МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ

**ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

**по дисциплине «СПЕЦИАЛЬНЫЕ ГЛАВЫ**

**ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ»**

**для студентов специальности 7.092301**

**«Оборудование и технология сварки»**

Утверждено

на заседании методического

совета ДГМА

Протокол № 20 от 5.06.2012г

Краматорск 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.................................................................................................. 5

ТЕМА 1. МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЙ – ТЕОРИТИЧЕСКАЯ

ОСНОВА ИЗУЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И

СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ …………………… 6

* 1. Основные понятия курса «Специальные главы прочности

сварных конструкций»………………………………………………… 6

1.2 Коэффициенты запаса……………………….……………………….8

ТЕМА 2 ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ………………………………………………………………..9

2.1Свойства металлов при одноосевом растяжении..............…….........9

2.2 Напряжения в точке тела........................................................……..…12

2.3 Теории напряженно - деформированного состояния тела................13

2.4 Плоское напряженное состояние, плоская деформация……...........14

ТЕМА 3 ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОГО

СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ ОЕДИНЕНИЙ………………….……16

3.1 Механизм влияния концентраторов на распределение

напряжений и деформаций......................………………………………16

3.2 Концентрация напряжений и пластические деформации

металла при разрушении........................... .................................................18

3.3 Критерии оценки напряженно - деформированного состояния

при наличии концентрации напряжений.................................................19

ТЕМА 4 ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ МЕТАЛЛА

РАЗРУШЕНИЮ В ПРИСУТСТВИИ КОНЦЕНТРАТОРОВ……… 24

4.1 Критерии оценки сопротивляемости металла

образования трещин...................................................................................24

4.2 Критическое равновесие трещины......................................................26

4.3 Энергетическое условие А.Гриффитса..............................................28

4.4 Распространение трещины при наличии в материале хрупкой

зоны.…....................................................................................................................31

4.5 Эквивалентная длина трещины….......................................................33

4.6 Энергетические методы определения сопротивляемости

металла образованию и распространению трещины...............................34

4.7 Методы определения сопротивляемости металла

распространению рещин.............................................................................36

4.8 Неэнергетические характеристики определения

распространения трещин……………………………………………………….39

4.9 Определение размера пластической деформации в области

вершины трещины............................................................................................ …41

ТЕМА 5 ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ

СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ………………………………………….42

5.1 Проблема учета влияния дефектов на работоспособность

сварных оединений................................................................................................42

5.2 Оценка влияния трещиноподобных дефектов по силовым и

деформационным критериям...............................................................................43

5.3 Чувствительность сварных соединений к концентрации

напряжений ...........................................................................................................44

5.4 Коэффициенты запаса по разным критериям……………………….45

5.5 Порядок расчета допустимости имеющегося дефекта……………47

ТЕМА 6 ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ……………47

6.1 Мягкие и твердые прослойки в сварных соединениях………..…47

6.2 Напряженное состояние и прочность мягкой прослойки при

растяжении................................................................................... ……………….49

6.3 Контактное упрочнение.....................................................................51

6.4 Влияние относительной толщины и формы мягкой прослойки

на место и характер разрушения…………………………………………..........52

ТЕМА 7 ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ПРОЧНОСТЬ И

СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ…………………………52

7.1 Изменение свойств металлов при понижении температуры..........52

7.2 Методы оценки свойств металлов при понижении

температуры…………………………………………………………...................53

7.3 Основные факторы, снижающие хладостойкость

сварных соединений ............................................................................................55

7.4 Оценка хладостойкости сварных соединений..................................58

7.5 Методы повышения хладостойкости сварных соединений…..….59

ТЕМА 8 РАБОТА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ

ТЕМПЕРАТУРАХ……………………………………………………..60

8.1 Свойства основного металла...............................................................60

8.2 Прочность и пластичность металла при высоких

температурах........................................................................................... ……….61

8.3 Влияние концентраторов напряжений на прочность

и пластичность металла при высоких температурах......................................63

8.4 Свойства сварных соединений при высоких температурах

эксплуатации и влияние на них механической неоднородности......................63

8.5 Локальные разрушения и методы оценки склонности к ним

сварных соединений ............................................................................................66

8.6 Расчет сварных соединений на прочность……………………..….67

ТЕМА 9 ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЫ НА ПРОЧНОСТЬ

СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ…………………………………..…………68 9.1Коррозионные среды и виды коррозионных повреждений

металла и сварных соединений............................................................................68

9.2 Методы оценки работоспособности сварных соединений

в коррозионных средах ………………………………………………………..72

9.3 Прочность сварных соединений в агрессивных средах.................77

9.4 Основные и специальные методы повышения стойкости сварных соединений против коррозионного разрушения................................................78

ТЕМА 10 Конструкционная и расчетная прочность…………………...79

10.1Свойства сварных соединений……………………………………..79

10.2 Конструкционная и расчетная прочность, причины их

расхождения…………………………………………………………………… 80

10.3 Пути сближения расчетной и конструкционной прочности...........82

Перечень ссылок.........................................................................................84

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение является основным изготовителем и поставщиком оборудования для всех отраслей народного хозяйства. Применение техно-логического процесса сварки при изготовлении оборудования способствует экономии металла, снижению трудоемкости, использованию высокопрочных легированных сталей и сварочных материалов, обеспечивающих повышение качества выпускаемых металоконструкций.

Наряду с преимуществами процессу сварки присущи и недостатки: наличие концентраторов напряжений, остаточные напряжения, изменение структуры и химического состава металла сварных швов, склонность к хрупким разрушениям, усталостным и коррозионным повреждениям, изменение размеров и формы в процессе сварки и при последующей эксплуатации.

В основном, в настоящее время используются расчеты на прочность по допускаемым напряжениям или нормативным сопротивлениям, назначаемым в зависимости от предела текучести материала. Однако такой подход недостаточен при оценке работоспособности сварной конструкции, имеющей вышеуказанные недостатки.

Изучение вопросов прочности, связанных с наступлением разрушения, показало, что оно является одним из возможных предельных состояний, которое необходимо учитывать в расчетах. В последние годы этими вопросами стала заниматься новая область науки – «Механика разрушения». Освоение механики разрушения сварных конструкций привело к появлению дисциплины «Специальные главы прочности сварных конструкций».

Изучение курса базируется на знаниях, полученных в процессе усвоения теоретической механики, металловедения, сопротивления материалов, теории сварочных процессов, расчета и проектирования сварных конструкций, напряжений и деформаций. В свою очередь, данный курс является базой для изучения учебной дисциплины «Изготовление сварных конструкций» в той части, которая касается главным образом вопросов разрушения, не освещенных в ней.

Выполнение контрольной работы по курсу, решение задач обусловливают необходимость постановки цели, освоения методики выполнения заданий, выполнения расчетов, анализа полученных результатов, выводов и т.д.

Данный курс формирует умение и навыки конструкторского оформления и оценки работоспособности сварных конструкций, эксплуатирующихся при низких и высоких температурах, в коррозионных средах, при наличии концентраторов напряжения, механической неоднородности сварных соединений, а также применения при их изготовлении высокопрочных материалов.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель. Изучение дисциплины дает будущим инженерам-сварщикам дополнительные сведения по вопросам разрушения и прочности сварных соединений и элементов конструкций в различных условиях их эксплуатации. Дисциплина завершает подготовку специалистов в области прочности и технологии изготовления сварных конструкций.

Задачи. Сведения, получаемые в результате изучения дисциплины, необходимы:

- для расширения знаний по вопросам разрушения сварных конструкций в сложных условиях их эксплуатации;

- для обоснованного назначения конструкторских и технологических требований к сварным конструкциям, обеспечивающих их заданную работоспособность;

- для правильного выбора методов испытаний и критериев оценки с це-лью получения достоверной информации о свойствах сварных соединений и элементов конструкций в сложных условиях их эксплуатации;

- для выработки умения правильного выбора пути, обеспечивающего высокие эксплуатационные свойства сварных соединений при минимально возможных затратах.

При изучении курса «Специальные главы прочности сварных конст-рукций» необходимо усвоить:

- механические свойства основного металла и сварных соединений, методы сохранения их пластичности в процессе изготовления сварных конструкций;

- расчет на прочность сварной конструкции или отдельных ее элементов с учетом предельного состояния разрушения;

- принципы рационального конструкторского оформления сварных соеди-нений, повышающие их эксплуатационную надежность;

- причины образования напряжений, деформаций, снижения пластичности металла и наступления разрушения сварных конструкций;

- влияние концентраторов напряжения, остаточных деформаций, дефек

тов, механической неоднородности и среды эксплуатации на работоспособ-ность сварных конструкций.

ТЕМА 1. МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЙ – ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИЗУЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1.1 Основные понятия курса СГПСК

Условия эксплуатации

Условия эксплуатации - это нагрузка, температура, среда, с которой соприкасается сварное соединение, радиация и время, на протяжении которого действуют эти факторы.

Условия эксплуатации влияют главным образом на выбор материала, типов сварных соединений, способов сварки и последующей термической обработки сварных конструкций.

Условия нагружения

Условия нагружения - это скорость прикладывания и продолжитель-ность действия нагрузки во времени.

Предельные состояния

Существуют такие состояния конструкций или деталей, когда их эксплуатация считается невозможной, опасной или нежелательной. Такие состояния называются предельными.

Предельное напряженное состояние

Предельное напряженное состояние - это достижение в какой-нибудь точке детали или в ее сечении напряженного состояния, которое отвечает наступлению нового процесса (текучесть металла, образование шейки, разру-шение).

Нагрузка

Одним из основных факторов, влияющих на условия эксплуатации сварных конструкций, являются нагрузки, различающиеся по скорости их приложения, по продолжительности и условиям, при которых они действуют.

Нагрузки предельные - это нагрузки, которые отвечают предельному состоянию.

По скорости приложения нагрузки делятся:

- статические-относительно медленное их приложение и могут быть постоянными и повторно-статическими (многоразовые статические нагруз-ки,которые изменяются с частотой, не более одного или двух нагружений в секунду);

- вибрационные - относительно высокие скорости приложения нагрузки с частыми их сменами (больше 1 Гц), резкой границы между вибрационными и повторно-статическими нагрузками не существует;

- ударные (однократные или повторно-ударные) - высокие скорости приложения нагрузок.

Характер нагрузки зависит от условий, в которых она действует: низ-кие или высокие температуры, тип среды, наличие радиации и другие.

Прочность

Под прочностью (в инженерном смысле) понимается способность материала, сварного соединения, детали или конструкции оказывать сопротивление не только разрушению, но и наступлению текучести, потери устойчивости, распространению трещин и другому.

Под прочностью (в научном смысле) понимается только сопротивление разрушению.

Виды разрушений

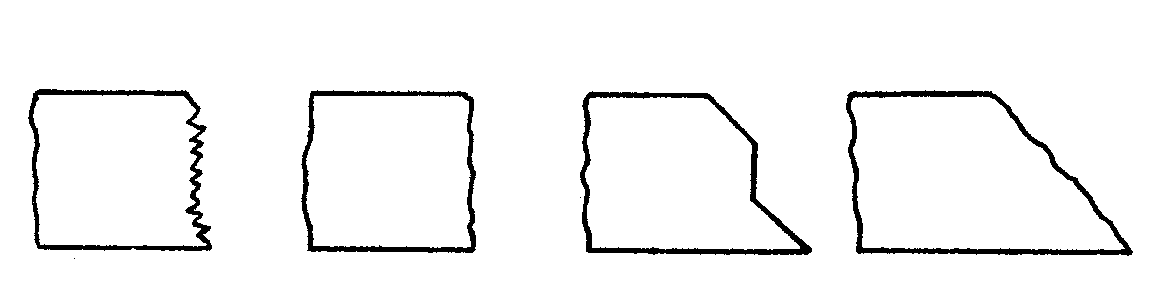
Различают следующие виды разрушения - вязкое, хрупкое и усталост-ное.

Вязкое (пластическое) разрушение сопровождается значительной пластической деформацией металла, протекающей по всему объему тела или в его значительной части, и является результатом исчерпания способности материала оказывать сопротивление пластической деформации. Оно присуще пластическим материалам. При пластическом разрушении скорость расп-ространения трещины мала и составляет не более 0,05 скорости звука. Цвет излома - матовый.

Хрупкое разрушение оставляет лишь следы пластической деформации. Излом – кристаллический, с характерными блестящими гранями отдельных плоскостей разрушения. При хрупком разрушении скорость распространения трещины составляет 0,2...0,5 скорости звука. Полухрупкое (квазихрупкое) разрушение имеет участки с вязким и хрупким видом излома. Оно происходит в наиболее ослабленном сечении (перед краем трещины) при напряжении выше предела текучести σт, но меньше предела прочности σВ.

Усталостное разрушение происходит при довольно малых пластических деформациях за счет медленного распространения трещины усталости при циклической нагрузке путем накопления в материале необратимого повреждения. При этом трещины в материале начинают развиваться задолго до полного раз-рушения, независимо от того, пластическое это будет разрушение или хрупкое. В зоне усталостной трещины излом имеет матовую поверхность. Продолжительность процесса разрушения занимает больше 90% времени "жизни" детали.

Форма поверхности разрушения листового металла при статической или ударной нагрузке приведена на рис.1.



***а б в г***

а - вязкое; б - хрупкое; в - с участками среза у поверхностей

пластины; г - путем среза

Рисунок 1. - Виды разрушений листового металла

2 Коэффициенты запаса

Понятие вероятности неразрушимости при проектировании сварных конструкций пока используется редко, а её оценку ведут по коэффициентам запаса. Различают требуемое (установленное) и фактическое значение коэффициентов запаса. Установленное значение коэффициента запаса формируется под влиянием как технических, так и экономических, организационных, конъюнктурных и других факторов.

Требуемый коэффициент запаса должен компенсировать возможные отклонения нескольких параметров: нагрузок, свойств металла, сечений элементов и других. Поэтому при установлении этих коэффициентов запаса необходимо пользоваться как частными коэффициентами запаса, так и общим коэффициентом запаса.

Запас прочности - это отношение каких-нибудь двух однотипных вели-чин, одна из которых отвечает наступлению предельного состояния, а вторая - состоянию эксплуатации:

*; К =*  (1)



Требуемые частные коэффициенты запаса [n]>1 устанавливаются директивным путем, они никакому расчетному определению не подлежат и являются числами, показывающими, во сколько раз их нормативные значения должны быть изменены для устранения возможных неблагоприятных отклонений.

