

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**С.А. Вологжанина, А.Ф. Иголкин**

# **ХЛАДОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

**Лабораторные работы**

**Учебно-методическое пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт–Петербург**

**2015**

УДК 66.04.621.78

**Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф.** Хладостойкие материалы. Лабораторные работы: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 42 с.

Даны указания к лабораторным работам по дисциплине «Рациональный выбор материалов с учетом управления свойствами материалов» для магистрантов, обучающихся по направлению 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения всех форм обучения. Возможно использование при проведении лабораторных работ по дисциплинам «Надежность материалов в оборудовании холодильной, криогенной техники и систем жизнеобеспечения», «Нанотехнологии и специальные материалы», «Хладостойкие материалы», «Фундаментальные и прикладные аспекты создания новых материалов» для магистрантов, обучающихся по направлению 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения всех форм обучения.

**Рецензент: доктор техн. наук, проф. А.А. Малышев**

**Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 1 от 10.09.2015 г.**



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5–100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2015

© Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф., 2015

## Цель работы

Ознакомиться с основными методами испытаний материалов при низких температурах, способами оценки хладостойкости и назначения возможной температуры эксплуатации материалов, изучить влияние химического состава и технологических процессов обработки на хладостойкость конструкционных сталей.

## Введение

Материалы и полуфабрикаты, применяемые для изготовления низкотемпературных емкостей при ремонте и реконструкции должны обеспечивать их надежную работу в течение проектного срока службы с учетом:

- заданных условий эксплуатации (проектное давление, минимальная отрицательная и максимальная проектные температуры)
- состава и характера среды (коррозионная активность, взрывоопасность, токсичность и др.)
- влияния температуры окружающего воздуха.

Таким образом, необходимо учитывать:

- 1) уровень прочности и тип используемого материала;
- 2) основные размеры конструкции, в частности максимальную толщину сечения;
- 3) условия изготовления и влияние их на свойства материала, в частности будет ли выполняться термическое снятие напряжений;
- 4) уровни напряжений, возникающие при сборке, аварийных режимах и в условиях эксплуатации; тип нагружения (статическое, динамическое или циклическое и т. п.);
- 5) коэффициент запаса прочности для предотвращения катастрофических разрушений;
- 6) минимальную и максимальную температуру нагружения конструкции.

Для обеспечения работоспособности выбираемых материалов следует учитывать следующие основные группы свойств.

*Физические свойства:*

– теплопроводность: низкая теплопроводность уменьшает теплопритоки и придает материалу теплоизолирующие свойства, а высокая теплопроводность способствует снижению температурных градиентов в изделиях.

– коэффициент линейного расширения, который изменяется с понижением температуры и может оказывать влияние на работоспособность всей конструкции в целом (см. рис. 1);

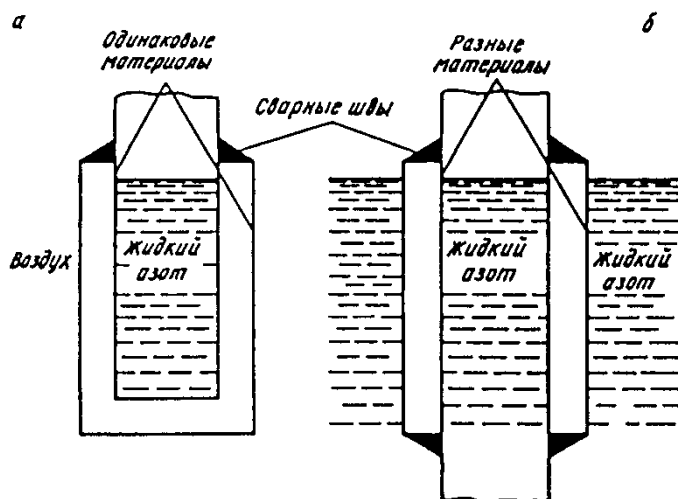


Рис 1. Схема неправильной конструкции:

*а* – с использованием одного материала при разных температурах;

*б* – с использованием разных материалов при одной низкой температуре

– плотность: для транспортных средств большое значение имеет уменьшение массы конструкции, поэтому для них целесообразно использовать материалы с высокой удельной прочностью.

*Химические свойства:*

– Коррозия, коррозионная усталость, коррозия под напряжением, водородное охрупчивание и т. д. могут вызвать повреждения в металле и привести конструкцию к хрупкому разрушению.

– совместимость с рабочей средой. Необходим учет влияния химического взаимодействия низкокипящих продуктов (жидкий кислород,

водород и др.) со сплавами, из которых изготавливаются эти конструкции.

Основными отборочными испытаниями на совместимость с жидким кислородом являются испытания на ударное нагружение и на прокол падающим бойком находящейся под давлением диафрагмы. У титановых сплавов в обоих случаях возникает активная реакция, алюминиевые сплавы активно реагируют с кислородом только при ударном нагружении, а медные и никелевые сплавы, а также коррозионностойкие стали не вступают в реакцию при обоих видах испытаний. Алюминиевые сплавы можно рассматривать как совместимые с жидким кислородом, что обуславливает их довольно широкое применение в качестве материала для изготовления стационарных транспортных кислородных резервуаров.

Материалы толщиной до 5 мм для изготовления оборудования, работающего с газообразным кислородом, имеют следующие значения предельного давления кислорода и скорости газового потока, при которых возможно их горение при комнатной температуре:

Давление кислорода, МПа, при скорости потока, м/с	0	До 0,5	Свыше 0,5
Стали углеродистые и легированные	0,64	0,64	0,64
Чугун	3,20	0,80	0,40
Коррозионностойкие стали типа 30X13, 12X18H10T	16,00	4,00	2,00
Алюминиевые сплавы АМг, АМц, АД1	3,20	0,64	0,40
Медь, никель и их сплавы	42,00	42,00	42,00

*Технологические свойства:*

- литейные свойства у литейных сплавов;
- обрабатываемость давлением у деформируемых сплавов;
- обрабатываемость резанием;
- способность воспринимать термическую обработку, в т.ч. прокаливаемость, отпускостойчивость, стойкость к деформационному старению и др.;
- свариваемость.

Технологичность и механические свойства материала обычно находятся в обратной зависимости. Одним из примеров является зависимость между содержанием элементов в сплаве, прочностью и свариваемостью.

мостью стали. По мере увеличения содержания углерода и легирующих элементов свариваемость и обрабатываемость давлением и резанием снижаются.

Для оценки свариваемости обычно используют углеродный эквивалент по формуле Международного института сварки (МИС):

$$C_{\text{экв}} = (C + Mn)/6 + (Cr + Mo + V + Nb + Ti)/5 + (Ni + Cu)/15.$$

Например, для обеспечения свариваемости в листовых низколегированных сталях ограничивают содержание углерода до 0,22 % и/или углеродного эквивалента  $C_{\text{экв}}$  значением не более 0,45–0,50.

Анализ причин хрупких разрушений сварных конструкций, проведенный Международным институтом сварки, дает следующее ранжирование отдельных факторов по частоте их проявления при авариях:

- чувствительность металла к надрезу (19,7 %),
- конструктивные надрезы (13,6 %),
- остаточные напряжения (12,9 %),
- старение и наклеп (10,6 %),
- усталостные трещины (6,8 %),
- внешняя нагрузка (6,1 %),
- термические напряжения (4,5 %),
- трещины в зоне термического влияния (2,5 %),
- термообработка (2,3 %),
- трещины в металле шва (1,6 %).

Общий процент проявления факторов, связанных с влиянием концентрации напряжений и наличием трещин, достигает 50 %.

#### *Механические свойства:*

- характеристики прочности;
- характеристики пластичности и вязкости. Учитывать, что у разных материалов соотношение пластичности и вязкости может очень сильно различаться. Например, алюминий имеет малую вязкость при высоком относительном удлинении. Наоборот, термообработанная (улуч-

шенная) легированная сталь при сравнительно небольшом относительном удлинении может иметь высокую вязкость;

- сопротивление усталостному разрушению;
- сопротивление термической усталости.

На рис. 2 – 4 представлено влияние понижения температуры испытания на характеристики прочности, пластичности, ударной вязкости и трещиностойкость основных групп сталей, применяемых для изготовления низкотемпературного оборудования.

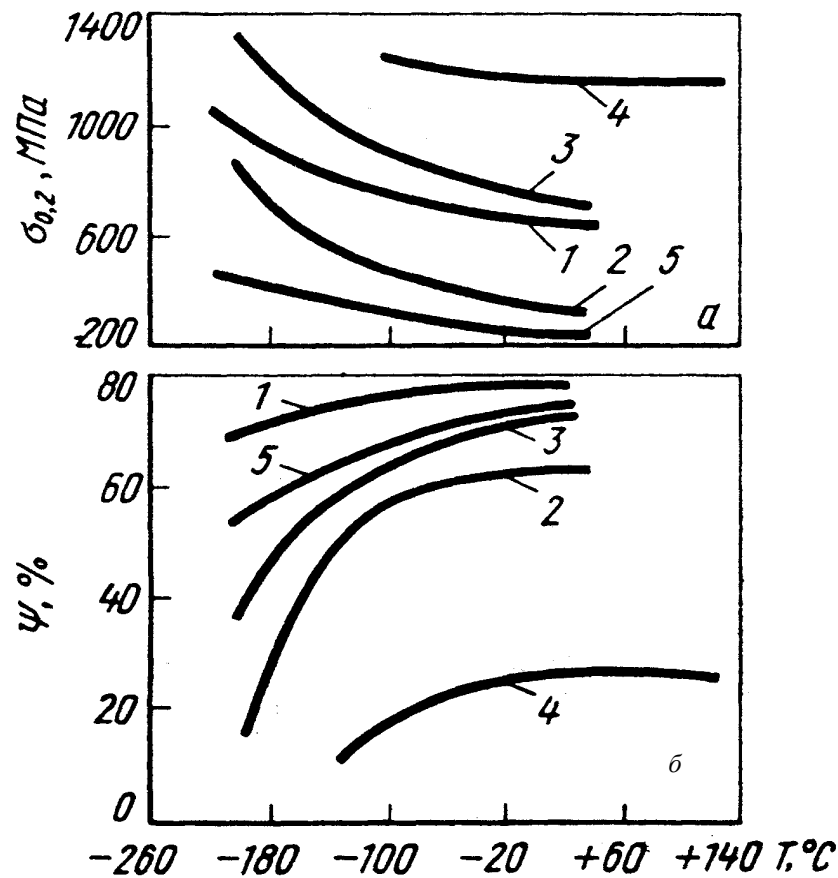


Рис. 2. Влияние температуры испытания на предел текучести (а) и поперечное сужение (б) образцов из сталей с различной структурой: 1 – феррит (0Н6А); 2 – феррит, перлит (22К); 3 – сорбит отпуска (38Х2Н2МА); 4 – низкоотпущенный мартенсит (20ХГНР); 5 – аустенит (12Х18Н10Т)

