удаления клина концы образца сблизятся на величину  $\Delta$  до первоначального размера прорези СС.

Если же общая деформация представляет сумму упругой и пластической деформаций, то после удаления клина концы образца сблизятся тем меньше, чем больше пластическая деформация.

Остаточное раскрытие кольца  $\Delta_1$  после удаления клина позволяет определить снижение напряжения. Повторив несколько раз на одном и том же образце аналогичные операции, строят кривую релаксации.

Напряжения в крайних волокнах рабочей части кольцевого образца в зависимости от раскрытия кольца  $\Delta_1$  приблизительно определяют по формуле  $\sigma = E A \Delta_1$ , где  $E$  - модуль упругости металла, ГПа;  $A$  — коэффициент, равный 0,000583.

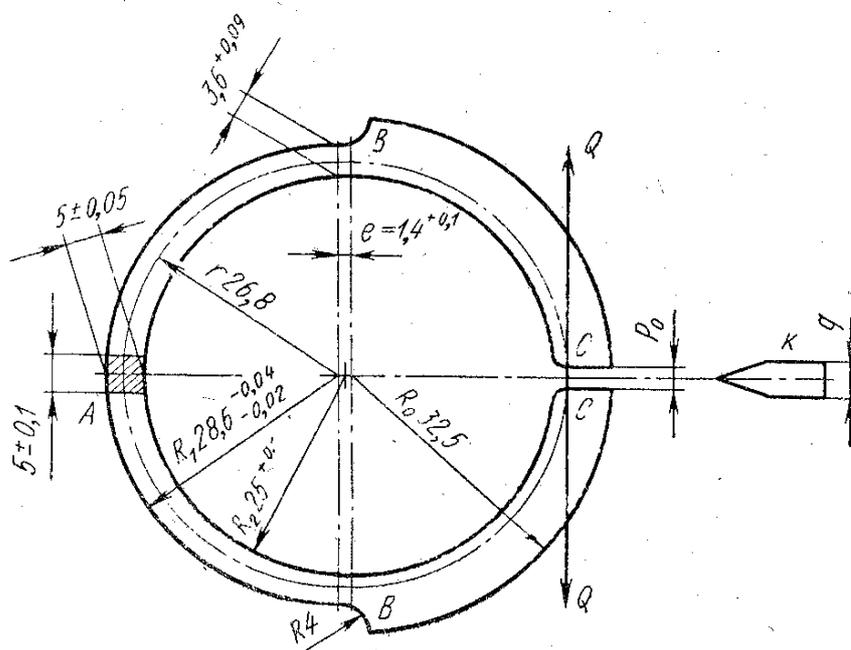


Рис. 29. Кольцевой образец для испытания металлов на ползучесть и релаксацию

Введение в среднеуглеродистую сталь хрома, ванадия и особенно молибдена способствует повышению релаксационной стойкости. Существенное влияние оказывает структура стали. Так, релаксационная стойкость при 400 – 450 °С у стали с пластинчатым перлитом выше, чем у стали с зернистым перлитом. Поэтому нормализация с последующим высоким отпуском сообщает Cr - Mo - V сталям более высокую релаксационную стойкость, чем закалка с отпуском (улучшение). В аустенитных сталях наибольшая релаксационная стойкость наблюдается при высокой стойкости твердого раствора и упрочнении мелкодисперсными выделениями избыточных фаз. Выделение  $\delta$ - феррита и наличие в структуре нестойких карбидных фаз резко снижает релаксационную стойкость этих сталей.

### **3. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И СТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Под технологическими факторами авторы подразумевают определенные операции и результаты металлургического передела, включая термическую обработку, которые оказывают влияние на комплекс свойств жаропрочных материалов.

Ниже будут рассмотрены вопросы влияния метода выплавки и разливки металла, условий деформирования заготовок, величины зерна и разнотерности и т.д. Вместе с тем, следует иметь в виду, что теплоэнергетическое оборудование работает длительное время в условиях высоких температур. Поэтому в период эксплуатации в металле могут произойти структурные изменения и, как следствие, деградация его свойств.

#### **3.1. Влияние способа выплавки и разливки металла**

Неблагоприятное влияние вредных примесей общеизвестно. К ним относятся P, S, цветные металлы Pb, Sn, As, Sb. Снижают качество стали неметаллические включения и газы ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ). Поэтому при производстве жаропрочных сталей получили широкое распространение рафинирующие способы выплавки:

- в вакууме;
- в защитных атмосферах;
- различные переплавы (например, вакуумно-дуговой – ВДП и электрошлаковый – ЭШП).

Основное назначение рафинирующих способов получения стали и сплавов – резко сократить содержание в них кислорода и, как следствие, различного рода оксидов. Это позволяет повысить:

- вязко-пластические свойства,
- трещиностойкость на границе раздела «оксид-матрица»;
- газоплотность.

Наиболее эффективно применение вакуумной металлургии, в частности ВДП, если этот переплав осуществлять 2— 3 раза. Содержание кислорода при ВДП сокращается до 50 раз (0,00015 % вместо 0,008 %), ударная вязкость увеличивается вдвое. Металл практически становится нечувствительным к надрезу при испытании образцов на длительную прочность. После ВДП (и других переплавов) наблюдается снижение прочности на 5 -10 %.

Вместе с тем, переплав благоприятно влияет на работоспособность материалов, уменьшая разброс значений характеристик длительной прочности.

#### **3.2. Металлургические дефекты**

В настоящем разделе рассмотрим только дефекты готовой продукции, которые можно обнаружить при внешнем осмотре. Требования к шерохова-

ности поверхности металлопродукции изложены в ГОСТах и технических условиях.

Термины и определения дефектов поверхности регламентированы ГОСТ 20847—75 «Прутки, полосы и профили горячекатаные и кованные из сталей и сплавов. Дефекты поверхности» и ГОСТ 21014—75 «Листы и ленты стальные. Дефекты поверхности и формы». Некоторые определения дефектов приведены ниже.

**Раскатанное загрязнение** (рис. 30а) — вытянутое вдоль направления деформации загрязнение слитка или литой заготовки шлаком или огнеупорами. На микрошлифах по месту дефекта видны грубые неметаллические включения, обезуглероживания нет.

**Раскатанный пузырь** (рис. 30б) — прямолинейное нарушение сплошности поверхности вдоль направления деформации. Образуется из наружного или подповерхностного пузыря слитка или литой заготовки. Часто дефект имеет групповое расположение. Полость дефекта заполнена окалиной. Стенки полости обезуглерожены, зона обезуглероживания резко ограничена и насыщена мелкими оксидами. Полость дефекта расположена примерно под прямым углом к поверхности. Образуется вследствие попадания влаги при выпуске и разливке или при высокой газонасыщенности металла.

**Раскатанная трещина** (рис. 30в,г) — разрыв («горячая трещина»), образовавшаяся в слитке или литой заготовке при высоких температурах в период затвердевания из-за недостаточной прочности корки затвердевшего металла, может вытягиваться вдоль направления деформации. Дефект заполнен окалиной. Стенки дефекта обезуглерожены, разрыв может быть разветвлен. Аналогичный дефект образуется из трещин напряжения («холодная трещина») в слитке или литой заготовке.

**Раскатанная корочка** (рис. 30д) — местное отслоение металла, образовавшееся в результате раскатки завернувшихся корочек, заливин и брызг на поверхности слитка или литой заготовки. На микрошлифах в зоне дефекта наблюдается обезуглероживание и скопление неметаллических включений сложного состава, шлака и огнеупоров. Дефект может иметь небольшой наклон к поверхности или идти почти параллельно ей.

**Рванины** (рис. 30е) — раскрытые разрывы, расположенные поперек или под углом к направлению наибольшей вытяжки при деформации. Образуются вследствие пониженной пластичности металла при деформации. В разрывах может быть окалина, а зоны у стенок дефекта могут быть насыщены оксидами и нитридами.

**Прокатная плена** (рис. 30ж) — отслоение металла языкообразной формы, соединенное с основным металлом одной стороной, образовавшееся вследствие раскатки рванин или следов глубокой зачистки местных дефектов поверхности. Нижняя поверхность отслоения и металл под ним покрыты

окалиной. На микрошлифе в зоне, прилегающей к дефекту, может наблюдаться обезуглероживание.

**Чешуйчатость** (рис. 30з) — отслоения и разрывы в виде сетки, образовавшиеся при деформации вследствие пониженной пластичности или перегрева металла. На микрошлифах разрывы проходят по границам зерен и сопровождаются оксидами и эвтектическими фазами.

**Трещина напряжения** (рис. 30и,к) — прямолинейный или зигзагообразный разрыв, идущий вглубь металла под прямым углом к поверхности. Образуется вследствие напряжений, вызванных структурными превращениями. На микрошлифе трещина напряжения проходит по границам зерен, имеет тонкий конец и не окислена.

**Ус** (рис. 30л,м) — продольный выступ с одной или двух диаметрально противоположных сторон, образуется вследствие неправильной подачи металла в калибр, переполнения калибра или неправильной настройки валков и привалковой арматуры.

**Закат** (рис. 30н,о) — прикатанный продольный выступ металла с одной или двух диаметрально противоположных сторон, образовавшийся при вдавливании уса или подреза. Дефект может иметь зазубренный край. На поперечном микрошлифе дефект располагается под острым углом к поверхности. Конец дефекта не разветвлен, заполнен окалиной и огибается волокном. Металл по дефекту обезуглерожен.

**Шлифовочные трещины** (рис. 30п) — разрывы, иногда в виде сетки, образовавшиеся при травлении металла, имевшего напряжения от структурных превращений или деформаций. Типичны для металла с мартенситной структурой. Трещины распространяются по границам зерен.

**Волосовины** (рис. 30р) — нитевидные несплошности, расположенные вдоль направления деформации; образуются из скоплений неметаллических включений, вытягивающихся вдоль направления деформации и образующих неглубокие дефекты различной протяженности.

**Пузырь-вздутие** (рис. 30с) — дефект поверхности листов в виде вспучивания металла, образующийся из-за загрязнения металла неметаллическими включениями или газовыми пузырями. Образование пузырей-вздутий часто наблюдается при насыщении водородом тонких листов в процессе травления. В местах прослоек (обычно силикатов) или несварившихся газовых пузырей накопившийся водород образует вздутие. Пузыри-вздутия образуются также при быстром нагреве листов металла с прослойками включений.

**Расслоение** (рис. 30т) — дефект на торцах и кромках листов, представляет собой несплошность, образующуюся из-за несвариваемости металла вследствие загрязнения неметаллическими включениями (шлаком, огнеупором и др.).

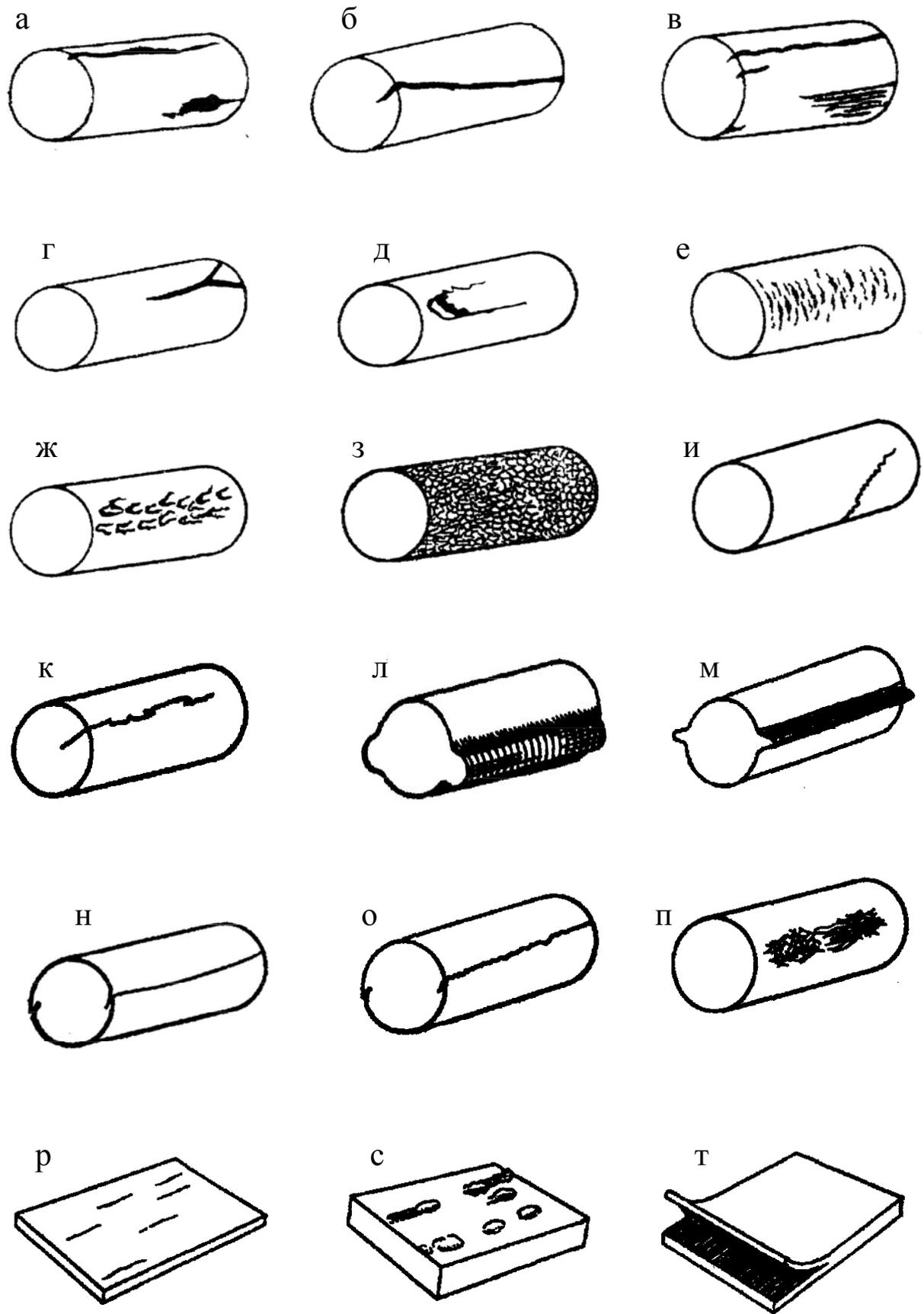


Рис. 30. Металлургические дефекты

### 3.3. Влияние условий деформирования заготовок

Технология деформирования должна обеспечить:

- отсутствие участков с неполностью разбитой литой структурой;
- недопущение образования зон с рекристаллизованной разнотельной структурой (в процессе деформирования или последующей термической обработки);
- расположение волокон металла в направлении, благоприятном для работы детали.

Вышеперечисленные факторы могут оказывать определенное влияние на характеристики механических свойств и жаропрочность металла.

Участки с неразбитой литой структурой создают анизотропию механических свойств и поэтому могут привести к перераспределению напряжений и снижению запасов прочности.

В процессе деформирования металл приобретает ту или иную степень холодного, полугорячего или горячего наклепа.

**Холодный наклеп** обычно приводит к понижению деформационной способности сплавов, способствует интенсификации выделения карбидов типа  $M_{23}C_6$  и образования  $\sigma$ -фазы в аустенитных сталях. Наклеп более 5 % в большинстве случаев отрицательно сказывается на сопротивляемости термической и механической усталости.

А вот поверхностный наклеп может оказывать на характеристики усталости положительное влияние. Причиной тому служат поверхностные сжимающие остаточные напряжения.

В тех случаях, когда деформационная способность сплава определяет его работоспособность, после наклепа детали подвергают термической обработке (закалка и отпуск), устраняющей отрицательное влияние наклепа (термическая обработка листов, турбинных лопаток после механической обработки, гибов труб и т.д.).

**Полугорячий наклеп** приводит к повышению предела текучести и длительной прочности, однако при температурах не выше 650 °С. Полугорячий наклеп широко используется в США и Англии для упрочнения турбинных дисков малых и средних размеров.

**Горячий наклеп** применяют для повышения жаропрочных свойств. При этом используют термомеханическую (ТМО) и механикотермическую обработку (МТО).

Так, ВТМО (высокотемпературная термомеханическая обработка) при 1100 °С с деформацией 20 % приводит к повышению усталостной долговечности ( $\sigma_{-1}$ ) стали 37Х12Н8Г8МФБ при 650 °С в 1,5-2 раза; при 800 °С - в 4-5 раз.

Применение МТО позволяет для сплавов ХН77ТЮ и ХН70ВМ увеличить время до разрушения при испытании при 600 °С до 30 раз. Скорость ползучести уменьшается в 1,3 — 1,9 раза. Для сталей 12Х16Н25М6 и 12Х18Н9Т уменьшение скорости ползучести после МТО достигает 20 крат.

### 3.4. Влияние величины зерна на свойства жаропрочных сталей и сплавов

Увеличение размеров зерен приводит к существенному возрастанию плотности выделения карбидов по их границам и, как следствие, к снижению ударной вязкости, предела прочности, относительного удлинения и относительного сужения.

Известно одно исключение из этого правила. В сплаве нимоник-90 (ХН77ТЮР) повышение температуры закалки до 1100 – 1200 °С способствует росту зерна (для случая закалки в воде) и увеличению скорости ползучести, т.е. все по классическому варианту.

Если же этот сплав после высокотемпературного нагрева (1100-1200 °С) охладить до 900-1000 °С и выдержать при этом 16 ч, то в результате старения по границам крупных зерен выделяются карбиды такой формы, что скорость ползучести окажется более низкой по сравнению с мелкозернистым металлом (рис. 31).

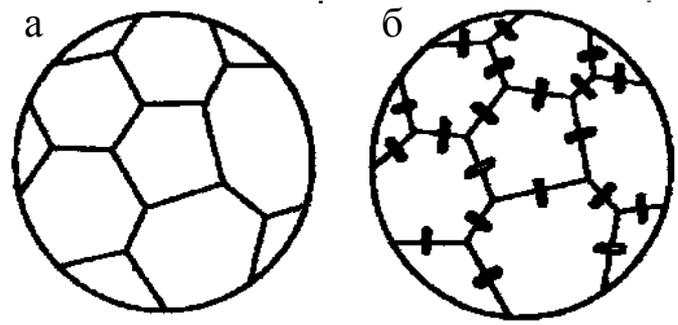


Рис. 31. Структура сплава ХН77ТЮР (схема) после различных режимов термической обработки:  
 а – 1100-1200 °С, охлаждение в воде;  
 б – 1100-1200+900-1000 °С, 16 ч, охлаждение в воде

С укрупнением зерна увеличивается скорость проникновения макротрещин вглубь металла (при ТЦО). На рис. 32 показано влияние величины зерна на сопротивление усталости.

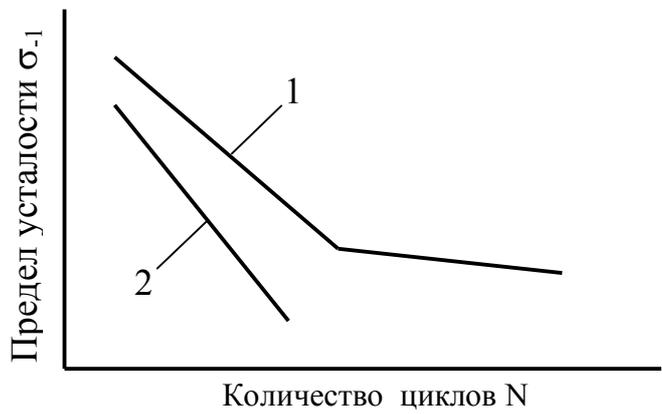


Рис. 32. Влияние величины зерна на сопротивление усталости:  
 1 – мелкое зерно;  
 2 – крупное зерно

### 3.5. Трансформация структуры стали в процессе высокотемпературной эксплуатации

В условиях длительного пребывания при высоких температурах структура стали может претерпевать значительные изменения. Основные из них:

- сфероидизация пластинчатых составляющих;
- изменение фазового состава;
- графитизация;
- выделение интерметаллидов пластинчатой формы;
- изменение величины зерна;
- изменение структуры под воздействием нейтронного облучения.

**Сфероидизация.** В сталях с феррито-перлитной структурой в процессе эксплуатации пластичная форма цементитных образований утрачивается. Карбидные пластины превращаются в многочисленные округлые частицы – сфероиды. На рис. 33 представлена схема процесса сфероидизации.

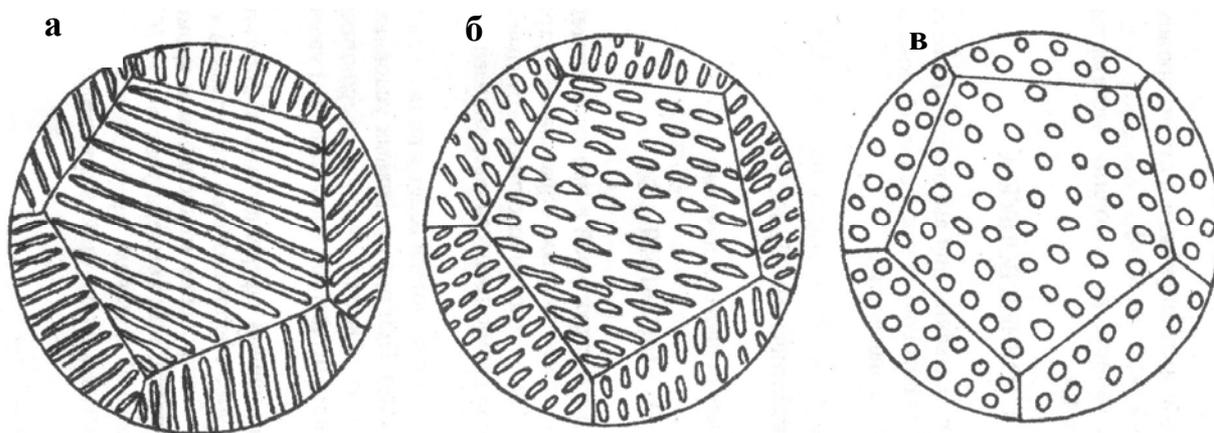


Рис. 33. Схема процесса сфероидизации перлита:  
а – исходная структура – пластинчатый перлит;  
б – начальная стадия сфероидизации;  
в – зернистый перлит (зернистый цементит)

Сфероидизация перлитной составляющей ведет к понижению пределов прочности ( $\sigma_B$ ) и текучести ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_{0,2}$ ). При прочих равных условиях трещины и другие рваные дефекты наблюдаются на участках труб со сфероидизированной структурой. По мере сфероидизации перлитной составляющей увеличивается скорость ползучести.

Наименее устойчивы в отношении сфероидизации перлитной составляющей углеродистые стали. В них сфероидизация с ощутимой скоростью протекает, начиная с 470-480 °С. Легирование молибденом и хромом увеличивает устойчивость перлита, однако при температурах выше 500 °С сфе-

роидизация обнаруживается. Кремний и никель сфероидизацию усиливают. Именно потому указанные элементы в теплоустойчивых сталях не используют.

На рис. 34 представлены фотографии микроструктур, образующихся в процессе сфероидизации.

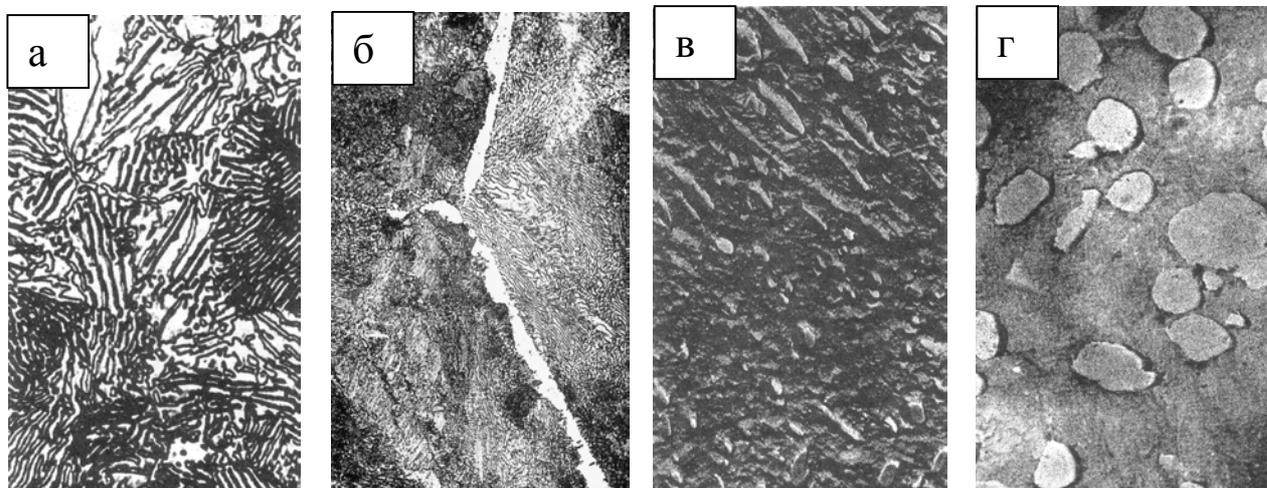


Рис. 34. Фотографии микроструктур, иллюстрирующие процесс сфероидизации:  
 а – пластинчатый перлит;  
 б – пластинчатый перлит в доэвтектоидной стали;  
 в – начальная стадия сфероидизации;  
 г – зернистый перлит

Для оценки степени сфероидизации разработана шестибалльная шкала:  
 1 - й балл – соответствует начальной стадии сфероидизации;  
 6 - й балл – глубокой сфероидизации, когда цементит полностью теряет пластинчатое строение и принимает форму округлых частиц (сфероидов).

Скорость сфероидизации зависит от температуры и продолжительности процесса, величины перлитного зерна, исходной структуры, величины остаточных напряжений и степени наклепа.

Время, необходимое для определения степени сфероидизации, может быть найдено с использованием эмпирической формулы

$$\tau = A \cdot e^{\frac{b}{T}},$$

где  $\tau$  – время, ч;

$T$  – абсолютная температура, К;

$A$  и  $b$  – константы, зависящие от химического состава стали, её исходной структуры, величины зерна и строения перлита.

Ускорению сфероидизации способствует уменьшение размера зерна (крупнозернистые стали сфероидизируются с меньшей скоростью, чем мелкозернистые), утоньшение частиц цементита (отожженные стали сфероидизируются с меньшей скоростью, чем нормализованные), предшествующая пластическая деформация (чем больше степень деформации, тем больше

скорость сфероидизации), аналогичным образом влияют остаточные напряжения.