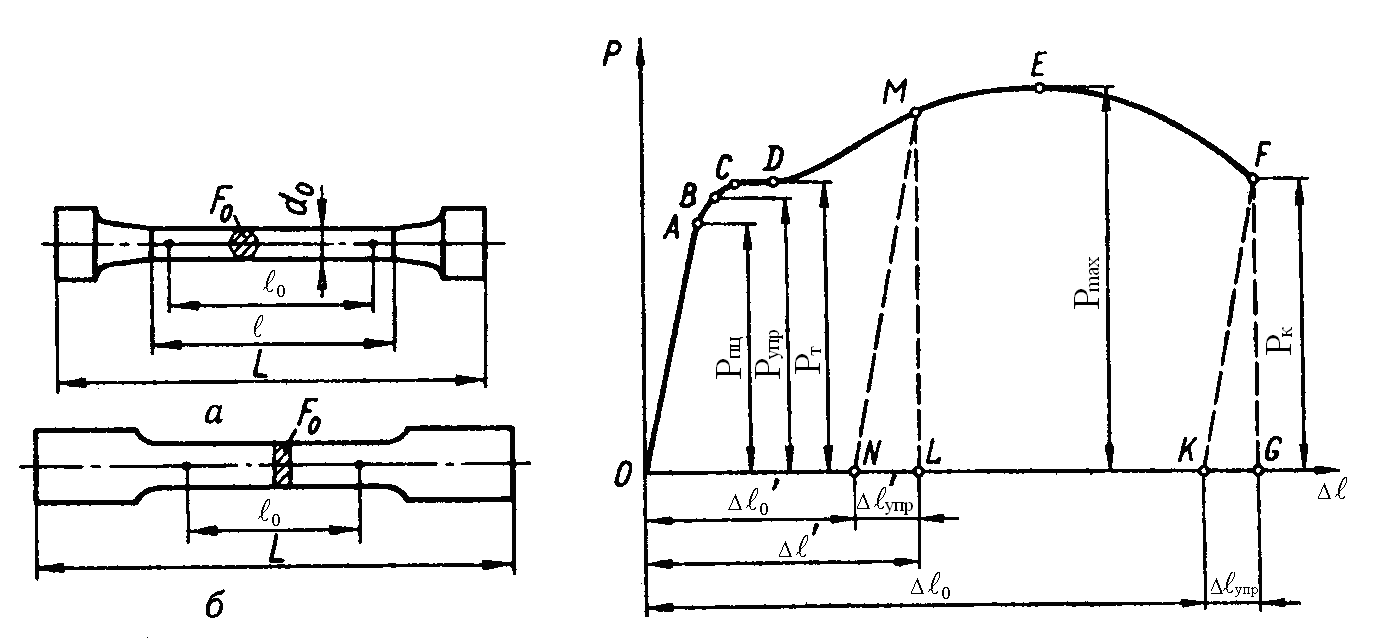
Фактические коэффициенты запаса определяются либо эксперимен-тально, либо расчетным путем. Они вычисляются сравнением однородных характеристик.

Чаще всего в экспериментах определяют фактический коэффициент за-паса как общий коэффициент запаса по тому параметру, который определяют во время опыта. Например, если при испытании регистрируется разрушающая нагрузка Рр сварного соединения с угловыми швами, а механические свойства и размеры катетов швов отвечают нормативным значениям, то отношение Рр/Рэ  дает общий коэффициент запаса прочности.

ТЕМА 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

2.1 Свойства металлов при одноосевом растяжении

Одним из основных видов испытания материалов является испытание на растяжение, при котором определяются наиболее важные их механичес-кие свойства. Из испытываемого материала изготовляются специальные ци-линдрические или плоские образцы (рис.1 а, б).



**в**

а - вид цилиндрического образца для испытания на растяжение;

б - вид плоского образца для испытания на растяжение;

в - вид диаграммы растяжения

Рисунок 1 – Вид образцов и диаграммы растяжения низкоуглеродистой стали в координатах Р-Δ



При растяжении получают диаграмму зависимости условных напря-жений σ = P/F0 от условных деформаций = Δ/0, используя силу Р, начальную площадь F0, удлинение образца Δ0 и начальную расчетную длину образца0 (см. рис.1 а,б).



Точка А. От начала нагружения до определенного значения растягивающего усилия имеет место прямая пропорциональная зависимость между удлинением и силой. Напряжение, которое вызвано силой пропорциональности Рпц, называется пределом пропорциональности и равняется:

σ пц = Рпц / F0. (2.1)

На участке ОА справедлив закон Гука.

Точка В. Наибольшее напряжение, при котором остаточная деформация (упругая деформация) при разгрузке не обнаруживается, называется пределом упругости и равняется:

σпр = Рпр / F0, (2.2)

где Рпр – усилие упругости.

Точка С. При дальнейшем растяжении образца от точки В кривая рас-тяжения становится криволинейной и плавно поднимается к точке С, где наблюдается переход к горизонтальному участку СД. Предел текучести σт - это наименьшее напряжение, при котором деформация образца происходит при постоянном растягивающем усилии Рт и равняется:

σт = Рт/Fо. (2.3)

Во время пластической деформации повышается температура образца, изменяются его электропроводность и магнитные свойства.

Участок СД. На этой стадии растяжения удлинение образца увеличивается при постоянном значении растягивающего усилия. Такой процесс деформации носит название текучестью материала и сопровождается остающимся (пластическим) удлинением, которое не исчезает после снятия нагрузки.

Точка Е. Наибольшее усилие, которое воспринимает образец. Напряже-ние, соответствующее максимальной силе Рmax, называется временным сопротивлением σв или пределом прочности и равняется: σв = Рmax/Fо (2.4)

К этому моменту удлинение образца распределялось равномерно, по всей длине0 образца; площади поперечных сечений расчетной части об-разца изменились незначительно и также равномерно по его длине. Поэтому в формулы введено начальное значение площади Fо. После достижения Рmax при дальнейшем растяжении образца деформация происходит, главным об-разом, на небольшой длине образца. Это приводит к образованию местного сужения в виде шейки и к падению силы Рк, несмотря на то, что напряжение в сечении шейки непрерывно возрастает.



Относительным удлинением после разрыва δ называют отношение в процентах прироста расчетной длины образца после разрыва к его начальной дли-не:

(2.5)



Относительное сужение образца после разрыва ψ определяется отноше-нием абсолютного уменьшения площади поперечного сечения образца в про-центах к начальной площади поперечного сечения:

(2.6)



Относительное удлинение δ и относительное сужение ψ характеризуют пластичность материала и есть условными, так как удлинение и сужение относятся к первичной длине и к первичной площади образца. В действительности пластическая деформация развивается на непрерывно изменяющейся длине образца. Обозначив *d* увеличение длины образца в данный момент испытания, находим истинное (действительное) удлинение:



(2.7)



где δ = Δ / 0.



Подобным образом определяем действительное сужение:

(2.8)



где ψ = ΔF/F0 .

Так как объем тела во время пластической деформации не изменяется, то

F0 0 = Fk k , или то есть



Любое увеличение длины относительно исходной базы образца вызовет соответствующее уменьшение диаметра базы образца.

Необходимость определения соответствующей действительной деформации вытекает из факта, что она в любой заданный момент времени зависит от длины базы образца і в тот же момент времени. Таким образом, фиксированное изменение длины Δі приводит к постоянно уменьшаемому увеличению деформации, так как длина базы образца і в этот момент времени возрастает с каждым дополнительным увеличением Δ.



2.2 Напряжения в точке тела

Напряжения являются следствием взаимодействия частичек тела при его нагружении. Внешние силы стараются изменить взаимное расположение частичек, а возникающие при этом напряжения препятствуют смещению частичек, ограничивая его преимущественно некоторой маленькой величиной.

В соответствии с гипотезой о сплошности материала считают, что каж-дую частичку тела в сколь угодно маленьком пространстве во всех направлениях окружает великое множество других частичек. Находящаяся в данной точке частичка по-разному взаимодействует с каждой из соседних частичек. Поэтому в одной и той же точке в разных направлениях напряжения будут разные и очень редко, когда они одинаковы по всем направлениям.

Из курса “Сопротивление материалов” известно, что девять компонен-тов напряжения в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через рассматриваемую точку тела, полностью определяют напряженное состояние в этой точке (тензор напряжений).

σх τ ух τzx

τ ху σв τ zу

τ хz τ уz σ z.

Нормальные напряжения обозначаются σ с индексом, который отвечает направлению нормали к плоскости, на которой они действуют. Касательные напряжения обозначаются τ с двумя индексами: первый соответствует направлению нормали к плоскости, а второй – направлению самого напряжения. Например, на плоскости, перпендикулярной к оси X, действу ют напряжения σx, τxy, τxz и т.д.

При неодноосном напряженном состоянии в каждой точке тела имеются напряжения: σх, σy, σz , τху, τУZ, τZХ и деформации: х, y, z, γху, γzx , γzx.

Характеристиками напряженного и деформированного состояния являются σі – интенсивность напряжений,і - интенсивность деформаций, которые определяются по формулам:

σі; (2.9)



і. (2.10)



В каждой точке тела существуют по крайней мере три взаимно пер-пендикулярных плоскости, в которых касательные напряжения равны нулю. Эти плоскости называются главными, а нормальные напряжения и дефор-мации в них – главными нормальными напряжениями и деформациями:

σі; (2.11)



і. (2.12)



Главные напряжения σ1 , σ2 и σ3 располагаются в таком порядке:

σ1 > σ2 > σ3.

2.3 Теории напряженно - деформированного состояния тела.

Энергетическая теория пластичности

По данной теории пластические деформации при объёмно-напряженном состоянии возникают в случае достижения интенсивности напряжений предела текучести:

σі = σт, (2.13)

где σт – предел текучести.

При 3-осном растяжении или сжатии отдельные компоненты могут заметно превосходить σт металла, но при этом σі < σт и пластические деформации не возникнут.

При 2-осном напряженном состоянии, когда σ1 = -σ3 , а σ2 = 0, что соответствует чистому сдвигу, пластические деформации начнутся при максимальном напряжении σі = σт /√3 < σт :

σі



σі = .



Для 1–осного растяжения σ1 = σ, σ2 = σ3 = 0,

.



Деформационная теория пластичности

Для расчетов напряженного состояния за пределами упругих деформаций используется деформационная теория пластичности: для различных напряженных состояний металла берется одинаковая экспериментальная зависимость между напряжениями и деформациями. Деформационная теория пластичности устанавливает единую связь между интенсивностью напряжений σі и интенсивностью деформаций і, независимо от схемы напряженного состояния:

σі = ƒ(і), или σ = Е, (2.14)

где Е – модуль упругости.

Для простого (одноосного) растяжения относительная продольная деформация равняется: , а относительная поперечная деформация



Эти два уравнения выражают закон Гука (зависимость между деформациями и напряжениями) при линейном напряженном состоянии.

. (2.15)



Подобным образом получим формулы и для других главных удлинений:

; (2.16)



(2.17)



Формулы (2.25), (2.26), (2.27) характеризуют обобщенный закон Гука для случая 3-осного напряженного состояния

Теория течения

Более точной является теория течения, которая устанавливает единую связь между интенсивностью напряжений σi и интегралом ∫*d*iпл интенсивности увеличений пластических деформаций, независимо от схемы напряженного состояния. Величина *d* іпл может быть найдена из общей зависимости для многоосного нагружения:

(2.18)



где *d*хпл, dyпл…– приращения пластических деформаций на беско-нечно малом участке деформирования.

Из уравнения (2.18) получаем:

(2.19)



= хпл =  пл . (2.20)



2.4 Плоское напряженное состояние, плоская деформация

Плоское напряженное состояние (σz = 0;  0)



Плоская пластина нагружена в ее плоскости (рис.2.13, а). Толщина её δ очень мала по сравнению с размерами а и с. Если выделить элемент с размера-ми dх, dy и δ в любой точке пластины, то на его гранях возникнут напряжения σх, σy, τxy и τyx (рис.2.13, б).

На боковых гранях этого элемента напряжения отсутствуют: σz = 0;

τzx =0; τzy = 0, и мы имеем плоское напряженное состояние тела, то есть две параллельных грани бесконечно малого элемента, выделенного в любой точке тела, свободны от напряжений. Напряжения σх, σy, τxy и τyx равномерно распределены по толщине пластины.

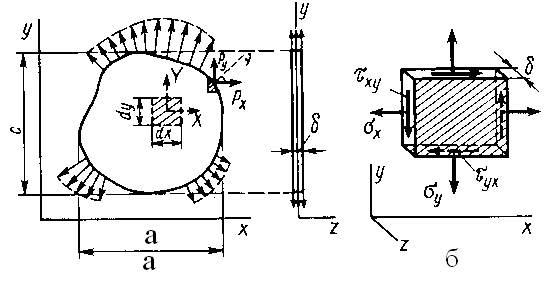


Рисунок 2.13 – Схема определения плоского напряженного состояния

При плоском напряженном состоянии в каждой точке изменяется тол-щина пластины. Деформация в направлении оси Z по закону Гука равна:

.



Толщина пластины в каждой точке вследствие поперечной деформации изменяется на величину δ = zδ = - (σx + σy).



Плоская деформация ( z  = 0; σz 0)



Имеем очень длинное цилиндрическое тело, равномерно нагруженное по всей длине в (рис.2.14, а).

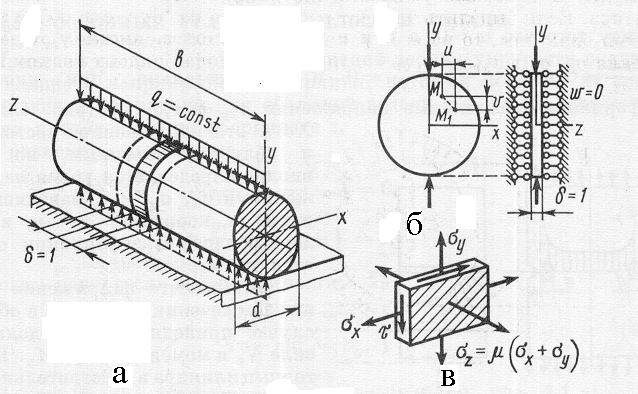


Рисунок 2.14 – Схема определения плоской деформации

Мысленно рассечем это тело на отдельные слои толщиной δ=1. Если бы эти слои испытывали плоское напряженное состояние, то в каждой точке пластины толщина изменялась бы на величину Δδ. Но в ре-зультате противодействия соседних слоёв это невозможно, поэтому каждый слой деформируется в условиях (рис.2.14, б), где он как бы зажат между двумя абсолютно твердыми поверхностями, принудительно обеспечивающими условия неизменяемости толщины слоя Δδ = 0. При этом перемещение во всех точках тела происходит только в параллельных плоскостях XY (см.рис.2.14, б). Это и есть плоская деформация. По закону Гука имеем:

z = (σz - μσx - μσy) / E = 0 .

В местах, где пластина должна была утолщаться, появятся сжимающие напряжения σz , а в местах возможного утонения – растягивающие напря-жения σz (рис.2.14, в).

В обоих случаях σz = μ(σx + σy) ( 2.21)

Тема 3. Методы определения и критерии оценки напряженно-

деформированного состояния сварных соединений

3.1 Механизм влияния концентраторов на распределение напряжений и деформаций.

Влияние концентраторов напряжений на работоспособность сварных конструкций велико. Это главный фактор, который существенным образом понижает прочность. Неравномерность распределения напряжений в деталях и сварных соединениях влияет на их несущую способность. Из самого определения вытекает, что напряжения распределяются неравномерно. Вследствие концентрации напряжений текучесть металла в отдельных точках может появляться значительно раньше, чем по сечению в целом. Однако наступление текучести в отдельных точках деталей еще не является тем предельным состоянием, на которое ориентируются при расчете сварных конструкций. Общая же текучесть сечения возникает при более высоких нагрузках, что является положительным. Наибольшее отрицательное влияние концентрации напряжений оказывают на достижение предельного состояния разрушения при нагрузках: вибрационных, повторно – статических, ударных и статических.

Принято говорить о концентрации напряжений. Однако большее значение в упругопластической стадии нагружения имеет концентрация деформаций.

Рассмотрим широкую пластину единичной толщины, имеющую щеле-видный надрез глубиной h и радиусом r (рис.3.1, а). Удалим мысленно учас-ток h, находящийся выше корня надреза (рис.3.1, б).