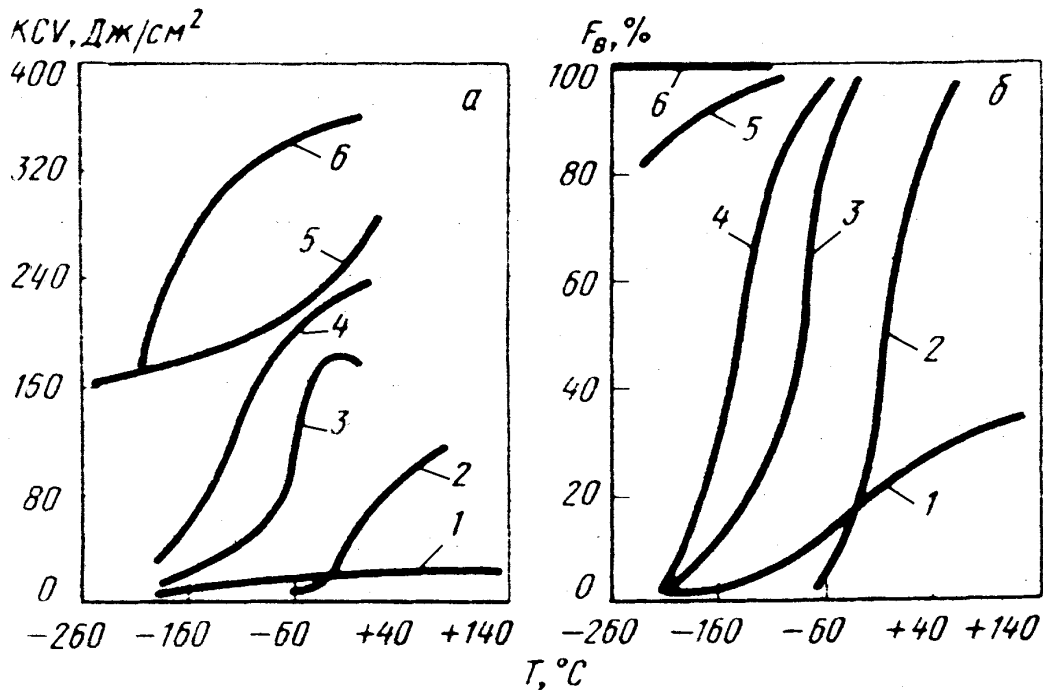


Рис. 3. Влияние температуры испытания на ударную вязкость  $K_{CV}(a)$  и долю вязкой составляющей в изломе  $F_B(b)$  сталей 20ХГНР (1), 22К (2), 38Х2НМА (3), 0Н6А (4), 12Х18Н10Т (5) и 04Х21Н16АГ8Ф (6)

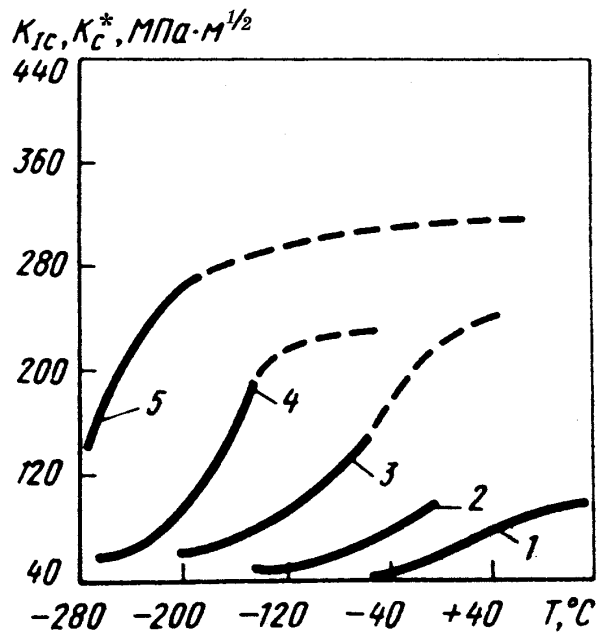


Рис. 4. Влияние температуры испытания на статическую трещиностойкость сталей 20ХГНР (1), 22К (2), 38Х2НМА (3), 0Н6А (4) и 12Х18Н10Т (5): сплошные линии –  $K_{IC}$ ; пунктирные –  $K_{IC}^*$



Анализ приведенных зависимостей показывает, что выбор хладостойкого материала – это всегда поиск компромисса между системой противоречивых требований: прочность при высокой температуре эксплуатации (обычно комнатной), вязкость и пластичность – при низкой температуре. С учетом категории прочности по работе удара  $KV \geq 27$  Дж или  $KCV \geq 34$  Дж/см<sup>2</sup> и обязательным достижением 50 % волокнистой составляющей в изломе образца при проведении испытаний на образцах типа Шарпи при заданной температуре. При этом следует учитывать, что значение ударной вязкости стальных сварных соединений в зависимости от класса стали, должно быть не ниже значений, указанных в таблице.

Требуемые значения ударной вязкости для сварных соединений, выполненных из сталей основных классов

Температура испытания, град. С	Минимальное значение ударной вязкости, Дж/см <sup>2</sup> (кгс.м/см <sup>2</sup> )					
	для сталей, кроме ферритного, аустенитно-ферритного и аустенитного классов		для сталей ферритного и аустенитно-ферритного классов		для сталей аустенитного класса	
	KCU	KCV	KCU	KCV	KCU	KCV
20	50(5)	35(3,5)	40(4)	30(3)	70(7)	50(5)
Ниже -20	30(3)	20(2)	30(3)	20(2)	30(3)	20(2)

Таким образом, металлы и сплавы, применяемые для работы в оборудовании низкотемпературной техники должны обеспечивать комплекс механических свойств: иметь необходимую прочность (прежде всего по пределу текучести) в сочетании с высокой вязкостью и пластичностью, обладая малой чувствительностью к концентраторам напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению. Кроме того, эти стали должны иметь хорошую свариваемость, обрабатываемость давлением и резанием, а в случае литого исполнения – хорошими литейными свойствами.

## 1. Факторы, определяющие характер разрушения

Время, условия и тяжесть каждого разрушения конструкции обусловлены целым рядом причин различного характера, воздействующих на объект случайным образом. Анализ причин отказов является важнейшей составной частью системы обеспечения работоспособности крупногабаритных конструкций. Основными причинами разрушения являются дефекты заводского изготовления конструкций (стадия производства), ошибки, допущенные в проектах (стадия проектирования) или, наконец, нарушение условий эксплуатации конкретной конструкции.

Общий процент отказов, обусловленных низким уровнем качества проектирования и производства, достигает 70 %.

Наиболее неблагоприятными факторами, оказывающими влияние на характер разрушения конструкций, являются

- режимы и уровень нагруженности элементов,
- температура эксплуатации,
- качество металла,
- концентрация напряжений,
- масштабный фактор,
- технологическая и эксплуатационная дефектность,
- деформационное и естественное старение

При этом отказ является, как правило, следствием воздействия совокупности ряда факторов. Для большинства отказов стальных строительных конструкций характерно сочетание следующих факторов

- концентрация напряжений,
- динамическое старение при сварке,
- остаточные сварочные напряжения,
- пониженные температуры.

Разрушение твердого тела представляет собой процесс разделения его на части под действием нагрузки, который также может сопровождаться термическими, радиационными, коррозионными и другими воздействиями. На атомном уровне разрушение представляет собой разрыв межатомных связей с образованием новых поверхностей. Если разрыв межатомных связей происходит перпендикулярно плоскости разрушения, то происходит разрушение сколом или отрывом. Если разрыв связей идет под действием силы, приложенной параллельно плос-

кости разрушения, то происходит разрушение сдвигом или скольжением. В металлах может иметь место и тот, и другой вид разрушения, что определяется главным образом их кристаллической структурой. Кроме того, характер разрушения зависит от температуры, скорости деформации, напряженного состояния, чистоты металла и т. д.

В зависимости от степени пластической деформации перед разрушением различают два основных вида разрушений: хрупкое и вязкое. При вязком разрушении металл претерпевает перед разрушением не только упругую, но и значительную пластическую деформацию. При отсутствии пластической деформации или при ее незначительном развитии происходит хрупкое разрушение.

Хрупкое разрушение происходит путем отрыва или скола, когда плоскость разрушения перпендикулярна нормальным напряжениям. Под действием нормальных напряжений происходит упругая деформация кристаллической решетки, а после достижения предельной степени ее искажения происходит последовательный разрыв межатомных связей с отрывом одной атомной плоскости от другой, т. е. разрушение металла. Разрушение начинается от какого-либо дефекта, вблизи которого развивается концентрация напряжений, превосходящих теоретическую прочность металла.

У достаточно пластичных металлов, характеризующихся релаксацией напряжений, местной концентрации напряжений вблизи несплошностей оказывается недостаточно, и развитие трещин скола не происходит.

Вязкое разрушение происходит путем сдвига под действием касательных напряжений. Плоскость скольжения расположена под углом  $45^\circ$  к направлению главных нормальных напряжений. Чисто сдвиговое вязкое разрушение характерно для таких аморфных материалов, как глина; чисто хрупкое разрушение свойственно идеально упругим материалам, например алмазу. Однако большинству реальных материалов одновременно присуще и вязкое, и хрупкое разрушение, а разделение на отдельные виды разрушения условно проводится по преобладанию того или иного типа.

Характерными признаками вязкого и хрупкого разрушения являются энергоемкость, т. е. величина работы разрушения, вид трещины и

поверхности излома и скорость распространения трещины. При разрушении по хрупкому механизму затрачивается значительно меньшая работа на процесс самого разрушения, чем при вязком. Начавшееся хрупкое разрушение является самопроизвольным процессом. Оно происходит за счет высвобождения накопленной в системе упругой энергии, и поэтому для распространения трещины не требуется подвод энергии извне. При хрупком разрушении затрата энергии на образование новых поверхностей в результате раскрытия трещины меньше, чем освобождающаяся при этом накопленная упругая энергия. При вязком разрушении затрачивается значительно большая работа. Для развития вязкого разрушения необходим непрерывный внешний подвод энергии, расходуемой на пластическое деформирование металла впереди растущей трещины и преодоление возникающего при этом упрочнения. При этом работа, затрачиваемая на пластическую деформацию, значительно превышает работу собственно разрушения.

При хрупком разрушении магистральная разделяющая тело трещина имеет малый угол раскрытия (острая трещина), пластическая деформация вблизи поверхности разрушения почти полностью отсутствует. При вязком разрушении трещина имеет большой угол раскрытия (тупая трещина), поверхность разрушения характеризуется значительной степенью пластической деформации.

При низких температурах межзеренные границы обычно прочнее самих зерен, и поэтому у большинства металлов при низких температурах разрушение имеет транскристаллитный характер и проходит по зернам, а не по границам между ними. При повышенных температурах межзеренные границы обычно слабее зерен. Поэтому разрушение при повышенных температурах имеет, как правило, межкристаллитный характер.