**Изменение фазового состава.** В низколегированных сталях, содержащих молибден (15М, 20М, 15ХМ, 12ХМ), в результате длительного температурного воздействия около 500 °С и выше твердый раствор обедняется молибденом, а карбидная фаза, наоборот, обогащается этим элементом. Это явление наблюдается, например, в процессе эксплуатации паропроводов на ТЭЦ.

Так как молибден благотворно влияет на теплостойкость, обеднение им твердого раствора приводит к снижению прочности.

**Графитизация.** Графитизация развивается в углеродистых сталях при длительном воздействии температур, начиная с 470-480 °С, и в сталях типа 15М – с 500 °С.

Углеродистые стали подвержены графитизации независимо от способа их выплавки и условий раскисления. Стали, легированные молибденом, способны графитизироваться лишь при раскислении повышенным количеством алюминия (более 200 г на тонну металла).

Распад цементита в стали происходит медленно, и поэтому требуется значительное время (иногда годы), чтобы графит стало возможным обнаружить металлографическим анализом.

Наибольшую опасность представляют скопления сегрегированного графита, способствующего образованию хрупких и с низкой прочностью зон, в которых произойдет зарождение трещины и разрушение.

Менее опасны небольшие точечные образования графита (рис. 35).

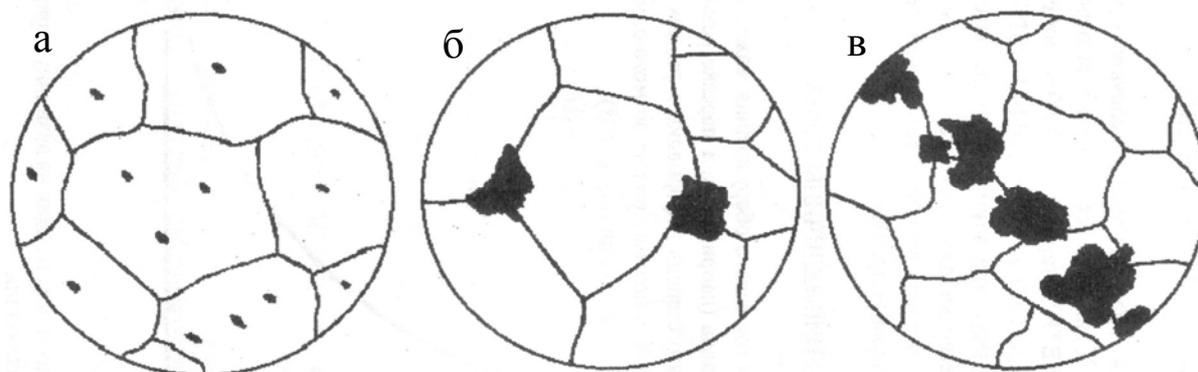


Рис. 35. Графитизация: а – выделения точечного графита;  
б – отдельные скопления графита;  
в – сегрегированный графит

Повышение температуры ускоряет процесс графитизации. При этом влияние температуры значительно эффективнее, чем влияние времени.

На развитие процесса графитизации, распределение и величину графитных выделений определенное влияние оказывают напряжения.

Источники напряжений:

- холодная пластическая деформация;
- неравномерное охлаждение при термической обработке.

Предпочтительным местом графитизации металла в рабочих условиях являются низкотемпературные участки зоны теплового влияния сварных швов.

Химический состав также влияет на графитизацию. Препятствуют графитизации карбидообразующие элементы – марганец, молибден, хром, титан, ниобий, вольфрам.

Способствуют графитизации – углерод, кремний, никель, алюминий.

Особенно эффективно повышает сопротивление графитизации хром. Достаточно ввести в стали 15М, 20М и др. небольшое количество хрома (0,3-0,5 %), чтобы предотвратить или, по крайней мере, резко замедлить процесс графитизации. Этим и объясняется наличие хрома в теплоустойчивых сталях 12ХМ, 12Х1МФ, 25Х1МФ, 12Х2МФСР, 20Х3ВМФ, 15Х5М, 15Х5ВФ, 14Х12В2МФ, 12Х8ВМ1БФР.

**Образование интерметаллидов.** В сталях аустенитного класса при длительной эксплуатации в условиях высоких температур (500-600 °С) выделяются различные дисперсные фазы, например,  $Ni_3TiAl$  в стали ХН35ВТЮ (старение до 50000 ч), интерметаллид  $Fe_2Ti$  в стали Х12Н20ЕЗР,  $\sigma$  – фаза  $FeCr$  в стали 03Х19Н9МБВТ. Указанные фазы выделяются по границам зерен или внутри их в виде пластин. В последнем случае обедняется легирующими элементами твердый раствор, уменьшается сопротивляемость внутризеренной пластической деформации и, как следствие, снижается длительная прочность.

**Изменение величины зерна.** В процессе монтажа энергетического оборудования может возникнуть местный холодный наклеп металла (например, при нарезке резьбы, отбортовке, погипе труб). Заметим, что степень деформации в разных зонах при этом будет непременно различной, а поэтому весьма возможно, что некоторые зоны испытают критическую деформацию  $\epsilon_{кр}$  (рис. 36).

Если после указанных операций деформированные участки не подвергнуть рекристаллизационному отжигу, то процесс рекристаллизации может развиваться после, во время промышленной высокотемпературной эксплуатации. При этом непременно образуется разнотернистая структура (рис. 37) и на границе раздела крупных и мелких зерен, особенно при теплосменах, могут образоваться трещины.

**Влияние нейтронного облучения на процесс структурообразования.** В оборудовании атомных электрических станций (АЭС) широко используются аустенитные хромоникелевые стали и высоконикелевые сплавы. Нейтронное облучение, которому подвергаются материалы АЭС, инициирует образование в них трансмутантного гелия, пузырьки которого мигрируют к границам зерен. Накопление там гелия вызывает охрупчивание (рис. 38).

Вопрос особенно важен в связи с возможным увеличением срока службы водо-водяных действующих и проектируемых реакторов ядерных энергетических установок до 60 – 80 и более лет.

В условиях радиации уменьшается растворимость в реакторных сталях фосфора; происходит выделение и миграция его к границам зерен, образование и даже обособление фосфидов.

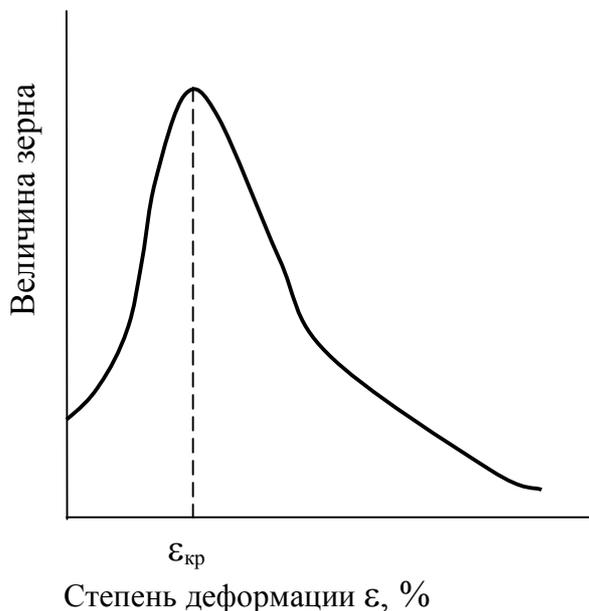


Рис. 36. Влияние степени деформации на величину зерна при рекристаллизации

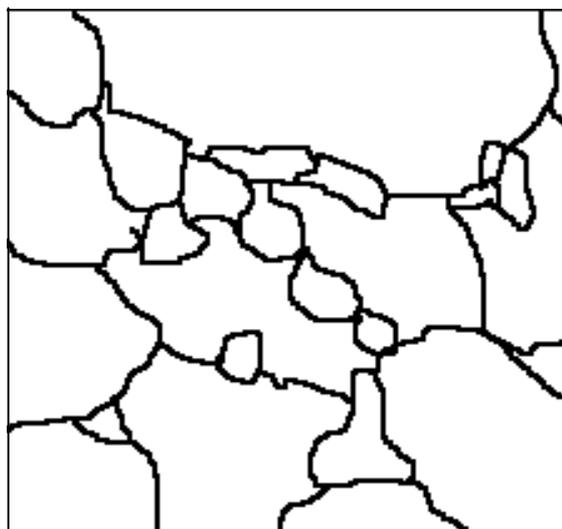


Рис. 37. Разнозернистая структура

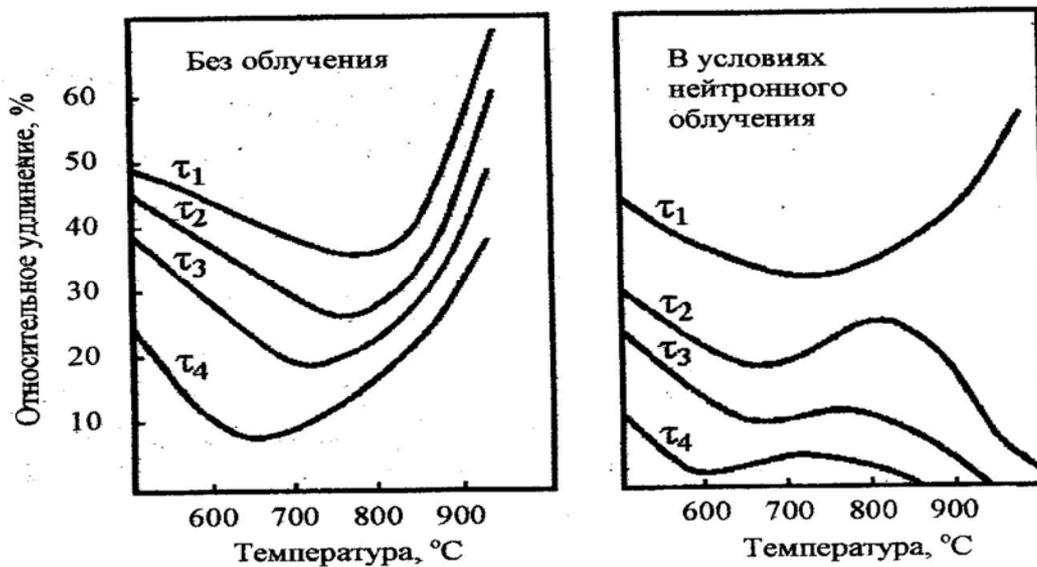


Рис. 38. Характер изменения температурно-временной зависимости длительной пластичности аустенитных хромоникелевых сталей и сплавов без облучения и при нейтронном облучении ( $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_4$ )

## 4. КОНСТРУКТИВНАЯ ПРОЧНОСТЬ ОСНОВНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН И ДРУГОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Конструктивной прочностью принято считать комплексную характеристику, включающую показатели прочности, пластичности и специальные требования, обеспечивающие безаварийную работу оборудования в течение определенного отрезка времени.

### 4.1. Запасы прочности

Традиционно запас прочности определяется как отношение напряжения, вызывающего разрушение (или течение) материала, к расчетному:

$$K = \frac{\sigma_{\text{разр}}}{\sigma_{\text{расч}}}$$

где  $K$  – коэффициент запаса прочности;

$\sigma_{\text{разр}}$  – напряжение, вызывающее разрушение;

$\sigma_{\text{расч}}$  – напряжение, заложенное в расчет детали.

Для статических нагрузок ( $K_{\text{ст}}$ ) применяют обычно  $K_{\text{ст}} \geq 1,5$ ; для динамических  $K_{\text{дин}} \geq 3$ .

### 4.2. Комплекс необходимых испытаний свойств материалов

Любой материал обладает комплексом свойств, перечень которых может быть очень большим, ибо они зависят не только от основных параметров (температуры и времени), но и от вида заготовки, условий ее получения (условий выплавки,ковки, термической обработки), а также изменений структуры в процессе длительных выдержек в рабочем интервале температур.

В табл. 2 представлены основные характеристики жаропрочных материалов, определяющие работоспособность различных деталей газовых турбин и другого энергетического оборудования, из них изготовленного.

Таблица 2

Основные характеристики свойств жаропрочных материалов

Характеристика материала	Обозначение	Условия, определяющие значение характеристики	Характер нагружения
1	2	3	4
Предел прочности	$\sigma_{\text{в}}$	$t, V, t_{\text{стар}}, \tau_{\text{стар}}$	Растяжение
Предел текучести	$\sigma_{0,2}; \sigma_{0,05}$	$t, V, t_{\text{стар}}, \tau_{\text{стар}}$	Растяжение
Пределы упругости и пропорциональности	$\sigma_{\text{у}}; \sigma_{\text{пц}}$	$t, V, t_{\text{стар}}, \tau_{\text{стар}}$	Растяжение

1	2	3	4
Циклические пределы упругости, пропорциональности, текучести	$S_y; \bar{S}_y$ $S_{пл}; \bar{S}_{пл}$ $S_{0,4}; S_{0,1}$	$t, V, t_{стар}, \tau_{стар}$ , Т.О., $K, \epsilon_{пл}$	Растяжение – сжатие, кручение
Сопротивление отрыву	$S_k$	$t, V, t_{стар}, \tau_{стар}, K$ , Т.О.	Растяжение
Относительное удлинение	$\delta$	$t, V, t_{стар}, \tau_{стар}, K$ , Т.О.	Растяжение
Относительное сужение	$\varphi$	$t, V, t_{стар}, \tau_{стар}, K$ , Т.О.	Растяжение
Сопротивление статическому деформированию	$m$	$t, V, t_{стар}, \tau_{стар}, K$ , Т.О.	Растяжение
Сопротивление циклическому деформированию	$m^0$	$t, V, t_{стар}, \tau_{стар}, K$ , $\epsilon_{пл}, Т.О.$	Растяжение – сжатие, кручение
Ударная вязкость	KCU	$t, V, t_{стар}, \tau_{стар}$ , Т.О.	Ударный изгиб
Длительная прочность	$\sigma_{д.п.}$	$t, \tau, M, P.з., K.н.$ , $t_{стар}, \tau_{стар}, Т.О.$	Растяжение, кручение, внутреннее давление
Сопротивление ползучести	$\sigma_{п}$	$t, \tau, P, t_{стар}, \tau_{стар}$ , $\epsilon_{пл}, P.з., Т.О.$	Растяжение при ползучести
Сопротивление циклической ползучести	$\sigma_n^{(y)}$	$t, \tau, P, t_{стар}, \tau_{стар}$ , $\epsilon_{пл}, P.з., Т.О.$	Растяжение – сжатие, кручение
Пластичность при длительном разрыве	$\delta_p$	$t, \tau, P.з., \sigma, \tau_{стар}$ , $t_{стар}, Т.О.$	Растяжение при ползучести
Предел усталости (амплитуда переменного напряжения)	$\sigma_{-1}$	$t, N_p, \omega, \sigma_{ст}, P.з.$ , $M, K.н., t_{стар}$ , $\tau_{стар}, \epsilon_{пл}, Т.О.$	Растяжение, сжатие, изгиб
Остаточное напряжение при испытании на релаксацию	$\sigma_{ост}$	$t, \sigma_0, \tau, \epsilon_{пл}, t_{стар}$ , $\tau_{стар}, \epsilon_0, c, Т.О.$	Растяжение
Амплитуда полной деформации, вызывающая разрушение при испытаниях на термическую усталость	$\Delta\epsilon/2$	$t_{max}, t_{min}, N_p, \omega$ , $t_{стар}, \tau_{стар}, K.н.$ , Т.О.	Растяжение – сжатие
Вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии	$K_{Ic}, K_{IIc}$ , $K_{IIIc}$	$t, t_{стар}, \tau_{стар}, Т.О.$	Изгиб

1	2	3	4
Сопротивление трещиностойкости	$J_{Ic}, \delta_{кр}$	$t, t_{стар}, \tau_{стар}, T.O.$	-
Жаростойкость: (глубина окисления, обедненного слоя, язвообразования)	$\Delta l_{ок},$ $\Delta l_{об},$ $\Delta l_{я}$	$t, \tau, o. ср.$	-
Модуль упругости: - статический - динамический	$E_{ст}$ $E_{дин}$	$t$	Статическое растяжение, динамический изгиб
Коэффициент линейного расширения	$\alpha$	$t$	-
Коэффициент теплопроводности	$\lambda$	$t$	-
Удельная теплоемкость	$C$	$t$	-

Обозначения:

$V$  – скорость деформирования;

$t_{стар}$  – температура длительного старения;

$\tau_{стар}$  – продолжительность старения;

$M$  – масштабный фактор;

$R.z.$  – величина зерна;

$K.n$  – концентратор напряжения;

$P$  – накопленная за время  $\tau$  деформация ползучести;

$N_p$  – количество циклов до разрушения;

$\sigma_{ст}$  – статическая составляющая;

$\sigma_0$  – начальное напряжение при релаксации;

$\epsilon_0$  – начальная деформация при испытании на релаксацию;

$c$  – жесткость нагружения;

$o. ср$  – окислительная среда;

$\Delta l_{ок}$  – глубина окисленного слоя;

$\Delta l_{об}$  – глубина обедненного слоя;

$\Delta l_{я}$  – глубина язв;

$t_{max}$  и  $t_{min}$  – максимальная и минимальная температуры цикла;

$T.O.$  – режим термической обработки;

$m$  и  $m^0$  – коэффициенты упрочнения;

$k$  – номер полуцикла;

$\epsilon_{пл}$  – деформация ползучести;

$\omega$  – амплитуда колебаний.

### 4.3. Материалы газотурбинных установок

Специальные материалы, широко применяемые в настоящее время для высокотемпературных деталей газовых турбин, могут быть подразделены на следующие основные классы: перлитные, хромистые ферритные, феррито-мартенситные, мартенситные и аустенитно-мартенситные, аустенитные стали, титановые сплавы и, наконец, сплавы на никелевой и кобальтовой основе. Перспективными для деталей турбин и компрессоров ГТУ считаются керамические материалы (керметы), металло-оксидные сплавы и композитные материалы. Температуры применения и физические свойства сплавов разных классов приведены в табл. 3.

### 4.4. Металлы лопаточного аппарата

Рассмотрим основные особенности работы деталей лопаточного аппарата.

Все детали лопаточного аппарата работают при длительном воздействии высоких температур. В наиболее тяжелых условиях находятся рабочие и направляющие лопатки первых ступеней турбины. На следующих ступенях температура постепенно снижается, а на последних составляет 100 °С и ниже.

Детали лопаточного аппарата работают в среде движущегося водяного пара. При этом на большей части ступеней работает перегретый пар и лишь на лопатках последних ступеней – влажный. Содержание в паре солей, кислорода, сконденсировавшихся капель воды неодинаково на разных участках проточной части. Отсюда и различный характер и степень коррозионного и эрозионного воздействия пара на лопатки различных ступеней.

Рабочие лопатки испытывают наибольшие напряжения статического, динамического и знакопеременного характера. Эти напряжения определяются в основном центробежными силами, действующими на лопатку при ее вращении. Центробежные силы создают в лопатке растягивающие напряжения тем больше, чем больше площадь сечения и длина лопатки, диаметр обода (или ротора), на котором закреплены лопатки, и частота вращения ротора турбины.

Центробежные силы могут вызывать в лопатке также и изгибающие напряжения. Есть и вторая причина, вызывающая в лопатке изгибающее напряжение – это реакция струи движущегося пара.

На первых ступенях турбины, где используются короткие лопатки, напряжения металла лопаток от центробежных сил и изгиба обычно невелики. Максимумы они достигают на последних ступенях, где лопатки длинные.

Исключительное значение имеет вибрация (тангенциальная и крутильная). Рабочие лопатки проектируют с таким расчетом, чтобы опасные резонансные колебания не могли возникнуть в процессе работы турбины.

## Физические свойства материалов ГТУ

Материал	Предельная температура применения материала, °С	Удельная плотность, г/см <sup>3</sup>	Примеры марок материалов
Перлитные стали	550	7,8-7,9	12МХ, 12Х1МФ, 25Х1МФ, 25Х2М1Ф, 15ХМ
Модифицированные 12%-ные хромистые стали	600	7,7-7,8	20Х12ВНМФ, 13Х11Н2В2МФ
Аустенитные стали	600-700	7,85-8,2	03Х16Н15М3, 20Х23Н18, 10Х23Н18, 37Х12Н8Г8МФБ, 40Х15Н7Г7Ф2МС, 31Х19Н9МВБТ, 12Х18Н9*
Никелевые сплавы	700-900	7,0-8,5	ХН35ВТЮ, ХН70Ю, ХН70ВМЮТ, ХН70ВМТЮФ, ХН77ТЮР, ХН78Т, ХН80ТБЮ
Кобальтовые сплавы	700-780	Со – 8,9	ЭИ416
Молибденовые сплавы	1050	10,2	ЦМ5, ВМ2, ВМ6
Ниобиевые сплавы	1000	8,65	ВН-4, ВН-9, РН-5
Титановые сплавы	600	4,4-4,6	ВТ3-1
Керамические и композитные материалы	1300	-	

*Примечание. Предел длительной прочности за 1000 ч не менее 250 МПа.*

\*08Х18Н10, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 20Х25Н16Г7АР.

Направляющие лопатки в процессе работы находятся в неподвижном состоянии и поэтому испытывают существенно меньшие напряжения, чем рабочие.

Металл лопаток должен обладать высокими прочностью, пластичностью, сопротивлением ползучести, выносливостью, коррозионной стойкостью и сопротивлением эрозионному разрушению. Кроме того, он должен легко обрабатываться резанием, обладать способностью хорошо расклепываться, так как ленточные бандажи прикрепляют к лопаткам расклепыванием шипов. Некоторые конструкции хвостовиков лопаток получают протяжкой или холодной высадкой. Поэтому необходимо, чтобы металл обладал способностью значительно деформироваться в холодном состоянии.

Какие же конкретно стали и сплавы используют для изготовления турбинных лопаток?

Стали, применяемые для лопаток, можно разделить на три группы: хромистые нержавеющие стали, упрочненные хромистые стали и аустенитные стали.

**Хромистые нержавеющие стали** широко применяют для изготовления рабочих и направляющих лопаток, работающих при температурах до 450 – 500 °С. Это стали 08X13 ферритного класса, 12X13 мартенсито-ферритного класса и 20X13 мартенситного класса.

Термическая обработка после горячей прокатки состоит в отжиге при 870 – 900 °С или высоком отпуске при 740 – 780 °С.

Упрочняющая обработка в зависимости от содержания углерода состоит в закалке с температуры 950 – 1050 °С. Охлаждение от указанных температур осуществляют в масле или на воздухе. Для заготовок больших сечений предпочтительнее закалка в масле. После закалки проводят отпуск при 600-750 °С с охлаждением на воздухе.

Коррозионная стойкость хромистых сталей тем выше, чем меньше в них содержится углерода. По этому показателю предпочтение отдают ферритным сталям.

На рис. 39 приведены механические свойства сталей 12X13 и 20X13, определенные в результате кратковременных высокотемпературных испытаний.

**Упрочненные хромистые стали.** Представлены сталями мартенсито-ферритного (14X17H2), мартенситного (13X14H2ВФР, 13X11H2В2МФ, 13X11H2В2МФШ, 14X12В2МФ) и аустенитно-мартенситного (08X17H16Т) классов.

Эти стали (по сравнению с ранее рассмотренными хромистыми) используют для изготовления лопаток мощных паровых турбин.

В табл. 4 приведены сравнительные данные о свойствах трех сталей: хромистой мартенситного класса 20X13, упрочненной хромистой мартенсито-ферритного класса 14X17H2 и упрочненной аустенито-мартенситного класса 08X17H16Т.

Свойства некоторых хромистых сталей при температуре испытания 400 °С

Свойства	Сталь		
	20X13	14X17H2	08X17H16T
$\sigma_B$ , МПа	600	870	900
$\sigma_{3000}$ , МПа	390	450	495
$\sigma_{1/1000}$ , МПа	390	400	380

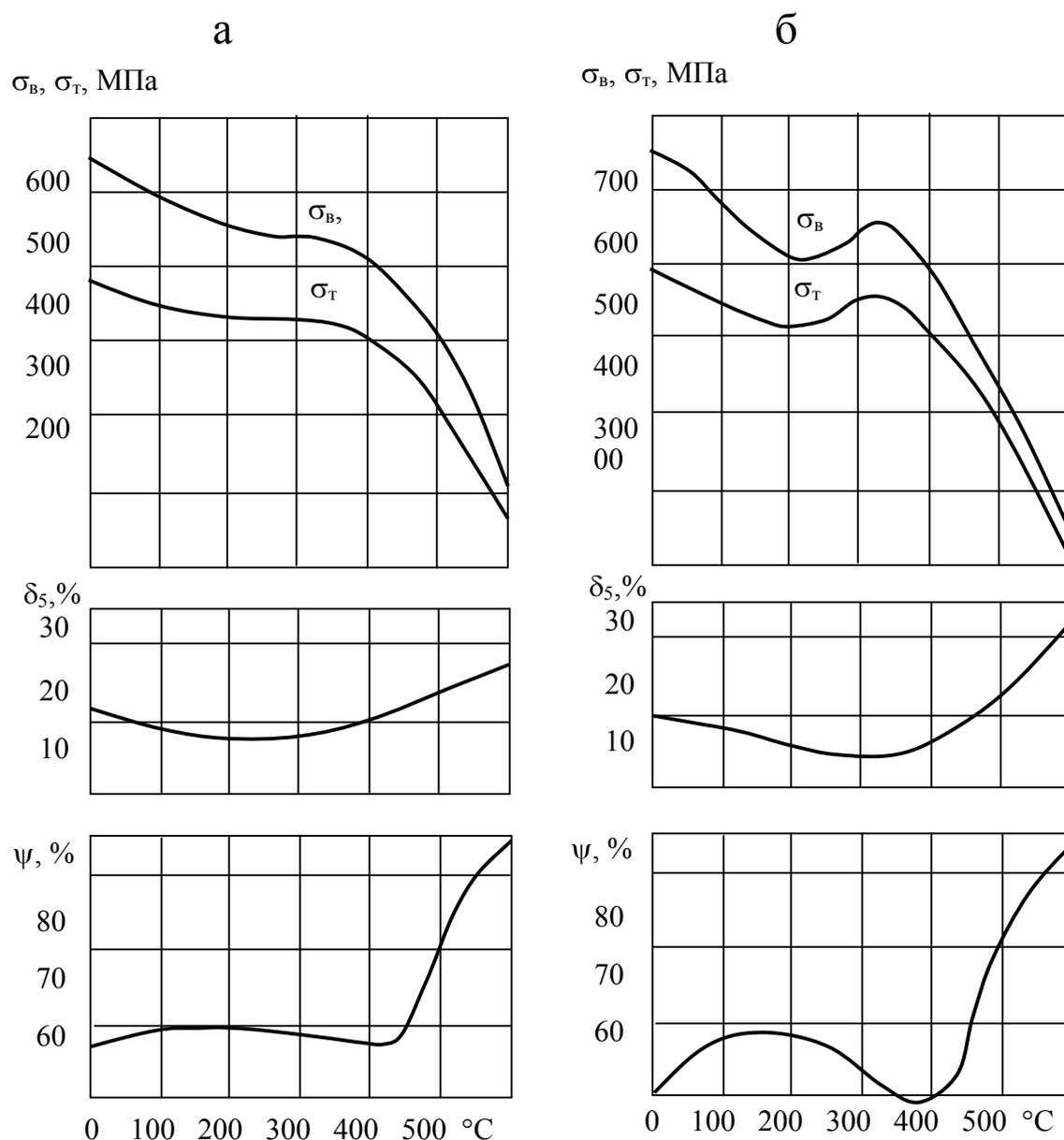


Рис. 39. Механические свойства сталей  
а - 12X13; б - 20X13

**Аустенитные стали.** По способу упрочнения эти стали делят на гомогенные, с карбидным и интерметаллидным упрочнением. Марки аустенитных сталей, режимы их термической обработки и свойства приведены в табл. 5.