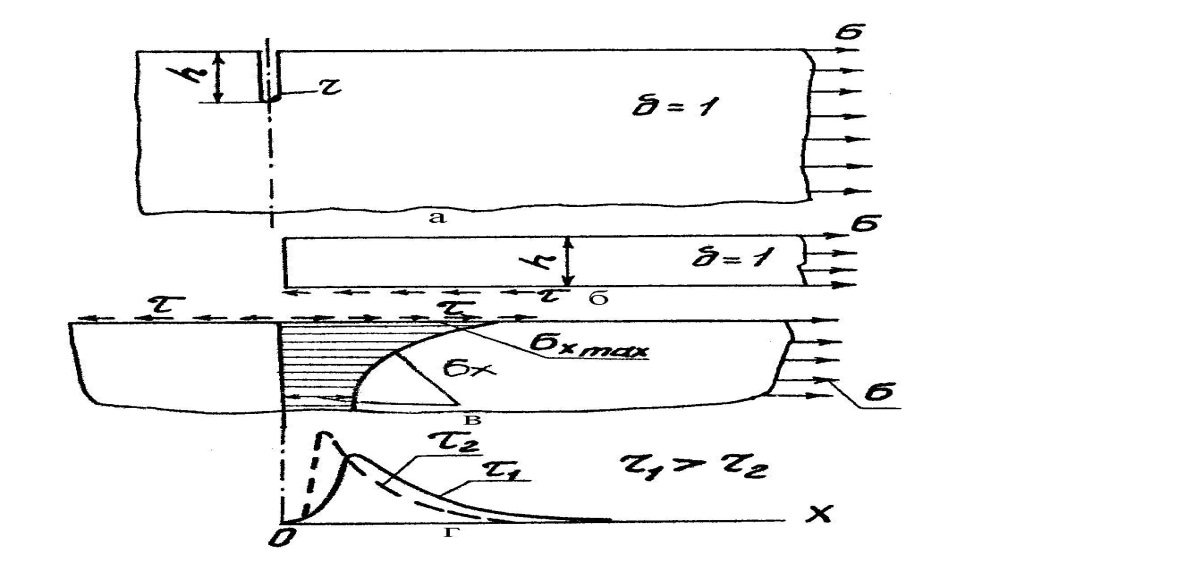


Рисунок 3.1 - Распределение напряжений в пластине, имеющей

надрез

Напряжения σ создают силу P = σh (при δ =1), которая уравновешивается суммой касательных напряжений . Тогда σh =. Такие же касательные напряжения, но противоположного знака действуют на остальную часть полосы (рис.3.1, в) и создают неравномерные напряжения σx. Чем больше h при постоянном r, тем больше, тем выше концентрация напряжений σx  при постоянном σ. Таким образом, с увеличением глубины надреза h возрастают σxmax и, следовательно, коэффициент концентрации напряжений:

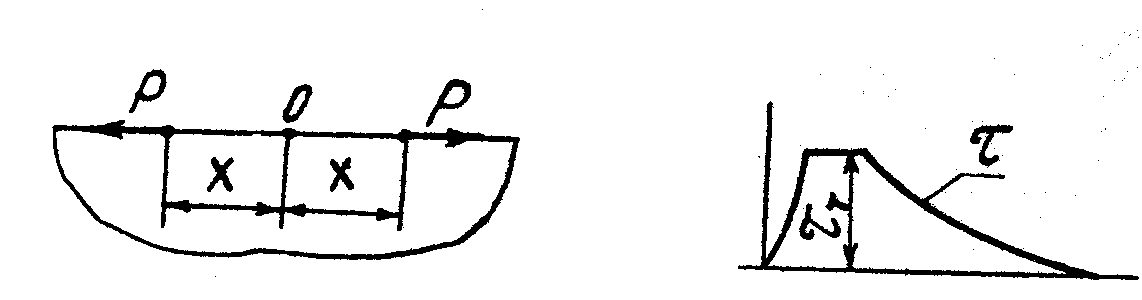
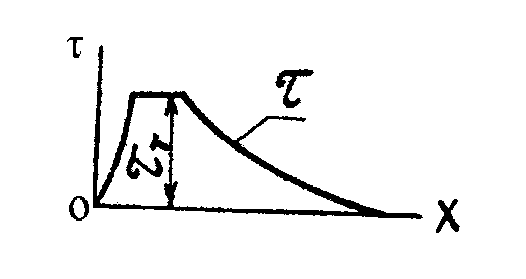


α = σxmax / σ . (3.1) С уменьшением r при постоянном h интеграл остается постоянным, но изменяется характер эпюры τ (рис.3.1, г) - пунктирная линия.



Это приводит к росту σxmax по следующей причине. Из теории упругости известно, что одни и те же касательные силы P, приложенные на краю пластины (рис.3.2, а), вызывают различные напряжения σ0 в точке 0 в зависимости от расстояния х, на котором силы расположены от точки 0 и определяются по формуле σ0 = 4Р/πх.

Чем меньше х, тем значительнее напряжение σ0. Касательные напряже-ния τ2 силы Р расположены ближе к точке 0 (см.рис 3.1, г), поэтому они и вызовут более высокие напряжения σxmax, то есть с уменьшением r концентрация напряжений возрастает.

***а б***

Рисунок 3.2 – Касательные силы Р на краю пластины (а) и эпюра

касательных напряжений τ при наличии в зоне текучести металла (б)

При достижении касательными напряжениями предела текучести τ = τт

изменяется форма эпюры τ (рис.3.2, б), изменяется и эпюра σx. При ударном

приложении нагрузки σт возрастает, также возрастает и концентрация напряжений σx.

С понижением температуры влияние концентрации напряжений на нас-тупление разрушения возрастает по следующей причине. При снижении температуры величина σразр остается почти неизменной, а σт возрастает. При одной и той же нагрузке эпюра τ изменяет свой вид (рис. 3.3). Так как возрастает σт ,  то растёт σxmax в точке 0 при постоянной нагрузке, что приводит к преждевременному разрушению.

У высокопрочных материалов величина σт сближается с σ разр, что означает: у основания надреза начало пластической деформации у них сопряжено с образованием σxmax, более близких к σразр, чем у сталей обычной прочности, то есть разрушения у высокопрочных сталей при наличии концентраторов могут возникнуть при невысоких средних напряжениях.

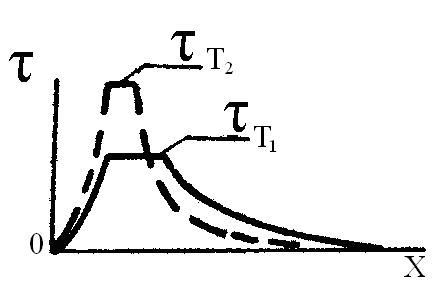


Рисунок 3.3 – Распределение касательных напряжений τ при разных

температурах и пределах текучести металла

3.2 Концентрация напряжений и пластические деформации

металла при разрушении.

Определение напряженно-деформированного состояния имеет двоя-кое значение: во-первых, знание распределения напряжений и деформаций в пределах упругих деформаций позволяет судить о степени напряженности металла в разных точках детали; во-вторых, без исчерпывающего описания напряжений и деформаций при высоких их уровнях невозможно определить многие механические характеристики металлов после проведения испыта-ний образцов, непосредственно связанных с критериями прочности и плас-тичности. На рис.3.4 приведено распределение напряжений и размеры зон пластических деформаций в полосе с надрезами.

Одним из проявлений концентрации напряжений является уменьшение пластических деформаций металла перед разрушением. Измерение пластических деформаций на полосе с надрезом (см.рис.3.4) показывает, что распределение деформаций очень неравномерное как по поперечному сечению (О-О), так и в направлении действия нагрузки (в сечении А-А). При высокой степени концентрации напряжения к моменту наступления разрушения пластическая деформация может возникнуть лишь вблизи кон центраторов, в то время как зона I будет оставаться на упругой стадии деформирования.

По сечению А - А пластической деформацией охвачена сравнительно небольшая зона размером . Вот почему концентраторы напряжений явля-ются одной из основных причин появления хрупкости в металлах, которые могут разрушаться после незначительной пластической деформации. Умень-шение объема зон протекания пластической деформации означает умень-шение работы, которую необходимо затратить перед разрушением элемен-та. В экспериментах для этой цели выполняют острые надрезы на образцах.



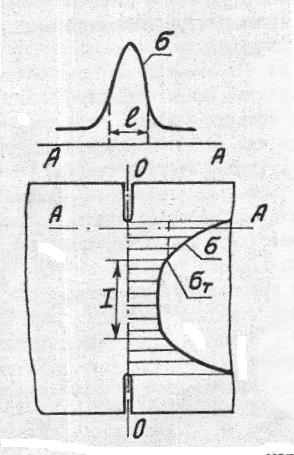


Рисунок 3.4 - Распределение напряжений и размер зоны пластических

деформаций в полосе с надрезами

Предельно жесткие условия концентрации напряжений наблюдаются при движении трещины в металле. Экспериментальное определение пластических деформаций вблизи плоскости разрушения указывает на резкую неравномерность их распределения. Ширина зоны пластических деформаций различна у разных металлов и может представлять от сотых до нескольких десятых миллиметра. Величина max также разная в зависимости от материала и температуры испытания. Она может изменяться у поверхности разрушения от 30...40% до нуля. Пластические деформации еще меньшие, когда при разрушении имеет место плоская деформация, которая в направлении толщины равняется нулю ( z = 0).



Пластины большой толщины, а также хрупкие металлы разрушаются в условиях плоской деформации, протекающей при сохранении неизменности объема металла. Так как при этом утонение металла по толщине невозможно, то пластическая деформация в вершине трещины возникает преимущественно за счет сдвига металла в крайне ограниченных объемах.

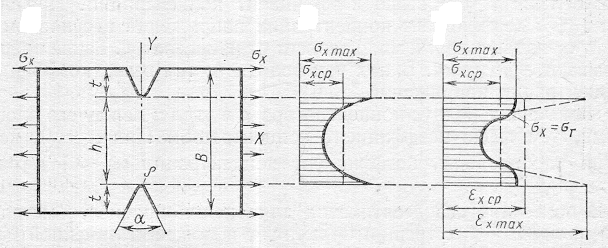
Необходимость затрачивать энергию при разрушении, и тем большую, чем больше пластическая деформация металла, является важнейшей особенностью процесса разрушения металла.

3.3 Критерии оценки напряженно-деформированного состояния

сварных соединений

При определении механических свойств сварных соединений использу-ются стандартные образцы без острых надрезов. Во многих случаях необхо-димо оценить сопротивляемость металла разрушению на образцах с острыми надрезами. На концентрацию напряжений влияют: форма элемента, его ли-нейные размеры (h, t, в), радиус концентратора ρ, угол между гранями кон-центратора α (рис.3.5,а) и вид приложенной нагрузки (растяжение, изгиб, сдвиг и т.д.).

Рассмотрим тонкую пластину, в которой по толщине σz = 0. В ос-лабленном сечении действуют средние напряжения (рис.3.5, б).



***а б в***

а - общий вид нагруженной пластины;

б - эпюра напряжений в упругом участке;

в - эпюры деформаций и напряжений при σxmax > σт

Рисунок 3.5 - Распределение напряжений и деформаций в пластине

с надрезами

Степень концентрации напряжений при ρ0 принято оценивать ко-эффициентом концентрации напряжений:



ασ = σхmax / σхср, (3.2)

где σхmax – максимальное напряжение.

Если пренебречь влиянием напряжений σy в ослабленном сечении, то в упругой области коэффициент концентрации напряжений ασ приблизительно

совпадает с коэффициентом концентрации деформаций = хmax/ хср.



Если h>>t, то изменение h при t = const мало влияет на коэффициент кон-центрации напряжений ασ. Такие надрезы называются мелкими. Коэффициент концентрации напряжений у них зависит от изменения t. Чем больше t, тем вы-ше коэффициент концентрации напряжений, следовательно,

ασ ≈ √ t. (3.3)

Если t >> h, то коэффициент концентрации напряжений ασ в основ ном зависит от изменения h и мало зависит от изменения t. Такие надрезы называ-ются глубокими. У них чем больше h, тем выше коэффициент концентрации напряжений, то есть.

ασ ≈ √ h. (3.4)

Если ≠0, то оценку напряженного состояния ведут по коэффициенту концентрации напряжений ασ или коэффициенту концентрации деформаций



(3.5)



Чем меньше радиус концентратора  *и* угол α, тем выше значение коэффициента концентрации напряжений ασ. При α = 0, если грани параллельны, коэффициенты концентрации напряжений определяются выражениями:



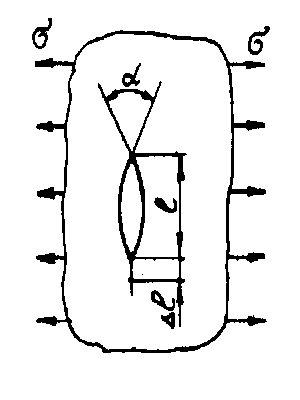
ασ ≈ √ t / или ασ ≈ √ h / . (3.6)

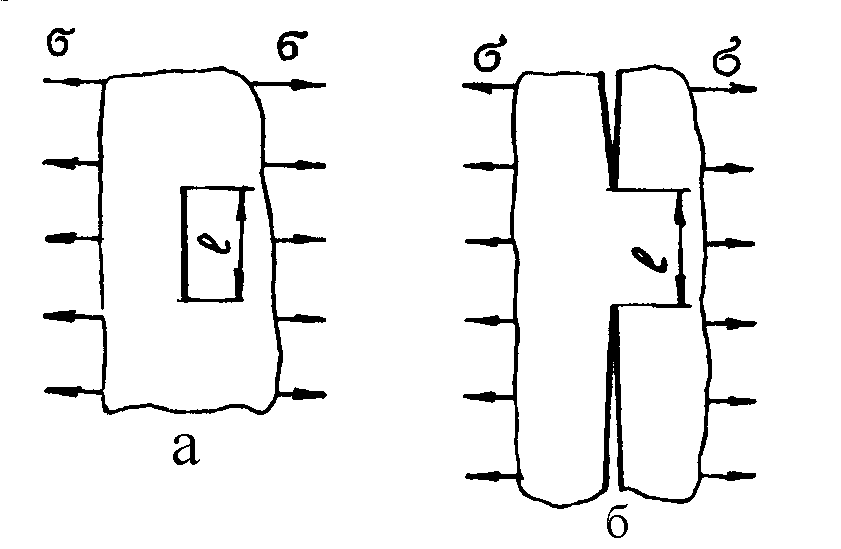


Рассмотрим растянутые напряжением σ тонкие бесконечные пластины (плоское напряженное состояние), имеющие вид (рис. 3.6, а, б, в) соответственно: трещины с α = 0 (см.рис. 3.6, а), надрезов (см.рис. 3.6, б) и выреза (см.рис.3.6, в).

При = 0 расчетное напряжение становится равным бесконечности и понятие коэффициента концентрации напряжений теряет смысл. В механике разрушения при → 0 для оценки напряженно-деформированного состояния используют коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины при упругих деформациях (К) и понятие коэффициента интенсивности высвобождения энергии деформации (G). Последний критерий(в джоулях на квадратный метр) определяется по формуле G= πσ2/2Е, означает выделение энергии при подрастании трещины в теле на единицу площади и равен 1-й производной от упругой энергии, накопленной в теле в случае, когда внешние силы не выполняют никакой работы.