Макроизлом при хрупком разрушении имеет блестящую гладкую поверхность. Плоские грани расколотых кристаллических зерен придают металлический блеск хрупкому излому. Электронно-микроскопическое исследование обнаруживает «речные узоры», или «ручьистое» строение излома, являющееся следствием взаимодействия движущейся трещины с дефектами кристалла, а также наличие предпочтительных кристаллографических ориентировок фасеток скола. Из-

лом при вязком разрушении имеет матовый волокнистый характер без металлического блеска. Электронно–микроскопическое исследование обнаруживает характерное «чашечное» строение излома.

Для хрупкого разрушения характерна высокая скорость распространения трещины, достигающая приблизительно 0,4 скорости распространения звука в металле. Отсюда скорость распространения хрупкой трещины для стали должна составлять около  $2 \cdot 10^3$  м/с. Скорость распространения вязкой трещины значительно ниже и определяется скоростью нарастания напряжений.

С помощью рассмотренных признаков можно определить характер разрушения детали или конструкции (вязкий или хрупкий механизм). Необходимость квалификации характера разрушения в каждом отдельном случае обусловлена тем, что меры борьбы с вязким и хрупким разрушением принципиально различны. В случае вязкого разрушения необходимо повышать прочность материала. При хрупком разрушении надо, наоборот, увеличивать вязкость и пластичность, при необходимости даже снижая прочность. Наиболее опасно хрупкое разрушение. Макроизлом при хрупком разрушении имеет блестящую гладкую поверхность. Плоские грани расколотых кристаллических зерен придают металлический блеск хрупкому излому. Электронно–микроскопическое исследование обнаруживает «речные узоры», или «ручьистое» строение излома, являющееся следствием взаимодействия движущейся трещины с дефектами кристалла, а также наличие предпочтительных кристаллографических ориентировок фасеток скола. Излом при вязком разрушении имеет матовый волокнистый характер без металлического блеска. Электронно–микроскопическое исследование обнаруживает характерное «чашечное» строение излома.

Для хрупкого разрушения характерна высокая скорость распространения трещины, достигающая приблизительно 0,4 скорости распространения звука в металле. Отсюда скорость распространения хрупкой трещины для стали должна составлять около  $2 \cdot 10^3$  м/с. Скорость распространения вязкой трещины значительно ниже и определяется скоростью нарастания напряжений.

С помощью рассмотренных признаков можно определить характер разрушения детали или конструкции (вязкий или хрупкий меха-

низм). Необходимость квалификации характера разрушения в каждом отдельном случае обусловлена тем, что меры борьбы с вязким и хрупким разрушением принципиально различны. В случае вязкого разрушения необходимо повышать прочность материала. При хрупком разрушении надо, наоборот, увеличивать вязкость и пластичность, при необходимости даже снижая прочность. Наиболее опасно хрупкое разрушение.

Один и тот же материал в зависимости от условий деформации может разрушаться по хрупкому или вязкому механизму.

Характер разрушения зависит от влияния различных факторов как связанных, так и не связанных со свойствами материала.

Различают внешние и внутренние факторы. К внешним факторам относятся температура, тип надреза или концентратора напряжений, условия и скорость нагружения, характер окружающей среды, форма и размеры детали. К внутренним факторам, присущим материалу, относятся тип кристаллической решетки, химический состав, структура и размер зерна, зависящие от технологии предшествующей обработки.

**Внешние факторы.** Влияние температуры на характер разрушения хорошо иллюстрируется схемой, предложенной А. Ф. Иоффе и развитой Н. Н. Давиденковым (рис. 5).

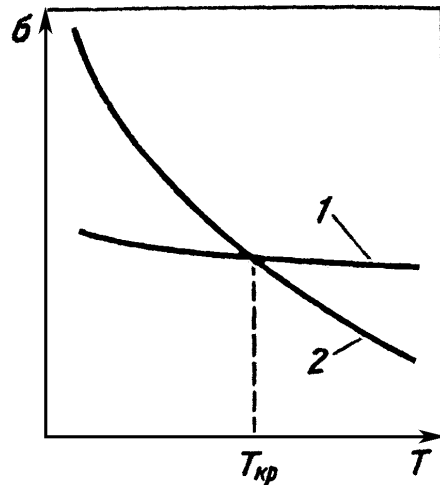


Рис. 5. Схема вязко-хрупкого перехода по Иоффе – Давиденкову:

1 – разрушающее напряжение; 2 – напряжение течения, или сопротивления сдвигу;  
 $T_{кр}$  – критическая температура хрупкости

Согласно этой схеме, смена одного вида разрушения другим определяется соотношением значений предела текучести  $\sigma_T$  и разрушающего напряжения  $\sigma_{отр}$ . Температурные зависимости  $\sigma_T$  и  $\sigma_{отр}$  имеют различный характер, так как в соответствии с этой схемой предел текучести и разрушающее напряжение друг с другом не связаны.

Напряжение трения кристаллической решетки или сопротивление Набарро  $\sigma_0$ , входящее в уравнение Холла – Петча для предела текучести, связано с температурой материала следующей зависимостью:  $\sigma_0 = B e^{-\beta T}$ , где  $B$  и  $\beta$  – постоянные.

Разрушающее напряжение, в первом приближении соответствующее сопротивлению отрыва, может быть определено по формуле:  $\sigma_{отр} = (4G\gamma/k)d^{-1/2}$ , где  $G$  – модуль сдвига,  $G = E/[2(1 + \mu)]$ ;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\gamma$  – эффективная поверхностная энергия разрушения;  $k$  – постоянная;  $d$  – диаметр зерна.

С понижением температуры напряжение трения решетки, а следовательно, и предел текучести резко возрастают. В противоположность этому ни один из членов в правой части уравнения для сопротивления отрыву не зависит существенно от температуры, поэтому в первом приближении разрушающее напряжение является температурно независимым.

В процессе нагружения при определенной температуре напряжение может достичь раньше величины либо  $\sigma_T$ , либо  $\sigma_{отр}$ . Если раньше будет достигнуто  $\sigma_T$ , то произойдет пластическая деформация, которая при дальнейшем росте напряжений приведет к разрушению. Если раньше будет достигнуто  $\sigma_{отр}$ , то произойдет хрупкое разрушение.

Точка пересечения  $\sigma_T$  и  $\sigma_{отр}$  делит схему Иоффе – Давиденкова на две температурные области: левее этой точки располагается область хрупких разрушений материала ( $\sigma_{отр} < \sigma_T$ ), правее – область вязких разрушений ( $\sigma_{отр} > \sigma_T$ ). Температуру, при которой предел текучести становится равным разрушающему напряжению, называют *температурой вязко-хрупкого перехода*, или *критической температурой хрупкости*, и обозначают  $T_{кр}$ .

К недостаткам схемы Иоффе – Давиденкова относится сложность и недостоверность определения сопротивления отрыву, а также то, что фактически при всех температурах испытания хрупкому разрушению

предшествует более или менее выраженная пластическая деформация. Процессы хрупкого разрушения и пластической деформации в металлах взаимосвязаны. Вместе с тем схема наглядна и хорошо описывает феноменологию вязко–хрупкого перехода. Эта схема больше отвечает современным представлениям, если под сопротивлением отрыву понимать не среднее, а локальное сопротивление хрупкому разрушению; под пределом текучести – также локальное сопротивление пластической деформации.

Способность материала хрупко разрушаться с понижением температуры называется *хладноломкостью*. Помимо температуры, она зависит от влияния многих факторов. Хладноломкость проявляется при определенных условиях и является не свойством, а состоянием материала. Основной характеристикой хладноломкости является критическая температура хрупкости. С помощью этой характеристики оценивают и сопротивление хрупкому разрушению материала. Критическая температура хрупкости не является константой материала и определяется целым рядом факторов.

Анализ причин хрупких разрушений показал, что трещины хладноломкости обычно начинаются от надрезов, являющихся концентраторами напряжений. Надрезом является любое нарушение непрерывности металла. К надрезам относятся дефекты сварных соединений (пористость, непровары, пустоты по сечению шва), поверхностные царапины, неметаллические включения, газовые раковины. Надрезами могут быть технологические отверстия и резкие переходы сечений в детали. Надрезы создают в металле сложное напряженное состояние, стесненность пластической деформации и концентрацию напряжений (рис. 6).

Сложное напряженное состояние проявляется в том, что под действием растягивающих сил напряжения возникают не только в продольном, но и в поперечном направлениях.

Стесненность пластической деформации приводит к увеличению сопротивления пластической деформации, т. е. к росту  $\sigma_T$ . Чем острее и глубже надрез, тем более стеснена пластическая деформация, тем выше  $\sigma_T$ . Под влиянием надрезов металл разрушается хрупко при более высокой температуре.



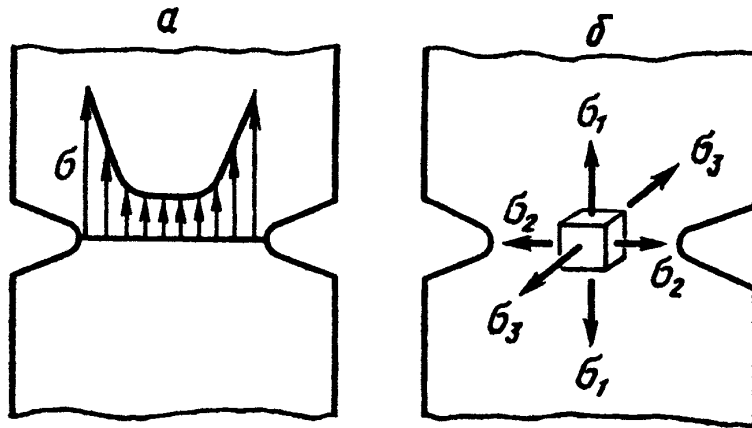


Рис. 6. Концентрация растягивающих напряжений в вершине надреза (а) и схема объемного напряженного состояния в сечении надреза (б)

Чувствительность к надрезу и трещине, являющейся предельным выражением надреза, относится к числу важнейших характеристик работоспособности металла. С повышением прочности металла растет чувствительность к надрезу.

С увеличением скорости нагружения также возрастает опасность хрупкого разрушения. Чем ниже температура металла, тем более сильное влияние оказывает скорость деформирования.

Окружающая среда может влиять на изменение поверхностной энергии разрушения материала и оказывать коррозионное воздействие. Кроме того, в среде, содержащей водород, происходит водородное охрупчивание металлов. Растрескивание при коррозии под напряжением и насыщенность водородом увеличивают хрупкость металла и смещают критическую температуру хрупкости в область более высоких значений.

Чем больше сечение образца, тем больше стесненность пластической деформации. Увеличение объемности напряженного состояния приводит к повышению предела текучести.