Термин «гомогенные стали» следует понимать условно, так как в их структуре обычно присутствует некоторое количество карбидов и карбонитридов титана или ниобия. Эти стали рассчитывают на длительную службу при 650 – 700 °С. Они обладают высокими технологическими свойствами: способностью к горячей пластической деформации и свариваемостью. Цели термической обработки гомогенных сталей – получение более однородного гамма-твердого раствора, заданной величины зерна (балл 3 - 6), стабильной структуры, а также снятия напряжений, которые могут возникнуть в процессе изготовления лопаток.

Таблица 5

Длительная прочность некоторых жаропрочных сталей

Марка стали	Область применения, °С	Режим термической обработки		Температура испытания, °С	Длительная прочность, МПа		
		$t_{\text{зак}}$ , °С	$t_{\text{стар}}$ , °С – $\tau$ , ч		$\sigma_{10^2}$	$\sigma_{10^4}$	$\sigma_{10^5}$
<b>Гомогенные стали</b>							
10X18H12T	650-700	1100-1200	-	600	-	-	110
				650	-	-	70
				700	-	-	45
08X15H24B4TP	650-700	1130	-	700	260	180	120
				750	170	110	80
<b>Стали с карбидным упрочнением</b>							
37X12H8Г8МФБ	650-750	1140	660-16	600	450	320	-
				650	360	220	-
40X15H7ГФ2МС	650-750	1180-1220	800-16	600	420	-	-
				700	240	-	-
				800	125	-	-
<b>Стали с интерметаллидным упрочнением</b>							
10X11H20T3P	750-850	1100-1180	740-16	600	600	-	-
				700	350	-	-
				800	180	-	-
08X11H35MTЮP	750-850	1150-1180	780-25	600	650	-	-
				700	450	-	-
				800	250	-	-

Стали с карбидным упрочнением предназначены для работы при температурах 650 – 750 °С и довольно высоком уровне напряжений. Основу сталей с карбидным упрочнением составляет хромоникелевый или хромоникелемарганцевый аустенит, содержащий 0,25 – 0,5 % углерода. Марганец, как и никель, расширяет гамма-область. Это позволяет частично заменить никель менее дефицитным марганцем. К тому же, марганец способствует некоторому повышению жаропрочности.

Карбидообразующие элементы ванадий, ниобий, вольфрам, молибден связывают часть углерода в специальные карбиды, а также упрочняют аустенитную основу.

Значительную долю упрочнения обеспечивают также карбиды ванадия VC, выделяющиеся в высокодисперсном состоянии при старении.

Карбиды и карбонитриды ниобия в процессах старения практически не участвуют, так как имеют высокие температуры образования и растворения (выше 1250 °С), а в основном присутствуют в виде первичных выделений. Положительная роль этих фаз заключается в том, что они препятствуют росту аустенитного зерна при нагреве. Карбиды хрома  $M_{23}C_6$  и  $M_7C_3$  растворяют в себе другие элементы (железо, вольфрам, молибден), поэтому их состав изменяется в зависимости от легирования стали и режима термической обработки. Чем сложнее карбидные стали, тем больше эффект упрочнения при старении, тем медленнее развиваются процессы разупрочнения.

Стали с интерметаллидным упрочнением используют для изготовления лопаток, работающих при температурах до 750 – 850 °С. Упрочнение аустенита этих сталей происходит за счет выделения при старении фаз - упрочнителей – интерметаллидов типа  $(NiFe)_3$  (Ti,Al) и фаз Лавеса (химических соединений с определенным стехиометрическим соотношением атомов) типа  $Fe_2Mo$ ,  $Fe_2W$ ,  $Fe_2(Mo, W)$ . Совместное выделение интерметаллидов и фаз Лавеса приводит к наиболее высоким показателям длительной прочности. Возможно также образование карбидных фаз типа  $M_{23}C_6$ , но в этих сталях они не способствуют повышению длительной прочности.

Аустенитные стали с интерметаллидным упрочнением содержат повышенное количество никеля, титана и алюминия. Замена никеля марганцем в сталях этого типа не производится, так как он не образует благоприятных для упрочнения интерметаллидных фаз и понижает жаростойкость.

Содержание углерода в этих сталях ограничивают 0,1 %. Во многие стали дополнительно вводят молибден и вольфрам (до 3,5 %) для повышения длительной прочности.

**Сплавы для лопаток.** Для этой цели используют сплавы на никелевой, кобальтовой и титановой основе.

Сплавы на никелевой основе предназначены для длительной работы при температурах 700 – 800 °С.

Чистый никель обладает низкой длительной прочностью ( $\sigma_{100}^{800}=40$  МПа) и низкой стойкостью к газовой коррозии при высоких температурах. Основные жаропрочные свойства никелевых сплавов достигаются в

результате комплексного легирования. Структура таких сплавов является многофазной, а это позволяет сочетать в них самые разнообразные свойства.

Химический состав никелевых сплавов (нимоников) для лопаток приведен в табл. 6, а их жаропрочные свойства – в табл. 7.

Для получения высокой окалиностойкости никель легируют хромом, а для повышения жаропрочности - титаном и алюминием. В этом случае при старении закаленного сплава в основном гамма-твердом растворе образуется интерметаллидная  $\gamma'$  - фаза типа Ni(Ti,Al), а также карбиды TiC и нитриды TiN, увеличивающие жаропрочность при высоких температурах.

Таблица 6

Состав сплавов нимоник, %

Марки сплавов	Cr	Ti	Al	Fe	C	Прочие
ХН77ТЮ	19-22	2,3-2,7	0,55-0,95	<1	0,06	<0,01Ce
ХН77ТЮР	19-22	2,4-2,8	0,60-1,0	<1	0,07	< 0,01 В
ХН70ВМТЮ	13-16	1,8-2,3	1,7-2,3	5,0	0,12	5-7 W 2-4 Mo 0-0,5 V < 0,02 В <0,02 Ce
Нимоник 90	18-21	2,0-2,8	0,8-1,2	1,0	0,10	15-21Co
Нимоник 100	10-12	1-2	4-6	2,0	0,3	18-22 Co 4,5-5,5 Mo

Таблица 7

Жаропрочные свойства сплавов нимоник

Марки сплавов	Кратковременная прочность, МПа			Длительная прочность, МПа				
				$\sigma_{100}$			$\sigma_{1000}$	
	600 °C	700 °C	800 °C	600 °C	700 °C	800 °C	700 °C	800 °C
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ХН77ТЮ	880	680	550	580	360	140	280	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ХН77ТЮР	950	850	560	680	420	200	350	120
ХН70ВМТЮ	990	900	750	-	500	290	380	-
Нимоник 90	1000	800	630	-	430	210	340	140
Нимоник 100	1150	1050	750	-	500	290	420	200

Дальнейший рост жаропрочности достигается легированием молибденом и вольфрамом, повышающими температуру рекристаллизации и ускоряющими процессы диффузии в твердом растворе, определяющими коагуляцию избыточных фаз.

Наиболее широко используют сплав ХН77ТЮР. После закалки с 1080 – 1120 °С он имеет структуру, состоящую из пересыщенного  $\gamma$  - твердого раствора с ГЦК решеткой, и поэтому небольшую прочность и высокую пластичность, допускающую глубокую штамповку (вытяжку), гибку и профилирование. После закалки и старения при 700 °С сплав получает высокую жаропрочность.

**Сплавы на кобальтовой основе** применяются главным образом для изготовления деталей, работающих при более высоких, чем нимоники, температурах, например, лопатки турбореактивных двигателей. Наиболее жаропрочные кобальтовые сплавы сохраняют работоспособность при температуре до 1100 °С ( $\sigma_{100}^{1100} = 70$  МПа).

Кобальтовые сплавы обладают хорошей коррозионной стойкостью при повышенных температурах, например, в продуктах сгорания топлива, содержащего серу; характеризуются высокой стабильностью структуры при длительных сроках службы под нагрузением и, следовательно, имеют более пологий ход кривых зависимости прочностных свойств от температуры и продолжительности выдержки; имеют более высокую теплопроводность и меньший коэффициент термического расширения, чем никелевые жаропрочные сплавы. Поэтому кобальтовые сплавы более подходят для изготовления деталей, предназначенных для длительной работы в коррозионной среде, в условиях термической усталости и имеющих сравнительно крупные размеры, например, силовые и рабочие лопатки мощных газовых турбин.

Вследствие специфики механизма упрочнения, кобальтовые сплавы содержат повышенное количество углерода, обычно от 0,25 % до 1 %.

В кобальтовых сплавах могут образовываться следующие фазы: аустенитная  $\gamma$  - матрица с ГЦК структурой, карбиды, бориды, карбонитриды и ТПУ (топологически плотно упакованные) фазы –  $\sigma$ ,  $\mu$ , фазы Лавеса. Интерметаллидная  $\gamma'$  - фаза в них не выделяется. При тщательном контроле состава образования ТПУ фаз, оказывающих отрицательное влияние на жаропрочность и пластичность, можно избежать, тогда жаропрочные кобальтовые сплавы будут состоять из  $\gamma$ -твердого раствора и упрочняющих карбидных и карбонитридных фаз.

**Титановые сплавы** обладают низким декрементом затухания колебаний; эрозионная стойкость в условиях влажного пара несколько выше, чем у нержавеющей сталей. Из титановых сплавов изготавливают лопатки длиной рабочей части 665, 765 и 900 мм.

Титановые сплавы для лопаток легируют алюминием, который стабилизирует  $\alpha$  - фазу, повышает прочность, жаропрочность, сопротивляемость окислению. Кроме алюминия, эти сплавы легируют хромом, молибденом, ванадием и другими элементами. Сплавы сохраняют достаточную окислостойкость до 400-500 °С. Чаще других используют сплав АТ4. Кроме того, применяют сплавы АТ3, АТ6, ВТ3, ВТ3-1, ВТ4, ВТ5, ВТ6, ВТ8, ВТ9, ВТ10. Химический состав и механические свойства титановых сплавов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Химический состав и механические свойства титановых сплавов

Марка сплава	Химический состав, %			Механические свойства				
	Al	Cr	Другие элементы	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
АТ3	2,5-3,5	0,4-0,9	0,25-0,60 Si; 0,01В	780	800	20	43	0,68
АТ4	3,5-5,0	0,4-0,9	0,25-0,60 Si; 0,01 В	790-820	865	14- 17	27- 30	0,55
АТ6	5,0-6,5	0,4-0,9	0,25-0,60 Si; 0,01 В	865	920	8-10	27- 30	0,55
ВТ3	4,0-5,2	2,0-3,0	0,10 С	920	1030	10	30	0,30
ВТ3-1	4,0-5,2	1,5-2,5	1,0-2,0 Мо; 0,10 С	830-930	940	12,5	24,5	0,85
ВТ4	4,0-5,0	-	1,0-2,0 Mn	-	800-900	15- 22	20- 30	-
ВТ5	4,0-5,5	-	-	700-800	800-950	12- 25	30- 45	0,3-0,6
ВТ6	5,0-6,5	-	3,5-4,5 V	800-900	900-1000	8-13	30- 45	0,4-0,8
ВТ8	5,8-6,8	-	2,8-3,8 Мо	900-1050	1000- 1150	9-15	30- 55	0,3-0,6
ВТ9	6,0-6,5	-	3,0-3,5 Мо	-	1250	-	-	-
ВТ10	4,8-6,0	-	2,0-3,0 Sn; 2,0-3,7 Cu	950	1050	10	20	-

## 4.5. Металлы валов и цельнокованых роторов

Металл вала турбины испытывает в процессе эксплуатации напряжения от собственного веса и веса всех деталей, которые насажены на вал, а также от крутящего момента, соответствующего передаваемой мощности. Металл работает в условиях длительного воздействия высоких температур, при этом различающихся по длине и сечению вала. Наиболее высокая температура у первых ступеней; на шейках подшипников и на концах вала - невысокая - около 50 – 80 °С.

Наряду с постоянными по величине и знаку напряжениями на валах действуют и переменные напряжения. Они обусловлены, например, тем, что обычно центры тяжести деталей ротора не лежат на геометрической оси вала. Отсюда возможность вибрации вала.

В большинстве случаев валы турбины изготавливают ступенчатыми - с различными диаметрами на различных участках. В местах перехода от одного диаметра к другому имеет место концентрация напряжений. Неизбежными концентраторами напряжений являются и шпоночные пазы.

Получение высококачественной и вполне надежной в эксплуатации поковки вала турбины представляет существенные трудности в связи со значительными габаритами и массами валов. Металл вала должен быть свободен от загрязнений шлаками и неметаллическими включениями, от флокенов, трещин, плен и других дефектов. Необходимо, чтобы внутренние напряжения в поковке были минимальными. Размеры и масса цельнокованых роторов обычно больше, чем вал; геометрические формы более сложны. Максимальные напряжения в процессе эксплуатации имеют место в центральной зоне ротора на поверхности внутреннего отверстия, которым обычно снабжаются цельнокованые роторы (и крупные валы), т.е. в той зоне, где при существующей технологии производства поковок чаще встречаются металлургические дефекты, а механические свойства ниже, чем в периферийных зонах. Эффективность термической обработки центральной части поковки ротора или вала также ниже, чем других зон.

Валы и роторы паровых турбин, работающих при температурах ниже 600 °С, изготавливают из углеродистых сталей марок 35 и 40, хромистых (40Х), хромомолибденовых (34ХМА, 34ХМ1А, 20Х1М1), хромомолибденованадиевых (25Х1М1Ф), хромомолибденовольфрамовых (20Х3МВФ), хромоникельмолибденовых (34ХН1МА, 34ХН3МА, 38ХН3МФА) и других марок сталей. Валы и роторы подвергаются сложной термической обработке. Так, изготовленные из стали 25Х1М1Ф сначала подвергаются нормализации (970-990 °С) и отпуску (710-730 °С); затем следуют вторая нормализация (930-950 °С) и отпуск (690-700 °С). Для валов и роторов из стали 20Х3МВФ предусмотрена ещё более сложная термическая обработка: закалка (1020-1050 °С) в масле, отпуск (680-700 °С); нормализация (1050-1100 °С); закалка (980-1020 °С) в масле и заключительный отпуск при температу-

ре 660-680 °С. В табл. 9 в качестве примера приведены свойства прочности и ползучести, определенные при различных температурах.

Таблица 9

Механические свойства стали 20Х3МВФ  
(закалка 1050 °С, масло; отпуск 700 °С)

Температура испытания, °С	Механические свойства					
	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_b$	$\sigma'_{1/10^5}$	$\sigma'_{10^5}$	$\delta_5$	$\psi$
	МПа				%	
20	750-850	870-910	---	---	13	45-50
450			250	400		
500			147	294		44-52
550			98	157	10-12	44
580			49	98	11	27-40
600			22	70		

**Аустенитные стали и сплавы для дисков, валов и роторов.** Валы, диски и цельнокованные роторы отечественных паровых турбин изготавливают из сталей перлитного класса.

Исследовались возможности применения для этих целей упрочненных хромистых нержавеющей сталей мартенсито-ферритного класса 14Х12ВНМФ и 14Х12В2МФ. Однако уровень жаропрочных и других свойств перлитных и мартенсито-ферритных сталей для дисков и роторов, работающих при температурах выше 600 °С, оказался недостаточным.

Для этих целей используют стали аустенитного класса и сплавы на никелевой основе 31Х19Н9МВБТ, ХН35ВТ, ХН35ВТК и др.

Аустенитные стали, как материал роторов, значительно уступают перлитным и упрочненным хромистым нержавеющей сталям, ибо чувствительны к ускоренным пускам и остановам вследствие пониженного сопротивления термической усталости. Поэтому высоколегированные аустенитные стали и сплавы на никелевой основе используют для дисков с ограниченным ресурсом работы. При этом отдают предпочтение сталям с карбидным и интерметаллидным упрочнением. Для сварных роторов и дисков используют стали 34ХМ1А и 10Х16Н13М2Б. На рис. 40 представлен ротор паровой турбины низкого давления К-160-130, сваренный из стали 34ХМ. Масса всего ротора около 36 т. Использование сварных роторов позволяет решать сложные конструкторские и производственные задачи. По окончании сварки ротор подвергают термической обработке для снятия остаточных напряжений, выравнивания структуры и устранения закаленных зон металла в сварном соединении. Термическую обработку обычно осуществляют в печи с вращением ротора, установленного в горизонтальном положении. Известен также

опыт термической обработки роторов в вертикальном положении при помощи индукционных нагревателей.

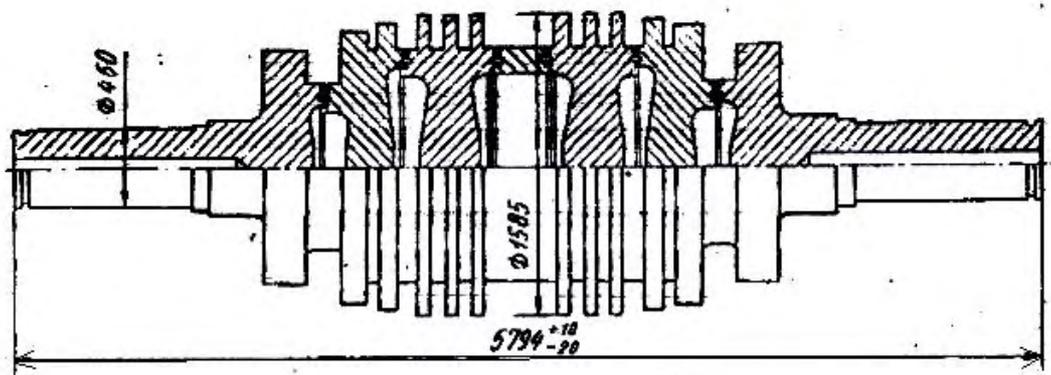


Рис. 40. Сварной ротор паровой турбины низкого давления мощностью 150000 кВт

#### 4.6. Металлы основных деталей статоров

Цилиндры, обоймы, диафрагмы и другие детали статора турбины работают в менее тяжелых условиях, чем детали роторной группы. Находясь в относительно неподвижном состоянии, они не испытывают тех значительных напряжений статического, динамического и знакопеременного характера, которые возникают в металлах деталей ротора. Тем не менее, условия работы многих деталей статора являются весьма сложными.

Цилиндры испытывают напряжения от давления движущегося пара. Во многих турбинах цилиндры работают в условиях очень значительных перепадов давлений и температур. Например, в цилиндре среднего давления конденсационной турбины мощностью 300 тыс. кВт разность температур по оси от паровпуска до паровыпуска может превышать 500 °С. Цилиндры или отсеки низкого давления, работающие в условиях вакуума, испытывают давление воздуха снаружи.

Значительные перепады температур имеют место и в цилиндрах газовых турбин. Формы цилиндров весьма сложны. Части цилиндров соединяют между собой по разъемам болтами и шпильками. В сечениях имеются резкие перепады.

Диафрагмы испытывают напряжения от разности давлений пара в камерах двух соседних ступеней и работают при высоких температурах, различных для диафрагм различных ступеней.

Сегменты сопел работают в условиях воздействия высоких температур и давлений пара. Часто они испытывают абразивное воздействие твердых частиц (например, окалина с внутренних поверхностей паропроводов), увлекаемых потоком пара. Эти частицы вызывают в сегментах механические повреждения эрозионного характера.

В зависимости от характера и условий работы основных деталей статора, используют различные виды металлических заготовок – стальное и чугуное литьё, поковки, прокат, сварные, сварно-литые, сварно-кованые, сварнолистовые конструкции и пр.

**Стальные и чугунные отливки деталей статоров.** Цилиндры, выхлопные части, обоймы, сопловые коробки, часть диафрагм и других деталей изготавливают из стальных и чугунных фасонных отливок.

Для отливок деталей турбин, работающих при температурах меньше 425 °С рекомендуют сталь 25Л.

Корпуса и обоймы турбомашин, детали гидротурбин изготавливают из стали 30Л и 35Л. Сталь 30Л после нормализации (870 – 890 °С) и отпуска (580 – 600 °С) имеет примерно следующие механические свойства:  $\sigma_{в} \sim 480$  МПа,  $\sigma_{0,2} \sim 260$  МПа,  $\delta = 17$  %,  $\psi = 30$  %;  $KCU = 0,35$  МДж/м<sup>2</sup>.

Для отливок статоров паровых турбин, работающих при более высоких температурах, широко используют хромомолибденованадиевые стали 20ХМФЛ (до 540 °С) и 15Х1М1ФЛ (565 °С). Из этих сталей изготавливают отливки цилиндров, обойм, паровых и сопловых коробок и других деталей. Цилиндры низкого давления и выхлопные патрубки отливают из серого чугуна марок СЧ15, СЧ20.

Для диафрагм с заливаемыми в них лопатками из нержавеющей стали (в турбинах в части низкого давления) используют серый чугун СЧ20, СЧ25, СЧ30. Отливки диафрагм для снятия напряжений подвергают низкому отжигу при температуре 550-600 °С.

Для работы под нагрузкой при температурах до 600 °С рекомендуются высоколегированные жаропрочные чугуны марок ЧН19Х3Ш и ЧН11Г7Ш. Химический состав этих чугунов приведен в табл. 10.

Таблица 10

Химический состав жаропрочных чугунов

Марка чугуна	Массовая доля элементов, % (остальное Fe)						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
						Не более	
ЧН19Х3Ш*	2,3-3,0	1,8-2,5	1,0-1,6	1,5-3,0	18,0-20,0	0,10	0,03
ЧН11Г7Ш	2,3	1,8-2,5	5,3-8,0	1,5-2,5	10,1-12,5	0,08	0,05

\* Шаровидная форма графита.

**Сварно-литые и сварнолистовые цилиндры.** Разница температур по длине цилиндра может быть весьма значительной. Поэтому технически и экономически целесообразно выполнять цилиндры, сваренными из отливок, металл которых имеет различные характеристики жаропрочности. В современных паровых турбинах большой мощности сварными изготавливают цилиндры высокого и среднего давления. Например, часть цилиндра, рабо-

тающего при температурах до 565 °С, изготавливают из стали 15Х1М1ФЛ, а другую, где нагрев не превышает 400 °С, – из углеродистой стали.

Цилиндры низкого давления в турбинах большой мощности достигают значительных размеров и массы. По условиям работы такие цилиндры могли бы выполняться из чугуна, однако производство тонкостенных чугунных отливок длиной более 10 м представляет определенные трудности. Поэтому цилиндры и отсеки низкого давления в настоящее время изготавливают в основном сварными из листового проката.

Сварнолистовыми выполняют также обоймы низкого давления, опоры подшипников и некоторые другие детали и узлы паровых и газовых турбин.

Сварные конструкции выполняют из сталей различных классов и марок, при этом учитывают их свариваемость. Свариваемость перлитных сталей, наиболее широко применяемых в сварных конструкциях паровых и газовых турбин, зависит от содержания углерода и уровня легирования стали. Необходимо стремиться к тому, чтобы содержание углерода в сталях перлитного класса не превышало 0,2-0,3 %.

Стали с 12 % хрома ферритного, феррито - мартенситного и мартенситного классов обладают удовлетворительной свариваемостью при еще меньшем содержании углерода – 0,1 -0,2 %.

Существуют различные методы приближенной оценки свариваемости стали в зависимости от ее химического состава, например, по эквивалентному содержанию углерода:

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + \text{Mn}/6 + \text{Cr}/3 + \text{Ni}/15 + \text{Mo}/4 + \text{V}/5.$$

Практика показывает, что удовлетворительно свариваться могут те стали, для которых  $C_{\text{ЭКВ}}$  не превышает 0,45.

Аналогичная формула предложена и для приблизительной оценки склонности стали к образованию околошовных трещин:

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + \text{Mn}/20 + \text{Ni}/15 + (\text{Mo} + \text{Cr} + \text{V})/10.$$

При  $C_{\text{ЭКВ}} < 0,35$  и толщине металла до 16-20 мм сварку можно выполнять без предварительного подогрева. При большей толщине и  $C_{\text{ЭКВ}} > 0,45$  рекомендуется подогрев свариваемых кромок металла.

**Сварные диафрагмы.** Диафрагмы служат для разделения внутренней части цилиндра на участки с различными параметрами пара. В каждой диафрагме размещены неподвижные сопловые лопатки, проходя между которыми, поток пара ускоряется и приобретает необходимое направление для входа в каналы, образованные рабочими лопатками.

Диафрагмы состоят из двух половин, которые устанавливают соответственно в верхней и нижней половинах цилиндра (безобойменная конструкция цилиндров) или в верхней и нижней половинах промежуточной обоймы.

На внутренней расточке диафрагмы размещены сегменты лабиринтных уплотнений для уменьшения протечек пара из одной ступени в другую вдоль ротора. Диафрагмы выполняют стальными или чугунными.

Сварные диафрагмы широко применяются в цилиндрах или отсеках высокого и среднего давления турбин, где они в значительной мере вытес-

нили наборные диафрагмы. Для изготовления сварных диафрагм используют стали 12X13, 15X11МФ и 15X12ВМФ. Свойства последней приведены в табл. 11.