**в**

а - трещина с α = 0;

б - размер сечения пластины, в которой расположена трещина;

в - вырез с α ≠ 0

Рисунок 3.6 – Бесконечная пластина с надрезами ( )



При этом упругая энергия в теле уменьшается. Если внешние силы одновременно осуществляют работу, то они сообщают телу дополнительную энергию и полная энергия может увеличиваться. Выделенная энергия зависит только от энергии упругой деформации тела и величины подрастания трещины. Работа внешних сил выступает как подведенная к телу энергия, а не как энергия, подводимая к трещине и выделяемая при ее подрастании.

Коэффициент интенсивности напряжений К линейно зависит от прило-женных по контуру напряжений или сил и пропорционален √, где - длина трещины (см.рис.3.6, а), размер опасного сечения образца (см.рис.3.6, б) иливыреза (см .рис.3.6, в), равен МПа·м ½:



К = √π/2σ√, (3.7)



где σ - среднее напряжение в ослабленном или в неослабленном се-чении на некотором расстоянии от трещины.

Между коэффициентами К и G существуют зависимости:

G= K2/E – для плоского напряженного состояния; (3.8)

– для плоского деформированного состояния. (3.9)



Величины К и G используются для оценки свойств металла при наличии в нём трещины.

Чувствительность металла к концентрации напряжений в случае концентраторов с надрезами может также оцениваться величиной коэффициента концентрации αт, при котором широкий образец со щелевидным надрезом разрушается при напряжении, равном пределу текучести σт , определяется по формуле Нойбера:

αт = √ ασ , (3.10)



где ασ и - коэффициенты концентрации, соответственно, напряжений и деформаций.



В момент наступления разрушения в концентраторе достигается ис-тинное разрушающее напряжение σразр и разрушающая деформация разр, которые могут быть определены при одноосевом растяжении гладкого об-разца. Средние напряжения и деформации, соответственно, равны σт и т = σт / Е; тогда = разр/ т и ασ = σ разр / σт. Подставляя эти значения в формулу Нойбера, получим:



. (3.11)



В качестве характеристики напряженно-деформированного состояния ис-пользуют также понятие раскрытия вершины концентратора δ. Первоначально оно применялось к концентраторам с ρ ≠ 0 и означало увеличение ав основании выреза (рис.3.7, а), определяемое как разность А1В1 после нагружения и АВ до нагружения :

δ = А1В1 – АВ. (3.12 )

Затем это понятие было перенесено на трещины (рис.3.7,б), но при этом довольно сложно точно определить величину раскрытия трещины. В настоящее время за критерий δ используется интеграл упругопластических деформаций  на длине СD (рис.3.7, в).

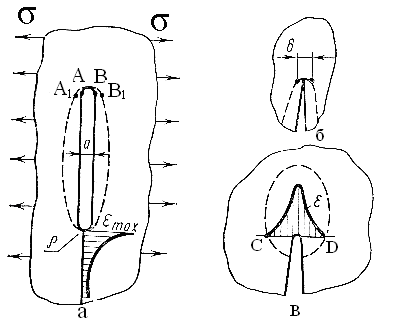
К деформационным критериям относится также критерий динамического раскрытия трещины при ее быстром распространении в условиях плоского напряженного состояния. В листовых металлах зона пластической деформации при разрушении значительно больше толщины металла.



По существу применительно к листовым металлам деформационный критерий раскрытия трещины представляет интеграл поперечных пласти-ческих деформаций упл, возникающих в процессе распространения трещины слева и справа от нее (рис. 3.8).



где 2bпл – размер ширины зоны пластических деформаций.



а - изменение расстояния между точками А и В;

б - раскрытие конца трещины;

в - интеграл упругопластических деформаций

Рисунок 3.7 - Разные случаи определения величины

раскрытия вершины трещины

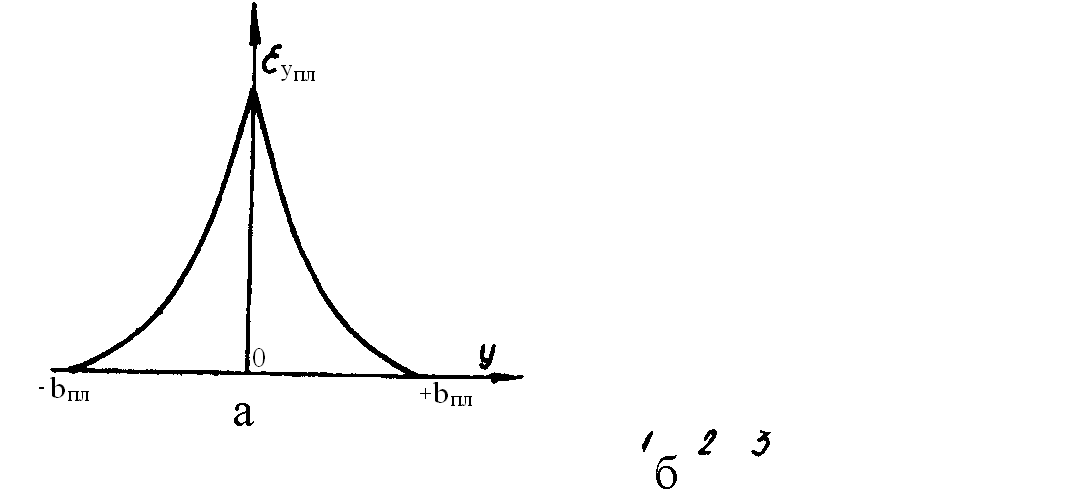
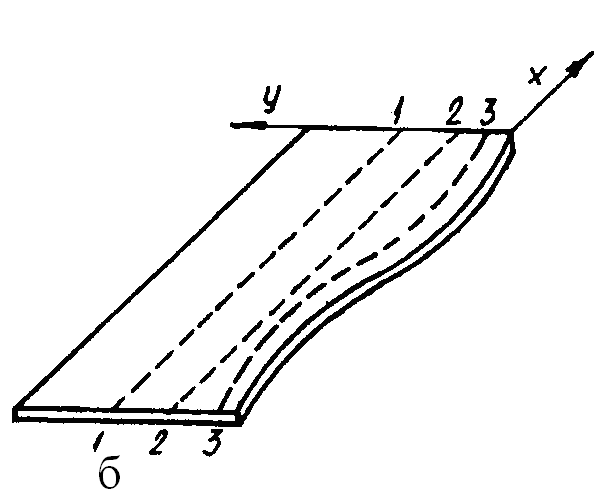
 

Рисунок 3.8 - Схема продольных (а) и поперечных (б) пластических

деформаций возле края разрыва

Для случаев деформированного состояния металла вблизи острых надрезов и трещин за пределами упругости используется коэффициент интенсивности деформаций V, м 1/2, который в простом случае концентратора с параллельными гранями при α = 0 вычисляется по формуле

V = max = ср. . (3.13)



Тема 4 Характеристика сопротивляемости металла разрушению

в присутствии концентраторов

4.1 Критерии оценки сопротивляемости металла образованию трещин.

Наиболее распространенной характеристикой оценки прочности металла, сварного соединения или детали в присутствии концентратора является среднее разрушающее напряжение σср.р, определяемое при растяжении или срезе отношением разрушающей силы Рр  к площади ослабленного сечения или разрушающего момента Мр  к моменту сопротивления W при изгибе. Однако оценка свойств только по разрушающему напряжению может не выявить отрицательное влияние концентратора, пока он не превысит некоторого значения.

В некоторых случаях необходимо определить сопротивляемость метал-ла разрушению, то есть образованию трещин. Эта сопротивляемость оцени-вается тремя показателями:

силой Рр или моментом при образовании трещины Мр;

упругопластической деформацией металла в сечении, достигаемой к моменту образования трещины ср. р;

работой, совершаемой на стадии упругопластической деформации до появления трещин, Аз.

Оценка несущей способности элемента или образца по среднему разрушающему напряжению σср. р весьма распространена:

σср.р  **=** Мр / W. (4.1)



Однако оценка свойств металла только по σср. р недостаточна. Необходима дополнительная оценка свойств конструкционных элементов по средней упругопластической деформации сечения, достигаемой к моменту появления трещины.

Точное определение упругопластических деформаций расчетным пу-тем затруднено из-за недостаточного развития практических методов. Поэ-тому используются экспериментальные приближенные методы, позволяю-щие давать оценку степени опасности тех или иных типов концентраторов в конкретных сварных соединениях.

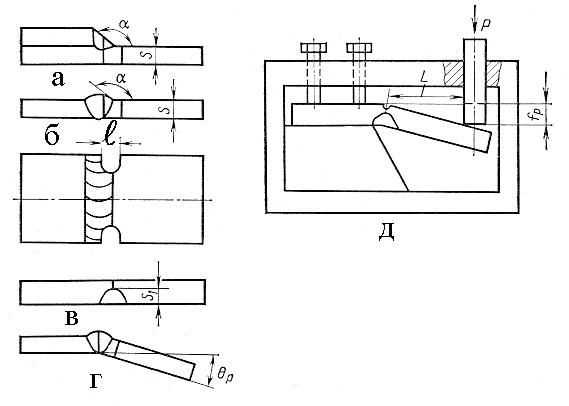
Оценку по пластичности ср. р применяют и при испытаниях на изгиб стыковых и нахлёсточных сварных соединений (рис.4.1, а, б).

Образцы из этих соединений, имеющие ослабление для сосредоточения деформации вблизи линии сплавления, устанавливаются в приспособление (рис.4.1, в) для их консольного изгиба и нагружаются до появления трещины по линии сплавления.



При испытаниях фиксируется угол р – угол поворота в радианах (рис.4.1, г), при котором образовалась трещина и состоялось разрушение. Приближённо определяется средняя разрушающая пластическая деформация ср. р в ослабленном концентратором сечении.





а - образец нахлёсточного соединения;

б - образец стыкового соединения с полным проваром;

в - образец стыкового соединения с непроваром;

г - образец после испытаний;

Д - устройство для испытания

Рисунок 4.1 – Определение εср.р во время испытания

сварных соединений на изгиб

В образцах с непроваром из низкоуглеродистых и низколегированных сталей (см.рис.4.1, в) по найденному значению р определяют ср. р  по формуле



, (4.2)



а также вычисляют критический коэффициент интенсивности деформаций (приведенную деформацию):

**.**



В образцах с полным проваром **,** (4.3)



где S – толщина металла; – ширина ослабления образца.



При = S средняя разрушающая деформация (4.4)



Показатель пластичности ср. р характеризует не только пластические свойства металла, но также влияние на пластическую деформацию различных параметров сварного соединения (радиуса концентратора, угла перехода α от шва к основному металлу, толщины металла или величины непровара S1), а также и механические неоднородности, вызванные термическим и деформационным циклом сварки.

Распространена оценка свойств металла по работе, затрачиваемой на пластическую деформацию образцов с концентраторами. В данном случае определяется работа при упругопластической деформации некоторого объема металла, примыкающего к сечению с концентратором.

Для определения работы образования трещины Аз используют образцы 10х10х55 мм с односторонним надрезом 2 мм. На них действует сила Р, измеряется прогиб f и строится диаграмма (рис. 4.2).

Площадь ОАВ пропорциональна работе изгиба образца до появления трещины; площадь АВС пропорциональна упругой энергии, накопленной в обра-це к началу его разрушения; площадь, которая осталась, АСД характеризует работу Ар,затрачиваемую на распространение трещины по телу образца.

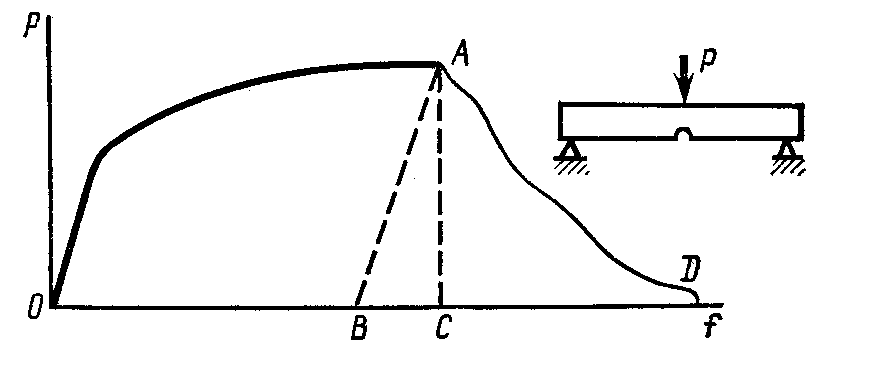


Рисунок 4.2 – Определение работы зарождения Аз и работы распространения трещины Ар при изгибе надрезанного образца

**4.2 Критическое равновесие трещины**

Рассмотрим бесконечную пластину единичной толщины с центральной поперечной трещиной 2, на которую действуют напряжения σ (рис.4.3). Края пластины неподвижны. Необходимо определить величину напряжения, при котором трещина приходит в движение, и энергию W, необходимую для её распространения.

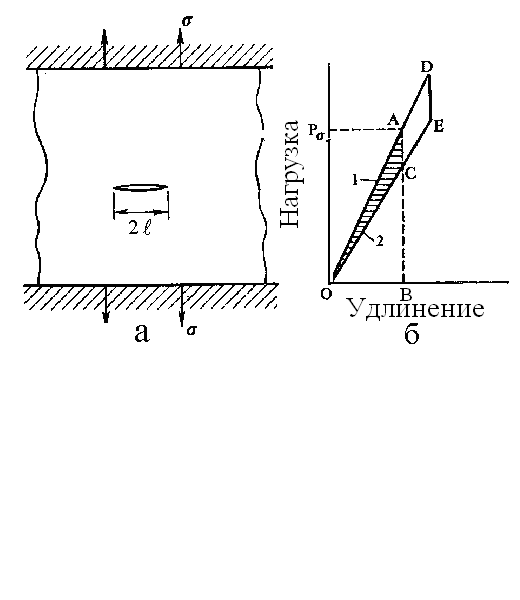


Запасенная в пластине упругая энергия представлена площадью треуголь- ника ОАВ (рис.4.3,б). Если длина трещины увеличится на величину ∆, то жесткость пластины уменьшится (линия ОС), т.е. нагрузка неско лько уменьшится, так как края пластины неподвижны.



Таким образом, запасённая в пластине упругая энергия уменьшится до величины, равной площади треугольника ОСВ, то есть увеличение длины трещины от до + ∆ высвободит упругую энергию, равную площади треугольника ОАС. Если пластина нагружается до более высокого напряжения, то при увеличении длины трещины на величину ∆ высвободится большая энергия. Треугольник ОДЕ представляет собой энергию, выделенную при распространении трещины.





а - пластина с трещиной и с неподвижными краями;

б– энергия упругих деформаций пластины с трещиной длиной (1) и + ∆ (2)



Рисунок 4.3 – Растянутая пластина с трещиной длиной 2



Для того, чтобы трещина смогла продвинуться на величину ∆ (рис.4.3), необходимо разрушить межатомные связи на длине ∆, для чего необходимо затратить определенную работу U. Напряженный металл в единице объема при одноосном растяжении напряжениями σ содержит потенциальную энергию



**.** (4.5)



На рисунке 4.4 приведена графическая зависимость критического напряжения от критической длины трещины: . В точке Ао, которая лежит ниже кривой, действуют напряжения σо. Тогда любые случайные изменения в напряжениях σ+Δσ или в длине трещины +Δ не вызовут рост трещины, так как не будет выполняться энергетическое условие G = W и выделенной энергии G будет недостаточно, чтобы компенсировать затраты работы на разрушение. При возрастании напряжения до σ1 точка А1 окажется на кривой **.** Здесь теоретически возможен медленный рост трещины с движением точки А1 вниз кривой так, чтобы увеличению длины ∆строго соответствовало снижение напряжений σ - Δσ и выполнялось бы энергетическое условие dЭ + dА = 0 и трещина развивалась бы монотонно. Но это равновесие неустойчиво. Обычно в этих условиях нагрузка и напряжение σ1 остаются на постоянном уровне. Точка А1 двигается по горизонтали в направлении точки А3, выделяемая энергия dЭ превосходит затрачиваемую работу dА и возникает процесс разрушения. . Увеличение напряжений σ1 + Δσ требует даже "закрытия" трещины на длину ∆, чтобы точка оставалась на кривой и выполнялось энергетическое равновесие.