Появление дефектов в материале подчиняется вероятностным законам, вследствие чего прочность детали должна иметь статическую природу. С увеличением размера образца возрастает вероятность появления опасных дефектов.

На ослабление сечений с увеличением размеров накладывается действие металлургических факторов из-за большего развития ликви-

ции, пористости, различия в размерах зерен, меньшей степени проработки структуры при ковке, прокатке или термической обработке.

**Внутренние факторы.** Склонность к хрупкому разрушению при низких температурах зависит от кристаллической структуры металла.

Металлы с кристаллической решеткой объемноцентрированного куба (стали на основе  $\alpha$ -железа, вольфрам, хром, молибден и др.), а также некоторые металлы с гексагональной плотноупакованной решеткой (цинк, кадмий, магний) относятся к хладноломким материалам. Чистый титан имеет решетку ГЦ, но сохраняет пластичность и при низких температурах. Металлы с решеткой гранецентрированного куба (аустенитные стали на основе  $\gamma$ -железа, медь, алюминий, никель) не склонны к хладноломкости.

Размер зерна металла имеет важное значение для предела текучести, сопротивления хрупкому разрушению и для температуры вязко-хрупкого перехода. Измельчение зерна существенно понижает критическую температуру хрупкости.

Процесс течения металла зависит от среднего расстояния, на которое перемещаются дислокации, прежде чем они будут заблокированы у границ зерен.

На рис. 7 показана зависимость  $\sigma_T$  и  $\sigma_{отр}$  от размера зерна. У мелкозернистых образцов предел текучести меньше разрушающего напряжения.

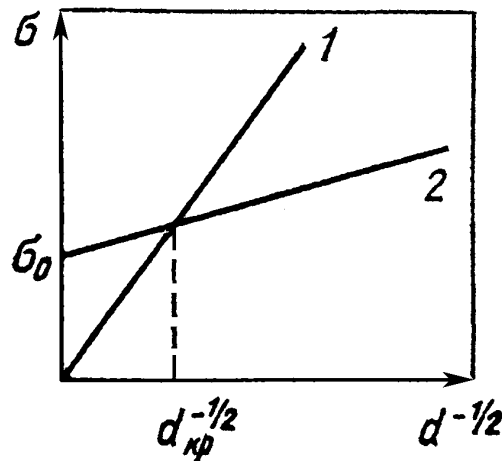


Рис. 7. Влияние размера зерна на предел текучести  $\sigma_T$  и разрушающее напряжение  $\sigma_{отр}$  низкоуглеродистой стали при 77 К:

$$1 - \sigma_{отр} = (4G \gamma / k) d^{-1/2}; \quad 2 - \sigma_T = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

Чем мельче зерно, т. е. больше параметр  $d^{-1/2}$ , тем больше  $\Delta\sigma = \sigma_{отр} - \sigma_T$ . Если размер зерен больше  $d_{кр}$ , то для данных условий испытания (температуры, скорости и др.) будет иметь место хрупкое разрушение. Изменением технологии выплавки и разливки, пластической деформации и термической обработки можно влиять на размер зерна и тем самым управлять свойствами металла и его хладостойкостью.

## **2. Испытания механических свойств при низких температурах**

### **Особенности проведения испытаний**

Поведение металлов под действием внешних нагрузок характеризуется их механическими свойствами, которые позволяют определить пределы нагрузки для каждого конкретного материала, произвести сопоставимую оценку различных материалов и осуществить контроль качества металла в заводских и лабораторных условиях.

К испытаниям механических свойств предъявляется ряд требований. Температурно–силовые условия проведения испытаний должны быть по возможности приближены к служебным условиям работы материалов в реальных машинах и конструкциях. Вместе с тем методы испытаний должны быть достаточно простыми и пригодными для массового контроля качества металлургической продукции. Поскольку необходимо иметь возможность сопоставления качества разных конструкционных материалов, методы испытаний механических свойств должны быть строго регламентированы стандартами.

Температурно–силовые условия проведения механических испытаний должны быть максимально приближены к условиям работы материалов в реальных машинах и конструкциях. Испытания при низких температурах более сложны, чем такие же испытания при комнатной температуре. При их проведении необходимо захлаживание образцов с помощью холодильных камер и криостатов, использование специальных средств измерения температуры и деформации образцов. Захлаживание осуществляется с помощью специальных хладагентов.

Температуры кипения обычно применяемых для этой цели газов имеют следующие значения (в К (°C)):

Аммиак	239,8 (–33,3)	Азот	77,3 (–195,8)
Углекислый газ	194,6 (–78,5)	Неон	27,1 (–245,9)
Метан	111,7 (–161,4)	Водород	20,3 (–252,7)
Кислород	90,2 (–183)	Гелий	4,2 (–268,9)
Аргон	87,3 (–185,7)		

В качестве хладагентов при проведении испытаний до 203 К (–70 °C), т. е. до температур климатического холода, применяют твердую углекислоту (сухой лед) в смеси с денатуратом или этиловым спиртом. При испытаниях до 77 К (–196 °C) в качестве хладагента обычно используют жидкий азот в чистом виде или его пары. Эти системы охлаждения сравнительно дешевы и удобны.

В качестве хладагентов при температурах ниже 77 К обычно используют жидкие водород и гелий.

Применение жидкого водорода, имеющего температуру кипения 20 К, сопряжено с большими трудностями. Взрыво- и пожароопасная концентрация водорода в воздухе колеблется в широких пределах – от 4,6 до 76 %. Взрыв воздушно-водородной смеси в открытом пространстве наиболее вероятен при содержании 30–40 % водорода. В случае попадания воздуха в систему с жидким водородом происходит его конденсация с образованием твердых осадков, способствующих детонации и взрыву.

Жидкий гелий вполне безопасен для испытаний при низких температурах, но он значительно дороже водорода. Это обуславливает необходимость сложной организации сбора, очистки и вторичного использования испаряющегося газообразного гелия. Из-за сложности теплозащиты при работе с жидким гелием для испытаний обычно применяют небольшие образцы, малогабаритные криостаты. Учитывая, что применение тензометров, передающих деформацию образца, осложняет теплоизоляцию криостата, запись деформации обычно ведут не с рабочей части образца, а со штанг, находящихся вне криостата.

Для измерения температур до 153 К ( $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) применяют жидкостно–стеклянные термометры. В качестве термометрических жидкостей используют ртуть, спирт, пентан. При температурах ниже 153 К для измерений применяют термометры сопротивления и термопары.

### Статические испытания на растяжение

Проводятся в соответствии с ГОСТ 11150–84. Металлы. Методы испытания на растяжение при пониженных температурах. Необходимые температурные условия в образце при испытаниях создаются с помощью криостатов. По конструктивному признаку криостаты для испытаний на растяжение могут быть разделены на две группы (рис. 8). К первой группе относятся криостаты с двухсторонним вводом силовых элементов, ко второй – криостаты реверсивного типа, т. е. с реверсивным вводом тяг.

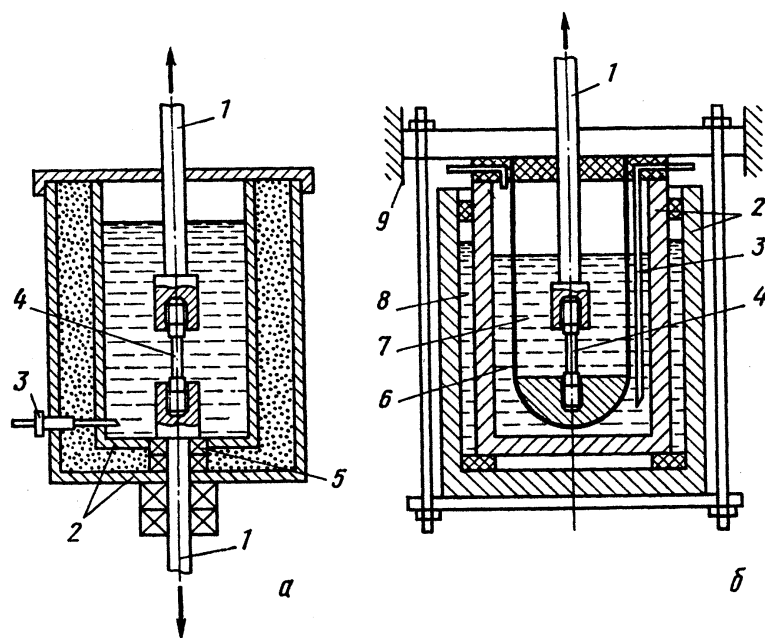


Рис. 8. Схема криостатов для испытаний на растяжение:

- a* – с двухсторонним вводом тяг; *б* – реверсивного типа с односторонним вводом тяг;
- 1 – нагружающие тяги; 2 – двухстенный корпус камеры с теплоизоляцией;
- 3 – ввод жидкого хладагента; 4 – испытуемый образец; 5 – тефлоновое уплотнение;
- 6 – опорная труба; 7 – жидкий водород или гелий; 8 – экран жидкого азота;
- 9 – внешний корпус камеры

Криостаты с двухсторонним вводом тяг имеют более простое устройство. Они представляют собой двухстенные ванны из латуни или аустенитной стали с войлочной или пенопластовой изоляцией. Их недостаток состоит в том, что выходящие из криостата две силовые тяги являются источником повышенных теплопритоков, приводящих к увеличенному расходу охлаждающей жидкости. Криостаты этого типа обычно применяют при испытаниях до 77 К.

Криостат реверсивного типа позволяет уменьшить теплопритоки. Нагрузка на образец создается с помощью опорной трубы, к которой крепится нижний захват образца, и расположенного внутри трубы подвижного штока, связанного с верхним захватом образца.

Испытания в среде жидкого гелия требуют принятия дополнительных мер по теплоизоляции рабочей камеры и ее тщательной герметизации. Для усиления теплоизоляции применяют вакуумные рубашки и экраны, охлаждаемые жидким азотом. Хромированные поверхности экранов, обращенные к рабочей камере криостатов, отполированы до зеркального блеска. Применяют криостаты с перезарядными устройствами, позволяющие при одной заливке хладагента испытывать несколько образцов.

## **Динамические испытания**

Проводятся в соответствии с ГОСТ 9454–78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенных температурах. Для проведения испытаний ударной вязкости при низких температурах также применяют копры двух типов. К первому, наиболее распространенному типу относят копры, у которых система нагружения вынесена за пределы холодильной камеры. Второй тип копра представляет собой специальную установку с размещением системы нагружения внутри холодильной камеры.

Испытания при температуре до 20 К проводят на обычных копрах, а для испытаний при 4 К применяют специальные. При использовании обычных стандартных копров необходимо обеспечить минимальную продолжительность от момента извлечения образца из термокамеры до проведения опыта, а также поддержание постоянства температуры образца в течение этого времени. Для сохранения температуры об-

разца его обматывают ватой, тонкой бумагой или поролоном. Для испытаний при температуре кипения жидкого водорода образец должен быть помещен в бумажный контейнер, в верхней части которого предусмотрена прорезь для заполнения его жидким хладагентом (рис. 9).