Таблица 11

Свойства стали 15X12ВМФ

Температура °С	$\sigma_e$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %	$\sigma_{10^5}^t$	Декремент затухания колебаний, %
	МПа				
20	890	750	15	---	1,4
580	580	530	14	280	0,7

**Металл крепежных деталей.** Крепежные детали – болты и шпильки фланцевых соединений цилиндров. Плотность фланцевого соединения зависит от многих факторов, однако основные трудности в ее обеспечении возникают в связи с явлением релаксации напряжений в условиях воздействия высоких температур.

К металлу крепежных деталей предъявляются следующие требования:

- предел текучести должен позволять осуществление затяжки без остаточной деформации;
- высокое сопротивление ползучести, необходимое для длительной работы соединения без подтягивания;
- малая чувствительность к концентрации напряжений;
- отсутствие склонности к тепловой хрупкости;
- коррозионная стойкость;
- отсутствие склонности к заеданию в резьбе;
- отсутствие волосовин и загрязнений неметаллическими включениями.

Преждевременный выход из строя крепежных деталей наблюдается при повышенной загрязненности металла шлаковыми и другими неметаллическими включениями, наличии волосовин, недостаточно высоком уровне релаксационной стойкости, длительной прочности и пластичности, повышенной склонности к охрупчиванию. Установлено, что при повторных нагружениях релаксационная стойкость повышается.

Для изготовления гаек обычно применяют металл с меньшей твердостью, чем для шпилек и болтов.

Коэффициенты линейного расширения и теплопроводности соединяемых деталей должны быть близкими и соответствовать показателям металла и шпилек, и болтов. Для изготовления крепежных деталей, работающих в условиях высоких температур, применяют стали перлитного класса, сталь с 12 % хрома, аустенитные стали и сплавы на никелевой основе.

Стали перлитного класса по возрастанию температуры применения можно расположить следующим образом. Сталь 25X1МФ используется до 500 °С, подвергается закалке и высокому отпуску (930-950 °С – масло, 620 - 660 °С - воздух). Примерные механические свойства  $\sigma_B=780$  МПа,  $\sigma_{0,2}=665$  МПа,  $\delta=16$  %,  $\psi=50$  %, КСУ=0,59 МДж/м<sup>2</sup>.

Заметим, что нормализация и отпуск могут сообщать стали более высокие характеристики пластичности. Однако, обычно предпочитают закалку с отпуском, после которых чувствительность стали к надрезу ниже, а длительная пластичность выше, чем после нормализации с отпуском.

Для получения меньшей твердости гаек их отпускают при температуре на 15-30 °С выше, чем шпильки и болты. В табл. 12 приведены значения пределов ползучести и длительной прочности при различных температурах испытаний.

Сталь 25X2М1Ф с более высоким содержанием хрома используется до 535 °С. Она подвергается двойной нормализации (последовательно с 1030 - 1050 °С и 950-970 °С) и отпуску при 680-720 °С с охлаждением на воздухе. Механические свойства:  $\sigma_B=780$  МПа,  $\sigma_{0,2}=670$  МПа,  $\delta=12$  %,  $\psi=50$  %, КСУ = 0,49 МДж/м<sup>2</sup>.

Сталь 20X3МВФ используется до 540 – 560 °С. Термическая обработка ее состоит в закалке от 1030 - 1060 °С (масло) и отпуске 660-700 °С (воздух). Механические свойства:  $\sigma_B=880$  МПа,  $\sigma_{0,2}=735$  МПа,  $\delta=12$  %,  $\psi = 40$  %, КСУ = 0,59 МДж/м<sup>2</sup>.

Таблица 12

Характеристики жаропрочности стали 25X1МФ

Характеристики жаропрочности	Температура испытания, °С				
	450	475	500	525	550
$\sigma_{1/10^5}^t$	230	145	80	53	30
$\sigma_{10^5}^t$	---	---	170	115	60

Сталь 20X1М1Ф1ТР используется до 560 – 720 °С после закалки 980-1000 °С (масло) и отпуска 680-720 °С (воздух). Механические свойства:  $\sigma_B=650-900$  МПа,  $\sigma_{0,2}=500-800$  МПа (применение стали с  $\sigma_{0,2} > 800$  МПа не рекомендуется),  $\delta=15-18$  %,  $\psi=45-50$  %, КСУ=0,5-0,7 МДж/м<sup>2</sup>.

Стали 20ХМФБР и 25X1М1ФБР рекомендуется использовать до 565-580 °С для высокотемпературных крепежных деталей паротурбинных установок сверхкритических давлений. Термическая обработка состоит в нормализации и отпуске 600 °С – 3 ч и 700 – 720 °С – 6 ч. Механические свойства:  $\sigma_B \geq 800$  МПа,  $\sigma_{0,2}=680-800$  МПа,  $\delta \geq 1$  %,  $\psi \geq 50$  %, КСУ=0,6 МДж/м<sup>2</sup>.

Стали с 12 % хрома предназначены для изготовления крепежа, работающего при температуре около 650 °С.

Сталь 20X12ВМБФР относится к мартенситному классу и подвергается закалке в масле с температуры 1030 – 1150 °С и отпуску при 650 – 720 °С (охлаждение на воздухе). Механические свойства при этом зависят от сечения изделий и составляют при сечении 25 мм:  $\sigma_B=750$  (880) МПа,  $\sigma_{0,2}=500$  (680) МПа,  $\delta=12(15)$  %,  $\psi=45$  (50) %, КСУ=0,4 (1,1) МДж/м<sup>2</sup>. В скобках указаны значения механических свойств при сечении больше 25 мм, но меньше 100 мм.

Для гаек рекомендуется сталь 15X11МФ, которая относится к мартенситному классу и подвергается закалке в масле при 1010-1060 °С и отпуску 660-770 °С с охлаждением в воде. Механические свойства (сечение 60 мм) составляют:  $\sigma_B=740-880$  МПа,  $\sigma_{0,2}=590$  МПа,  $\delta=15$  %,  $\psi=50$  %, КСУ=0,59 МДж/м<sup>2</sup>.

Кроме сталей мартенситного класса, применяется сталь 15X12ВНМФ, относящаяся к мартенсито-ферритному классу. После закалки 1000-1200 °С (охлаждение в масле) и отпуска 680-700 °С (охлаждение в воде) она имеет свойства, указанные в табл. 13.

Таблица 13

Механические свойства стали 15X12ВНМФ при комнатной температуре и температуре эксплуатации (сечение 40 – 120 мм)

Температура испытания, °С	Механические свойства				
	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\Psi$	КСУ
	МПа		%		МДж/м <sup>2</sup>
20	830-870	700-730	15-18	55-59	1,0
650	295-340	275-315	26	87	1,5

**Аустенитные стали и сплавы на никелевой основе.** Примером аустенитной стали может служить ХН35ВТ. Эта сталь используется до 650 °С. После закалки 1080-1100 °С (вода) и старения при температуре 850 °С -10 ч (воздух) и 700 °С – 25 - 50 ч (охлаждение с печью до 200-300 °С) она имеет следующие механические свойства (изделия сечением до 125 мм):  $\sigma_B=730$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 390$  МПа,  $\delta =15$  %,  $\psi =35$  %, КСУ = 0,56 МДж/м<sup>2</sup>,  $\sigma_{1/10^4}^{650} = 166$  МПа,  $\sigma_{1/10^5}^{650} =130$  МПа,  $\sigma_{10^4}^{650} =196$  МПа,  $\sigma_{10^5}^{650} =157$  МПа.

Сплав ХН70ВМЮТ после закалки от 1150 °С (масло) и старения 800 °С, 20 ч. (охлаждение на воздухе) при сечении 32 – 55 мм имеет следующие механические свойства:  $\sigma_B = 980$  МПа,  $\sigma_{0,2}= 590$  МПа,  $\delta = 20$  %,  $\psi = 45$  %, КСУ = 0,4 МДж/м<sup>2</sup>.

$\psi = 25 \%$ ,  $KCU=0,59 \text{ МДж/м}^2$ ,  $\sigma_{1/10^4}^{800} = 108 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{1/10^5}^{800} = 80 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{10^4}^{800} = 88 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{10^5}^{800} = 49 \text{ МПа}$ .

**Металлы соединительных муфт.** Детали муфт не подвергаются воздействию высоких температур, пара и воды. Поэтому главными требованиями к металлу муфт являются достаточные прочность, пластичность, ударная вязкость, определяемые при комнатной температуре.

Основные детали муфт изготавливают из поковок углеродистой и легированной стали марок 25, 30, 35, 40, 45Х, 34ХН1М 34ХН3М, 35ХН1М2ФА, 30ХН2МФА, 36Х2Н2МФА. Поковки, в зависимости от состава стали, подвергаются нормализации или закалке с отпуском. Металл должен быть однородным, чистым, свободным от пороков типа флокенов, трещин, скоплений шлаковых включений.

**Металлы деталей уплотнений.** В турбоагрегатах используют два основных вида уплотнений: концевые и диафрагменные. Концевые уплотнения применяются для уменьшения утечки пара между корпусом и валом турбины. Диафрагменные – для предотвращения протекания пара между диафрагмой и поверхностью ступиц дисков. Корпуса и обоймы многих конструкций концевых уплотнений изготавливают из литейной углеродистой стали 30Л, из чугуна СЧ20 и СЧ30, из кованных сталей Ст4сп, Ст3сп, стали 35.

Для насаживания с натягом на вал втулок уплотнений применяют стали 15ХМ, 20ХМ, 30ХМ и др. Для втулок передних лабиринтных уплотнений турбин высокого давления – 25Х2МФА.

Уплотнительные гребни, сегменты и другие уплотняющие детали изготавливают из латуни, алюминиевой бронзы, нейзильбера. До 300 °С используют латунь марок Л62 и Л68; при 300-400 °С – нейзильбер НМЦ65-20 (13,5-16,5 %Ni, 18-22 % Zn, остальное Cu).

Уплотнительные "усики", работающие при температуре до 400 °С рекомендуются изготавливать из нейзильбера.

Для уплотнения гребней рекомендуется применять никель марок Н2 (Ni+Co>98,9 %; Co<0,4 %; Fe<0,25 %; Si<0,3 %; C<0,10 %; S<0,03 %; Cu<0,15 %). Гребни лабиринтных уплотнителей, работающих при 500 °С и более высоких температурах, изготавливают в некоторых случаях из монель-металла НМЖМц 28 - 2,5 - 1,5 (Ni + Co – 65-70 %; Fe – 2,0-3,0 %; Mn – 1,2 -1,8 %: Cu – остальное).

**Металлы азотируемых деталей.** Азотирование обеспечивает высокую твердость, износостойкость поверхности, снижает склонность к задирам и чувствительность к концентраторам напряжений, повышает коррозионную стойкость.

Азотированию подвергают детали лопаточного аппарата, резьбу крепежных деталей, работающих при высоких температурах, для предотвращения заедания резьбовых соединений, детали узлов парораспределения и регулирования: штоки, втулки, клапаны, золотники, буксы и др. Основная сталь для азотирования 38Х2МЮА. Только в этой стали можно получить самую высокую твердость HV 11000 МПа и износостойкость поверхностно-

го азотистого слоя. Кроме этой стали, используют 25X2МФА, 25X2М1Ф, 15X11МФ, 12X13, 20X13.

**Металлы подшипников.** Для заливки вкладышей опорных подшипников, гребней и колодок упорных подшипников в практике современного турбостроения в основном используют высокооловянистый баббит Б83 (Sb-10-12 %; Cu - 5,5-6,5 %; Pb<0,35 %; Sn-остальное).

Для заливки верхних половин вкладышей опорных подшипников в некоторых турбинах применяют баббит Б16 (Sb - 15-17 %; Cu – 1,5-2,0 %; Sn-15-17 %; Pb - остальное).

**Металлы конденсаторных трубок.** Трубки конденсаторов паровых турбин находятся под постоянным воздействием охлаждающей воды, протекающей в трубках и омывающей их внутреннюю поверхность, и водяного пара, поступающего в корпус конденсатора и конденсирующегося при охлаждении.

Охлаждающая вода может содержать соли и загрязнения, содержащие аммиак, сероводород и др., абразивные примеси (песок, зола). Она может вызывать коррозию трубок с внутренней поверхности (особенно сильно – морская вода).

Конденсирующийся пар может содержать аммиак в результате подщелачивания питательной воды котлов. Конденсат с высоким содержанием  $\text{NH}_3$  может способствовать развитию коррозии конденсаторных трубок с наружной поверхности (рис. 41).

Наблюдается и, так называемая, ударная коррозия – повреждение входных концов конденсаторных трубок поступающей в них водой, в которой находятся пузырьки воздуха. При входе в трубку струя воды суживается, создается вихревое её движение; совместное ударное действие струи воды и пузырьков воздуха вызывает коррозионно-эрозионное разрушение. Ещё одно часто встречающееся коррозионное повреждение трубок конденсаторов – обесцинкование.

Трубки конденсаторов изготавливают из цветных металлов и сплавов меди, латуни различных марок, медно-никелевых сплавов, алюминия и его сплавов. Расширяется применение нержавеющей сталей аустенитного класса.

Наиболее широко используются для пресной охлаждающей воды трубки из латуни Л68, а для морской воды – из латуни марки ЛО70-1. В конденсаторах турбин производства ЛМЗ мощностью 200 и 300 тыс.кВт-из медно-никелевого сплава МНЖМц 5-1-0,8 (Ni+Co – 5,0 - 6,5 %; Fe – 1,0 - 1,4 %; Mn – 0,3 - 0,8 %).

#### **4.7. Причины аварий труб поверхностей нагрева котлов энергетических блоков**

Анализ повреждаемости труб поверхностей нагрева котлов энергетических блоков высоких и сверхвысоких параметров имеет большое значение для повышения надежности работы оборудования.

Трубы поверхностей нагрева работают в условиях высоких давлений и температур, к которым в случае дальнобойной водяной очистки (ДВО) добавляется ещё термическая усталость.

Основными причинами повреждения труб поверхностей нагрева являются: металлургические дефекты, дефекты термической обработки, дефекты вследствие перегрева выше расчетной температуры, эрозия и износ, дефекты сварных соединений, межкристаллитная коррозия, термическая усталость.

**Металлургические дефекты.** В котлах высокого и сверхвысокого давления металлургические дефекты труб обнаруживаются не часто, однако быстро и с более серьезными последствиями. Наиболее часто из металлургических дефектов встречаются трещины, закаты, плены (см. рис. 30). Они являются следствием, главным образом, невысокого качества трубной заготовки и наличия в ней неудаленных поверхностных дефектов или усадочных частей слитка. Во всех случаях повреждения имеют вид продольных разрывов и свищей, которые образуются непосредственно по дефектам.

**Дефекты термической обработки.** Для труб из жаропрочных аустенитных сталей дефектом может оказаться мелкозернистая структура, что нередко служит причиной ускоренной ползучести.

Более опасным дефектом является разнотернистая структура (см. рис. 37), которая образуется в результате интенсивного протекания процесса рекристаллизации при термической обработке труб. Разрушение образцов при испытаниях на длительную прочность обычно начинается на границе участков с различной структурой. Это касается не только разнотернистости, но и морфологии карбидной фазы. Коагуляция последней ведет к снижению жаропрочности.

**Перегрев выше расчетной температуры.** Перегрев труб до температур, существенно превышающих расчетные, может происходить при резком снижении расхода охлаждающей воды, а также при бурном росте отложений из-за ухудшения водного режима.

С повышением температуры прочностные свойства металла стенок труб снижаются. Если напряжение от внутреннего давления труб окажется равным или превысит предел текучести, соответствующий данной температуре, металл "потечет": внутренний диаметр труб станет увеличиваться, а толщина стенок – уменьшаться. Вследствие этих двух процессов напряжения от внутреннего давления возрастут еще больше, пластическая деформация пойдет все ускоряющимся темпом, и произойдет разрушение труб. Если же температура понизится до наступления разрушения, то на трубе останется раздутие – так называемая "отдулина". Деформация развивается в направлении максимальных растягивающих напряжений, а растекание и разрушение – перпендикулярно этому направлению. В соответствии с этим разрушение прямых труб характеризуется увеличением диаметра и продольным растеканием (рис. 42).



Рис. 41. Условия работы конденсаторных трубок (схема)

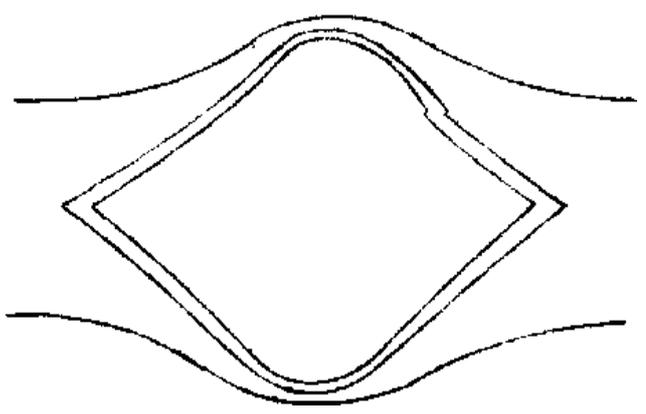


Рис. 42. Внешний вид поврежденной трубы

Перегревы труб какого-либо элемента котла встречаются, как причина аварий, довольно часто. Причины перегрева и разрушения (разрыва) труб могут существенно различаться. Так, различают повреждение труб от кратковременного и длительного перегревов.

При кратковременном перегреве разрушение труб характеризуется значительным увеличением диаметра и утоньшением их стенок у кромок разрыва (рис.43а). Трубы обычно имеют широкое раскрытие. Силой струи, вытекающей из места разрыва, трубы часто оказываются сильно погнутыми. Наружная поверхность почти без окалины; внутренняя в месте разрыва - совершенно чистая.

В микроструктуре металла в районе максимальной деформации наблюдаются существенные изменения по сравнению с удаленными от места повреждения. Удлиненные зерна и общая направленность микроструктуры (текстуры) служат признаком нагрева до температуры, при которой действующие напряжения превышают предел текучести металла труб (рис. 43б).

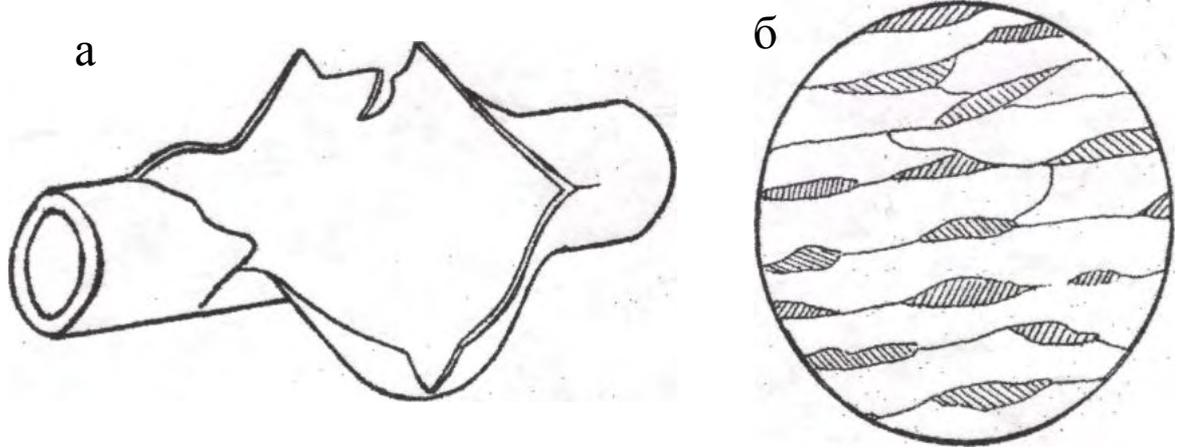


Рис. 43. Схема внешнего вида поврежденной трубы в результате кратковременного перегрева до температуры межкритического интервала (а) и текстуры металла в месте повреждения (б)

Перекристаллизация исходной структуры металла труб из перлитных сталей указывает на перегрев до межкритического интервала температур ( $A_{c1}$ - $A_{c3}$ ). Чем больше площадь, занятая перекристаллизованными участками, тем выше была температура рабочей среды (перегретого пара), структура содержит мартенситную (резкое охлаждение вытекающей средой при разрыве), перлитную или бейнитную составляющие. Сфероидизация перлита при наличии сильного утонения стенки труб служит признаком перегрева в субкритическом интервале температур ниже  $A_{c1}$ .

Кратковременные перегревы металла большей частью являются следствием резких нарушений циркуляции рабочей среды.

В случае длительного перегрева разрыв труб характеризуется небольшой общей деформацией (рис. 44), развитием межзеренного растрескивания и разрывом вследствие слияния мелких трещин.

Растрескивание и образование излома начинается от наружной поверхности трубы. Характер разрыва трубы зависит от длительности ее работы в условиях перегрева и от сорта стали.

При перегреве стабилизированных титаном или ниобием сталей аустенитного класса, например, 12X18H12T, выделяется  $\sigma$  - фаза; в сталях перлитного класса (сталь 20, 12X1МФ и др.) происходит сфероидизация карбидов в составе перлита. Распределение структурных изменений по длине и окружности трубы соответствует характеру перегрева и позволяет в отдельных случаях судить о его причинах.

При перегреве в первую очередь разрушаются трубы, работоспособность которых понижена из-за технологических (металлургических) дефектов и дефектов термической обработки. Для стали 12X18H12T дефектом термической обработки является мелкозернистая и разнотернистая структура аустенита; для стали 12X1МФ - структура феррита с карбидами или перлитом по границам зерен.

В котлах высокого давления разница температур против расчетной уже на 20 - 50 °С приводит к быстрой ползучести труб, в особенности, если при рабочей температуре возможно образование окалины. В экранных трубах и в экономайзерах при малых скоростях движения воды возможно образование застойных мест и «запаривание» отдельных участков, что приведет к их перегреву.

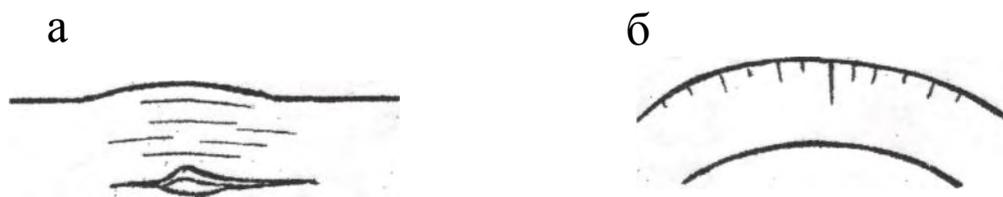


Рис. 44. Схема внешнего вида поврежденной трубы в результате длительного перегрева (а) и поперечного ее сечения около начала сквозной трещины (б)

**Эрозия и износ.** Эрозии частицами золы подвержены конвективные пароперегреватели, экономайзеры и воздухоподогреватели котлов, работающих на твердом топливе. Абразивные частицы золы, увлекаемые дымовыми газами, с большой скоростью ударяют в поверхность труб и вызывают их износ. При прямом ударе частицы золы отскакивают и не вызывают большого истирания. Наибольший износ возникает в тех случаях, когда абразивные частицы наносят удар примерно под углом в  $35^\circ$  к вертикали. Частицы как бы срезают микроскопические участки окалины и поверхностного слоя металла. Образуется характерная площадка, так называемая площадка износа (рис.45).

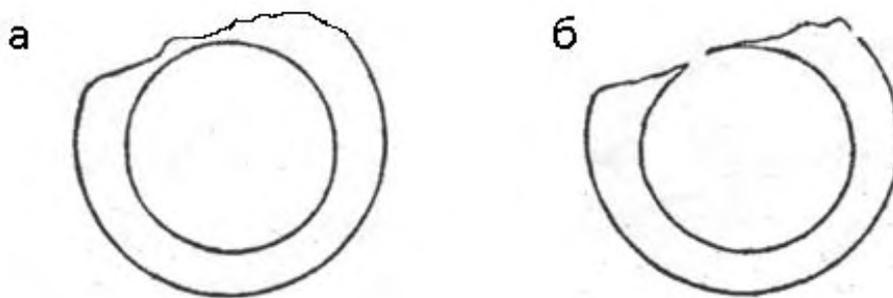


Рис.45. Поперечное сечение трубы, подвергнувшейся эрозионному повреждению: а - площадка износа; б - то же плюс свищ

Виды износа различны: эрозионный, парозоловой, пароводяной (при водяной обдувке труб), золовой, дробевой (образуется на трубах, подвергнутых дробевой очистке).

Эрозионный износ характеризуется сильно «изъеденной» поверхностью вокруг повреждений. Для парозолового износа характерно уменьшение диаметра (износ) по всему периметру и разрыв в наиболее утоненном месте. Характерным признаком дробевого износа является наличие наклепанного слоя с наружной поверхности трубы.

**Дефекты сварных соединений.** Основными видами повреждений сварных стыков, выполненных ручной электро-дуговой сваркой, являются свищи, возникшие из-за некачественной сборки (смещение кромок) и сварки (непровары и несплавления в корне шва) (рис. 46). Другой причиной развития свищей является пережог околошовной зоны при газовой сварке.

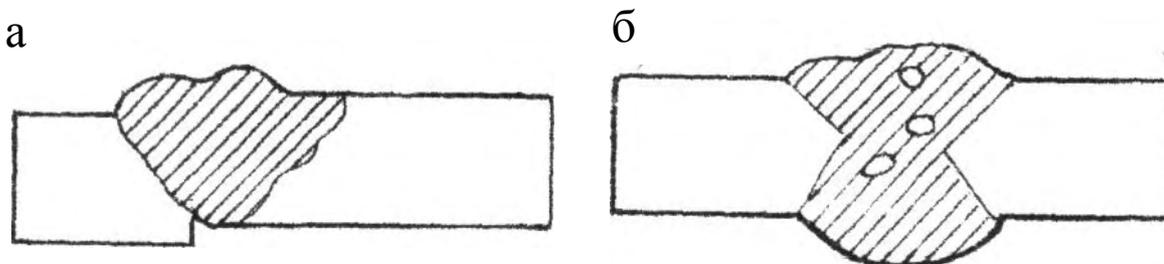


Рис. 46. Повреждения сварных соединений: а - недопустимое смещение кромок; б - газовые поры. Макрошлифы вырезаны рядом со свищем

**Межкристаллитная коррозия.** Случаи разрушения труб вследствие межкристаллитной коррозии довольно редки.

**Термическая усталость.** Основной причиной повреждаемости труб топочных экранов, подвергаемых дальнобойной водяной очистке, является образование в результате многоцикловых операций водяной очистки трещин усталости.

Трещины, возникающие в трубах вследствие термической (тепловой) усталости, могут быть кольцевыми и продольными (рис. 47). Эти трещины, как правило, распространяются в зернах, а не по их границам, т.е. имеют транскристаллитный, а не межкристаллитный характер.