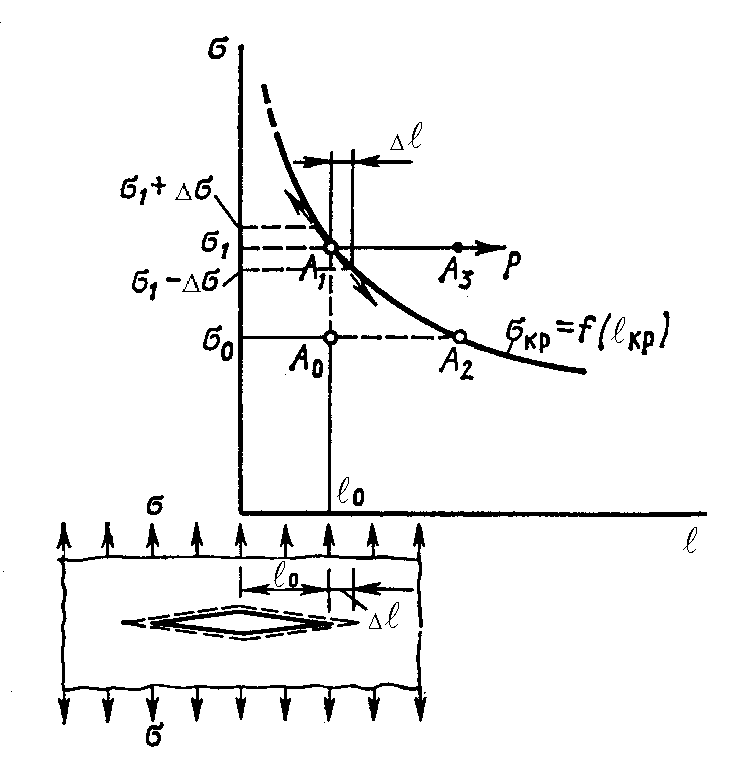


Рисунок 4.4 – Кривая критического равновесия трещины

Но так как это невозможно, то возникает лавинообразное распростра-нение трещины. Аналогичная ситуация возникает, если за счет подрастания трещины система переходит из точки А0 в точку А2 при σ0 = const. Таким образом, данная кривая определяет момент возникновения неустойчивости в равновесии трещины, когда любые случайные изменения напряжения или длины трещины вызовут ее рост, называется кривой А. Гриффитса. Крити-ческое равновесие трещины определяется критическим коэффициентом ин-тенсивности напряжений К, так как он знаменует потерю устойчивости рав-новесия системы.

**4.3 Энергетическое условие распространения трещины (теорема А.Гриффитса).**

А. Гриффитс рассмотрел условия развития единичной трещины в пластине при ее растяжении и хрупком разрушении (см.рис.4.5,а), связанном с возникновением в материале трещин, вызванных дефектами в структуре материала, состоянием поверхности детали вследствие обработки или коррозии, действием повторно-статических нагрузок. Трещины, которые возникли, сначала развиваются во времени медленно, а затем - быстро. Развитие трещин со временем может происходить и при постоянной нагрузке.

Согласно закону сохранения энергии А. Гриффитс определил, что при растяжении бесконечной пластины длиной 2 трещина начнет распространяться после того, как напряжение σ достигнет критического уровня, при котором соблюдается равенство прироста работы, поглощаемой на разрушение металла, и прироста энергии упругих деформаций пластины, освобождающейся при подрастании трещины (энергетическое условие для идеализированной схемы разрушения). То есть dU +dА = 0.



Если в сплошной растянутой пластине единичной толщины образовать трещину длиной 2 (рис.4.5), то потенциальная энергия деформации пластины уменьшится на



(4.6)



и покажет разность потенциальной энергии деформации пластины без трещины и с трещиной в виде эллипса.

Появление новых поверхностей сопровождается затратами энергии

**,** (4.7)



гдеUпов – энергия, затрачиваемая на разрушение металла (распрост-ранение трещины).

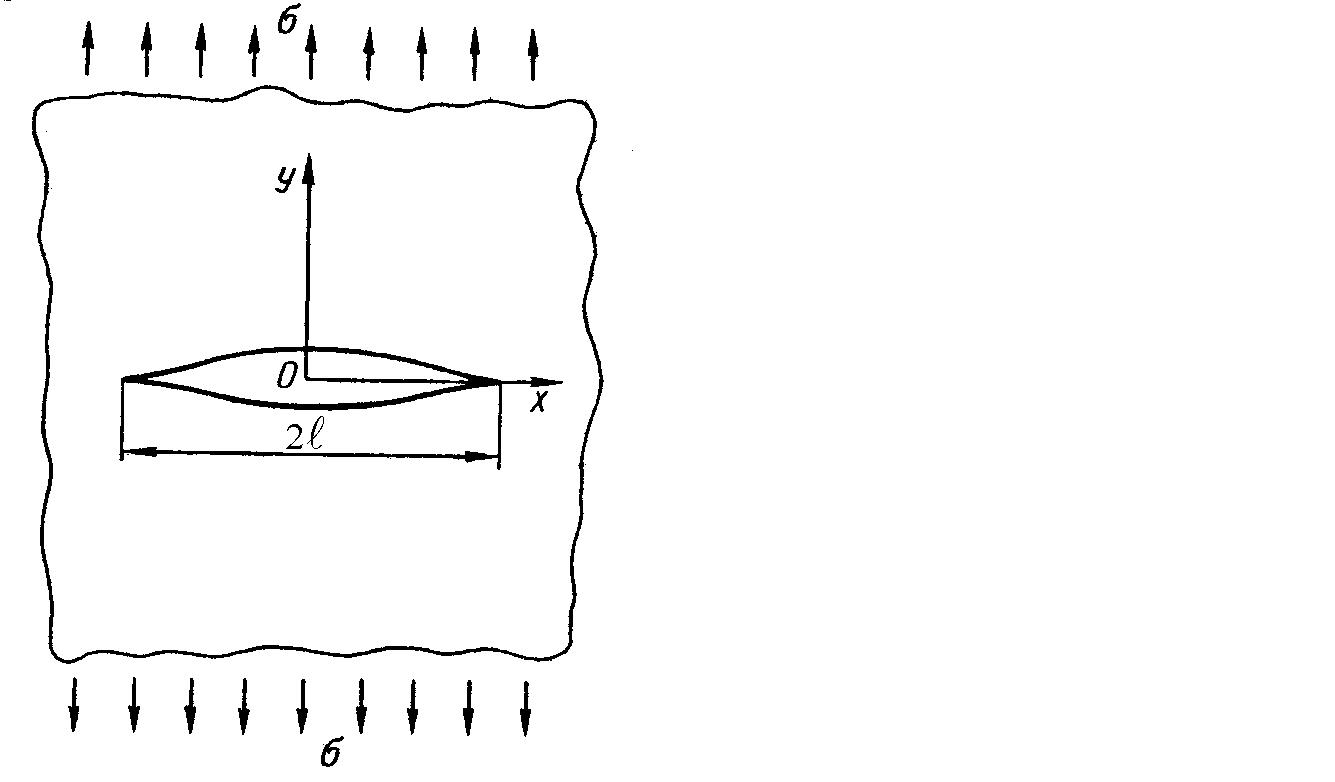


Рисунок 4.5 – Растянутая пластина с трещиной длиной 2



Тогда суммарное изменение энергии составит:

**.** (4.8)



Если энергии освобождается больше, чем поглощается, то трещина самопроизвольно приходит в движение без увеличения напряжения. Это отвечает моменту равенства приращений высвобождаемой и затраченной энергии, то есть

**.**



Дифференцируя уравнение (4.14) по , получим:



(4.9)



или **.**



Отсюда: критическое напряжение для плоского напряженного состояния

; (4.10)



критическая длина трещины

; (4.11)



критическая энергия

(4.12)



Таким образом, достаточно зарегистрировать значение напряжения в момент начала движения трещины, чтобы вычислить по формуле характе-ристику металла W.

Характер условия равновесия поглощаемой и высвобождаемой энергии определяется второй производной:

.



Суть теоремы - максимальное разрушающее напряжение имеет место не при возникновении трещины, а после достижения ею некоторого критического размера. Существуют безопасные трещины, которые, однако, могут перейти в опасные за счет хрупкости материала, снижения температуры, старения мате-риала, динамического действия нагрузки.

Опыты показывают, что пластическая деформация развивается вблизи вершины трещины в сравнительно тонком слое, окаймляющем ее, зависит от многих факторов и может составлять от нескольких десятков микрон до деся-тых долей миллиметра. Э.Орван и Д.Ирвин предложили учитывать энергию пластического деформирования, введя в формулу вместо действительной удельной поверхностной энергии W эффективную поверхностную энергию:

Wэф = W + Wр, (4.13)

где Wр – работа пластического деформирования при образовании единицы поверхности.

Тогда условие квазихрупкого разрушения металлов принимает вид

(4.14)



Опыты показывают, что для сталей Wр = 103W, поэтому в формуле (4.13) можно пренебречь значением W и предположить, что Wэф = Wр. Обозначив

Wэф = W+WР = G, Д. Ирвин показал, что:

**-** для плоского напряженного состояния (4.15)



Для плоской деформации (если z = 0) вместо модуля упругости Е подставляется Е/(1-μ2) и формула имеет вид

(4.16)



В точке нестабильности скорость высвобождения упругой энергии G (которую также называют движущей силой распространения трещины) достигает критической величины и определяется как Gс, после чего про-исходит разрушение (распространение трещины при неизменном напряжении).

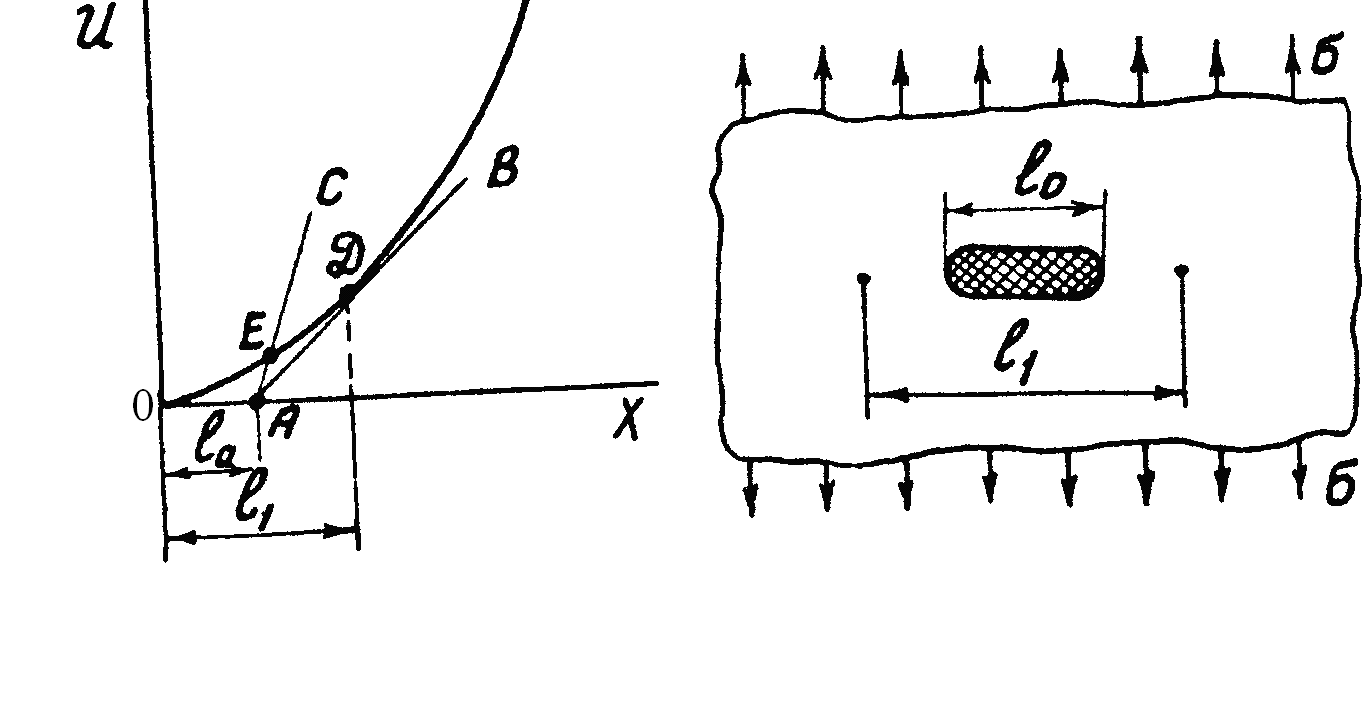
Не следует смешивать начало движения трещины, которое связано с разрушением частиц металла по мере роста нагрузки и зоны пластических деформаций у конца трещины, с началом движения трещины по энергети-ческому условию, если напряжения в образце достигают максимально воз-можного для конкретного образца значения.

**4.4 Распространение трещины при наличии в материале**

**хрупкой зоны**

Рассмотрим условие распространения трещины в случае наличия в материале хрупкой зоны 0 (рис.4.6).





*а б*

Рисунок 4.6 - Схема, иллюстрирующая высвобождение и поглощение

энергии при движении трещины в металле с хрупкой зоной 0



Трещина, распространяясь по хрупкой зоне, затрачивает на свое рас-пространение ничтожно малое количество энергии. Освобождаемая избы-точная энергия накапливается в виде кинетической энергии движущихся частиц металла. Затем эта энергия расходуется на продвижение трещины в область металла с высокими пластическими свойствами. Размеры трещины достигают критических величин, после чего разрушение охватывает большие участки. Кривая 1– высвобождаемая энергия при движении трещины. Лома-ная линия ОАВ – затраты энергии на пластическую деформацию металла при движении трещины. На участке 0 они близки к нулю. На участке АВ – линейный рост затрат энергии на движение трещины по вязкому участку. Однако линия АВ не пересекает кривую 1- это означает, что количество освобождающейся энергии больше израсходованной и трещина будет дви-гаться без остановки. Если металл за пределами зоны 0 имеет очень вы-сокие пластические свойства (линия АС), то трещина может остановиться в точке Е (рис. 4.6, а). Допустим, что в пластине (рис.4.6, б) движение трещины идет без затрат энергии и трещина может распространиться до размера 1. Полная энергия, которая освободится на участке 1  –а затраты энергии на ее распространение



Uр= (1-0) G,



где G – энергия, затрачиваемая на единицу длины трещины в вязком метал-ле.