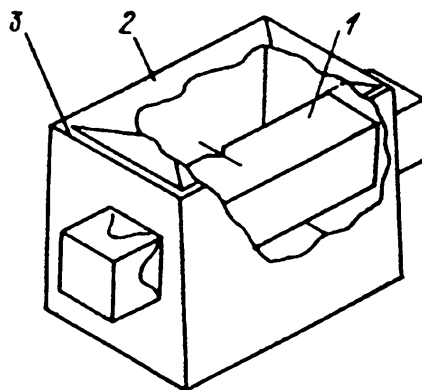


Рис. 9. Образец в бумажном контейнере:

1 – испытуемый образец; 2 – бумажный контейнер; 3 – прорезь для заливки жидкого водорода

Для испытаний на ударный изгиб при температурах до 4 К целесообразно использование специального пневматического копра. Проведение испытаний на ударный изгиб в криостате гарантирует постоянство необходимой температуры испытания. Схема копра для испытаний в среде жидкого гелия приведена на рис. 10. Кроме копра, установка содержит пульт управления с регистрирующей аппаратурой, включающей осциллограф для записи диаграммы деформации. Пневматический копер работает следующим образом. Молот поднимается в исходное положение, в котором он удерживается с помощью стопорного шарикового замка. При установке молота в исходное положение тяги поднимают наковальню с образцом. Благодаря этому наковальня перестает соприкасаться с динамометром, установленным на основании копра, что снижает внешние теплопритоки. После получения вакуума в двух полостях криостата в рубашку заливают жидкий азот и заполняют рабочий объем криостата жидким гелием. При достижении образцом необходимой температуры выключают стопорный замок. Рабочий ход молота

происходит под действием силы тяжести и подачи воздуха в пневмоцилиндр. В начале движения молота вследствие ослабления тяг наковальня опускается и плотно ложится на динамометр. При ударе ножа молота по образцу датчик деформации и тензодатчики динамометра передают электрические сигналы на осциллограф.

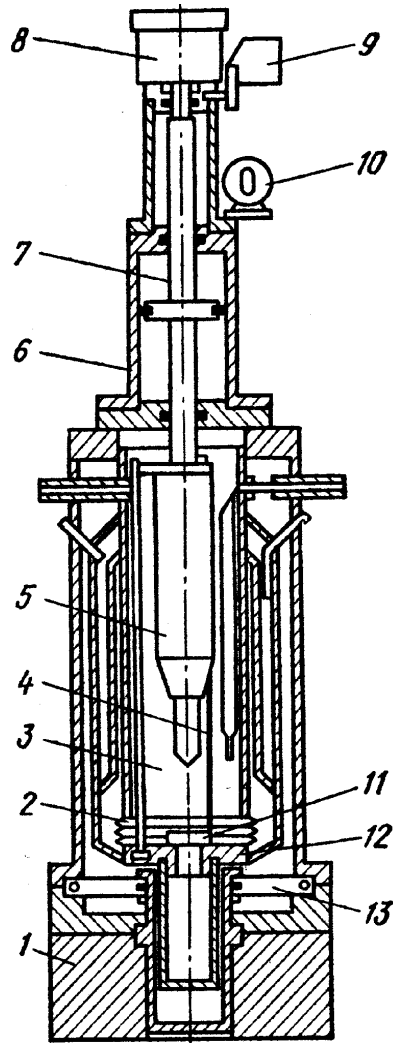


Рис. 10. Схема пневматического копра для испытаний на ударный изгиб при гелиевых температурах:

- 1 – основание копра; 2 – сильфон; 3 – объем заливки жидкого хладагента;  
 4 – тяги; 5 – молот; 6 – пневмоцилиндр; 7 – шток; 8 – шариковый замок;  
 9 – шторка; 10 – фотодатчик; 11 – образец; 12 – наковальня; 13 – динамометр



После разрушения образцы попадают в приемный бункер. В конце хода молот тормозится гидроамортизатором и автоматически быстро возвращается в исходное положение. Кассетное устройство позволяет при одной заливке хладагента испытывать 12 стандартных образцов. Расход жидкого гелия при испытании 12 стандартных образцов из стали 12Х18Н10Т после предварительного охлаждения криостата жидким азотом составляет 0,8 л на образец.

На практике появляется необходимость в проведении испытаний при 160–100 К. В таком случае можно воспользоваться охлаждением образца в жидком азоте с последующим отогревом его на опорах копра. Для этого необходимо построение временной зависимости температуры центральной зоны образца в месте надреза, измеренной многократно с помощью зачеканенной термопары.

Для выяснения поведения материалов в условиях ударного изгиба проводят испытания с записью диаграммы нагрузка – прогиб. Такое испытание имеет некоторые преимущества перед стандартным испытанием на ударный изгиб, позволяя проводить измерения разрушающей нагрузки и прогиба, а также измерение работы до максимума нагрузки и после (работа долома).

Применяется следующая система регистрации нагрузок и деформаций при ударном изгибе. Усилие определяется с помощью динамометра, на который наклеены тензорезисторы, соединенные по мостовой схеме. При нагружении динамометра сигнал разбаланса моста, пропорциональный приложенному усилию, поступает через усилитель на вертикальный вход электронного осциллографа. Прогиб образца определяется с помощью фотодатчика, состоящего из фотоэлемента и осветителя с равномерным световым потоком, который освещает фотоэлемент через фигурную прорезь в его корпусе. Движущийся молот шторкой, которая неподвижно закреплена на нем, перекрывает световой поток, что меняет сопротивление элемента. Выходной сигнал осуществляет развертку сигнала нагрузки по горизонтали. Диаграммы деформаций при испытании каждого образца фотографируются с экрана осциллографа на чувствительную фотопленку.

Работа разрушения определяется планиметрированием площади под кривыми деформации образцов. Диаграммы нагрузка – прогиб, по-

лученные фотографированием с экрана осциллографа, позволяют определять работу зарождения и развития трещины.

### Усталостные испытания

Проводятся в соответствии с ГОСТ 25.507–85 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования.

На рис. 11 приведена конструкция установки для усталостных испытаний образцов при температуре до 20 К.

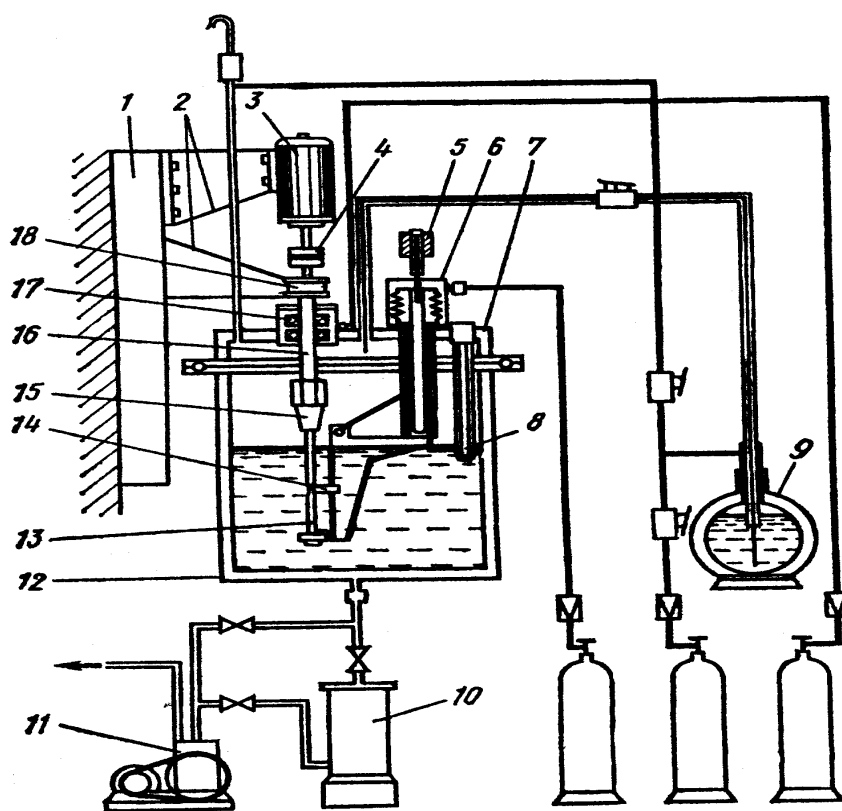


Рис. 11. Схема установки для усталостных испытаний консольно закрепленных круглых образцов в среде жидкого водорода:

- 1 – станина; 2 – стойка; 3 – электродвигатель; 4 – муфта; 5 – датчик перемещения;
- 6 – пневмоцилиндр; 7 – крышка криостата; 8 – датчик уровня;
- 9 – сосуд с криогенной жидкостью; 10, 11 – вакуумные насосы; 12 – криостат;
- 13 – образец; 14 – термопара; 15 – цанговый зажим; 16 – несущий вал;
- 17 – уплотнительное устройство; 18 – упорный подшипник

Нагружение производится по схеме поперечного изгиба консольно закрепленных вращающихся образцов круглого сечения. Нагружение осуществляется с помощью пневматического устройства, внутри которого находится герметичный сильфонный нагружающий узел. Усилие на образец передается от штока через рычаг и подшипник, установленный на хвостовой части образца. Заданное давление нагружения поддерживается автоматически редуцирующими устройствами. Также автоматически осуществляется регистрация и запись деформации образца. Температура образца измеряется термопарами. Количество циклов нагружения регистрируется механическим счетчиком, соединенным приводом с электродвигателем. При разрушении образца электродвигатель отключается.

При испытании строят кривую усталости – график, характеризующий зависимость между максимальными напряжениями цикла и долговечностью серии образцов, испытанных в заданных температурных условиях.

### **Испытание падающим грузом и взрывом**

В практике многих стран широкое применение получили испытания падающим грузом. Испытание проводится на специальных образцах DWT (Drop–Weight–Test) двух типов. Первый тип образца (проба Баттеля) изготавливается по натурной толщине изделия и имеет острый надрез, иногда прессованный. Серию образцов испытывают при различных температурах. Оценка ведется по критической температуре получения заданной доли вязкой составляющей в изломе.

Второй тип образцов (рис. 12) предложен Пеллини и Пьюзаком. Образцы имеют толщину от 12,7 до 25,4 мм, длину 353 мм, ширину 90 мм. В центре образца делают хрупкую наплавку, по которой затем наносят надрез, чтобы обеспечить инициирование хрупкой трещины в начальный момент нагружения. Испытание проводят путем ударного нагружения падающим грузом серии образцов данного материала при различных температурах. Энергия падающего груза составляет от 320 до 1740 Дж в зависимости от предела текучести материала и размера об-

разца. Под образцом устанавливают специальный упор, ограничивающий его прогиб.