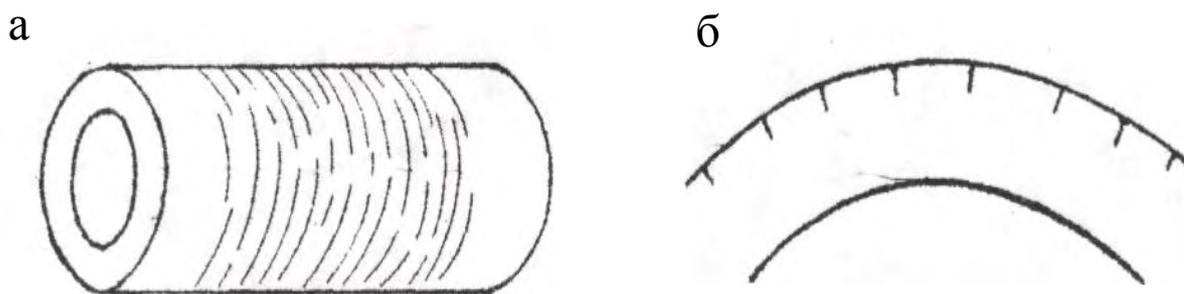


Рис.47. Усталостные трещины: а - кольцевые; б – продольные

Направление усталостных трещин связано с направлением максимального напряжения в данном элементе. При большей величине тангенциальных напряжений трещина будет продольной. Такие трещины встречаются в изгибах труб со значительной овальностью при наличии условий переменных температурных напряжений. Глубина поперечных трещин, как правило, больше продольных.

Основным критерием воздействия дальнобойной водяной очистки на повреждаемость труб поверхностей нагрева является глубина трещин, появляющихся на их наружной поверхности от термоусталостных напряжений.

## 5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В электротермических установках используют следующие виды материалов:

- металлические для нагревательных элементов;
- неметаллические для тех же целей;
- металлические конструкционные;
- огнеупорные и теплоизоляционные материалы, материалы растворов и обмазок (см. подразделы 6.1, 6.4, 6.5).

## 5.1. Металлические материалы для нагревательных элементов

Нагревательные элементы электротермических установок могут быть выполнены из сплавов с высоким электрическим сопротивлением или из сплавов тугоплавких металлов.

Сплавы с высоким электрическим сопротивлением должны обладать:

- высокой жаростойкостью (окалиностойкостью);
- высоким удельным электрическим сопротивлением;
- высокой излучательной способностью;
- стабильностью сопротивления;
- небольшим и постоянным значением температурного коэффициента электросопротивления;
- достаточной электропрочностью (для сохранения формы нагревательных элементов в процессе их работы);
- удовлетворительной технологичностью (пластичность, свариваемость).

Перечисленным требованиям наиболее полно соответствуют специально разработанные для нагревательных элементов сплавы сопротивления, которые можно разделить на две группы; никельхромовые и железохромоалюминиевые. Основой никельхромовых сплавов служат никель или никель и железо. Основными легирующими элементами являются хром, алюминий и кремний. Основой железохромоалюминиевых сплавов является железо. Основными легирующими элементами - хром и алюминий. В оба типа сплавов для повышения жаростойкости вводят микродобавки редкоземельных и щелочноземельных металлов.

Наряду с легирующими элементами, обеспечивающими высокую жаростойкость сплавов, в них содержатся также и примесные элементы, попадающие с шихтовыми материалами в процессе плавки. Это прежде всего сера и фосфор, оказывающие отрицательное воздействие на механические свойства и снижающие жаростойкость.

Очень сильно снижает жаростойкость сплавов углерод. Например, повышение содержания углерода с 0,04-0,05 % до 0,08-0,09 % в сплавах Х23Ю5Т и Х27Ю5Т может снизить срок службы нагревательных элементов в 4-5 раз. Примесными элементами для железохромоалюминиевых сплавов также являются кремний и марганец, а для никельхромовых сплавов – титан и марганец. Однако последние в пределах, допускаемых ГОСТ 10994-74, не вызывают значительного снижения жаростойкости.

Отечественная промышленность выпускает никельхромовые сплавы марок ХН20ЮС, Х15Н60, Х15Н60-Н, Х20Н80-Н, ХН60Ю3, ХН70Ю, Х15Н60Ю3А и железохромоалюминиевые сплавы марок Х15Ю5, Х23Ю5, Х27Ю5Т. Сплав Х15Н60 в связи с низкой жаростойкостью рекомендуется применять лишь в качестве реостатного материала. Химический состав сплавов сопротивления приведен в табл. 14.

Никельхромовые сплавы обладают меньшей жаростойкостью (окалиностойкостью) и меньшим удельным электрическим сопротивлением, чем

железохромоалюминиевые. Они не устойчивы в среде, содержащей серу и сернистые соединения. Однако никельхромовые сплавы более пластичны, обладают большей жаропрочностью и не охрупчиваются в процессе эксплуатации, как железохромоалюминиевые. Максимальная температура применения никельхромовых сплавов 1200-1500 °С, железохромоалюминиевых сплавов 1350-1400 °С, однако жаропрочные свойства последних невысокие. При температуре 1300 °С и выше удлинение их при эксплуатации может составить 20-25 %.

Никельхромовые сплавы могут работать в контакте с шамотом любой марки, не взаимодействуя с ним. Железохромоалюминиевые сплавы при температуре выше 1000 °С могут работать в контакте лишь с высокоглиноземистыми огнеупорами (с содержанием оксида алюминия не менее 60 – 70 %). При меньшем содержании оксида алюминия и наличии оксидов железа в огнеупорном материале наблюдается химическое взаимодействие между нагревательным элементом и футеровкой в месте их контакта, в результате чего на поверхности нагревателя возникают легкоплавкие эвтектики, что приводит к образованию язв (кратеров) и перегоранию элемента. Нагреватели из любых сплавов разрушаются в печах с атмосферой, содержащей водород, при использовании футеровочных материалов или мертелей на фосфатных связках.

Пластичность железохромоалюминиевых сплавов возрастает с увеличением температуры, и при температуре 800-1000 °С они легко поддаются деформации. Однако при температуре 400-500 °С наблюдается зона хрупкости. При медленном охлаждении до комнатной температуры хрупкость сохраняется. Для ее устранения следует выдерживать металл при температуре 750-850 °С, а затем проводить закалку металла в воде. При нагреве до 900 – 950 °С и выше происходит быстрый рост зерна, приводящий к необратимому охрупчиванию. Железохромоалюминиевые сплавы не рекомендуется эксплуатировать в среде азота, так как алюминий с азотом легко образуют нитриды, обедняя твердый раствор легирующим веществом, обеспечивающим жаростойкость сплава.

В вакууме при давлении до  $10^{-2}$  Па для нагревательных элементов при температуре до 1150 °С рекомендуется применять сплавы ХН70Ю, Х15Н60Ю3А, Х20Н80-Н, при этом предпочтение следует отдавать сплавам,

Таблица 14

Химический состав сплавов сопротивления

Марка сплава	Содержание элементов, %										
	C	Si	Mn	S	P	Zr	Cr	Ni	Al	Fe	Ti
X15Ю5	0,08	1,0	0,7	0,015	0,030	0,1	13,5-15,5	Не более 0,6	4,5-5,5	Основа	0,2-0,6
X23Ю5	0,05	0,6	0,3	0,015	0,020	0,1	21,5-23,5	То же	4,6-5,3	Основа	Не более 0,4
X27Ю5Т	0,05	0,6	0,3	0,015	0,020	0,1	26,0-28,0	0,15-0,4	5,0-5,8	Основа	0,2-0,6
X15Н60-Н	0,06	1,5	0,6	0,015	0,020	0,5	15,0-18,0	55,0-61,0	Не более 0,2	Остальное	Не более 0,2
X15Н60	0,15	1,5	1,5	0,020	0,030	-	15,0-18,0	55,0-61,0	То же	Не более 1,5	Не более 0,3
X20Н80-Н	0,06	1,5	0,6	0,015	0,020	0,5	20,0-23,0	Основа	То же	Не более 1,0	Не более 0,2
XН70Ю	0,10	0,80	0,3	0,020	0,030	-	26,0-29,0	Основа	2,8-3,5	То же	-
X15Н60Ю3А	0,10	0,80	0,3	0,020	0,020	-	15,0-18,0	55,0-61,0	3,2-4,0	Остальное	-

дополнительно легированным алюминием, поскольку скорость их испарения в вакууме ниже, чем у никелевых сплавов.

Нагреватели из железохромоалюминиевых сплавов в процессе работы охрупчиваются. Ремонт их, связанный с правкой и гибкой, следует вести при температуре 800-900 °С. Никельхромовые сплавы сохраняют пластичность до конца эксплуатации нагревателей.

При выборе конструкции нагревателей следует учитывать, что места сварки обладают меньшей жаростойкостью, чем основной металл. Для железохромоалюминиевых сплавов сварные швы и околошовная зона обладают, кроме того, повышенной хрупкостью. Сварку следует вести аргонодуговым методом с нерасходуемым вольфрамовым электродом и присадочной проволокой той же марки, что и свариваемый материал. Для нагревателей из никельхромовых сплавов, работающих при температуре ниже 1100 °С, допускается ручная электродуговая сварка электродами марки 03Л25 или 03Л25Б. Приварку тонкой проволоки к выводам осуществляют контактно-конденсаторной сваркой.

В процессе эксплуатации металлических нагревателей в воздушной атмосфере происходит их окисление и изменение химического состава, что приводит к изменению их физических свойств. Это выражается, в частности, в уменьшении удельного электрического сопротивления и росте температурного коэффициента электрического сопротивления.

В современной промышленности все более широкое применение получают газонаполненные электропечи сопротивления. По назначению равновесные атмосферы делятся на следующие группы:

- защитные (восстановительные) – обеспечивающие предотвращение окисления и обезуглероживания и применяемые для светлого отжига, нормализации и закалки, пайки, восстановления и спекания порошков;
- окислительные – используемые при контролируемом окислении и создании оксидных пленок;
- науглероживающие – применяемые в качестве газовых карбюризаторов для газовой цементации, газового цианирования (нитроцементации);
- специальные – используемые при химико-термической обработке, например, азотировании, хромировании, борировании и пр.

При работе нагревателей в углеродосодержащих атмосферах наряду с окислением происходит интенсивное их науглероживание. При этом жаростойкость снижается из-за протекания процесса карбидообразования, при котором твердый раствор обедняется хромом. Кроме того, углерод восстанавливает оксиды металлов с образованием газообразного оксида углерода, который, улетающая, разрывает защитную оксидную пленку. При науглероживании увеличиваются хрупкость, чувствительность к термическим напряжениям.

В табл. 15 приведены максимальные рабочие температуры применения нагревателей из сплавов X23Ю5Т и X23Ю5.

## 5.2. Специальные материалы для нагревательных элементов

В этом разделе рассматриваются неметаллические материалы: карбид кремния, диоксид молибдена, хромит лантана, диоксид циркония, нашедшие широкое применение для нагревательных элементов.

**Карбид кремния** (карборунд) до температуры 2093 °С имеет кубическую кристаллическую решетку  $\beta$  – SiC, выше она переходит в гексагональную  $\alpha$  – SiC, которая при 2400-2700 °С разлагается (диссоциирует) на Si и С. Карбид кремния имеет следующие показатели:

Температура плавления, °С.....	2820
Плотность, кг/м <sup>3</sup> .....	3200
Температурный коэффициент линейного расширения при 24-2400 °С, 10 <sup>-6</sup> , К <sup>-1</sup> .....	5,88
Предел прочности при разрыве, МПа.....	35-42
Предел прочности при сжатии, МПа.....	576
Предел прочности при изгибе при 1370 °С, МПа.....	490
Модуль упругости при 20 °С, 10 МПа.....	4,8
Теплопроводность при 20-500 °С, Вт/(м·К).....	42,0
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м.....	1,0-2,0
Термостойкость.....	высокая

Таблица 15

Применение сплавов в различных атмосферах

Атмосфера	Максимальная рабочая температура, °С	
	X23Ю5Т	X23Ю5
Воздух сухой	1375	1280
Воздух влажный	1300	1100
Водород	1375	1280
Азот особо чистый	950	900
Диссоциированный аммиак	1200	1100
Оксид углерода	1100	1000
Диоксид углерода	1100	1000
Контролируемая состава А (экзогаз богатый, осушенный и очищенный)*	1100	1050
Контролируемая состава В (экзогаз богатый)**	1150	1100
Контролируемая состава С (эндогаз)***	1050	1000
Городской газ (примерно 90 % CH <sub>4</sub> )	1050	1000

\* CO-10 %; H<sub>2</sub>-15 %; CH<sub>4</sub>-0,5 %; N<sub>2</sub>-остальное;

\*\* CO -10 %; H<sub>2</sub>-10 %; CO<sub>2</sub>-10 %; CH<sub>4</sub> - 1,0 %; N<sub>2</sub>-остальное;

\*\*\* CO – 20 %; H<sub>2</sub>-40 %; CH<sub>4</sub>-1,0 %; N<sub>2</sub>-остальное.

Выпускаются два вида технического карбида кремния – черный и зеленый. Черный содержит больше примесей и уступает зеленому по абразивным свойствам, по огнеупорным свойствам различия между ними не установлено. Химический состав технического карбида кремния обоих видов представлен в табл. 16.

Таблица 16

Химический состав технического карбида кремния

Карбид кремния	Массовая доля, %							
	SiC	Si	C	Al	Fe	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>
Зеленый	98,02	0,95	0,06	0,31	0,22	Следы	Следы	0,55
Черный	97,42	0,71	0,49	0,15	0,11	0,17	0,09	0,82

**Карбидокремниевые нагреватели** имеют сокращенное обозначение КЭН. Они широко применяются в высокотемпературных электропечах сопротивления. Температура их применения выше, чем у рассмотренных ранее сплавов сопротивления – до 1450-1600 °С. Они обладают более высоким удельным электрическим сопротивлением и возможностью замены вышедших из строя нагревателей без длительной остановки печи.

К основным недостаткам КЭН относятся: низкая механическая прочность, увеличение сопротивления нагревателей в процессе эксплуатации за счет окисления (старения нагревателей), нестабильность значений скорости старения и срока службы. Старение КЭН вызывает дополнительные неудобства при их эксплуатации: силовое оборудование печей (трансформаторы, тиристорные регуляторы) должно обеспечивать возможность повышения напряжения; вышедшие из строя КЭН должны заменяться на нагреватели с более высоким значением сопротивления по сравнению с маркированным сопротивлением нагревателей, установленных в печи.

В нашей стране изготавливают КЭН следующих типов:

- КЭН А – трубчатые с утолщенными выводами;
- КЭН Б – сплошные с выводами, пропитанными сплавом металлов;
- КЭН БС – сплошные с приставными выводами, пропитанными сплавом металлов;
- КЭН ВП – трубчатые с выводами, пропитанными сплавом металлов, легированным кремнием;
- КЭН С – трубчатые со спиральной прорезью;
- КЭН БМ – сплошные с выводами, пропитанными сплавом металлов, и с приваренными металлическими токоподводами;
- КЭН В – трубчатые с выводами, заполненными смесью металлических порошков.

В условное обозначение (маркировку) КЭН входят тип электронагревателя, диаметр и длина активной части, длина вывода в мм. Примеры марки-

ровки: КЭН А 8/180/150 – карбидокремниевый электронагреватель трубчатый с утолщенными выводами, диаметром рабочей части 8 мм, длиной рабочей части 180 мм и длиной каждого из выводов 150 мм; КЭН БС 25/400/70+340 – карбидокремниевый электронагреватель сплошной с приставными выводами, диаметром рабочей части 25 мм, длиной рабочей части 400 мм; длиной каждого из выводов рабочей части 70 мм и длиной каждого из приставных выводов 340 мм.

Рекомендуемые значения максимальных температур разогрева активной части нагревателей, °С для различных атмосфер печи:

Инертные газы (аргон, гелий и др.)	1600
Азот	1500
Воздух	1470
Углекислый газ	1450
Кислород	1450
Оксид углерода	1400
Воздух влажный, точка росы +10 °С	1300
Воздух сухой, точка росы – 50 °С	1250
Вакуум (остаточное давление), Па: 13,3	1200
0,66	1100

При эксплуатации КЭН возможны внезапные отказы из-за перегорания, нарушения контакта, а также в результате постепенного увеличения электрического сопротивления ("старения") материала.

**Дисилицид молибдена и нагреватели на его основе.** Дисилицид молибдена  $\text{MoSi}_2$  содержит 63 % Мо; 36,7 % Si, 0,8 % С; 0,2 % Fe, имеет плотность  $6300 \text{ кг/м}^3$ , температуру плавления  $2030 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , температурный коэффициент линейного расширения  $5,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , предел прочности при сжатии при  $1530 \text{ }^\circ\text{C}$  – 280 МПа, при изгибе ( $100 \text{ ч}$ ,  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) – 60 МПа, при растяжении ( $1320 \text{ }^\circ\text{C}$ ) – 287 МПа. Теплопроводность  $\text{MoSi}_2$  падает с 51 Вт/(м·К) при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  до 11 Вт/(м·К) при  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Этот материал не разрушается на воздухе при нагревании до  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Дисилицид молибдена  $\text{MoSi}_2$  применяется для изготовления электронагревательных элементов, в состав которых входит 61,7 % Мо; 32,8 % Si; 1,2 % Fe; 0,035 % Mn; 0,16 % Al; менее 0,1-0,5 % Mg; Ca; Ni; Cr; Co; V; Zr. Эти нагреватели широко применяются в высокотемпературных электропечах сопротивления с различными атмосферами. Надежно работает в воздушной среде, окислительных и инертных газах – до  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ ; в восстановительных средах – до  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Наиболее благоприятной средой для  $\text{MoSi}_2$ -нагревателей являются: воздух,  $\text{CO}_2$ , Ar,  $\text{N}_2$ , CO,  $\text{H}_2$ , углеводороды. Следует избегать контакта  $\text{MoSi}_2$  с Cl,  $\text{SO}_3$ , серой, а также работы при высоком вакууме. Ниже приведена максимально допускаемая в различных средах температура нагревателя, °С:

Воздух	1650-1700
Азот	1600
Аргон, гелий	1500
Сухой водород	1350
Углекислый газ	1600
Оксид углерода	1500
Сернистый газ	1600
Экзогаз	1550
Диссоциированный аммиак с 8 % H <sub>2</sub>	1400
Метан	1350
Эндогаз	1350-1450

По сравнению с карбидокремниевыми, нагреватели на основе дисилицида молибдена обладают рядом преимуществ: более высокой рабочей температурой активной части нагревателя (1650-1700 °С) за счет образования защитной оксидной пленки из стеклообразного SiO<sub>2</sub> и оксидов молибдена; способностью к быстрому разогреву за счет роста электрического сопротивления с повышением температуры; стабильностью электрического сопротивления в течение всего срока службы нагревателей, что позволяет соединять их последовательно и заменять вышедшие из строя нагреватели без учета их начального электрического сопротивления.

К недостаткам нагревателей на основе дисилицида молибдена относятся: низкая механическая прочность; низкая термостойкость; низкое начальное электрическое сопротивление обуславливающее необходимость использования мощного силового оборудования; высокая начальная пластичность в интервале температур 1400 – 1650 °С.

Нагреватели на основе дисилицида молибдена выпускаются под названием "Нагреватели высокотемпературные из дисилицида молибдена типа СМ-1". В условное обозначение (маркировку) нагревателя входят условное буквенное обозначение материала, из которого изготовлен нагреватель (СМ-1); цифровое обозначение длины рабочей части нагревателя, мм; буквенное обозначение формы рабочей части: U – U-образные, З – зигзагообразные, П – прямые. Пример маркировки нагревателя: СМ-1/315/400-U – дисилицид-молибденовый нагреватель с длиной рабочей части 315 мм, выводной части 400 мм, с U-образной формой рабочей части.

Выпускаемые нагреватели имеют диаметр прутка рабочей части 6 мм и выводной части – 12 мм. Осваиваются нагреватели с диаметрами рабочей части 9 мм, выводной части 18 мм, а также 3 мм и 6 мм. Нагреватели на основе дисилицида молибдена имеют более длительный срок службы при их эксплуатации в установившемся режиме. При циклических режимах работы электропечей на срок службы нагревателей типа СМ-1 влияют все параметры цикла: время разогрева, рабочая температура, время выдержки, время охлаждения и температура, до которой производится охлаждение. По сравнению со сроком службы нагревателей, работающих в непрерывном режиме при температуре 1650 °С, срок службы нагревателей, работающих в цикли-

ческом режиме при охлаждении до 1000 °С снижается в 3 раза, при охлаждении до 20 °С в 100 раз.

**Хромит лантана и нагреватели на его основе.** Нагреватели из хромита лантана предназначены для работы в электропечах периодического и непрерывного действия с окислительной атмосферой и температурой в рабочем пространстве 1600-1700 °С. Электронагреватели имеют трубчатую конструкцию с рабочей частью в виде нарезанной спирали (рис. 48). Маркировка нагревателей включает условное буквенное обозначение материала ЭХС – электронагреватель хромитлантановый спиральный, диаметр и длину рабочей части, длину одного из выводов в мм. Размеры нагревателей приведены в табл. 17.

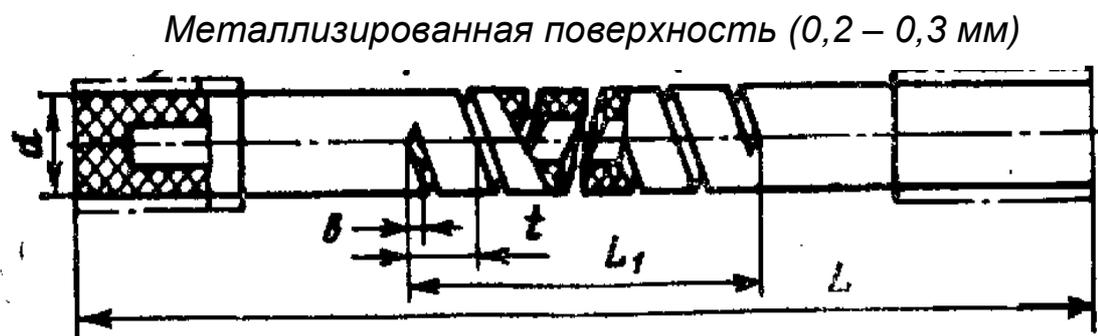


Рис. 48. Электронагреватель хромитлантановый спиральный

Таблица 17

Размеры нагревателей из хромита лантана

Нагреватель	Диаметр d, мм	Общая длина L, мм	Длина рабочей части L <sub>1</sub> , мм	Шаг спирали t, мм	Ширина пропила в спирали, мм
ЭХС16/146/152	16	450	146	16	1,5
ЭХС16/110/120		350	110		
ЭХС20/146/152	20	450	146	18	
ЭХС20/110/120		350	110		
ЭХС20/200/250		700	200		
ЭХС20/150/185		550	150		

**Диоксид циркония и нагреватели на его основе.** Нагреватели из диоксида циркония используются для работы в окислительной атмосфере при температурах свыше 1800 °С.

Диоксид циркония ZrO<sub>2</sub> имеет температуру плавления 2585-2950 °С. Истинная плотность ZrO<sub>2</sub> зависит от его кристаллической модификации: моноклинной – 5560 кг/м<sup>3</sup>; тетрагональной – 6100 кг/м<sup>3</sup>; кубической (твердый

раствор стабилизированный) – 6270 кг/м<sup>3</sup>. В качестве стабилизаторов используют CaO, реже MgO и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Отечественные нагреватели изготавливают из диоксида циркония, стабилизированного оксидом Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, так как Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в отличие от распространенных стабилизаторов CaO и MgO, подвергается меньшему избирательному испарению, а структура, фазовый состав и электрические свойства цирконий - иттриевой керамики в малой степени изменяются в процессе эксплуатации нагревателей.

На рис. 49 представлены четыре основных типа конструкций нагревателей из тугоплавких оксидов. Трубчатые нагреватели с утолщенными выводами (рис. 49а) предназначены для печей различной конструкции. При высокой температуре они могут пластически деформироваться, поэтому их необходимо устанавливать в вертикальном положении. Максимальная рабочая температура такого нагревателя составляет 2100-2150 °С. Сопротивление нагревателя при длительной эксплуатации меняется незначительно.

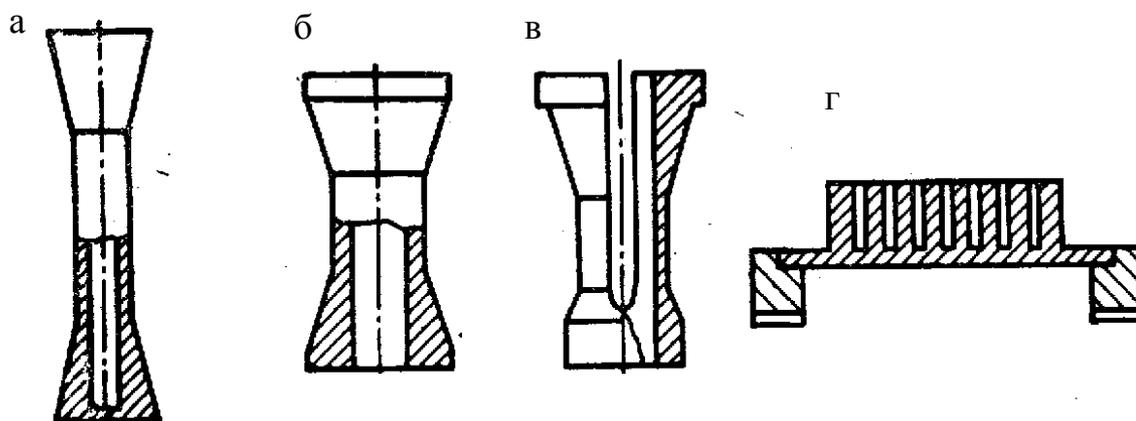


Рис. 49. Электронагреватели из стабилизированного диоксида циркония:  
а – трубчатый с утолщенными выводами; б – трубчатый с утолщенными выводами для печей с рабочим пространством внутри нагревателя;  
в – трубчатый U-образный; г – пластинчатый.

Трубчатые нагреватели с утолщенными выводами (рис. 49б), а также трубчатые U-образные (рис. 49в) предназначены для лабораторных печей с рабочим пространством внутри нагревателя. Эти нагреватели используют в печах с окислительной атмосферой и температурой до 2200-2300 °С. Пластинчатые нагреватели (рис. 49г) обладают большей устойчивостью к пластической деформации, так как одна сторона его выполняет роль высокотемпературного излучателя, а другая, менее нагретая, воспринимает на себя механическую нагрузку от усилия пружин, прижимающих токопроводы. Максимальная рабочая температура пластинчатого нагревателя составляет 1900-1950 °С.