Пусть 1 является критической длиной для данного значения G. Тогда (4.17)



откуда , а



Подставляя значения 1 иG в выражение (4.17), получим:



откуда . (4.18)



Таким образом, достаточно иметь хрупкую зону 0, по длине в два раза меньшую критической длины трещины 1, чтобы разрушение, воз-никнув, не прекратилось, а развивалось бы как нестабильное. Если бы была трещина длиной 0, то она вела бы себя как стабильная и не развивалась бы, так как критический размер 1 в два раза больше, чем 0.



**4.5 Эквивалентная длина трещины**

Хотя дефекты и концентраторы у сварных соединений разнообразны, возможна их некоторая схематизация и унификация. Неправильной формы трещины, непровары, несплавления, шлаковые и оксидные включения, цепочки близко расположенных пор, подрезы, царапины, места перехода от наплавленного металла к основному могут быть сведены к некоторой трещине эквивалентной длины экв, если допустить возможность образования у острия дефекта трещины небольшой длины Δ, порядка десятых долей миллиметра.



На рис.4.7,б показан растянутый образец с вырезом, вершины которого имеют: r = 0 и угол α.

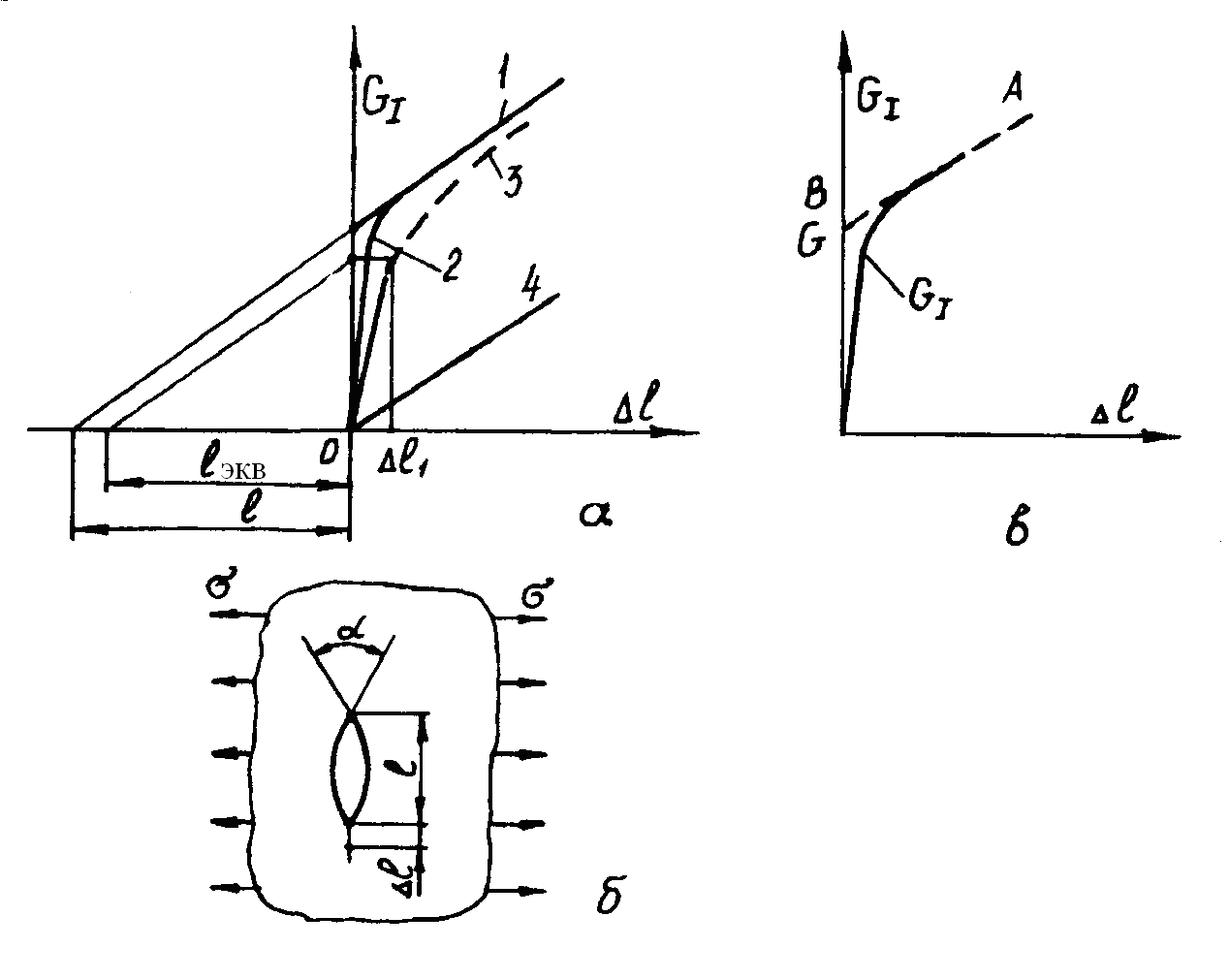


Рисунок 4.7 – Зависимость изменения освобождаемой энергии G1

при подрастании трещины на Δ1



Прямая 1 (рис. 4.7, а) показывает рост трещины в случае, если α=0 (обычная трещина). Кривая 2 отвечает подрастанию трещины от концентратора с α ≤ 30…50°. Она, при сравнительно малых Δ, сливается с прямой 1, что указывает на практически одинаковое выделение энергии в таких концентраторах и у трещины длиной . При более значительных углах α изменение энергии G отвечает ходу кривой 3. При фиксированном значении Δ1 подведенная энергия соответствует Gэ, что, в свою очередь, отвечает некоторой эквивалентной длине трещины экв(см.рис. 4.7,а). Кривая 4 отвечает образованию трещины в целой растянутой пластине.



Таким образом, оценка опасности концентраторов может быть проведена также по количеству высвобождающейся энергии с появлением в вершине концентратора небольшой по длине трещины, которая эквивалентна трещине при том же напряжении σср:

– для плоской деформации – **;** (4.19)



– для плоского напряженного состояния – (4.20)



По критерию экв можно сравнить разные по характеру концентраторы, если радиус r в них маленький. Для углов (см.рис.4.7,б) не больше 130...140° существует приближенный метод – построение кривой G1 до уровня Δ1 (рис. 4.7, в) с последующей экстраполяцией этого прямолинейного участка от А до В с целью определения Gэ и расчетом экв по формулам (4.19) и( 4.20). Таким образом, в случае подрастания трещины на малую величину Δ1 полная высвобождаемая энергия пропорциональна Δ1, т.е. пропорциональна энергии, накопленной возле вершины трещины.



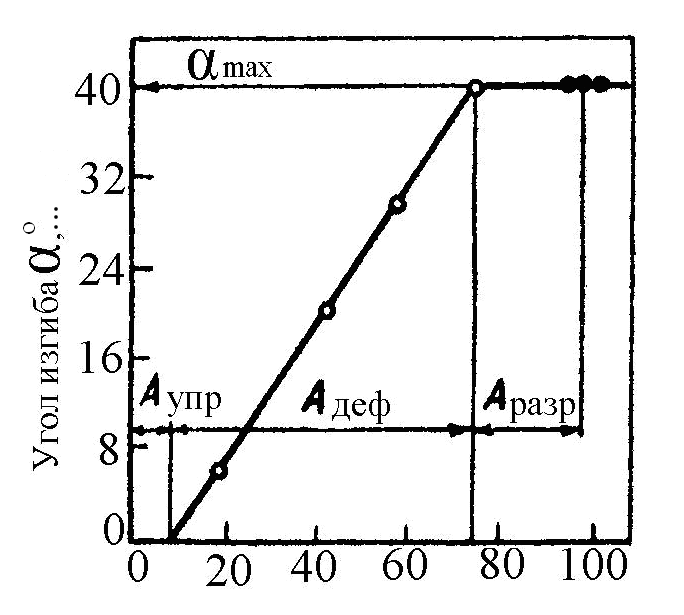
**4.6 Энергетические методы определения сопротивляемости**

**металла образованию и распространению трещины**

Большинство методов, позволяющих определить работу на стадии об-разования трещины Аз, являются комплексными.

**Метод Л. С. Лившица и А. С. Рахманова**

При данном методе испытывается серия надрезанных одинаковых образцов с увеличением энергии удара на каждом последующем образце и определяется угол загиба образца (рис. 4.8).



Поглощенная энергия А , Дж

О – неразрушенные образцы; • – полностью разрушенные образцы

Рисунок 4.8 – Схема определения составляющих работы

ударного изгиба

Величину энергии увеличивают до уровня, при котором появляется трещина. Часть образцов разрушают полностью, определяя максимальный угол загиба αmax. По результатам испытаний строится график, из которого можно определить суммарную работу до появления трещины (Аупр + Адеф), а также работу на распространение трещины (Ар).

Метод Н. Кано и Е. Имбембо

По диаграмме растяжения определяется работа до появления трещины и работа, затрачиваемая на распространение трещины в образце (рис. 4.9).

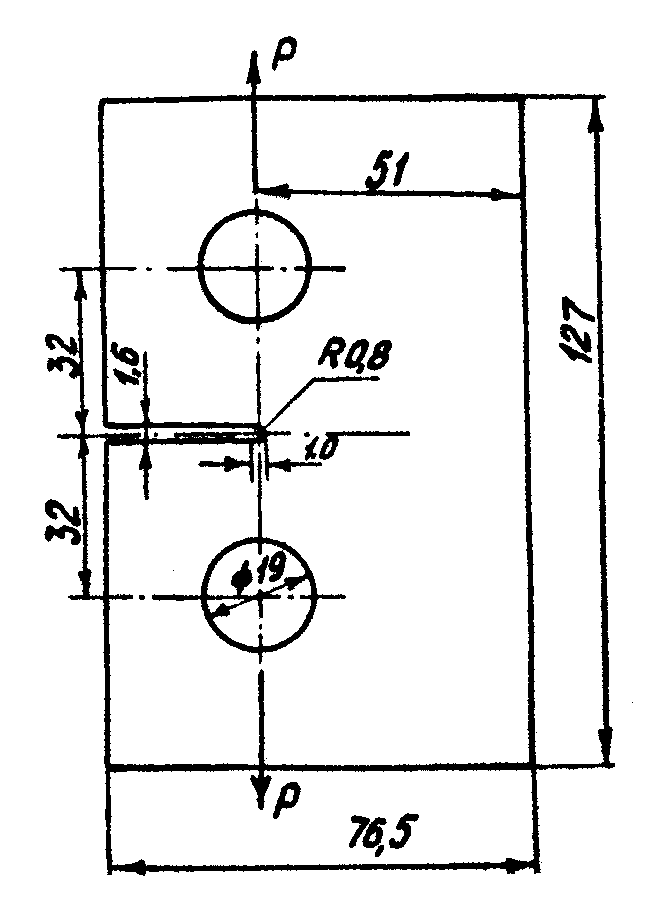


Рисунок 4.9 – Форма и размер образца Н.Кано и Е.Имбембо

Распределение работы на составляющие возможно также при использо-вании образцов с разными радиусами надреза (методы А.П.Гуляева и В.С.Ивановой).

**Метод А. П. Гуляева**

По данному методу серия образцов с разными радиусами надреза (рис.4.10) испытывается на ударный изгиб.

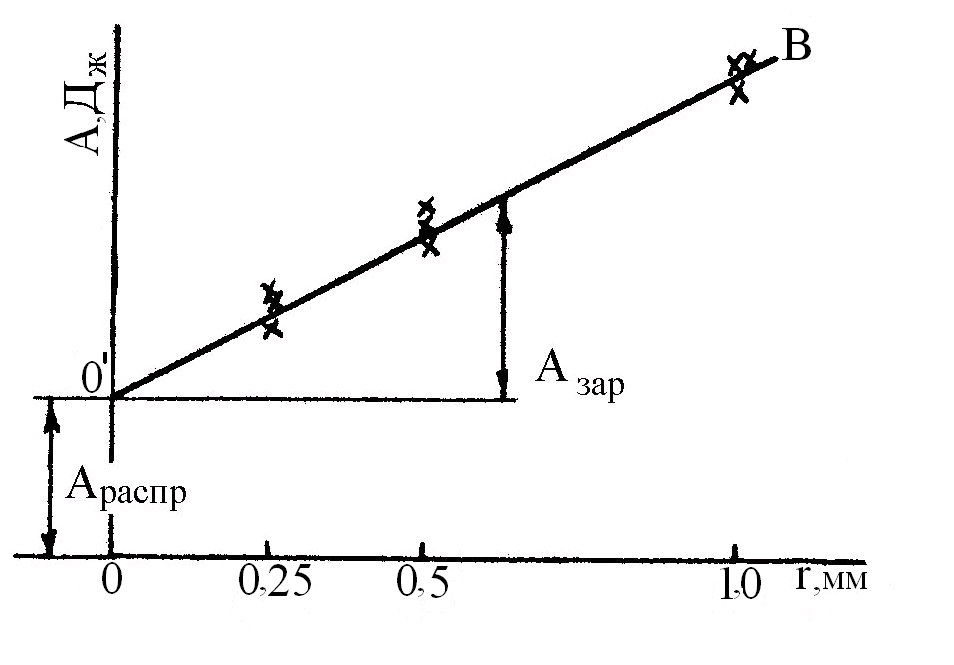


Рисунок 4.10 – Обработка результатов испытаний надрезанных

образцов на ударный изгиб

По результатам испытаний, при которых регистрируется полная работа А, поглощенная образцом при разрушении, проводится прямая О'В и опреде-ляется:

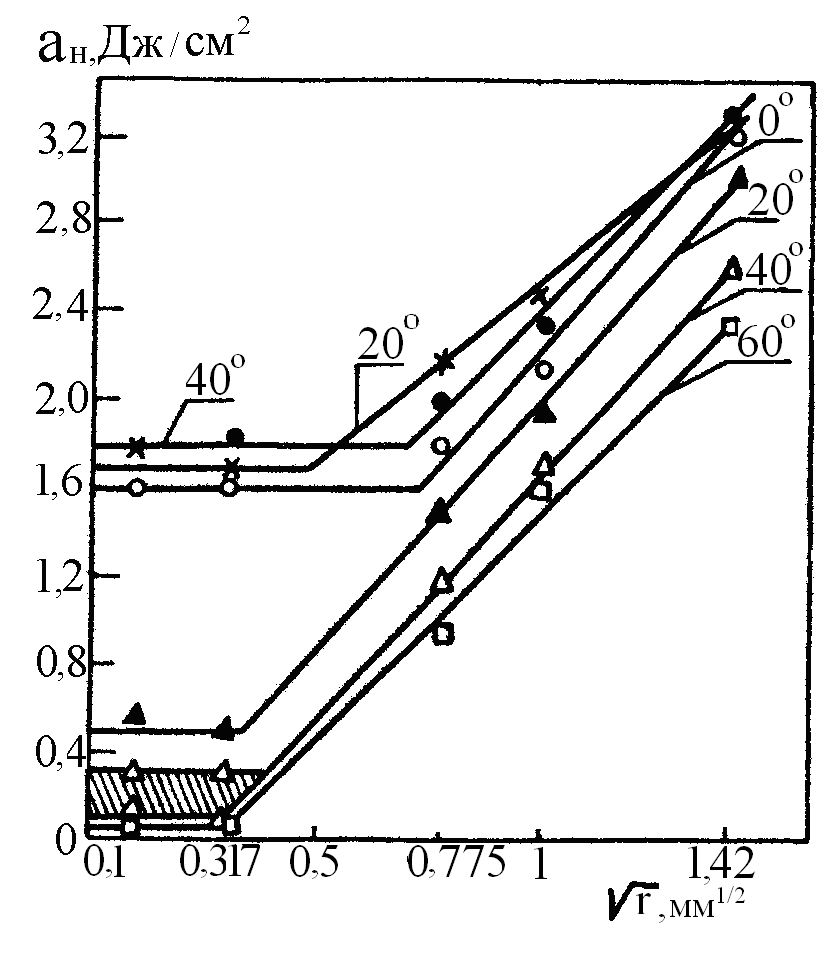
Азар - работа, идущая на изгиб образца до появления трещины.