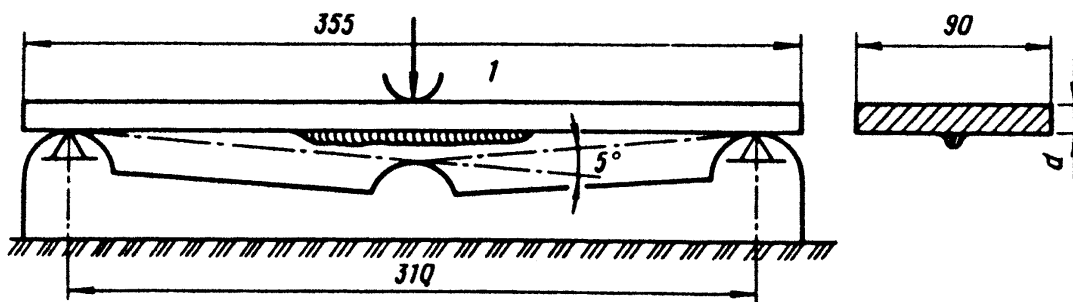


Рис. 12. Испытание образца на изгиб весом падающих грузов по Пеллини ( $l$  – место удара,  $d$  – толщина пробы). Характеристика разрыва определяется на основании определенных признаков относительными цифровыми показателями (BZ) (шкалой от 1 до 5):

BZ 1: образец, несмотря на трещину в рабочем месте, не разорвался, а прогнулся;

BZ 2: образец под рабочим местом немного разорвался;

BZ 3: образец примерно до половины ширины разорвался, но не прогнулся;

BZ 4: образец разорвался на расстоянии больше ширины, но не прогнулся;

BZ 5: образец переломился, не деформируясь

После нагружения серии образцов определяют максимальную температуру, при которой трещина проходит через все сечение образца – температуру нулевой пластичности. В ряде стран эта температура принята в качестве эталонной. Температура нулевой пластичности обозначается ТНП (NDT – Nil Ductility Transition).

Для оценки хрупкой прочности при больших скоростях деформации используют пластины размером  $356 \times 356$  мм натурной толщины, имеющие наплавленный с одной стороны хрупкий валик с надрезом. Испытания проводят при разных температурах. Пластины устанавливают на круглую матрицу и на небольшом расстоянии над пластиной осуществляют взрыв. Под действием давления расширяющегося газа пластина деформируется. При вязком поведении материала происходит характерное выпучивание. При температуре нулевой пластичности и ниже пластина разрушается без выпучивания. Температурные критерии, найденные по испытаниям падающим грузом и взрывом, находят широкое применение при построении полуэмпирических диаграмм разрушения Пеллини – Пьюзака, которые показывают зависимость приложен-

ных разрушающих напряжений от температуры для конкретных деталей (сосуды, трубопроводы и т. д.) с различными размерами дефектов (рис. 13).

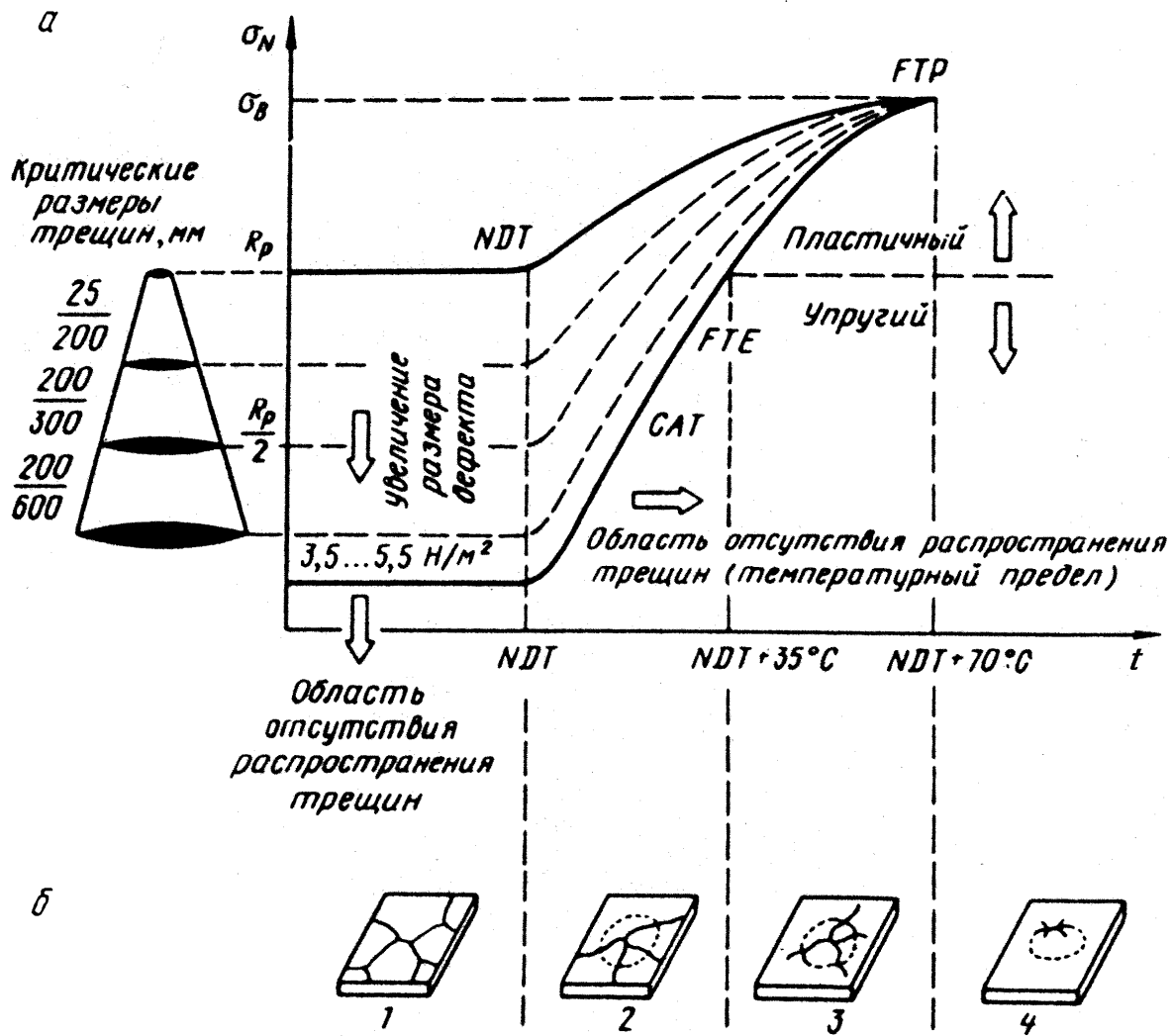


Рис. 13. Зависимость номинального напряжения от температуры при различных размерах дефекта:

а – диаграмма анализа излома по Пеллини;  $\sigma_B$  – прочность на разрыв;  $\sigma_N$  – номинальное напряжение; б – картина разрушения при испытании на вспучивание взрывом в различных областях диаграммы Пеллини; 1 – отсутствие вспучивания, ровные куски разрыва; 2 – незначительное вспучивание, полное разрушение; 3 – разрыв, ограниченный пластически деформированной областью вспучивания; 4 – большая вмятина, короткие трещины в качестве разрушения срезом

При полном пластичном поведении выше температуры FTP (Fracture Transition Plastic, пластичность перехода при изломе) наступает вязкий разрыв при достижении предела прочности на растяжение  $R_m$  (на рисунке используется отечественное обозначение  $\sigma_b$ ) из испытания на одноосное растяжение. Пластичность, ограниченная снижающейся температурой, означает, что напряжение на острие трещины нельзя больше пластически уменьшить. Таким образом, при локальных концентрациях напряжения можно вводить разрыв ниже предела прочности на растяжение  $R_m$ , причем в пределах определенного температурного диапазона создается зависимость напряжения разрыва от величины погрешности.

Точка, при которой номинальное напряжение излома достигает предела текучести  $R_p$ , называется точкой FTP. При температуре ниже этой точки остановка начавшейся трещины возможна лишь тогда, когда нагрузки ниже предела текучести. Температура, при которой предел текучести достигает при бездефектном образце предела прочности при растяжении, т. е. когда пластичность больше не существует, называется температурой NDT (Nil Ductility Transition, перехода нулевой вязкости). Ниже этой температуры напряжение излома зависит от концентрации напряжения на пике трещины, т. е. от величины дефекта.

Состояние переходной температуры в зависимости от величины дефекта определяется не только свойствами материала при одноосном испытании на растяжение, но также и толщиной детали или образца. Для проверки характеристики излома или способности материала улавливать трещины применяются различные образцы в различных вариантах. Испытание на вздутие и взрыв EBТ (Explosion–Bulge–Test) по Пеллини и испытание на падение груза DWT (Drop–Weight–Test) вместе с диаграммой хрупкого излома дают возможность определения температуры, которая ведет при данной толщине листа к хрупкому распространению трещин ниже предела текучести. Ниже температуры NDT (перехода нулевой вязкости) EBТ – образец испытания на вздутие и взрыв показывает растрескивание без деформации, выше FTP (пластичности перехода при изломе) происходит деформация только с короткими трещинами (см. рис. 13, б).

### 3. Оценка критической температуры хрупкости

Критическую температуру хрупкости  $T_{кр}$  (или порог хладноломкости) наиболее часто определяют следующими методами.

**Первый метод** – по изменению ударной вязкости. Для металлов, у которых отсутствует четко выраженный переход в хрупкое состояние за критическую температуру хрупкости принимают такую температуру, при которой ударная вязкость в два раза ниже, чем при комнатной температуре (рис. 14, а).