Нагреватели из стабилизированного диоксида циркония обладают не высокой термостойкостью, в связи с чем не рекомендуется их разогрев и охлаждение со скоростью более 4 °С/мин.

### 5.3. Тугоплавкие металлы и их сплавы

К тугоплавким относят металлы с температурой плавления ( $t$  °С) более высокой, чем у железа: титан (1666 °С), ванадий (1900 °С), хром (1903 °С), цирконий (1852 °С), ниобий (2500 °С), молибден (2620 °С), гафний (2222 °С), тантал (2996 °С), вольфрам (3410 °С), рений (3180 °С). В электротермии из тугоплавких металлов в основном применяются вольфрам и молибден, реже тантал и ниобий.

Тугоплавкие металлы работоспособны в вакууме, восстановительных и нейтральных средах и, кроме того, стойки в некоторых агрессивных средах (кислотах, расплавах щелочных металлов и т.д.). В окислительной среде они обладают малой жаростойкостью и могут применяться только лишь с защитными покрытиями

Ниже приведена таблица температур начала химического взаимодействия тугоплавких металлов с газами, °С (табл. 18), а в табл. 19 представлены допустимые температуры нагревателей, работающих в контакте с керамической футеровкой.

Таблица 18

Температуры начала химического взаимодействия тугоплавких металлов с газами, °С

Газы / Металлы	W	Mo	Ta	Nb
Воздух	300-400	250-300	260	200
Пары воды	500	400-500	260	-
Углекислый газ	1200	Выше 1000	1200	-
Водород	Не взаимодействуют		300	300

Таблица 19

Допустимые температуры нагревателей из тугоплавких металлов, работающих в печах в контакте с керамической футеровкой

Материал футеровки	Температура нагревателя, °С		
	молибден	вольфрам	ниобий
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (корунд)	1800	1800-1900	1650
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> с содержанием SiO <sub>2</sub> , % :			
2	1700	1700-1800	1400-1500
30	1500	1500	1400
55	1400	1400	1400
Шамот	1200	-	-
ZrO <sub>2</sub>	1800	1900	1450

## 5.4. Проводниковые материалы

Проводниковые материалы должны прежде всего обладать высокой электропроводностью для уменьшения потерь при передаче электроэнергии. Об электропроводности обычно судят по удельному электросопротивлению  $\rho$ , значения которого для проводниковых материалов приведены в табл.20.

Таблица 20  
Удельное электросопротивление и удельная электропроводность проводниковых материалов

ПОКАЗАТЕЛИ	Au	Ag	Cu	Al	Fe
Удельное электросопротивление, Ом·см·10 <sup>-6</sup>	2,1	1,5	1,7	2,8	9,8
Удельная электропроводность, Ом <sup>-1</sup> ·см <sup>-1</sup> ·10 <sup>6</sup>	0,477	0,667	0,588	0,35	0,10

Кроме высокой электропроводности, проводниковые материалы должны отвечать еще ряду эксплуатационных и технологических требований: обладать высокой механической прочностью для предохранения проводов от провисания; достаточной пластичностью для волочения проволоки; хорошей коррозионной устойчивостью в атмосферных условиях; легкостью пайки и сварки, что существенно для монтажных работ.

Так как при легировании металлов возможно образование твердых растворов, что, согласно закону Н.С. Курнакова, вызовет повышение электросопротивления, в качестве проводниковых материалов обычно применяются чистые металлы: медь и алюминий, реже – серебро и железо, в особо ответственных случаях даже золото.

Наибольшей электропроводностью обладает серебро, но по экономическим соображениям за эталонный проводниковый материал выбрана отожженная медь.

В отожженном состоянии медь обладает низкой прочностью. Прочностные характеристики можно существенно повысить путем создания наклепа при волочении. Электропроводность при этом снижается всего на 2-3 %. Вместе с тем этот способ не всегда приемлем, так как наклеп ведет к резкому падению пластичности. На практике применяется и второй путь повышения прочности меди – легирование. Как уже отмечалось, легирование приводит к понижению электропроводности. Меньше всего снижают электропроводность серебро, кадмий и цинк (рис. 50). Наилучшим легирующим элементом проводниковой меди является кадмий, предел растворимости которого в меди менее 0,3 %.

Для упрочнения меди в нее вводится около 1 % кадмия. Избыток его сверх предела растворимости выделяется в виде упрочняющей фазы  $Cu_2Cd$ .

Предел прочности меди, легированной кадмием, (кадмиевой бронзы) достигает 700 МПа (после волочения), а электропроводность составляет 83 - 90 % от отожженной меди.

В табл. 21 приведены состав, свойства и назначение электротехнических медных сплавов. Для повышения электропроводности проводниковой меди при ее плавлении стремятся удалить все имеющиеся в ней примеси. Продувая расплавленную медь кислородом или воздухом, добиваются пере-

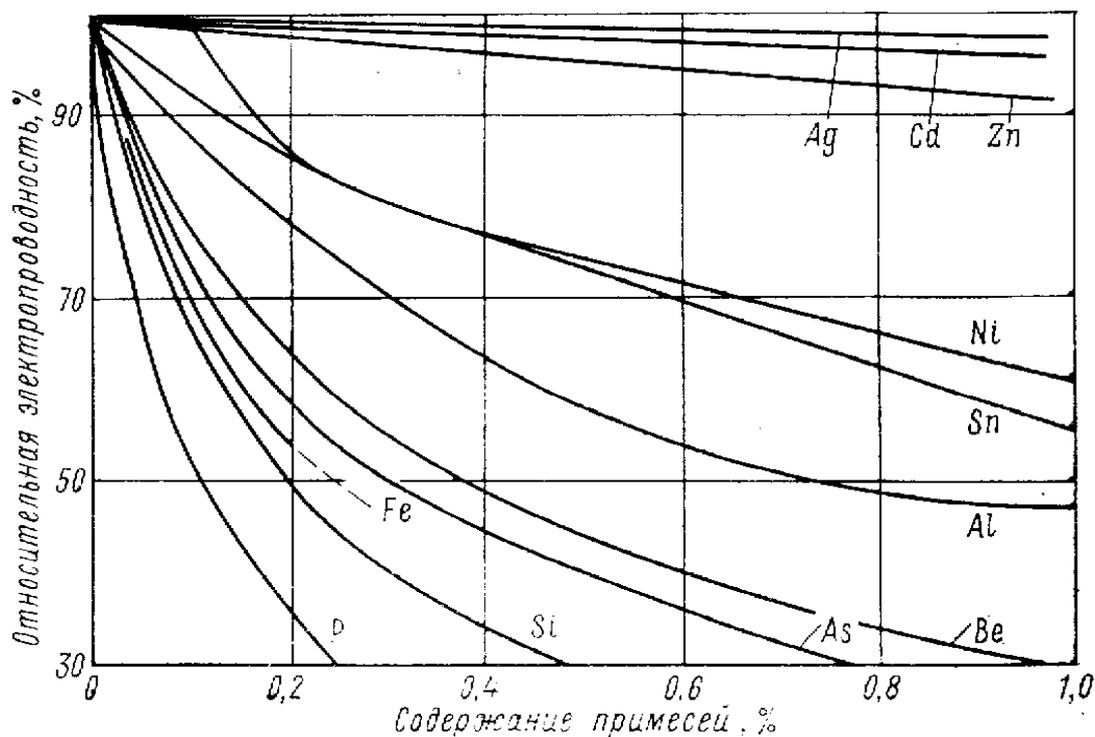


Рис 50. Влияние примесей на электропроводность меди

вода в шлак образующихся при этом оксидов примесей. Какое-то количество кислорода остается в меди в виде хрупкого соединения  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Если содержание закиси меди превышает  $10^{-3}$  %, то усложняются условия горячей и холодной пластической обработки.

Алюминий обладает примерно в 1,7 раза большим электросопротивлением, чем медь, однако плотность его втрое меньше, чем меди. Поэтому масса алюминиевого проводника равных длины и электросопротивления вдвое меньше медного. Это позволило заменить в нашей стране медь для воздушных линий электропередач алюминием и начать производство изолированных кабелей.

Для изготовления токоподводящих изделий применяют алюминий технической чистоты марок А7, А6, А0, для кабелей — марки А7.

Для работы при низких температурах могут с успехом применяться сверхпроводящие материалы. В настоящее время известно свыше 1000 двойных и тройных сплавов, обладающих сверхпроводящими свойствами.

Поскольку сверхпроводимость разрушается собственным током сверхпроводника, практический интерес представляют "жесткие" сверхпроводники. В табл. 22 приведены некоторые свойства жестких сверхпроводников.

Таблица 21

Назначение и свойства электротехнических медных сплавов

Сплав	Назначение	Свойства		
		электропроводность, %	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %
Медь ММ (отожженная)	Проводящие жилы Контактные провода, шины	100	250-280	18-55
Медь МТ (нагартованная)		98	340-390	0,5-2,5
Бронза кадмиевая (0,9 % Cd)	Токопроводящие пружины	95	310	50
		83-90	730	4
Бронза (0,8 % Cd; 0,6 % Sn)		55-60	290	55
		50-55	730	4
Бронза (2,5 % Al; 2 % Sn)		15-18	370	45
		15-18	970	4
Латунь (30 % Zn)	Фасонные токопроводящие детали	25	320-350	60-70
		25	880	5

Примечание. Для сплавов верхняя строчка относится к отожженному, нижняя – к холоднокатаному состоянию.

Таблица 22

Характеристики некоторых сверхпроводящих материалов

Материал	Температура перехода, К	Критическое магнитное поле при нуле Кельвина, кЭ
$\text{Nb}_3\text{Sn}$	18,1	245
$\text{V}_3\text{Si}$	17,0	234
$\text{Nb}_3\text{Al}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$	20,8	400
$\text{Nb}_x\text{Ti}_{1-x}$	11,0	100

## 6. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

К этой группе материалов, используемых в энергетике, относятся огнеупорные изделия, керамика из высокоогнеупорных оксидов и некоторые специальные конструкционные неметаллические материалы.

### 6.1. Огнеупорные материалы и изделия

Огнеупорными называют материалы, применяемые для футеровки (внутренней облицовки) металлургических печей, топок магистралей горячего дутья, разливочных ковшей, нагревательных печей, химических аппаратов, ванн и других устройств.

Огнеупорные материалы подвержены воздействию высоких температур, печных атмосфер, значительной строительной нагрузке, непосредственному или косвенному влиянию обрабатываемого материала.

В связи с этим важнейшими требованиями, предъявляемыми к огнеупорным материалам, являются следующие:

- высокая температура размягчения;
- хорошая стойкость и постоянство объема при резких перепадах температур;
- химическая стойкость в условиях эксплуатации.

Огнеупорные материалы изготавливают главным образом на основе минерального сырья и применяют в виде кирпичей, фасонных изделий и порошков. Кирпичи и фасонные изделия употребляют для кладки стен, пода и свода всевозможных печей, химических аппаратов, дымовых труб, конвертеров, ковшей, стенок ванн и т.п. Огнеупорными порошками набивают подины и откосы сталеплавильных печей, на них замешивают огнеупорные бетоны.

Изделия называются огнеупорными, если они имеют огнеупорность 1580 - 1770 °С, высокоогнеупорными – 1770 - 2000 °С и высшей огнеупорности – выше 2000 °С. Заметим, что огнеупорность выражают через температуру (°С), при которой образец из данного материала (треугольная усеченная пирамида высотой 30 мм со сторонами основания 8 и 2 мм), наклонясь в результате размягчения, касается своей верхней частью поверхности подставки.

В зависимости от пористости, огнеупорные изделия классифицируют на ряд групп – от высокоплотных (пористость менее 3 %) до обычных (пористость 20 – 30 %) и легковесных (пористость более 45 %).

По химико - минеральному составу различают следующие виды огнеупорных изделий:

- кремнеземистые (динасовые огнеупорные изделия, изделия из кварцевого стекла);
- алюмосиликатные;
- магнезиальные;

- магнезиально-известковые (доломитовые огнеупоры и др.);
- магнезиально-шпинельные (магнезито-хромитовые, шпинельные и др.);
- магнезиально-силикатные;
- углеродистые;
- карбидокремниевые;
- цирконистые;
- оксидные (из  $\text{BeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  и других оксидов);
- неокислородные (из нитридов, боридов и других соединений).

Преобладающую часть изделий (более 95 %) составляют алюмосиликатные, различные виды магнезиальных и кремнеземистые огнеупоры.

Для правильного подбора огнеупорных изделий и своевременного устранения причин, вызывающих снижение качества огнеупоров в процессе эксплуатации, необходимо учитывать возможность разрушения материалов в различных условиях. Основными причинами разрушения огнеупорных изделий являются их деформация и дополнительная усадка, растворение в шлаке или расплаве, разъедание газами, растрескивание, истирание и др. В большинстве случаев действуют одновременно несколько факторов.

По химическим свойствам огнеупорные материалы делят на три группы: кислые, основные, нейтральные.

**Кислые огнеупоры** состоят преимущественно из кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ); они вступают в химическое взаимодействие с основными огнеупорами и шлаками, но стойки к кислым шлакам. К кислым огнеупорам относятся динасы (динасовый кирпич) и кварцевый песок.

Динасовый кирпич содержит 93 – 97 %  $\text{SiO}_2$ , 2 – 3 %  $\text{CaO}$  (связка), имеет огнеупорность (температуру размягчения под влиянием собственной массы) 1690 - 1730 °С. Подробные данные о динасовых огнеупорах приведены в табл. 23.

Кварцевый песок (93 - 97%  $\text{SiO}_2$ ) применяют для наварки и ремонта отдельных частей печей с кислой футеровкой.

**Основные огнеупоры**, наоборот, состоят преимущественно из основных оксидов, обычно оксидов магния ( $\text{MgO}$ ) и кальция ( $\text{CaO}$ ). К основным огнеупорам относятся магнезит (магнезитовый кирпич и металлургический магнезитовый порошок), хромомagneзит, магнезитохромит, доломит (порошок).

Магнезит состоит из 89 - 94 %  $\text{MgO}$ , 1 - 2 %  $\text{CaO}$ , 2 - 3 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , около 2 %  $\text{SiO}_2$  и 1 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Огнеупорность магнезита выше 2000 °С, но под нагрузкой он размягчается при 1500 °С. Магнезит применяется для футеровки подов и стен основных мартеновских и электрических сталеплавильных печей, а также для печей цветной металлургии. Магнезитовым порошком набивают, наваривают и заправляют под и откосы основных металлургических печей. Подробные данные о магнезитовых огнеупорах приведены в табл. 24.

## Динасовые огнеупоры

Показатель	Марки огнеупоров				
	для кладки марте- новских печей ГОСТ 4157-79		для электро- сталепла- вильных печей ГОСТ 1566-71	для стек- ловаренных печей ГОСТ 3910-75	динасовый легковесный ГОСТ 5040-78
	ДМ	ДН	ЭД-1	ДСУ	ДЛ-1,2
Массовая доля, %:					
SiO <sub>2</sub> , не менее	94,5	93,5	96,0	93,0	91,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более	-	-	1,5	-	2,0
CaO, не более	-	-	2,0	3,5	5,0
Огнеупорность, °С	1710	1690	1720	1710	1680-1700
Плотность истин- ная, кг/м <sup>3</sup> , не более	2380	2400	2340	2380-2390	2390 (кажу- щаяся- 1200)
Открытая порис- тость, %, не более	23	25	22	22	47-55
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	22,5	17,5	25,0	15,0	4,5
Температура нача- ла деформации под нагрузкой 0,2 МПа, °С, не ниже	1650	1640	1660	-	1620-1640
Температурный коэффициент ли- нейного расширения, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	7,4	7,4	7,4	7,4	13
Газопроницае- мость, мкм <sup>2</sup>	-	-	-	-	14-20
Температура при- менения на возду- хе, °С, не выше	1650	1640	1660	1650	1550

## Магнезитовые огнеупоры

Показатель	Марки огнеупоров			
	МУ-91	МО-91	МУ-89	МО-89
Массовая доля, %:				
MgO, не менее	91,0	91,0	89,0	89,0
CaO, не менее	3,0	3,0	4,0	4,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не менее	2,5	-	2,5	-
Огнеупорность, °С, не ниже	2000	2000	2000	2000
Плотность кажущаяся, кг/м <sup>3</sup>	3000	2700	3000	2700
Пористость открытая, %, не более	11-18	11-23	11-20	11-26
Предел прочности при сжатии, МПа, не более	60	50	50	40
Температура начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа, °С	1550	1500	1500	1500
Дополнительная линейная усадка при 1650 °С в течение 2 ч, %, не более	0,5	0,6	0,6	0,7
Температурный коэффициент линейного расширения при 20-1600 °С, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	13	13	14	14
Максимальная температура применения на воздухе, °С	1650	1600	1600	1600

Хромомагнезит и магнезитохромит содержат 30 - 70 % MgO и 10 - 30 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Они имеют примерно такие же свойства, как и магнезит, но отличаются от него лучшей стойкостью к перепаду температур.

Хромомагнезит применяется в цементнообжигательных печах, а также в агрегатах черной и цветной металлургии.

Магнезитохромит применяется для кладки сводов мартеновских и электрических сталеплавильных печей.

Подробные сведения о хромомагнезитовых и магнезитохромитовых огнеупорах приведены в табл. 25 и 26. Доломит, в отличие от магнезита, применяется в виде порошка сырой (необожженной) породы, состоящей главным образом из CaCO<sub>3</sub> и MgCO<sub>3</sub>. Такой сырой доломит обжигается при разогреве печи. Огнеупорность доломита 1800 - 1900 °С.

**Нейтральные огнеупоры** почти не взаимодействуют ни с основными, ни с кислыми огнеупорами и шлаками. К нейтральным огнеупорам относятся шамотные (менее 65 % SiO<sub>2</sub> и 30 - 45 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), хромитовые и углеродистые.

*Шамотные* кирпичи и фасонные изделия – самые распространенные огнеупорные материалы. Огнеупорность их достигает 1770 °С, у них высокая стойкость к перепаду температур, достаточная устойчивость против кислых и основных шлаков, расплавов солей при температурах до 1250 - 1350 °С; они дешевы. Недостатком их является сравнительно низкая температура размягчения под нагрузкой (1250 - 1400 °С).

## Хромомагнезитовые огнеупоры

Показатель	Марки огнеупоров				
	ХМ1-1	ХМ2-1	ХМ3-1	ХМ3-2	ХМ4-1
Массовая доля, %:					
MgO, не менее	46	46	42	42	42
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не менее	22	22	20	15	15
SiO <sub>2</sub> , не более	6	7	8	8	8
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	2950	2950	2950	-	-
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	30	27,5	25	25	20
Температура начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа, °С	1550	1520	1500	1500	1450
Термостойкость (1300 °С-вода), теплосмен	2	2	2	-	-
Максимальная температура применения на воздухе, °С	1700	1700	1500-1700	1500	1500

Шамотным кирпичом выкладывают шахты доменных печей, газогенераторы, вагранки, разливочные ковши, электропечи различного назначения (плавильные, нагревательные, для термической обработки), работающие главным образом в условиях воздушной (слабоокислительной) атмосферы. Шамотные огнеупоры выпускаются плотные и легковесные. В табл. 27 приведены физико-химические показатели плотных шамотных огнеупоров.

Температурный коэффициент линейного расширения плотных шамотных огнеупоров при 20 - 1600 °С составляет  $5,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Огнеупоры ШПД - 42, ШПД - 39 стойки в углеродосодержащей атмосфере при температурах до 1500 °С, а ШУД - 37 до 1440 °С.

Шамотные легковесные изделия (табл. 28) используются для кладки рабочего (незащищенного) или внутреннего (защищенного) слоев футеровки электропечей различного назначения. Легковесные шамотные изделия изготавливают только простой формы в виде прямых или фасонных кирпичей. Они не должны подвергаться воздействию расплавленных шлаков, металлов, стекла, золы, истирающих усилий и механических ударов. Шамотные легковесные изделия могут применяться в качестве промежуточной теплоизоляции в плавильных или высокотемпературных электропечах. Огнеупоры ШЛ - 0,4 и ШТЛ - 0,6 могут применяться в контролируемых углеродосодержащих атмосферах до 1100 °С, огнеупоры ШЛ - 1,3, ШЛ - 1,0 и ШЛ - 0,9 допускается применять в вакууме до 1000 °С.

## Магнезитохромитовые огнеупоры

Показатель	Марки огнеупоров				
	ПХСС	ПХСП	ПХСУ	ПХСОТ	ПХСУТ
Массовая доля, %:					
MgO, не менее	65	70	65	65	70
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7-15	7-15	7-15	7-18	7-15
Кажущая плотность, кг/м <sup>3</sup>	3000	3120	3040	3000	3120
Открытая пористость, %	22	16	20	22	18
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	27,5	37,5	32,5	25,0	35,0
Температура начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа, °С	1520	1560	1540	1500	1540
Дополнительная линейная усадка под нагрузкой 0,2 МПа при 1750 °С, %, не более	0,9	0,7	0,8	0,9	0,7
Термостойкость (1300 °С-вода), теплосмен	3	4	5	5	6

*Хромитовые огнеупоры* содержат не менее 25 % хрома и имеют огнеупорность около 1800 °С. Применяют их обычно для разделения слоев кислых и основных огнеупоров с целью предотвращения взаимодействия между ними.

*Углеродистые огнеупоры* содержат до 90 % углерода и делятся на графитовые и угольные. Из графитовых огнеупоров изготавливают тигли для плавки различных металлов, а из угольных - отдельные части металлургических печей (например, лещады и стенки горна доменных печей). Углеродистые огнеупоры весьма стойки (выше 2000 °С), мало взаимодействуют со шлаками и сохраняют свой объем при работе. Применять их в сталеплавильных печах нельзя, так как они науглероживают сталь.

## Плотные шамотные огнеупоры

Показатель	Марки огнеупоров				
	шамотные изделия общего назначения ГОСТ 390-83		изделия для домен- ных печей ГОСТ 1598-75		изделия для сифонной разливки стали ГОСТ 1586-69
	ШД	ШБ	ШПД-42	ШПД-39	С
Массовая доля, %: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не менее	30	28	42,0	39,0	28,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более	2,8	1,6	1,5	1,5	1,5
Огнеупорность, °С, не ниже	1730	1670	1750	1750	1670
Кажущаяся плот- ность, кг/м <sup>3</sup>	1900	1900	2320	2200	2000
Открытая порис- тость, %	30	30	12	16	15-26
Предел прочности при сжатии, МПа	15	13	40-70	50	-
Температура начала деформации под на- грузкой 0,2 МПа, °С	1300	1280	1500	1440	1400
Дополнительная ли- нейная усадка, %, не более, при темпера- туре, °С	0,7/1400	0,7/1350	0,2/1450	0,3/1450	0,5/1350
Газопроницаемость, мкм <sup>2</sup>	0,6	1,0	-	-	-
Термостойкость, теп- лосмен, не менее	10 (1300 °С- вода)	6 (1300 °С- вода)	-	-	1 (800 °С- вода)
Максимальная тем- пература применения на воздухе, °С	1400	1350	1500	1500	1350

## Шамотные легковесные огнеупоры

Показатель	Марки огнеупоров						
	класс А	ШЛ-1,3	каолиновые		ШЛ-1,0	ШЛ-0,9	тальковые
	ШЛА-1,3		ШКЛ-1,3	ШКЛ-1,0			ШТЛ-0,6
Массовая доля, %:							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,0	34,6	37,8	37,3	32,9	35,6	38,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,1	2,1	1,4-1,9	2,7	1,4	2,2	1,6
SiO <sub>2</sub>	60,8	58,3	-	56,3	59,6	57,0	55,3
Огнеупорность, °С	1760	1660-1730	1740	1700	1680-1710	1670-1740	1660
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup> , не более	1300	1300	1300	1000	1000	900	600
Открытая пористость, %	52-78	53	57	62-66	59-60	65	80
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	4,4	3,4	3,4	2,5	2,9	2,5	2,5
Дополнительная линейная усадка, %, не более, при температуре, °С	1,0 1400	1,0 1300	1,0 1400	1,0 1400	0,6 1300	1,0 1270	0,7 1200
Температурный коэффициент линейного расширения при 20-1000 °С, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	5,6	6,4-7,2	7,5	7,5	5,6	5,6	12,4
Температура начала деформации под нагрузкой 0,05 МПа, °С	1600	1510	1540	1390	1450	1240	-
Максимальная температура применения на воздухе, °С	1400	1300	1400	1400	1300	1270	1200
Максимальная температура применения в вакууме, °С	-	1000	-	-	1000	1000	-

## 6.2. Керамика из высокоогнеупорных оксидов

Керамические изделия из чистых высокоогнеупорных оксидов применяются в условиях высоких (выше 1800 °С) температур и при контакте с различными веществами: расплавленными и нагретыми металлами, расплавами, газами и др.

Керамические изделия из оксидов по структуре и свойствам существенно отличаются от аналогичных по химико-минералогической природе ог-

неупоров, так как от них, помимо огнеупорности, требуются: высокая степень чистоты состава; высокая плотность; малая пористость; стойкость к агрессивному воздействию; термомеханические свойства; диэлектрические свойства.

Эти изделия изготавливают по специальной технологии, существенно отличающейся от технологии производства огнеупоров.

**Свойства и химическая стойкость высокоогнеупорных оксидов.** В сухом воздухе все оксиды устойчивы до температуры плавления. В других средах и в вакууме их устойчивость заметно снижается. По степени устойчивости к воздействию расплавов металлов огнеупорные оксиды располагаются в следующий ряд:

$\text{ThO}_2 > \text{CaO} > \text{BeO} > \text{ZrO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{SiO}_2$ .

Из них наиболее устойчивы в вакууме  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

По степени устойчивости в вакууме оксиды располагаются:  $\text{ZrO}_2$  (стабилизированный  $\text{MgO}$ )  $>$   $\text{BeO} >$   $\text{ZrO}_2$  (стабилизированный  $\text{CaO}$ )  $>$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

По степени устойчивости в гелии:  $\text{BeO} >$   $\text{ZrO}_2 >$  (стабилизированный  $\text{CaO}$ )  $>$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Все вышеуказанные оксиды пригодны для плавки легкоплавких металлов. При плавке высокоактивных элементов и металлов (например  $\text{Si}$ ,  $\text{Nb}$ ) по степени устойчивости оксиды располагаются:  $\text{ThO}_2 >$   $\text{BeO} >$   $\text{ZrO}_2 >$   $\text{Al}_2\text{O}_3 >$   $\text{MgO}$ .