Араспр - работа, идущая на распространение трещины в образце.

**Метод В.С.Ивановой**

Строится график (рис.4.11) зависимости ударной вязкости не от радиуса надреза r, а от величины . Предполагается, что при некотором малом радиусе надреза работа изгиба образца становится крайне малой и вся энергия тратится на распространение трещины. Отрезок по оси ординат между горизонтальным и наклонным участками ломаной линии выражает работу образования трещины Аз, зависящую от геометрии надреза.







**⏶, ○** – острый надрез; **●,** х – по радиусу надреза

Рисунок 4.11 – Распределение ударной вязкости на составляющие для стали 15Г2 при разных отрицательных температурах испытания

**4.7 Энергетические методы определения распространения трещин**

Для оценки сопротивляемости металлана стадии распространения трещины используются разнообразные качественные и количественные характеристики. Для определения Кс (К1с), Gс(G1с), δс используются образцы с предварительно созданной трещиной. Чем выше вязкость металла и ниже его предел текучести σт, тем более крупные требуются образцы для конкретного определения указанных выше характеристик. Среди качественных характеристик более объективными являются энергетические.

Существует много методов определения работы распространения трещины на образцах относительно малых размеров (10х10х55мм). Общим недостатком этих методов являются игнорирование влияния толщины металла на работу распространения трещины и использование для испытаний пластических (вязких) металлов таких по размерам образцов, внутри которых не может разместиться зона пластических деформаций, образующаяся в конце трещины в крупном образце. Поэтому эти методы должны рассматриваться как средство для сравнительных испытаний металлов. При хрупких разрушениях использование этих методов затруднено. Ниже приводятся методы определения работы распространения трещины, основанные на использовании образцов, в которых работа зарождения трещины сведена до минимума за счет высокой остроты над-реза.



Метод Б.А. Дроздовского**.** В образце 10х10 и r = 3 мм заранее создаётся усталостная трещина. Образец разрушается на маятниковом копре. Регистрируемая работа принимается за работу распространения трещины.

Метод Отани. Предварительным ударом на копре в образце создают тре-щину некоторой глубины, которую окрашивают специальным раствором. Следующим ударом образец разрушается полностью, а определенная работа является искомой величиной.

Метод Шарпи*.* В образце 10 х 10 х 55мм создается V-образный надрез, который снижает работу зарождения трещины, а определенная работа принимается за работу распространения трещины.

Метод К. Хартбауэра и Г.Орнера**.** Для исключения работы пластичес-кой деформации в зонах сдвига 3(рис.4.12) используют образцы Шарпи с толщиной 10 и 5мм. Полагают, что работа в зонах сдвига у образцов тол-щиной 10 и 5мм одинакова. Тогда разность работ, отнесенная к разности площадей, даёт работу распространения трещины без зоны сдвига Ар

(4.21)



***а б***

Рисунок 4.12 – Образцы шириной 10мм(а) и 5 мм(б) с надрезом Шарпи (1), усталостной трещиной (2) и зоной сдвига (3)

**Метод В.Г. Кудрявцева и В.С. Ивановой**

По данному методу сопротивляемость распространению трещины определяется на крупных образцах с диаметром 8 мм и с V-образным кольцевым надрезом, который уменьшает площадь сечения образца вдвое; угол надреза 45 и 60°, радиус надреза не более 0,03мм. Образцы испытывают на ударный осевой разрыв и определяют затрачиваемую удельную работу на распространение трещины.

**Метод тепловой волны**

При распространении трещины работа расходуется на пластическую деформацию (95%), которая превращается в тепло, и образование в пластично деформированном слое остаточных напряжений (5%). При распространении трещины выделяется тепло, которое, распространяясь, вызовет в точке 1 изменение температуры (рис.4.13).

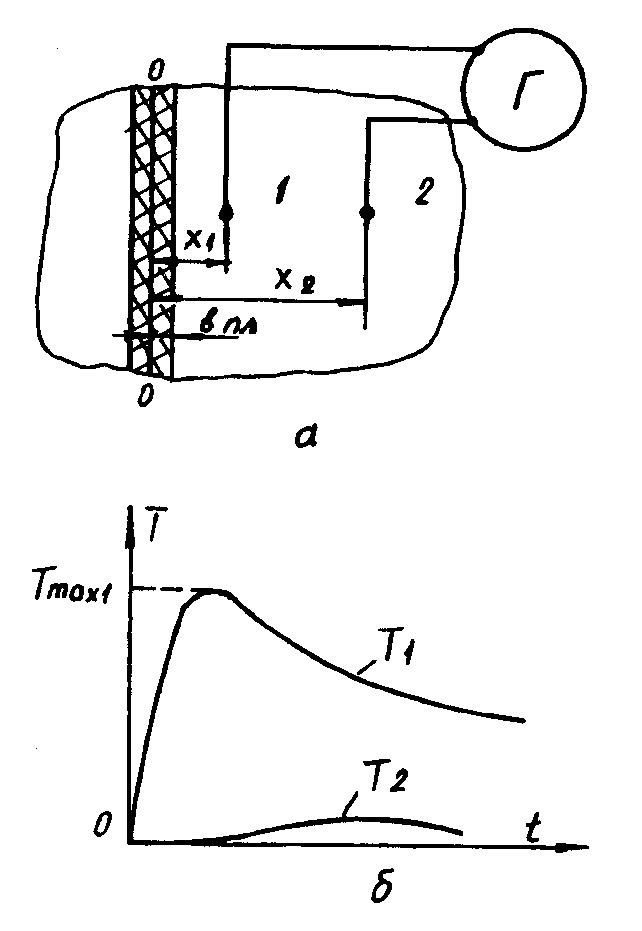
Зная Х и регистрируя Тmах, можно определить работу разрушения по уравнению

,(4.22)



где сρ – объемная теплоемкость.

На некотором расстоянии от места прохождения трещины заранее на поверхности металла или в глубоких тонких отверстиях приваривают электроды в виде проволок диаметром 0,2 мм, которые образуют термопары (рис. 4.13,а). Спай 1 должен располагаться на расстоянии Х = 3...15 мм от трещины, а спай 2 – на достаточном расстоянии, чтобы, когда температура в точке 1 достигнет максимума, температура в точке 2 изменялась бы незначительно.



а - схема расположения электродов в зоне предполагаемого движения трещины;

б – термический цикл в точке 1

Рисунок 4.13 – Определение работы распространения трещины путем

регистрации Тmax по методу тепловой волны

Для оценки сопротивляемости металла распространению трещины используют также разные неэнергетические характеристики: волокнистость излома; скорость распространения трещины, которые могут давать сравнительную оценку способности металла сопротивляться распространению трещины (при изменении температуры или другого фактора). Эти характеристики косвенно связаны с работой, которая расходуется на распространение трещины в металле.

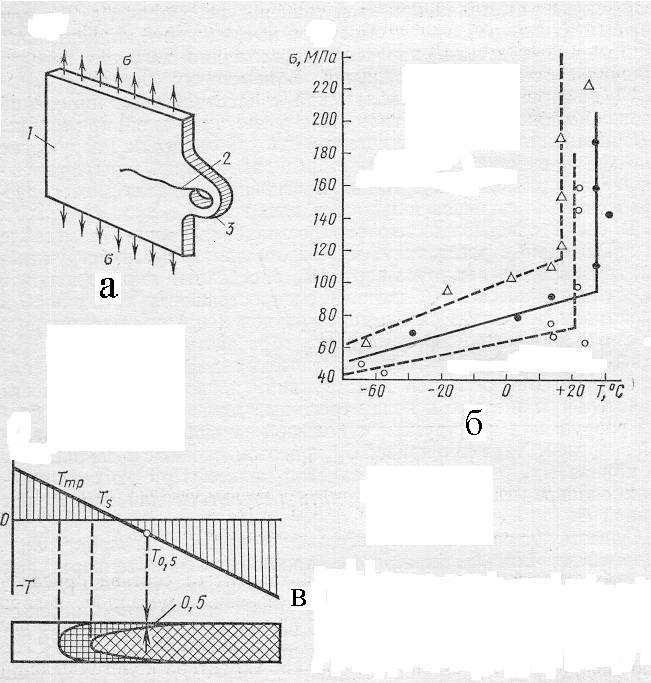
**4.8 Неэнергетические характеристики определения распространения трещин**

**Метод Т. Робертсона**

Используются образцы (рис. 4.14,а) большой ширины (несколько сотен миллиметров).

Перед разрушением образец с одной стороны (1) подогревается горел-кой, а с другой (2) охлаждается жидким азотом. Разные образцы подвергают ис-пытанию при разных напряжениях. К образцу сначала прикладывают растяги-вающее напряжение, а затем наносят удар пулей для создания движущейся тре-щины. В некоторой зоне с известной температурой трещина останавливается. Строится диаграмма, точки на которой соответствуют температуре остановки трещины (рис.4.14,б). При более низких напряжениях или при более высоких температурах трещина останавливается. Разные стали имеют разные значения критической температуры Ткр и напряжения σкр. Наиболее высокой температуре отвечает точка окончания зоны разрушения Ттр(рис.4.14,в).

В качестве характеристики также может быть взята температура Т0,5 в точке, где ширина зоны сдвига достигает 0,5мм и температура Тs - точка окончания зоны хрупкого излома, то есть критические температуры необхо-димо рассматривать как относительные.



а – образец (1 - место нагревания; 2 – место охлаждения;

3 – место нанесения удара );

б – кривые зависимости между температурой и напряжением

для трёх различных сталей;

в – характер излома

Рисунок 4.14 – Испытание по методу Т. Робертсона

Так как фронт трещины не всегда является прямолинейным, то имеется неопределенность в определении величины температуры остановки трещины, поэтому применяется иная обработка результатов (по характеру излома). Имеется участок совершенно хрупкого излома (косая штриховка), затем появляется зона сдвига (прямая штриховка), которая увеличивает свою ширину по мере перехода в область высоких температур (рис.4.14, в). При температуре выше Тs хрупкие участки исчезают полностью. В средней части листа (по толщине) трещина проходит до точки Ттр.

**Метод института Баттеля**

Подвергают испытанию на ударный изгиб образцы различной толщины размером 305 х 76, которые имеют по толщине надрез глубиной около 5мм. В области переходных температур в зоне растяжения имеется участок кристаллического излома (хрупкая зона), а другая часть образца – вязкий излом. За критерии берутся разные температуры (например, температура, при которой 50% площади разрушения имеет кристаллический излом или хрупкая зона достигает середины ширины образца, и др.). Волокнистость излома В определяется по формуле

(4.23)



где Fв – площадь вязкого излома;

Fхр – площадь хрупкого излома.

Установлено, что характер излома зависит от объема металла, вовлеченного в пластическую деформацию во время разрушения. Между работой, затраченной на распространение трещины и площадью волокнистых участков из-лома имеется приблизительно пропорциональная зависимость. Уменьшение площади волокнистых участков в изломе при снижении температуры свидетельствует об уменьшении работы разрушения и снижении сопротивляемости металла разрушению. Характеристика волокнистости излома используется для определения критических температур (например, Ткр.1, при которой содержится 50% волокнистого излома).

**Скорость движения трещины**

Установлено, что хрупким разрушениям отвечают высокие скорости рас- пространения трещины, а вязким – малые. Метод предусматривает наклейку на испытываемом образце двух проволочек, интервал времени между обрывами которых позволяет приблизительно определить время продвижения трещины на участке Х и скорость (рис.4.15).

Эта характеристика особенно важна для трубопроводов. Если давле ние в них успевает понизиться до некоторого уровня, то распространение трещины остановится.

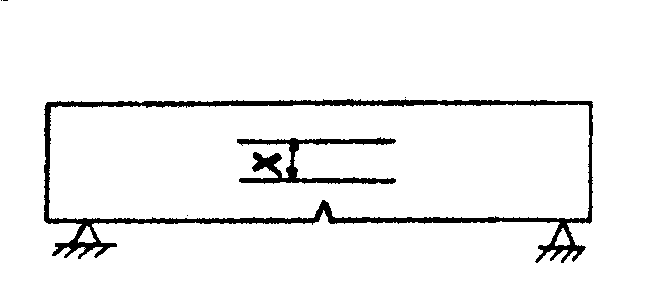


Рисунок 4.15 – Образец с проволочками, позволяющими

регистрировать скорость движения трещины

При больших скоростях движениятрещины давление в трубопроводе не успевает существенным образом снизиться к прибытию острия трещины в рассматриваемую зону. Следовательно, сохраняются высокие растягивающие напряжения, которые поддерживают распространение трещины вдоль трубы. Для трубопроводов, находящихся под давлением, это важно, так как в них важным параметром является скорость сбрасывания давления.

Хрупким разрушениям отвечают высокие скорости распространения трещин (более 500...600 м/с), полухрупким и пластичным (вязким) – 100...400 м /с и менее.

**4.9 Оценка размера пластической зоны вдоль трещины**.

Д. Ирвиным было показано, что наличие пластической зоны можно учесть, если вместо длины физической трещины 2 в расчетах использовать эффективную длину 2эф = 2 (+а), где а – поправка на пластичность.



Из рис. 4.16 следует, что напряжение σу = , возникающее непосредственно перед трещиной, будет превышать σТ на некотором расстоянии r от вершины трещины, то есть r ограничивает зону упругого напряжения. Принимая, что на границе между упругой и пластической зоной , получим: и размер зоны пластической деформации оказывается равным Наличие зоны пластической деформации определяет как бы увеличение длины трещины по сравнению с её “действительной “длиной.



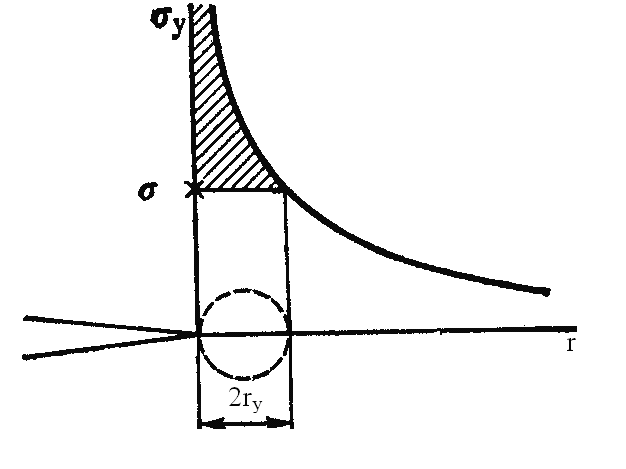


Рисунок 4.16 – Оценка размера зоны пластичности

Выражение для коэффициента интенсивности напряжений К1 с учетом решения для σу позволяет приближенно определить длину пластической зоны rт вдоль трещины. Так, при σу = σт для плоского напряженного состояния в пластине неограниченных размеров

(4.24)



или с учетом выражения :



(4.25)



Тогда половина длины трещины с учетом пластической зоны (рис.4.22):

rТ = (4.26)



С учетом размера зоны пластической деформации в пластине с коэффи-циентом интенсивности напряжений К коэффициент интенсивности напряжений Кэф определяется по уравнению, включающему эффективную длину трещины

(4.27)



К эф = = (4.28)



где - половина длины трещины.