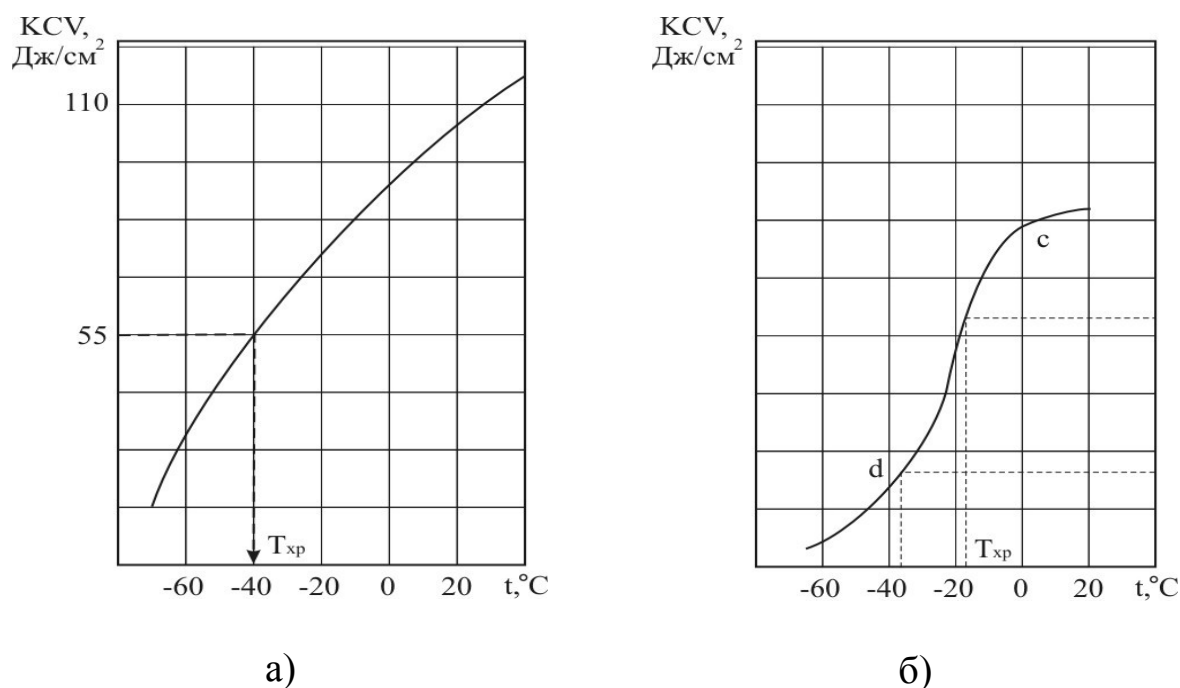


Рис. 14. Изменение ударной вязкости при понижении температуры испытания без выраженного (а) и с выраженным вязко-хрупким переходом (б)

Например, если при комнатной температуре ударная вязкость составляет  $KCV = 110 \text{ Дж/см}^2$ , то критическая температура хрупкости  $T_{кр} = -40^\circ\text{C}$ . Для металлов с четко выраженным переходом в хрупкое состояние за критическую температуру хрупкости принимают либо верхнюю (нижнюю) температуру интервала – точка с (d) на рис. 14, б. либо среднюю температуру этого интервала. Наиболее часто берут

среднюю температуру. Выбор метода определения  $T_{кр}$  зависит от условий работы и конструкторско–технологических факторов изделия. По критической температуре хрупкости определяют минимально допустимую температуру эксплуатации  $T_{эксп}$ , которая всегда должна быть выше  $T_{кр}$  на некоторую величину  $\Delta T$ . В зависимости от условий работы изделия величина  $\Delta T$  чаще всего изменяется в пределах 20–60°C, т.е.  $\Delta T = T_{эксп} - T_{кр} = 20 \dots 60^\circ$ . Для относительно простых условий работы или не очень ответственных изделий  $\Delta T$  принимают 20–30°C, а для ответственных или тяжело нагруженных изделий  $\Delta T$  увеличивают до 50–60°C.

**Второй метод** – по виду излома разрушившегося образца. Метод основан на определении соотношения площадей вязких и хрупких участков излома ударных образцов. Вязкий излом имеет характерное волокнистое строение с пепельным оттенком. С понижением температуры количество волокнистой составляющей в изломе снижается, появляются кристаллические блестящие участки. Обычно за критическую температуру  $T_{50}$  принимают такую, при которой доля волокнистой структуры равна 50 % (рис. 15).

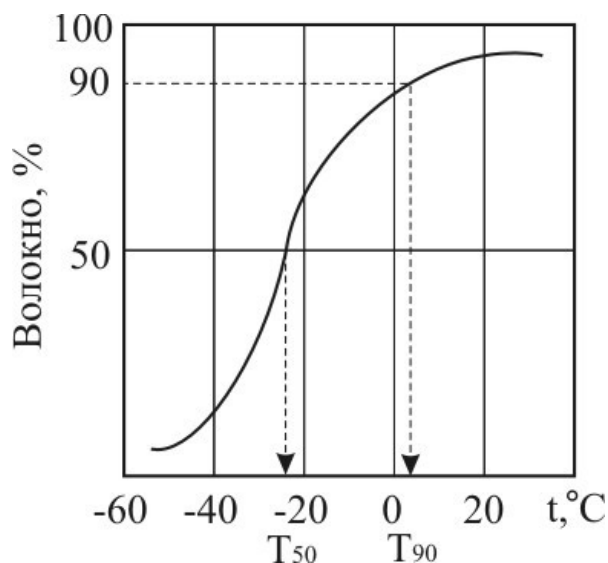


Рис. 15. Изменение количества волокнистой составляющей в изломе стали СтЗсп при понижении температуры испытания



В наиболее ответственных случаях порог хладноломкости (критическую температуру) устанавливают по началу появления хрупкой составляющей в изломе  $T_{90}$  (см. рис. 15). Температура  $T_{90}$  соответствует 90 % волокнистой составляющей в изломе.

*Третий метод* – по минимальному допустимому значению ударной вязкости при заданной низкой температуре. Сталь допускают к эксплуатации, если ее ударная вязкость при самой низкой рабочей температуре не ниже следующих значений:  $KCU \geq 40 \text{ Дж/см}^2$ ;  $KCV \geq 30 \text{ Дж/см}^2$ ,  $KCT \geq 20 \text{ Дж/см}^2$ . Однако, следует учитывать, что для особых условий эксплуатации и для ряда высоколегированных сталей значения ударной вязкости могут быть установлены на другом уровне в соответствии с отраслевыми нормативными документами.

#### **4. Содержание работы**

В данной работе требуется определить хладостойкость конструкционных углеродистых и легированных сталей после различных режимов термической обработки на основании результатов проведенных ранее экспериментов.

Для выполнения работы в табл. 1 и 2 для различных марок конструкционных сталей (в состоянии поставки, после отжига, нормализации, закалки и отпуска) представлены результаты испытаний ударной вязкости и доли волокнистой составляющей в изломе в зависимости от температуры испытаний.

Преподаватель выдает несколько заданий студенту из таблицы 1 и 2. Согласно данным задания по результатам испытаний, приведенных в таблицах 1 и 2, студент строит сериальные кривые хладноломкости и определяет критическую температуру хрупкости.

#### **5. Содержание отчета**

В отчете по данной работе необходимо

- 1) привести данные заданий из таблиц 1 и 2;

- 2) построить графики изменения ударной вязкости и доли волокнистой составляющей в зависимости от температуры испытания;
- 3) на графиках определить критическую температуру хрупкости.
- 4) для каждого случая определить минимальную допустимую рабочую температуру и указать условия, для которых данные рекомендации можно считать достаточно надежными;
- 5) выдать рекомендации по снижению допустимой рабочей температуры;
- 6) для заданной марки материала сравнить величины температуры хрупкости, определенные разными способами.

При сдаче отчета необходимо хорошо разбираться в содержании работы, уметь анализировать результаты испытаний, знать особенности испытания на удар при низких температурах, а также отвечать на все контрольные вопросы по заданной работе.

## **6. Контрольные вопросы**

1. Как влияет понижение температуры на свойства углеродистой стали?
2. Какие нарушения называют хрупкими?
3. Что называют хладноломкостью?
4. Какие металлы и сплавы охрупчиваются при понижении температуры, а какие нет?
5. Какие внешние факторы оказывают влияние на хладноломкость?
6. Какие внутренние факторы оказывают влияние на хладноломкость?
7. Как связана хладноломкость со строением кристаллических решеток?
8. Особенности проведения испытаний при низких температурах.
9. Как проводят статические испытания при низких температурах?
10. Как следует подготовить образцы для проведения испытаний при температурах ниже 77 К?
11. Что такое ТНП?

12. Как определяется критическая температура хрупкости (порог хладноломкости)?
13. Как влияет технология изготовления детали на критическую температуру хрупкости?
14. Влияет ли на хладноломкость размер и конфигурация детали?
15. Что называют критической температурой хрупкости?
16. Как влияет размер зерна на критическую температуру хрупкости?
17. Что такое сериальные кривые хладноломкости и как их построить?
18. Какая термическая обработка повышает хладостойкость и почему?
19. Какие факторы являются определяющими при выборе типа и размера образца для испытаний ударной вязкости?
20. Как определить допустимую рабочую температуру при эксплуатации изделия?
21. При каких температурах определяют показатели прочности, пластичности и вязкости при выборе стали для работы в условиях низких температур?

## Приложение

Таблица 1

№ п/п	Марка стали	Термообработка	Ударная вязкость KCV Дж/см <sup>2</sup> при температурах испытаний, °С																		
			20	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120	-130	-140	-150	-160	-170
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	СтЗсп	Состояние поставки	50	42	35	20	15	10	5												
2	СтЗсп	Нормализация, 920°С	80	72	65	50	30	20	10	5											
3	20	Отжиг, 900°С	70	62	55	40	27	15	10	5											
4	20	Нормализация, 900°С	85	80	70	62	50	30	20	15	10	5									
5	30	Закалка, 870°С; отпуск, 400°С	105	100	95	85	70	55	40	27	20	25	10	5							
6	40	Закалка, 850°С; отпуск, 400°С	115	100	105	95	82	70	45	35	26	20	15	10	8						
7	20Г	Закалка, 880°С; отпуск, 650°С	175	167	160	153	143	135	124	115	103	87	72	60	36	18	5				
8	20Х	Закалка, 880°С; отпуск, 650°С	185	182	180	176	172	168	162	155	140	120	90	70	45	30	17	10			
9	40Г	Состояние поставки	70	68	68	65	60	52	40	28	20	14	10	7							
10	40Г	Закалка, 840°С; отпуск, 600°С	173	160	150	143	131	120	110	100	83	70	55	40	20	7					
11	40Х	Закалка, 860°С; отпуск, 650°С	180	165	158	150	138	128	116	105	100	83	68	50	35	15	5				
12	40ХН	Состояние поставки	70	70	55	35	23	18	15	10	8										
13	40ХН	Нормализация, 850°С	105	105	93	86	70	50	40	32	25	20	15	12	10						
14	40ХН	Закалка, 830°С; отпуск, 600°С	190	190	176	168	155	140	120	87	67	52	40	30	22	15	10	5			
15	35Х	Закалка, 850°С; отпуск, 580°С	140	135	120	115	90	75	60	48	30	24	17	10	5						
16	45	Отжиг, 840°С	45	43	40	37	33	25	14	12	10	9	6	5							
17	50	Закалка, 850°С; отпуск, 450°С	56	55	50	47	44	39	35	26	20	11	3								
18	50	Закалка, 850°С; отпуск, 600°С	80	78	68	65	60	55	50	43	36	28	17	8							
19	65Г	Закалка, 830°С; отпуск, 450°С	115	113	103	95	80	60	45	28	20	15	13	9							
20	65С2А	Закалка, 850°С; отпуск, 450°С	120	115	107	103	95	84	70	48	33	20	14	12	9						
21	09Г2С	Состояние поставки	118	115	95	84	75	60	45	30	20	3									
22	09Г2С	Нормализация, 930°С	130	128	125	112	103	92	80	65	50	34	25	20	15	10	5				
23	09Г2С	Закалка, 910°С; отпуск, 580°С	150	140	132	125	115	102	87	75	52	35	28	23	18	14	10				
24	10Г2С	Отжиг, 900°С	105	100	95	90	85	78	60	42	30	20	13	8							
25	10Г2С	Нормализация, 900°С	110	106	106	104	100	94	80	65	42	29	22	14	8						