Конкретные свойства огнеупорных оксидов приведены в табл. 29.

### 6.3. Огнеупорные бетоны и набивные массы

К огнеупорным бетонам и набивным массам предъявляются следующие основные требования: постоянство объема в условиях эксплуатации; достаточная строительная прочность; огнеупорность.

Основное различие между огнеупорными бетонами и набивными массами заключается в том, что прочность бетонов обеспечивается благодаря твердению гидравлических, воздушно-твердеющих или химических вяжущих веществ (цементов) при температурах, исключающих спекание бетонной смеси; прочность футеровки из набивных масс обеспечивается при обжиге футеровки.

Огнеупорные бетоны являются искусственным каменным материалом, обладающим достаточной прочностью при нагревании, способным при температурах эксплуатации сохранять в необходимых пределах свои физико-механические свойства. Бетоны приготавливают на основе огнеупорных заполнителей, получаемых дроблением предварительно обожженных огнеупоров, и огнеупорного вяжущего (цемента). При нормальной температуре вяжущее (связка) скрепляет между собой зерна дробленого огнеупора и придает бетону необходимую прочность.

## Свойства огнеупорных оксидов

Показатель	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub> (кварц)	BeO	ThO <sub>2</sub>
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	3970	5560	3580	2650	3020	9690
Температура плавления, °С	2050	2700	2800	1610	2550	3050
Температура применения, °С	1950	2500	2400	-	2000	2700
Температурный коэффициент линейного расширения, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup> , в интервале от 20°С до значения, °С	8,4	9,5	15,6	3,0	10,6	10,2
Теплопроводность при нулевой пористости, Вт/(м·К), при температуре, °С	1000	1000	1700	1100	1700	1700
100	30,3	1,9	34,5	1,5	219,0	10,3
600	9,1	2,1	11,5	2,2	46,5	4,3
1000	6,2	2,3	6,9	5,1	20,3	3,1
1400	5,5	2,5	6,1	-	16,2	2,4
1800	6,8	2,7	9,4	-	15,4	3,0
Диэлектрическая проницаемость	10,5-12,5	7-8	5,5-6,0	4,6	6,3	5,0
Твердость по Моосу	9,0			7,0	9,0	
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °С						
20	2900	2060	1400	-	800	1500
1000	900	1170	1150	-	250	350
1400	240	127	-	-	170	39
1500	-	20	-	-	130	10
1800	23	-	-	-	36	-
Предел прочности при растяжении, МПа, при температуре, °С						
20	260	137	-	1000	100	82
1000	230	101	-	-	41	-
1200	130	83	56	-	28	-
1500	10	13	43	-	-	-
Предел прочности при изгибе, МПа, при температуре, °С						
20	300-400	196-245	91	-	50-300	72
1000	-	-	-	-	123	49
1400	-	-	40	-	27	-

Огнеупорные бетоны в зависимости от применяемого вяжущего, подразделяются на следующие виды:

- на высокоглиноземистом цементе (ВГЦ с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 72-80 %);

- глиноземистом цементе (ГЦ с содержанием  $Al_2O_3$  35-55 %);
- портландцементе (ПЦ, 5-8 %  $Al_2O_3$ , 22 %  $SiO_2$ , 65 %  $CaO$ );
- периклазовом цементе ( $MgO \geq 85$  %);
- жидком стекле, фосфатных связках и др.

По огнеупорности бетоны делят на высокоогнеупорные (выше 1770 °С), огнеупорные (1580-1770 °С) и жароупорные (1200-1580 °С) В зависимости от максимальной температуры применения огнеупорные бетоны подразделяются на 8 групп (табл. 30):

Таблица 30

Классификация бетонов по огнеупорности

Классификация по огнеупорности	Жароупорные					Огнеупорные		Высокоогнеупорные
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
Группа	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Максимальная температура применения бетона, °С	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	> 1700

**Набивные массы** приобретают прочность в результате спекания при высоких температурах за счет образования вязкого расплава, который склеивает между собой отдельные частицы в прочный керамический черепок. В качестве набивных масс используют огнеупорные материалы определенной зернистости с введением в них *плавней* (борный ангидрид, борная кислота, бура, плавиковый шпат и т.п.), которые значительно снижают температуру спекания масс при незначительном снижении их огнеупорности. Одним из основных требований, предъявляемых к набивным массам, является небольшое увеличение или постоянство объема в эксплуатации. Спекание обычно сопровождается усадкой материала. Для компенсации усадки в массу вводят расширяющие материалы, которые либо сами увеличиваются в объеме в результате перекристаллизации минералов, либо взаимодействуют при обжиге с компонентами набивной массы, образуя новые соединения, имеющие больший объем чем суммарный объем веществ, вступивших в реакцию. Такими добавками являются: силлиманит, кианит, дистенсиллиманит, андалузит, корунд и др.

Высокие температуры ускоряют превращения, поэтому быстрый разогрев кварцитной массы может привести к расслаиванию футеровки.

Для упрочнения набивки до спекания в набивные массы иногда вводят небольшое количество воздушно-твердеющих добавок (жидкое стекло, алюмофосфатную связку, сульфитно-спиртовую барду, глину). В отдельных случаях набивные массы изготавливают на каменноугольных, пековых или смоляных связках. Максимальный размер зерна набивных масс не превышает 3 мм.

Влажные набивные массы (табл. 31) с добавками ортофосфорной кислоты (4-5 %) поставляют в готовом виде в полиэтиленовых мешках или в другой упаковке, предохраняющей массу от высыхания.

Сухие набивные массы и смеси представлены в табл. 32, 33.

## 6.4. Теплоизоляционные материалы

Теплоизоляционные материалы применяются в качестве промежуточного (защитного) теплоизоляционного слоя в футеровках печей различного назначения. Обычно их огнеупорность (или температура плавления) ниже 1580 °С. Материалы этого типа характеризуются специфическим комплексом свойств: малой теплопроводностью, малой кажущейся плотностью при высокой пористости, достаточной механической и химической стойкостью, незначительной усадкой в период службы, недефицитностью и невысокой стоимостью. Эти материалы не должны подвергаться воздействию расплавов, газовой эрозии, абразивному и механическому воздействиям, значительной строительной нагрузке, резкому перепаду температур. Свойства материалов должны обеспечить снижение потерь тепловой энергии через слой футеровки. Теплоизолирующие свойства материалов обычно определяются их химико-минеральной природой, плотностью и характером структуры.

Теплоизоляционные материалы классифицируют по разным признакам:

- по химико-минеральному составу, зависящему от исходного сырья: органические и неорганические;
- по характеру структуры, зависящей от технологии изготовления: волокнистые, ячеистые, зернистые и смешанного строения;
- формованные и неформованные. Первые получают формованием и приданием материалу определенных форм и размеров; это – плиты, маты, скорлупы, сегменты, блоки, кирпичи, цилиндры и т.п. К неформованным материалам относятся волокнистые ваты и рулоны, засыпки, мастики, бетоны и др.;
- по сжимаемости, выраженной относительной деформацией при сжатии под нагрузкой, согласно табл. 32.

К мягким относятся ваты, войлоки, маты, рулоны; к полужестким – гибкие материалы: ткани, шнуры, жгуты; к жестким и полужестким могут быть отнесены волокнистые материалы на различных связующих; большинство формованных изделий зернистой и ячеистой структуры относятся к твердым изделиям, и их механические свойства оцениваются пределом прочности при сжатии и изгибе. В табл. 33 приведены группы и марки теплоизоляционных изделий соответственно кажущейся плотности, максимально допустимой по нормам. В электрических печах сопротивления обычно применяются легкие теплоизоляционные материалы, а в плавильных электропечах, в крупных электротермических установках, для которых требуются повышенные прочность и надежность теплоизоляционной кладки, применяются тяжелые материалы.

## Влажные огнеупорные набивные массы

Наименование	Технические условия	Марка	Назначение	Огнеупорность, °С	Массовая доля, %				
					влаги	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Масса муллитокорундовая на фосфатной связке	ТУ 14-8-345-80	МК-87 МК-85	Футеровка канальных и тигельных электропечей	≥1850	4,5	87	<1,0	-	1,7-2
				≥1850	4,5	85	<1,0	-	1,7-2
Масса муллитовая на безусадочная на фосфатной связке	ТУ 14-8-119-74	МЛМ-1 МЛ-2 МЛ-3	Футеровка установок непрерывной разливки стали, тигельных и канальных печей для черных металлов	-	5,0-6,5	≥67	<1,4	-	1,7-2,5
				-	4,0-5,5	≥67	<1,4	-	1,7-2,5
				-	4,0-5,5	≥67	<1,4	-	1,7-2,5
Масса корундовая	ТУ 14-8-457-84	МК-90	Для индукционных канальных электропечей	≥1700	3,0-4,0	≥90	-	-	-
Масса муллитокорундовая	ТУ 14-8-391-82	ММК-88	Футеровка тигельных и канальных электропечей	-	-	≥65	2,5	-	1,2-2
Масса муллитокорундовая	ТУ 14-8-341-80	ММК-72	Для раздаточных миксеров чугуна	≥1700	6-7	≥72	≤1,3	-	-
Масса муллитокорундовая	ТУ 14-8-269-78	МК-80	Футеровка канальных электропечей	1850	4,5-5,5	≥80	1,2	-	1,7-2,5
Масса муллитокорундовая	ТУ 14-8-286-78	ММК-1 ММК-3	Для электропечей плавки и выдержки латуни и бронзы	-	4,5-5	≥78	≤1,4	-	-
				-	4,5	≥78	≤1,4	-	-

## Сухие алюминиевые смеси, корундовые и кварцевые набивные массы

Наименование	Технические условия	Марка	Назначение	Огнеупорность, °С	Массовая доля, %			
					влаги	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Порошок для набивки высокоглиноземистой массы	ТУ 14-8-165-75	ПМЛК	Для футеровки подовых камней	-	2,0	62-70	1,2	-
		ПМЛС	индукционных медеплавильных печей	-	2,0	62-70	1,2	-
		ПКСТ	на магнийфосфатной связке	-	2,0	95	0,8	-
		ПКГТ		-	2,0	73-78	1,2	-
Кварцит молотый Первоуральского динасового завода	ТУ 14-8-246-77	ПКМИ-97,5	Для тиглей индукционных печей плавки чугуна и стали	1730	3,0	1,3	0,6	97,5
Кварцит молотый Овручского месторождения	ТУ 14-8-141-75	ПКМ	Для индукционных печей плавки чугуна и медных сплавов (с добавками 15% маршалита или пылевидного кварца марки А1)	1730	≤0,3	1,6	≤1,6	97,0
Порошок корундовый для набивных масс	ТУ 14-8-89-73	ПКН-8 ПКН-2 ПКН-0,5	В качестве набивных масс для высокотемпературных печей	2000	-	98	-	-
Порошок плавленного корунда	ТУ 14-8-384-81	ПКПК-97	Для изготовления огнеупорных набивных масс, бетонов, засыпок	2000	≤1,0	≥97	≤0,7	≤1,0
		ПКПС-97			≤1,0	≥97	≤0,7	≤1,0
		ПКПК-98			≤0,8	≥98	≤0,5	≤0,8
		ПКПС-98			≤0,8	≥98	≤0,5	≤0,8
		ПКПК-99			≤0,8	≥99	≤0,3	≤0,8
ПКПС-99	≤0,4	≥99	≤0,3	≤0,8				
Порошок плавленного муллита	ТУ 14-8-450-83		Для изготовления огнеупорных набивных масс и бетонов	1800	≤2,0	72-77	≤0,3	-
Кварц молотый пылевидный	ГОСТ 9077-82	А	В качестве мелкозернистой добавки в молотый концентрат	1700	2,0	0,5	0,05	98
		Б		1700	2,0	1,0	0,15	98

Таблица 33

## Сухие магнезитовые массы и смеси

Наименование	Технические условия	Марка	Назначение	Массовая доля, %			Изменение массы при прокаливании, %
				влаги	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Массы набивные периклазовые и периклазохромитовые*	ТУ 14-8-251-77	МПВС МПВП МПХВП	Для индукционных установок внепечного вакуумирования стали	1,0	86	-	-
				1,0	89	-	-
				1,0	68	-	-
Порошок магнезитовый и его смесь с корундом	ТУ 14-8-289-78	ПМ СМК	Для индукционных тигельных печей плавки стали	2,0	93	-	-
				2,0	69	18-25	-
Порошки из плавленного магнезита	ТУ 14-8-149-75	ППМВИ-94 ППМВИ-93 ППМВИ-93 ППМВИ-92	Для вакуумных индукционных печей плавки стали Для открытых индукционных печей плавки стали	0,3	94	≥2	0,3
				0,3	93	≥3	0,3
				0,3	93	-	0,3
				0,3	92	≥2	0,3
Порошок плавленного муллита	ТУ 14-8-450-83	ППФ	Для стыковочных поверхностей индуктора и ванны канальных печей	1,0	90	-	-

\*Масса содержит 8 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

По теплопроводности при 25 °С теплоизоляционные материалы разделяют на малотеплопроводные [до 0,058 Вт/(м·К)], среднетеплопроводные [0,058 – 0,116 Вт/(м·К)] и повышенной теплопроводности [0,116 – 0,180 Вт/(м·К)]. В стандартах или технических условиях должны быть указаны значения теплопроводности при (25±5) °С, а также при средней температуре (125±5) °С для материалов, применяемых до 500 °С, и при средней температуре (300±5) °С для материалов, применяемых при температурах свыше 500 °С.

Таблица 34

Виды изделий по сжимаемости

Сокращенное обозначение	Наименование	Сжимаемость, %, при удельной нагрузке, МПа		
		0,002	0,004	0,01
М	Мягкие	30	–	–
П	Полужесткие	6-30	–	–
Ж	Жесткие	6	–	–
ПЖ	Повышенной жесткости	–	10	–
Т	Твердые	–	–	10

Таблица 35

Группы теплоизоляционных материалов по плотности

Сокращенное обозначение	Наименование	Марка (по кажущейся плотности, кг/м <sup>3</sup> )
ОЛ	Особо легкие	15, 25, 35, 50, 75, 100
Л	Легкие	125, 150, 175, 200, 225, 300, 350
Т	Тяжелые	400, 450, 500, 600

**Волокнистые теплоизоляционные материалы.** Эти материалы относятся к группе материалов из глиноземокремнеземистого стекла с содержанием 40-90 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (остальное SiO<sub>2</sub>). Их изготавливают из волокон, получаемых из расплавов, находящихся в стеклообразном состоянии.

Огнеупорные стеклообразные волокнистые материалы (ОСВМ) обладают эластичностью (упругостью), трещиноустойчивостью при достаточно большой прочности отдельных волокон, малой кажущейся плотностью и малой теплопроводностью.

Недостатком ОСВМ является их свойство “расстекловываться” (кристаллизоваться) и охрупчиваться. При этом происходит потеря эластичности и последующее спекание материала в целом. Поэтому температура длительной эксплуатации этих материалов по сравнению с температурой их плавления намного ниже.

Большая часть выпускаемых алюмосиликатных огнеупорных волокон по составу относится к муллитокремнеземистым материалам, так как при их

кристаллизации выделяются кристаллы муллита\* и кристобалита (кремнезема  $\text{SiO}_2$ ).

Разрушение волокон в результате охрупчивания имеет место, когда кристаллы становятся по размерам равными диаметру волокна.

Добавки небольших количеств оксида хрома (до 5 %) или циркония несколько (на 150-200 °С) повышает температурный (и временной) интервал стеклообразного состояния.

Из муллитокремнеземистого волокнистого материала в виде ваты с добавлением или без добавления различных связок изготавливают теплоизоляционные изделия – войлок, плиты, бумагу, картон. Температура использования на воздухе до 1150–1300 °С; в углеродистой и в восстановительной атмосфере – обычно до 1050 °С; в вакууме – до 850 °С.

**Взаимодействие ОСВМ с различными веществами.** Муллитокремнеземистое волокно и изделия из него инертны к воде и водяному пару, мылам, щелочам и кислотам (кроме сильных щелочей, фосфорной и плавиковой кислот), малогигроскопичны, имеют хорошую фильтрующую способность и высокие электроизоляционные свойства, не смачиваются жидким алюминием, магнием, цинком и их сплавами.

Муллитокремнеземистое волокно и изделия из него не разрушаются механически под воздействием углеродосодержащих атмосфер во всем интервале температур их использования. Выше 1100 °С среда водорода и оксида углерода восстанавливает кремнеземистую часть волокон и способствует интенсивной кристаллизации в них муллита. Поэтому использование изделий ограничивается этой температурой.

Волокна с содержанием 60 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  могут быть использованы в атмосфере водорода до 1200 °С.

Алюмосиликатные волокна разрушаются под воздействием газообразных сульфатов, хлоридов, фторидов, оксидов свинца и ванадия, тяжелых масел, серы.

**Минеральные волокна и изделия из них.** Минеральные волокна (вата) получают из расплавов горных пород (базальта, перлита, андезита, гранита и др.). Длина отдельных волокон составляет от 2 до 60 мм. Диаметр их может составлять от 2 до 50 мкм. Минеральная вата должна содержать не менее 80–90 % волокна диаметром менее 7 мкм.

Средний состав, %, минеральной ваты: 38 - 50  $\text{SiO}_2$ , 5 - 16  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 20-35  $\text{CaO}$ , 4-9  $\text{MgO}$ , 1 - 10  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , до 1 % S (сульфаты и сульфиды); базальтового волокна: 51  $\text{SiO}_2$ , 1,1  $\text{TiO}_2$ , 15,2  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 5,9  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; базальтового волокна Берестовецкого месторождения: 8,6  $\text{FeO}$ , 9,3  $\text{CaO}$ , 5,6  $\text{MgO}$ , 2,9 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ).

\* Муллит – минерал класса силикатов. Химический состав не постоянен от  $\text{Al}_6\text{SiO}_{13}$  до  $\text{Al}_4\text{SiO}_8$  (или  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ). Твердость по минералогической шкале 6–7. Плотность 3030  $\text{кг/м}^3$ ,  $t_{\text{пл}} \sim 1810$  °С. Чистый муллит бесцветен. От небольших примесей оксидов железа и титана окрашивается в розоватый или синеватый цвет. В природе редок. Муллит входит в состав фарфора, глиноземистого огнеупора – шамота. Образуется из силикатов глинозема при 1300-1550 °С.

В контролируемых атмосферах (восстановительных) минеральная вата может использоваться до 600 °С, а базальтовое волокно до 400 °С.

Из минерального волокна (ваты) изготавливают войлоки, шнуры, маты, плиты; из базальтового волокна – картон, холсты, маты, плиты.

**Стекланные волокна и изделия из них** получают из стекланныго боя или из расплава стекольной шихты, содержащей известняк, кварцевый песок, соду, сульфит и др. Получение волокон осуществляют вытягиванием, раздувом или центробежным способом. Из волокон изготавливают плиты и маты. Химический состав волокон, %: 55-59 SiO<sub>2</sub>, 16-22 CaO, 11-15 Na<sub>2</sub>O, 2-5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6-10 MgO, кроме того, в небольших количествах присутствуют Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и др.

**Асбестовое волокно и изделия из него.** Для производства асбестового волокна используют главным образом природный хризотил-асбест. На основе обогащенного и распушенного асбеста изготавливают насыпные материалы и штучные изделия (бумагу, картон).

Температура применения асбестовых материалов не превышает 600 °С. Для асбестовых материалов характерно снижение прочности при нагреве вследствие потери адсорбционной воды.

**Формованные изделия зернистой структуры.** Основу теплоизоляционных изделий зернистой структуры составляют зернистые высокопористые компоненты (заполнители) естественного происхождения (трепел, диатомит) или полученные искусственно (вспученные перлит или вермикулит). В некоторых случаях для улучшения структуры и повышения физико-механических характеристик при сохранении теплоизоляционных свойств в состав композиций вводят дополнительно распушенный асбест, который армирует материал.

**Пористо-зернистые теплоизоляционные изделия** делят на две основные группы: для средних температур (до 600 °С) – перлитцементные, перлитофосфогелевые, асбестовермикулитовые; для высоких температур (свыше 600 °С) – диатомитовые, пенодиатомитовые, керамоперлитовые, керамоперлитофосфатные, перлитобетонные, вермикулитобетонные, вермикулитоперлитовые. Пористо-зернистые изделия изготавливают с керамической или цементной связкой. В первом случае используют пластичные огнеупорные глины, бентонит; во втором – цементы гидравлического твердения (портланд-цемент, глиноземистый цемент). Физико-технические показатели пористо-зернистых изделий представлены в табл. 36.

**Перлитцементные изделия** изготавливают из материала, полученного смешением перлитного песка\* (43 % по массе), портландцемента марки не ниже 400 (43 %) и асбеста не ниже шестого сорта (14 %) с последующими увлажнением (200-300 % от массы сухих компонентов), формованием гидромассы, пропариванием ее и сушкой до остаточной влажности 20-30 %.

\* Перлит – кремнеземистая горная порода вулканического происхождения; содержит 68-75 % SiO<sub>2</sub>, 10-15 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Перлитцементные изделия выпускаются в виде плит, полуцилиндров и сегментов толщиной от 50 до 105 мм.

Таблица 36

Теплоизоляционные изделия зернистой структуры

Вид изделия (ГОСТ, ТУ)	Максимальная температура применения $t_{max}, ^\circ\text{C}$	Кажущаяся плотность изделия $P_{каж}, \text{кг/м}^3$	Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}, \text{МПа}$	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}, \text{МПа}$	Теплопроводность изделий на воздухе $\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , не более, при температуре, $^\circ\text{C}$		Дополнительная линейная усадка при температуре применения $\Delta_{лин}, \%$
					25	300	
Стеклоперлитовые (ТУ 21-31-4-73)	700	100	0,14	0,17	-	-	-
		150	-	-	-	-	-
		200	0,20	0,30	0,080	-	-
Перлитофосфогелевые (ГОСТ 21500-76)	600	200	0,15	0,35	0,064	0,088	1,5
		250	0,25	0,45	0,076	0,090	1,5
		300	0,35	0,55	0,082	0,094	1,5
Перлитокерамические (ГОСТ 21521-76)	875	250	-	0,30	0,076	0,122	2,0
		300	-	0,50	0,081	0,128	2,0
		350	-	0,70	0,093	0,140	2,0
		400	-	1,00	0,105	0,151	2,0
Керамоперлитофосфатные	1150	250	-	0,70	0,070	-	-
		400	-	1,50	0,090	-	-
Перлитобетон: на портландцементе	600	600	-	3	0,150	-	-
		700	-	4	0,200	-	-
		900	-	10	0,256	-	-
на глиноземистом цементе	1000	650	-	3	0,186	-	-
		800	-	5	0,210	-	-
Вермикулитоперлитовые	900	160-220	0,25-0,5	-	0,060	-	-
Асбестовермикулитовые (ГОСТ 13450-68)	600	250	0,180	-	0,087	0,157	1,5
		300	0,225	-	0,093	0,163	1,5
		350	0,250	-	0,099	0,169	1,5
Вермикулитобетон: на портландцементе	850	300	-	0,2	0,088	-	-
		400	-	0,7	0,106	-	-
		500	-	1,3	0,130	-	-
		800	-	3,5	0,190	-	-
		на жидком стекле	900	400-500	-	0,2-0,5	0,099
Пеновермикулитобетон	900	450-800	0,9-3,0	1,5	0,200	-	-
Диатомитовые (ГОСТ 2694-78)	900	500	-	0,6	0,105	0,157	2,0
		600	-	0,8	0,116	0,169	2,0
Пенодиатомитовые (ГОСТ 2694-78)	900	350	-	0,6	0,083	0,122	2,0
		400	-	0,8	0,095	0,134	2,0

**Стеклоперлитовые изделия** представляют собой вспученный перлитовый песок на связке жидкого стекла. Шихта имеет следующий состав: перлитовый песок – 60-70 % (по массе), жидкое стекло плотностью 1250-1350 кг/м<sup>3</sup> – 30- 40%. Из шихты прессуют изделия, которые сушат при температурах до 300-400 °С.

Разновидностью стеклоперлита является перлитовый обжиговый легковес, технологический процесс получения которого отличается от описанного выше тем, что вместо сушки материал обжигается при 800 °С.

Кроме рассмотренных, используют изделия зернистой структуры: перлитофосфогелевые, перлитокерамические, керамоперлитофосфатные, вермикулитоперлитовые, асбестовермикулитовые, перлитобетоны (табл. 35), вермикулитобетон, пеновермикулитобетон, а также диатомитовые и пенодиатомитовые изделия.

Таблица 37

Составы перлитобетонов

Вид вяжущего	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона, кг					Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>
	цемент	перлит фракции				
		0,1 мм	0-2 мм	2-5 мм	5-10 мм	
Портландцемент	320	40	150	-	-	600
	325	160	80	40	40	700
	350	180	35	85	85	800
	385	180	35	170	160	1000
Глиноземистый цемент	320	-	130	70	70	650
	270	-	56	215	260	800
Жидкое стекло	500	175	190	-	-	650
	410	45	70	300	300	850

**Формованные изделия ячеистой и смешанной структуры.** К ним относятся ячеистые силикаты, а также автоклавные известково-кремнеземистые и карбонизированные известково-магнезиальные материалы, состоящие из силикатов кальция или смеси углекислого магния и кальция, армированных волокнами асбеста (смешанные структуры). Физико-технические показатели ячеистых изделий представлены в табл. 38.

**Пеностекло** по способу образования пористой структуры следует отнести к ячеистым изделиям. Его получают нагревом смеси стеклянного порошка (1-3 мм) с измельченным (до 1 мм) газообразователем (углеродистые вещества, карбонаты и т.п.). Размеры пор в пеностекле могут быть 0,5-5 мм. Кажущаяся плотность 100-700 кг/м<sup>3</sup>. Максимальная температура применения 300-400 °С (для стекол обычного состава) или 800-1000 °С (для бесщелочных). Для промышленного пеностекла с кажущейся плотностью 300-400 кг/м<sup>3</sup> предел прочности при сжатии составляет 4,5-5,0 МПа. Теплоемкость пеностекла (из оконного стекла) 0,75 кДж/(кг·К).

Пеностекло выпускают в виде плит (блоков) толщиной 100, 120 и 140 мм. Оно хорошо поддается механической обработке.