Окончание табл. 1

№ п/п	Марка стали	Термообработка	Ударная вязкость KCV Дж/см <sup>2</sup> при температурах испытаний, °С																		
			20	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120	-130	-140	-150	-160	-170
26	10Г2С	Закалка, 900°С; отпуск, 500°С	130	130	128	117	110	102	95	83	62	50	35	25	18	13	7				
27	14Г2АФ	Нормализация, 930°С	190	190	185	183	180	178	170	110	73	53	41	30	25	20	15	12			
28	17Г1С	Состояние поставки	80	80	65	58	49	37	28	20	10										
29	17Г1С	Закалка, 920°С; отпуск, 200°С	125	125	82	78	68	64	58	53	43	34	25	20	15	10					
30	20ХГР	Закалка, 880°С; отпуск, 200°С	105	105	100	95	90	85	80	72	64	53	40	30	17						
31	20ХГР	Закалка, 880°С; отпуск, 500°С	130	130	130	128	126	124	120	117	110	103	92	75	60	36	18	8	5	5	
32	18ХГТ	Закалка, 850°С; отпуск, 200°С	140	140	128	122	115	110	102	95	87	79	70	62	55	45	35	22	10		
33	25ХГСА	Закалка, 890°С; отпуск, 600°С	190	190	178	168	155	138	112	90	60	45	30	18	15	10					
34	12ХН3А	Закалка, 850°С; отпуск, 600°С	218	218	208	205	200	195	190	180	170	158	138	110	73	55	40	35	20	15	
35	18Х2Н4МА	Закалка, 870°С; отпуск, 200°С	170	170	164	160	155	147	135	115	90	77	68	60	55	50	45	43	40	35	30
36	18Х2Н4МА	Закалка, 870°С; отпуск, 610°С	230	230	222	218	214	205	200	190	180	168	155	137	110	80	65	55	50	45	40
37	30Х13	Состояние поставки	100	93	90	84	77	67	60	50	27	5									
38	30Х13	Закалка, 1050°С; отпуск, 550°С	110	105	102	96	90	85	77	67	55	42	26	5							
39	30ХГТ	Закалка, 850°С; отпуск, 200°С	106	105	102	100	95	85	72	57	35	20	7	5							
40	30ХГСА	Закалка, 880°С; отпуск, 580°С	170	168	165	160	153	143	126	115	80	47	30	23	15	10					
41	30ХН3А	Закалка, 820°С; отпуск, 600°С	195	192	190	188	184	180	175	165	150	130	113	87	45	30	25	18			
42	38ХС	Закалка, 900°С; отпуск, 600°С	170	170	165	163	155	145	125	100	68	47	25	10							
43	38ХМА	Закалка, 850°С; отпуск, 550°С	185	185	182	178	174	166	161	152	143	122	80	37	16	10	7				
44	38Х2Н2МА	Закалка, 860°С; отпуск, 560°С	155	155	153	151	150	146	143	138	130	122	110	85	35	18	15	12	10	9	
45	38ХН3МА	Закалка, 850°С; отпуск, 650°С	175	175	174	173	171	168	165	158	152	145	132	118	95	45	30	20	15	10	
46	40ХФА	Закалка, 850°С; отпуск, 600°С	125	123	112	106	100	94	86	78	68	60	52	40	31	20	10				

Таблица 2

№ п/п	Марка стали	Термообработка	Доля вязкой составляющей, %, при температурах испытаний, °С																			
			20	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120	-130	-140	-150	-160	-170	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
1	Ст3сп	Состояние поставки	100	85	60	23	10	5														
2	Ст3сп	Нормализация, 920°С	100	95	85	65	40	22	10	5												
3	20	Отжиг, 900°С	100	80	68	55	40	20	8	3												
4	20	Нормализация, 900°С	100	88	80	65	50	37	25	18	12	5										
5	30	Закалка, 870°С; отпуск, 400°С	100	95	87	75	68	62	55	48	42	37	80	25	10							
6	40	Закалка, 850°С; отпуск, 400°С	100	93	86	78	75	70	68	60	54	44	40	30	25	10						
7	20Г	Закалка, 880°С; отпуск, 650°С	100	95	90	85	80	75	65	60	50	40	30	18	12	8						
8	20Х	Закалка, 880°С; отпуск, 650°С	100	98	96	94	92	88	85	76	65	55	42	30	15	10						
9	40Г	Состояние поставки	100	96	95	86	78	70	57	38	25	15	12	10								
10	40Г	Закалка, 840°С; отпуск, 600°С	100	98	96	92	90	85	76	70	62	56	50	12	10	10						
11	40Х	Закалка, 860°С; отпуск, 650°С	100	95	93	88	85	80	75	68	62	56	50	42	35	23	10					
12	40ХН	Состояние поставки	100	60	45	35	25	20	15	12	6											
13	40ХН	Нормализация, 850°С	100	88	80	68	60	50	40	32	25	20	15	10								
14	40ХН	Закалка, 830°С; отпуск, 600°С	100	98	96	94	92	85	78	74	65	53	40	30	23	14	10					
15	35Х	Закалка, 850°С; отпуск, 580°С	100	87	78	73	64	56	48	40	30	24	20	12	10							
16	45	Отжиг, 840°С	100	85	73	62	50	38	28	25	20	12	8									
17	50	Закалка, 850°С; отпуск, 600°С	100	95	88	80	70	62	56	43	35	20	12	6								
18	65Г	Закалка, 830°С; отпуск, 450°С	100	90	85	76	65	50	35	27	20	14	10									
19	65С2А	Закалка, 850°С; отпуск, 450°С	100	96	88	85	83	70	60	45	30	20	12	10								
20	09Г2С	Состояние поставки	100	88	80	70	56	45	35	28	20	13	10	7								
21	09Г2С	Нормализация, 930°С	100	92	85	75	68	58	50	40	30	25	18	12	5							
22	09Г2С	Закалка, 910°С; отпуск, 580°С	100	95	87	80	75	65	58	50	43	35	30	25	18	10						
23	10Г2С	Отжиг, 900°С	100	94	86	76	65	55	45	38	32	28	22	15	8							
24	10Г2С	Нормализация, 900°С	100	95	90	85	75	65	56	48	38	32	28	20	18	13	10					
25	10Г2С	Закалка, 900°С; отпуск, 500°С	100	98	95	90	83	75	68	60	50	38	32	28	23	20	15	10				
26	14Г2АФ	Нормализация, 930°С	100	95	90	85	80	75	66	60	50	33	23	18	10	8						
27	17Г1С	Состояние поставки	100	90	85	75	65	50	37	20	10											

Окончание табл. 2

№ п/п	Марка стали	Термообработка	Доля вязкой составляющей, %, при температурах испытаний, °С																		
			20	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120	-130	-140	-150	-160	-170
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
28	17Г1С	Закалка, 920°С; отпуск, 200°С	100	96	95	90	85	81	74	60	40	20	10								
29	20ХГР	Закалка, 880°С; отпуск, 200°С	100	95	93	90	85	80	75	68	60	50	35	14							
30	20ХГР	Закалка, 880°С; отпуск, 500°С	100	98	95	93	90	87	83	78	73	65	59	50	35	25	15	10			
31	18ХГТ	Закалка, 850°С; отпуск, 200°С	100	98	96	94	90	85	83	75	73	65	55	45	32	23	13	7			
32	18Х2Н4МА	Закалка, 870°С; отпуск, 200°С	100	98	96	93	90	85	80	75	67	50	30	20	15	10					
33	18Х2Н4МА	Закалка, 870°С; отпуск, 610°С	100	100	100	98	96	95	90	85	80	75	68	58	48	36	24	10			
34	25ХГСА	Закалка, 890°С; отпуск, 600°С	100	98	96	92	88	82	78	70	62	50	32	20	10	5					
35	38ХС	Закалка, 900°С; отпуск, 600°С	100	100	98	95	90	85	77	65	50	30	20	15	10						
36	38ХМА	Закалка, 850°С; отпуск, 550°С	100	97	95	90	88	83	77	70	64	50	20	7							
37	38Х2Н2МА	Закалка, 860°С; отпуск, 560°С	100	100	98	96	96	95	94	90	88	85	77	70	50	20	10				
38	38ХН3МА	Закалка, 850°С; отпуск, 650°С	100	100	99	98	98	98	96	95	93	90	85	80	70	50	25	7			
39	30ХГТ	Закалка, 850°С; отпуск, 200°С																			
40	30ХГСА	Закалка, 880°С; отпуск, 580°С	100	100	98	96	94	90	86	80	66	50	35	25	15	10					
41	30ХН3А	Закалка, 820°С; отпуск, 600°С	100	100	100	98	96	95	93	90	85	80	72	58	30	17	10				
42	40ХФА	Закалка, 850°С; отпуск, 600°С	100	97	96	94	90	88	80	75	65	50	40	30	22	15	10				

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солнцев Ю.П., Пирайнен В.Ю., Вологжанина С.А. Материаловедение специальных отраслей машиностроения: Учеб. пособие. – СПб.: Химиздат, 2007. – 784 с.

2. Солнцев Ю.П., Ермаков Б.С., Слепцов О.И. Материалы для низких и криогенных температур: Энциклопедический справочник. – СПб.: Химиздат, 2008. – 768 с.



## СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы.....	3
Введение.....	3
1. Факторы, определяющие характер разрушения.....	10
2. Испытания механических свойств при низких температурах....	19
Особенности проведения испытаний.....	19
Статические испытания на растяжение.....	21
Динамические испытания.....	22
Усталостные испытания.....	26
Испытание падающим грузом и взрывом.....	27
3. Оценка критической температуры хрупкости.....	31
4. Содержание работы.....	33
5. Содержание отчета.....	33
6. Контрольные вопросы.....	34
Приложение.....	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	40

Вологжанина Светлана Антониновна  
Иголкин Алексей Федорович

# **ХЛАДОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

## **Лабораторные работы**

Учебно-методическое пособие

*Ответственный редактор*

Т.Г. Смирнова

*Титульный редактор*

Р.А. Сафарова

*Компьютерная верстка*

И.В. Гришко

*Дизайн обложки*

Н.А. Потехина

*Печатается*

*в авторской редакции*

---

Подписано в печать 17.12.2015.    Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 2,56.    Печ. л. 2,75.    Уч.–изд. л. 2,5

Тираж 50 экз.    Заказ №    С 99

---

Университет ИТМО. 197101, Санкт–Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс  
191002, Санкт–Петербург, ул. Ломоносова, 9