Химический состав (% по массе) изоляционно-монтажного пено-стекла: SiO<sub>2</sub> – 72-73, CaO – 6-7, Na<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 14-16, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,8-2, SO<sub>3</sub> – 0,4-0,5.

Таблица 38

Теплоизоляционные изделия ячеистой и смешанной структуры

Вид изделий (ГОСТ, ТУ)	Максимальная температура применения t <sub>max</sub> , °С	Кажущаяся плотность ρ <sub>каж</sub> , кг/м <sup>3</sup>	Предел прочно- сти, МПа		Теплопроводность изде- лий (на воздухе) λ, Вт/(м·К), не более при температуре, °С	
			при изгибе σ <sub>изг</sub>	при сжатии σ <sub>сж</sub>	25	125
Пеностекло: изоляционно- монтажное бесщелочное высокремнеземистое	400	130-160	0,3-0,4	0,5-0,8	0,06-0,07*	-
	600	350-500	1-1,5	3-5	0,093*	-
	1200	500-800	1,4-2,5	5-12	0,13-0,21*	-
Совелитовые (ГОСТ 6788-74)	500	350	0,20	-	0,079	0,091
		400	0,22	-	0,084	0,096
Вулканитовые (ГОСТ 10179-74)	600	300	0,30	-	0,077	0,089
		350	0,35	-	0,082	0,093
Известково-кремнезе- мистые (ГОСТ 24748- 81)	600	200	0,35	-	0,058	0,076
		225	0,35	-	0,065	0,077
Асбестосиликатные	600	250	0,30	-	0,070	-
		325	0,50	-	0,075	-
		400	0,80	-	0,080	-
Асботермосиликат	750	700	7	10	0,180**	-
		800	11	15	0,210**	-

\* при 0 °С

\*\* при 500 °С

**Совелит** – теплоизоляционный материал, представляющий смесь углекислого магния и углекислого кальция (85 %) и распушенного асбеста (15 % по массе). Совелитовые изделия выпускаются главным образом в виде плит, полуцилиндров и сегментов толщиной от 40 до 80 мм.

**Вулканилит** – теплоизоляционный материал, представляющий смесь диатомита (60 %), извести (20 %) и распушенного асбеста (20 % по массе). Выпускается в виде плит и скорлуп толщиной 30, 40, 50 и 60 мм.

**Известково-кремнеземистые изделия** изготавливаются по литьевой технологии из извести (30 %), полуводного гипса (10 %), диатомита (45 %) и асбеста шестого сорта (15 % по массе). В зависимости от влагосодержания

гидромассы получают изделия с кажущейся плотностью 200 или 225 кг/м<sup>3</sup>. После сушки при 230-250 °С изделия не разрушаются при увлажнении и полностью восстанавливают свои свойства после высушивания. Выпускаются в виде плит прямоугольного и трапецеидального сечения, полуцилиндров и сегментов.

**Асбестосиликатные изделия** изготавливаются на основе тонкодисперсного кремнеземистого компонента, извести и асбеста (не ниже шестого сорта) по литьевой технологии. В зависимости от влагосодержания гидромассы получают изделия различной кажущейся плотности. Асбестосиликатные изделия изготавливаются в виде плит с кажущейся плотностью 250, 325 и 700 кг/м<sup>3</sup> и скорлуп марок 250, 325 и 400. Состав асбестосиликатных изделий приведен в табл. 39.

Таблица 39

Состав асбестосиликатных изделий

Кремнезем, %	Известь, %	Асбест, %	Вода (по отношению к сухой массе), %	Средняя кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>
55-60	20	20-25	350-400	250
60	20	20	300-350	325
60	20	20	250-300	400

**Асботермосиликат** по своему составу и свойствам значительно отличается от асбестосиликатных изделий тем, что для увеличения температуры применения используется более температуростойкий амфиболовый асбест, полная дегидратизация которого наступает при температуре выше 900 °С; количество его достигает 50 % по массе. Асбест не только армирует материал, но является температуростойким наполнителем, предотвращающим усадку при нагревании. Асботермосиликат применяется как футеровочный материал при устройстве металлоприемников и расплавопроводов (лотки, трубы) при литье алюминия и его сплавов.

### 6.5. Материалы растворов и обмазок

Растворы, обмазки, мастики и т.п. относятся к неформованным материалам. Они применяются при изготовлении футеровок печей в качестве связки для скрепления между собой изделий в кладке (мергельный раствор) или самостоятельно в виде мастик и обмазок. Поставляются потребителю в виде готовых смесей или отдельных компонентов, которые смешиваются на месте.

**Мертели и мергельные растворы.** Мергельным раствором называют затворенную водой или жидкой связкой смесь порошкообразных (огнеупорных) материалов. Сухая смесь (без жидкого компонента) называется мергелем. Мергельные растворы, затворенные водой, в процессе кладки не обладают механической прочностью и приобретают ее только при нагреве кладки

выше 1200 °С, поэтому для скрепления изделий в момент кладки (для придания ей «холодной» прочности) применяют воздушно-твердеющие растворы, которые прочно скрепляют изделия при обычной температуре. Для затворения воздушно-твердеющих растворов используют растворы жидкого стекла, фосфатов, некоторых солей или, реже, гидравлических вяжущих. От прочности мертельного шва (после его спекания или твердения) зависит качество огнеупорной кладки. В мертельные растворы, затворенные водой, для лучшей удобоукладываемости и повышения водоудерживающей способности (получения тонкого шва) добавляют компоненты-пластификаторы: растворы концентрата сульфитно-спиртовой барды (ССБ) или сульфитно-дрожжевой бражки (СДБ) и кальцинированной соды.

По своему химико-минеральному составу применяемый мертель должен соответствовать огнеупорному материалу кладки. Раствор мертеля должен полностью заполнять швы между изделиями. Натечи выступившего из швов мертельного раствора следует обязательно удалить.

Мертели подразделяются по крупности помола входящих в них компонентов на мертели крупного помола (К) с размерами зерен до 3 мм, тонкого помола (Т) – 0-1 мм, и мертельный порошок – 0,0-0,5 мм. Для выполнения кладки электропечей применяются мертели тонкого помола или мертельный порошок. Мертели крупного помола допускается применять только в особых случаях.

В зависимости от материала, для кладки которого они предназначены, мертели бывают шамотные, диасовые, алюмосиликатные (в том числе, полукислые, муллитокремнеземистые, муллитовые, муллитокорундовые), корундовые, магнезиальные, цирконийсодержащие и др.

Для электропечей с температурой службы до 1200 °С обычно применяется мертельный раствор, затворенный водным раствором ССБ. Для кладки легковесных изделий в электропечах с восстановительной атмосферой, в том числе с атмосферой водорода, при рабочей температуре до 1500 °С для увеличения водоудерживающей способности к раствору мертеля следует добавлять раствор метилцеллюлозы или ССБ и безжелезистый высокоглиноземистый цемент.

Существует пять категорий печной кладки (по толщине шва): кладка вне категории - до 0,5 мм; 1-й категории: до 1 мм; 2-й до 2 мм; 3-й до 3 мм; 4-й более 3 мм. При кладке электропечей следует применять толщину швов в огнеупорном слое не более 2 мм, в теплоизоляционном слое – не более 4-5 мм.

По консистенции мертельные растворы подразделяются на жидкие, густые и полугустые. Консистенция раствора зависит от количества жидкого компонента, введенного в 1 м<sup>3</sup> сухой смеси: жидкий раствор – 600 л, полугустой – 500-550 л, густой – 350-400 л. Для швов толщиной до 2 мм следует применять жидкий или полугустой мертельный раствор.

Характеристики различных мертелей приведены в табл. 40-42, а мертельных растворов в табл. 43.

## Динасовые мертели

Показатель	Марка		
	МД 94	МД 92	МД 90
Массовая доля, не менее:			
SiO <sub>2</sub>	94	92	90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,0-3,5	2,5-4,0	4,0-6,0
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,10-0,15	-	-
CaCl <sub>2</sub>	-	2,0-2,8	2,0-2,8
СДБ на сухое вещество	0,07-0,12	0,1-0,25	0,1-0,25
Изменение массы при прокаливании, %, не более	1,1	1,5-2,8	1,8-3,5
Влажность, %, не более	5	5	5
Водоудерживающая способность (толщина шва), мм	4	4	3
Максимальная температура применения, °С	1650	1550	1500

Примечание. По требованию потребителя мертели марок МД 92 и МД 90 допускается изготавливать с содержанием Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> вместо CaCl<sub>2</sub> в количестве 0,10-0,15 % и СДБ в количестве 0,07-0,12 %. К обозначению марки таких мертелей добавляется цифра 1, например, МД 92-1.

**Обмазки и мастики** служат для защиты огнеупорной кладки и продления срока ее службы. Обмазки готовят более жидкой консистенции, чем мастики. В мастики для большей эластичности могут быть добавлены молотый асбест или диатомит, в этом случае повышается их изолирующая способность, но снижается огнеупорность. По своему назначению обмазки (мастики) могут быть защитными или уплотнительными.

*Защитные обмазки* служат для защиты рабочей поверхности кладки от разрушающего воздействия газов, пыли, резких температурных колебаний, от выветривания или для создания промежуточного (нереакционноспособного) слоя между кладкой и контактирующим с ней нагретым металлом (электронагревателем). *Уплотнительные обмазки* (и мастики) служат, главным образом, для повышения газонепроницаемости кладки; кроме того, они улучшают ее прочность.

Обмазки готовятся на воде, жидком стекле или на растворе ССБ с целью повышения прочности их сцепления с кладкой и предупреждения растрескивания и отслаивания. В отличие от мертелей, все компоненты обмазок должны быть тонкомолотыми. При их изготовлении вначале смешивают сухие компоненты (5 мин), а затем добавляют жидкий компонент и перемешивают еще 5-10 мин. Хранить приготовленные обмазки не допускается. Составы обмазок и области их применения приведены в табл. 44.

## Алюмосиликатные мертели

Показатель	марка					
	МП 18	МП 16	МШ 42	МШ 39	МШ 36	МШ 31
Массовая доля, %:						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не менее	18	16	42	39	36	31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более	-	-	1,5	1,6	1,6	-
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,12- 0,18	-	0,12- 0,18	0,12- 0,18	0,12- 0,18	0,12- 0,18
СДБ	0,07- 0,13	-	0,07- 0,13	0,07- 0,13	0,07- 0,13	0,07- 0,13
Изменение массы при прокаливании, %	1,3-3,0	1,3-3,0	1,3-3,0	1,3-3,0	1,3-3,0	1,8-3,2
Огнеупорность, °С, не ниже	1650	1610	1750	1730	1730	1690
Влажность, %, не более	6	6	5	5	5	5
Зерновой состав, % (проход через сетку):						
№ 2	100	100	-	-	-	-
№ 1	-	-	100	100	100	100
№ 05	-	-	95	95	95	95
№ 02	60-94	60-94	-	-	-	-
№ 009	-	-	60-85	60-85	60-85	60-85

## Магнезиальные мертели

Показатель	марка		
	МПВ	МПХВ	МХПВ
Содержание, %:			
MgO, не менее	80	70	55
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не менее	4	8	15
SiO <sub>2</sub> , не более	3	3	3
CaO, не более	3	3	3
Изменение массы при прокаливании, %, не более	0,8	0,3	1,0
Влажность при отгрузке, %	2	2	2
Зерновой состав, %, проход через сетку, не менее:			
№ 05	99	99	99
№ 0063	45	85	45

Составы мертельных растворов и их применение

Мертельный раствор	Сухая масса	Затворитель и его количество, л на 1м <sup>3</sup> сухой смеси	Область применения
Шамотный жидкий	Мертели МШ 38, МШ 39, МШ 42 или смесь порошков по ТУ 14-8-90-74	Вода, 600	Шамотная кладка I категории из плотных изделий
Шамотный полугустой	Мертели МШ 38, МШ 39, МШ 42 или смесь порошков по ТУ 14-8-90-74	Вода, 500	Шамотная кладка II и III категории из плотных изделий
Шамотный воздушно-твёрдеющий	Мертели МШ 36, МШ 38, МШ 39, МШ 42 или смесь порошков по ТУ 14-8-90-74	Раствор жидкого стекла плотностью 1230-1250 кг/м <sup>3</sup> , 10-15% от массы мертеля	Шамотная и шамотно-легковесная кладка II и III категорий, в том числе, в том числе в углеродосодержащей атмосфере с температурой до 1100 °С
Высокоглиноземистый жидкий	Мертели ММКР60, ММЛ 62 или смесь порошков по ТУ 14-8-90-74	Вода (при необходимости раствор ССБ плотностью 1100-1150 кг/м <sup>3</sup> ), 550-600	Высокоглиноземистая кладка I категории из плотных изделий в том числе, в том числе в углеродосодержащей атмосфере
Высокоглиноземистый воздушно-твёрдеющий	Мертели ММКР60, ММЛ 62 или смесь порошков по ТУ 14-8-90-74	Раствор жидкого стекла плотностью 1360-1380 кг/м <sup>3</sup> , 500	Высокоглиноземистая (и шамотная) кладка I категории из плотных и легко-весных изделий, в том числе, в том числе в углеродосодержащей атмосфере при температуре 1200 °С

Продолжение табл. 43

Мертельный раствор	Сухая масса	Затворитель и его количество, л на 1м <sup>3</sup> сухой смеси	Область применения
Высокоглиноземистый полугустой	Мертели ММКР60, ММЛ 62 или смесь порошков по ТУ 14-8-90-74	Раствор ССБ плотностью 1100-1200 кг/м <sup>3</sup> , 500-550	Высокоглиноземистая кладка I категории из легковесных изделий, в том числе, в том числе в углеродосодержащей атмосфере выше 1200 °С
Муллитокорундовый жидкий	Мертели ММК 77, ММК 72, ММК 80 или смесь порошков по ТУ 14-8-90-74	Вода (при необходимости раствор ССБ плотностью 1100-1150 кг/м <sup>3</sup> ), 550-600	Муллитокорундовая и корундовая кладка I категории из плотных изделий, в том числе в восстановительной атмосфере при температуре до 1500 °С
Корундовый полугустой	Электрокорунд ЭБ-75% и высокоглинозёмный цемент ВЦ-25%	Раствор метилцеллюлозы плотностью 900-1000 кг/м <sup>3</sup> (или ССБ), 25-27% от массы сухой смеси	Корундовая кладка I категории из плотных и легковесных изделий, в том числе в водородной атмосфере до температуры 1500 °С
Корундовый жидкий	Глинозем ГК (немолотый) или электрокорунд-50% и те же материалы вибромолотые -50%	Раствор ССБ плотностью 1100-1200 кг/м <sup>3</sup>	Корундовая кладка I категории из плотных и легковесных изделий, в том числе в водородной атмосфере до температуры 1870 °С

Окончание табл. 43

Мертельный раствор	Сухая масса	Затворитель и его количество, л на 1м <sup>3</sup> сухой смеси	Область применения
Динасовый полугустой	Мертели МД 92, МД 94 или смесь кварцитных материалов и огнеупорной глины	Вода, 500	Динасовая кладка I и II категорий
Хромисто-глиняный полугустой	Хромитовый порошок – 90 % и огнеупорная глина 10%	Вода, 500	Кладка из хромитовых и хромомагнетитовых изделий I и II категорий
Магнезитовый или хромо-магнезитовый на смоле	Магнезитовый или хромомагнезитовый порошок – 90% и каменноугольная смола, обезвоженная – 10%	-	Кладка из магнезитовых, магнезитохромитовых или хромомагнезитовых изделий I и II категорий
Диатомитовый густой	Диатомитовый порошок – 80% и огнеупорная глина – 20%	Вода, 400	Диатомитовая кладка III категории
Пенодиатомитовый густой	Пенодиатомитовый порошок – 80% и огнеупорная глина – 20%	Вода, 400	Пенодиатомитовая кладка III категории
Шамотно-цементный полугустой	Шамотный порошок – 70% и портландцемент 400 без гидравлических добавок – 30%	Вода, 300-400	Шамотно-легковесная кладка III категории

Составы обмазок и их применение

Обмазка	Состав сухой смеси, %	Затворитель и его количество, л на 1 м <sup>3</sup> сухой смеси	Область применения
Шамотная	Шамот (0,5 мм) – 85, глина огнеупорная – 14,5, ССБ (по сухой массе) – 0,5	Вода, 350-400	В качестве защитной обмазки для повышения стойкости шамотной кладки, в том числе для обмазки огнеупорной части свода
Шамотно-глинистая	Шамот (0,5 мм) – 75, глина огнеупорная – 25	Раствор жидкого стекла, плотностью 1230-1250 кг/м <sup>3</sup> , 250	В качестве защитной обмазки поверхности шамотной и шамотно-легковесной кладки с температурой службы до 1000 °С
Высокоглиноземистая	Молотый андалузит – 95, глина огнеупорная – 5	Раствор ССБ, плотностью 1150 кг/м <sup>3</sup> , 500	Обмазка внутренней поверхности высокоглиноземистой кладки
Глиноземистая	Глинозем технический ГК с размером зерна <0,2 мм – 30; шамот с размером зерна <0,2 мм-55; Глина огнеупорная – 15	Раствор ССБ, плотностью 1150 кг/м <sup>3</sup> , 350-400	Обмазка внутренней поверхности шамотной и высокоглиноземистой кладки, в том числе для печи с углеродосодержащими атмосферами
Корундовая	Корунд с размером зерна <1мм – 30; шамот с размером зерна <0,4 мм-55; глина огнеупорная - 15	Раствор ССБ, плотностью 1150 кг/м <sup>3</sup> , 350-400	Обмазка внутренней поверхности огнеупорной кладки, в том числе для печи с углеродосодержащими атмосферами

## 6.6. Специальные конструкционные неметаллические материалы

К специальным конструкционным материалам относятся прежде всего некоторые тугоплавкие бескислородные соединения, представляющие собой соединения металлов с неметаллами с общим условным обозначением MX: с углеродом – карбиды MC, с азотом – нитриды MN, с бором – бориды MB, с кремнием – силициды MSi и др. Эта группа материалов обладает рядом ценных технических свойств: высокой температурой плавления или разложения (табл.45), большой твердостью и прочностью, высокой химической стойкостью в агрессивных средах и т.д.

Таблица 45

Температура плавления, °С, некоторых бескислородных соединений

Металл М	Карбид MC	Нитрид MN	Борид MB	Силицид MSi
Кремний	2700 (разлагается)	-	-	-
Титан	3140	2950	2980	1540
Цирконий	3530	2980	3040	1700
Тантал	3880	3090	3100	3200
Ванадий	2830	2050	2100	-
Вольфрам	2600 (разлагается)	-	2300	2165
Гафний	3900	3310	3250	-

Эти материалы получают с использованием керамической технологии и обычно называются керамическими материалами или керметами.

При производстве высококачественной керамики с высокой однородностью структуры используют порошки исходных материалов с размером частиц до 1 мкм. После формования (прессование, экструзия, шликерное литье) заготовки подвергают спеканию. При этом отдельные частицы порошков превращаются в монолит, и формируются окончательные свойства керамики. Процесс спекания сопровождается уменьшением пористости и усадкой. Температура спекания, в зависимости от состава, может составлять до 2000 – 2200 °С.

Основными разработчиками и производителями керамических материалов являются США и Япония. Конструкционная керамика допускает применение более высоких температур по сравнению с металлом и поэтому является перспективным материалом для газотурбинных двигателей и двигателей внутреннего сгорания.

Для деталей газотурбинных установок (дисков, лопаток, сопловых аппаратов, камер сгорания и т. п.) наиболее перспективными считаются нитрид и карбид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiC}$ ).

Особенности свойств этих керметов:

- низкий коэффициент линейного расширения (в 3 - 5 раз меньше, чем у сталей), в связи с чем температурные напряжения в керамических деталях ГТУ меньше, чем в остальных;
- низкая удельная плотность (в 2,5 - 3 раза меньше, чем у металлов);
- повышенная жаропрочность ( $\sigma_{1/500}^{1200} = 600$  МПа);
- высокая химическая стойкость, позволяющая применить низкосортные топлива;
- хрупкость – разрушение при почти полном отсутствии пластической деформации (в деталях не допускаются концентраторы напряжений).

Детали адиабатного двигателя внутреннего сгорания (форкамера, клапанный механизм и др.), работающие в области температур 300 - 1500 К, изготавливают из керамики на основе диоксида циркония  $\text{ZrO}_2$  и нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Для повышения прочности и отражательной способности теплозащитных материалов ракетно-космической техники, испытывающих разогрев до 2000 °С, применяют покрытия эмалями (толщиной около 300 мкм), содержащими 94 %  $\text{SiO}_2$  и 6 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ .

Характерным примером использования керамических изделий в условиях высоких температур является применение режущего керамического инструмента, обладающего при этом высокой твердостью, износостойкостью и химической инертностью к большинству металлов в процессе резания. По комплексу этих свойств керамика существенно превосходит традиционные режущие материалы – быстрорежущие стали и твердые сплавы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. - Л.: Машиностроение, 1973. - 296 с.

Гецов Л.Б. Детали газовых турбин. Материалы и прочность. - 2 - е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, 1982. - 373 с.

Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов. - 6 - е изд. - М.: Металлургия, 1986. - 544 с.

Интеллектуальное достояние отечества и некоторые вопросы металловедения /А.М. Паршин, А.Н. Тихонов, Ю.С. Васильев и др.; под ред. А.М. Паршина и А.Н. Тихонова. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. - 439 с.

Марочник сталей и сплавов /В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; под общ. ред. В.Г.Сорокина.-М.: Машиностроение, 1989.-640 с.

Материаловедение: учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, Ф.М. Войткун - М: МИСиС, 1999. - 600 с.

Материалы для электротермических установок: справочное пособие /Н.В. Большакова, К.С. Борисанова, В.И. Бурцев и др.; под ред. М.Б. Гутмана. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 296 с.

Мороз Л.С. Механические свойства металлов: учебное пособие. - Л.: СЗПИ, 1971. - 180 с.

Паровые и газовые турбины: учебник для вузов / М.А. Трубилов, Г.В. Арсеньев, В.В. Фролов и др.; под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 352 с.

Паршин А.М., Тихонов А.Н. Коррозия металлов в ядерном машиностроении. - СПб.: Политехника, 1994. - 96 с.

Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов/А.Д. Амаев, А.М. Крючков, И.М. Неклюдов и др.; под ред. А.М. Паршина и П.А. Платонова. - СПб.: Политехника, 1997. - 312 с.

Радиационная повреждаемость конструкционных материалов / А.М. Паршин, А.Н. Тихонов, Г.Г. Бондаренко и др.; под ред. А.М. Паршина и А.Н. Тихонова. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. - 296 с.

Сичиков М.Ф. Металлы в турбостроении. - Изд. 2-е, переработ. и доп. - М.: Машиностроение, 1974. - 288 с.

Теплухин Г.Н., Маслов Ю.Н., Теплухин В.Г. Высокотемпературные материалы в ЦБП: учебное пособие / СПбГТУРП. - СПб., 1994. - 77 с.

Теплухин Г.Н., Хазанов С.А. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами; учебное пособие. СЗПИ, - Л.: 1980. - 80 с.

Хрестоматия и специальные вопросы металловедения / А.М. Паршин, А.Н. Тихонов, Г.Г. Бондаренко и др.; под ред. А.М. Паршина и А.Н. Тихонова. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. - 304 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>1. Повреждаемость жаропрочных материалов</b> .....	5
1.1. Технологическая повреждаемость.....	6
1.2. Дефектоскопия металлов.....	7
1.3. Классификация повреждений металлов в условиях эксплуатации при повышенных температурах.....	13
1.4. Исчерпание долговечности и изменение механических свойств.....	-
1.5. Образование и распространение трещин.....	15
1.6. Окисление и коррозионная повреждаемость.....	16
1.7. Коррозионная усталость.....	19
<b>2. Методы испытаний и исследований металлических материалов при высоких температурах</b> .....	21
2.1. Кратковременные испытания на растяжение.....	-
2.2. Исследование длительной пластичности (деформационной способности).....	22
2.3. Испытания на термическую усталость.....	23
2.4. Исследование склонности к тепловой и отпускной хрупкости.....	25
2.5. Исследование ползучести.....	27
2.6. Исследование длительной прочности.....	31
2.7. Определение циклической вязкости.....	34
2.8. Испытания на прочность при циклически изменяющихся напряжениях.....	35
2.9. Испытания на релаксацию.....	36
<b>3. Влияние технологических факторов и структуры на свойства жаропрочных материалов</b> .....	40
3.1. Влияние способа выплавки и разлива металла.....	-
3.2. Металлургические дефекты.....	-
3.3. Влияние условий деформирования заготовок.....	44
3.4. Влияние величины зерна на свойства жаропрочных сталей и сплавов.....	45
3.5. Трансформация структуры стали в процессе высокотемпературной эксплуатации.....	46

<b>4. Конструктивная прочность основных высокотемпературных деталей турбин и другого энергетического оборудования.....</b>	<b>51</b>
4.1. Запасы прочности.....	-
4.2. Комплекс необходимых испытаний свойств материалов.....	-
4.3. Материалы газотурбинных установок.....	54
4.4. Металлы лопаточного аппарата.....	-
4.5. Металлы валов и цельнокованых роторов.....	63
4.6. Металлы основных деталей статоров.....	65
4.7. Причины аварий труб поверхностей нагрева котлов энергетических блоков.....	72
<b>5. Материалы для электротермических установок.....</b>	<b>77</b>
5.1. Металлические материалы для нагревательных элементов.....	78
5.2. Специальные материалы для нагревательных элементов.....	82
5.3. Тугоплавкие металлы и их сплавы.....	88
5.4. Проводниковые материалы.....	89
<b>6. Неметаллические материалы.....</b>	<b>92</b>
6.1. Огнеупорные материалы и изделия.....	-
6.2. Керамика из высокоогнеупорных оксидов.....	99
6.3. Огнеупорные бетоны и набивные массы.....	100
6.4. Теплоизоляционные материалы.....	103
6.5. Материалы растворов и обмазок.....	113
6.6. Специальные конструкционные неметаллические материалы.....	121
<b>Библиографический список.....</b>	<b>123</b>

Учебное издание

Гелий Николаевич Теплухин  
Антон Васильевич Гропянов  
Мария Николаевна Жукова

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Учебное пособие

Редактор и корректор Н.П. Новикова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Компьютерный набор и верстка О.В. Бебякина. Тем. план 2011г., поз.83

---

Подп. к печати 03.10.2011 Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.

Печать офсетная. 8,0 уч.- изд. л.; 8,0 усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Цена "С". Заказ

---

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров.

198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.