**Тема 5. Влияние дефектов на работоспособность сварных**

**Конструкций**

**5.1 Проблема учета влияния дефектов на работоспособность**

**сварных соединений**.

Проблема влияния дефектов на прочность сварных соединений крайне сложна и многопланова. Решить ее можно, учитывая условия эксплуатации, характер дефекта и свойства металла сварного соединения. Исследования в области влияния дефектов на прочность группируются вокруг отдельных во-просов. В особые направления выделяются вопросы: а) влияния дефектов при переменных нагрузках, в условиях коррозии, при низких и высоких тем-пературах и т.д.; б) влияния трещин, непроваров, пор, сдвигов, мест перехода от наплавленного металла к основному и т.д. в зависимости от вида дефекта; в) исследования разных материалов: высокопрочных сталей, алюминиевых и титановых сплавов.

**5.2 Оценка влияния трещиноподобных дефектов по силовому и деформационному критериям**.

Под действием статической нагрузки при наличии трещин в качестве меры чувствительности (нечувствительности) к концентрации напряжений в условиях плоской деформации (как наиболее напряженному состоянию) ис-пользуется критический коэффициент интенсивности напряжений металла К1c Так как каждый металл имеет определенный уровень прочности (σт и σв) и обычно предназначен для работы при напряжениях, несколько меньших σт, то оценку нечувствительности в присутствии трещин более точно можно дать по отношению К1c/σт.  Эту величину можно рассматривать как пропор-циональную корню квадратному из длины трещины в бесконечной пластине, при которой среднее разрушающее напряжение равняется σт. Тогда

К1c/σт = σт /σт = , (5.1)



где т – длина трещины, вызывающая разрушение металла при σ= σт.



Однако не всегда толщина металла достаточна, чтобы были созданы условия плоской деформации. Но отход от плоской деформации не означает пере-ход к плоскому напряженному состоянию. В условиях неплоской деформации существует широкая гамма промежуточных напряженных состояний.

При сквозных трещинах нечувствительность металла конкретной толщины к концентрации напряжений в условиях неплоской деформации оценивается также отношением Кст/σт. При этом Кст – наименьшие при рассеянии значения критического коэффициента интенсивности напряжений металла Кс, которые определены при напряжениях, меньших σт.

При поверхностных (несквозных) трещинах оценка нечувствительности металла к концентрации напряжений для деталей большого сечения также проводится по соотношению Кст/σТ, так как условия плоской деформации здесь могут быть реализованы полностью.

Для образцов разной толщины соотношение пластических зон впереди трещины разное, в связи с чем изменяется значение энергии, затраченной на разрушение. Существует следующая зависимость характеристики трещиностойкости – коэффициента интенсивности напряжений Кс от толщины образца:



(5.2)



(5.3)



где Кс  – коэффициент интенсивности напряжений для плоского напря-женного состояния;

К1с – коэффициент интенсивности напряжений для плоской дефор-мации;

β1с – коэффициент, учитывающий переход от Кс до К1с в зависимости от толщины;

s – толщина металла.

**5.3 Чувствительность сварных соединений к концентрации напряжений**

В случае нетрещиноподобных дефектов разнообразной формы область нечувствительности металла к концентрации напряжений для конкретной толщины и конкретного сварного соединения оценивается по средним разрушающим напряжениям. Если оно составляет не менее 0,95σв, то сварное соединение считается нечувствительным к концентрации напряжений при наличии данного концентратора. На рисунке 5.1 показаны кривые изменения прочности сварных соединений с разной глубиной непровара при испытаниях их на растяжение.

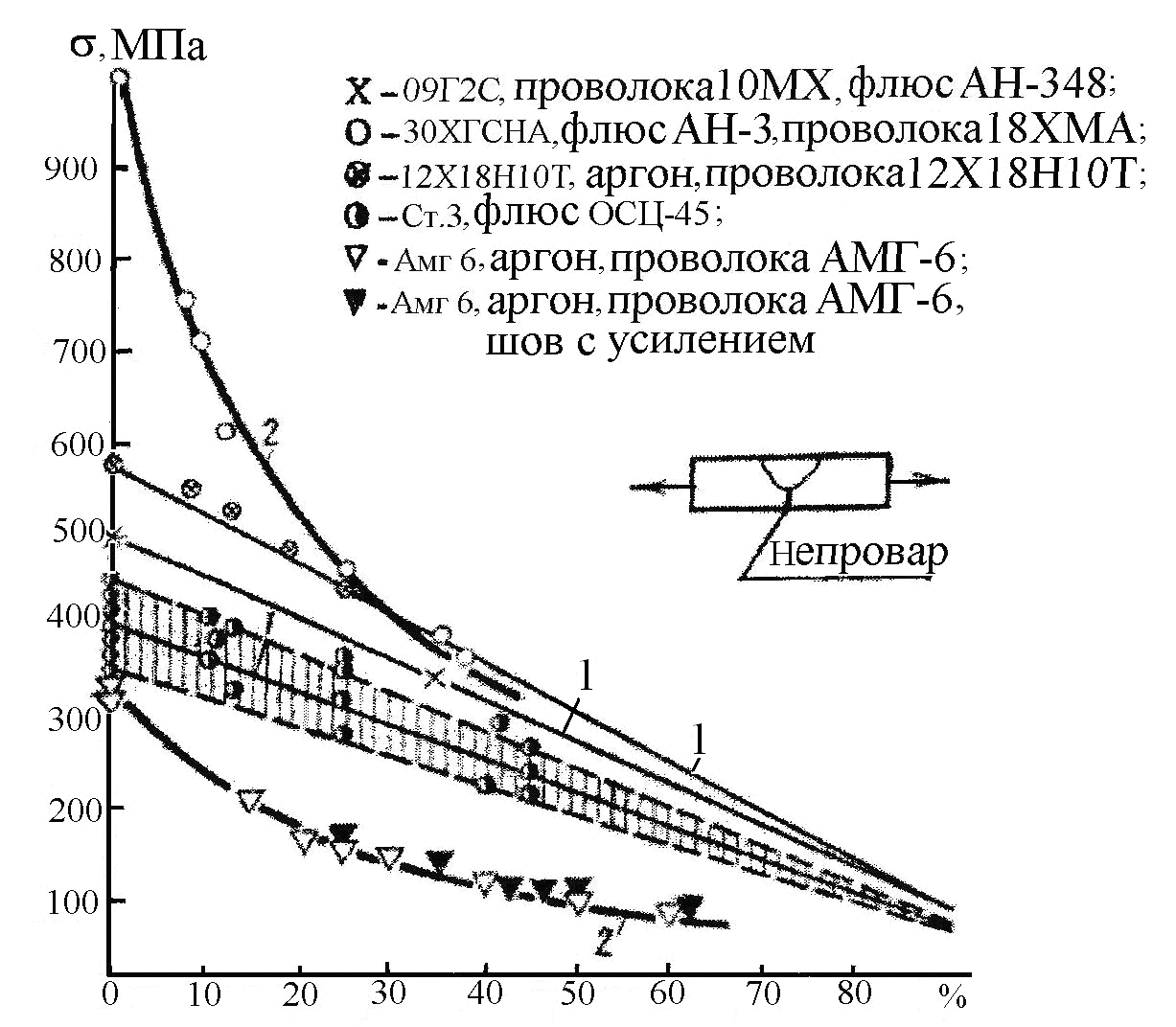


Рисунок 5.1 – Зависимость прочности сварных

соединений от глубины непровара

Если снижение прочности происходит прямо пропорционально уменьшению площади поперечного сечения сварного соединения, то есть

σср.р остается приблизительно постоянным, а σв снижается по прямой (линия 1), то такое сварное соединение условно считается нечувствительным к концентрации напряжений. Если снижение прочности происходит не пропорционально изменению поперечного сечения (кривые 2), то такое соединение считают чувствительным к концентрации напряжений.

**5.4 Коэффициенты запаса по различным критериям.**

Оценка работоспособности конструкций в присутствии трещины или иного острого концентратора сводится к определению ряда коэффициентов запаса и сравнению их с предельно допустимыми. Числовые значения коэф-фициентов запаса устанавливаются отраслевыми документами. В расчетах могут использоваться:

- коэффициент запаса по прочности (по средним разрушающим напряжениям)

nσ = σср.р/σэ; (5.4**)**

- коэффициент запаса по пластичности (по средней разрушающей деформации)

nε = .р /э; (5.5)



- коэффициент запаса по критическому числу циклов при циклическом нагружении

nN = Nкр/ Nэ; (5.6)

- коэффициент запаса по критическому размеру дефекта –

nL = Lкр / Lэ ; (5.7)

- коэффициенты запаса по трещиностойкости, устанавливаемые: ко-эффициентом интенсивности напряжений –

nк = Кс / Кэ; (5.8)

- коэффициентом интенсивности деформаций –

nv = Vp / Vэ . (5.9)

В этих зависимостях σэ,э – максимальные средние напряжения и деформации в расчетном сечении в период эксплуатации изделия или при его испытаниях; Lкр – критический размер дефекта (трещины), вызывающий разрушение при σ = σэ; Lэ – фактический размер дефекта (трещины) в изделии, который в процессе эксплуатации может изменяться от начального размера Lэ.н до конечного Lэ.к за счет его подрастания при циклических нагрузках с числом циклов в период эксплуатации Nэ; Nкр – число циклов нагружения, которые вызовут подрастание трещины до критического размера Lкр; σср.р,ср.р – средние разрушающие напряжения и деформации в расчетном сечении при наличии в нем трещины Lэ ( в начале эксплуатации Lэ.н и в конце эксплуатации Lэ.к); Кэ и Vэ - коэффициенты интенсивности напряжений и деформаций в пе-риод эксплуатации изделия, или при его испытаниях, вычисленные по σэ , э и Lэ (L э.н или Lэ.к); Кс и Vр - критические коэффициенты интенсивности нап-ряжений и деформаций при Lэ (Lэ.н или Lэ.к).

Для выполнения указанных выше поверочных расчетов необходимо иметь следующие данные: 1) экспериментальные значения σср.р,ср.р, а также Кс и Vр  во всем диапазоне изменения размера трещины L с учетом её геометрических соотношений и положения (поверхностная трещина, сквозная); 2) экспериментальные или расчетные зависимости подрастания трещины ΔL от числа циклов N при разных ΔК(при циклических нагрузках регистрируют число циклов и путь, пройденный трещиной), то есть всеми необходимыми значениями коэффициентов в формуле

d L /dN = C0ΔКа, (5.10)

где C0 и a - постоянные коэффициенты, определяемые эксперимен-тально.

На рисунке 5.2 приведены схематические зависимости значений σср.р, , Кс и Vр от размера трещины L . Процедура расчета разная в зависимости от того, отыскивается ли допустимый размер дефекта или выполняется проверка допустимости уже имеющегося дефекта.



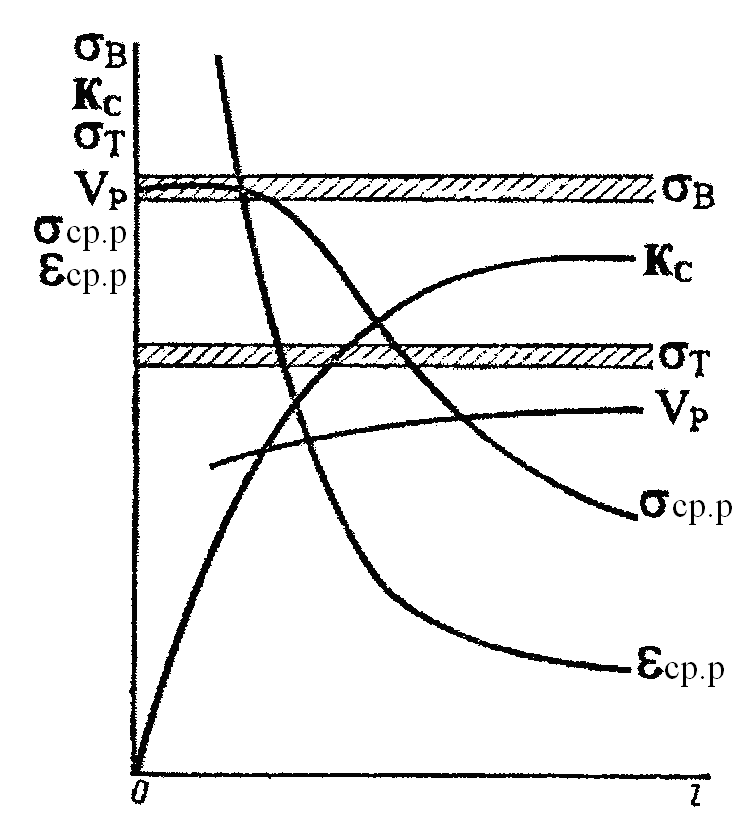


Рисунок 5.2 – Схематические зависимости σв, Кс, σт, Vр, σср.р, ср.р

от размера трещины

**5.5 Расчетная оценка допустимого размера дефекта и**

**допустимости имеющегося дефекта.**

Пусть известны размер и очертания начального дефекта Lэ.н и эксплуатационные напряжения σэ при циклическом нагружении.

1 По числу циклов нагрузки Nэ в период эксплуатации определяется подрастание трещины и находится Lэ.к.

2 Для Lэ.н и Lэ.к определяются средние разрушающие напряжения σср.р и деформациис учетом данных рисунка.



3 Находится значение nσ по формуле (5.4), которое для конкретных конструкций регламентируется соответствующими нормами. Рекомендуется, чтобы nσ был не менее 1,75…2,5 если σср.р < σт. Если σср.р > σт или σэ > 0,8 σт, достаточно, чтобы формула(5.5) был не менее 7…15.



4 По рисунку при σср.р= σэ находится критический размер дефекта Lкр, а затем n–по формуле (5.7). Рекомендуется, чтобы n был не менее 3…6, если берется начальный размер дефекта L э.н или не менее 2…3, если берется конечный размер Lэ.к.

5 Зная размер начального дефекта и имея данные для определения подрастания длины трещины, по L э.к определяют число циклов Nкр, а затем и n – по формуле (5.6), значение которого должно быть не менее 10.

6 Коэффициент запаса по трещиностойкости nк находят по формуле (5.8), вычислив Кэ по формулам линейной механики разрушения, то есть в предположении справедливости формул для упругой стадии работы материала с учетом известных σэ, L э.н, Lэ.к, а Кс берут при тех же Lэ.н и Lэ.к.

7 Аналогично находится коэффициент интенсивности деформаций Vэ, а затем по формуле (5.9) – коэффициент запаса nv. Коэффициенты запаса по трещиностойкости устанавливаются техническими условиями. При линейной зависимости K от нагрузки на конструкцию nk= nσ; nv = nε.

**Тема 6 Влияние механической неоднородности**

**на работоспособность сварных соединений**

**6.1 Мягкие и твердые прослойки в сварных соединениях**

Сварное стыковое соединение в поперечном сечении имеет несколько

участков, которые могут существенным образом различаться между собой по

механическим свойствам (рис. 6.1).

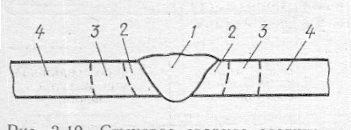


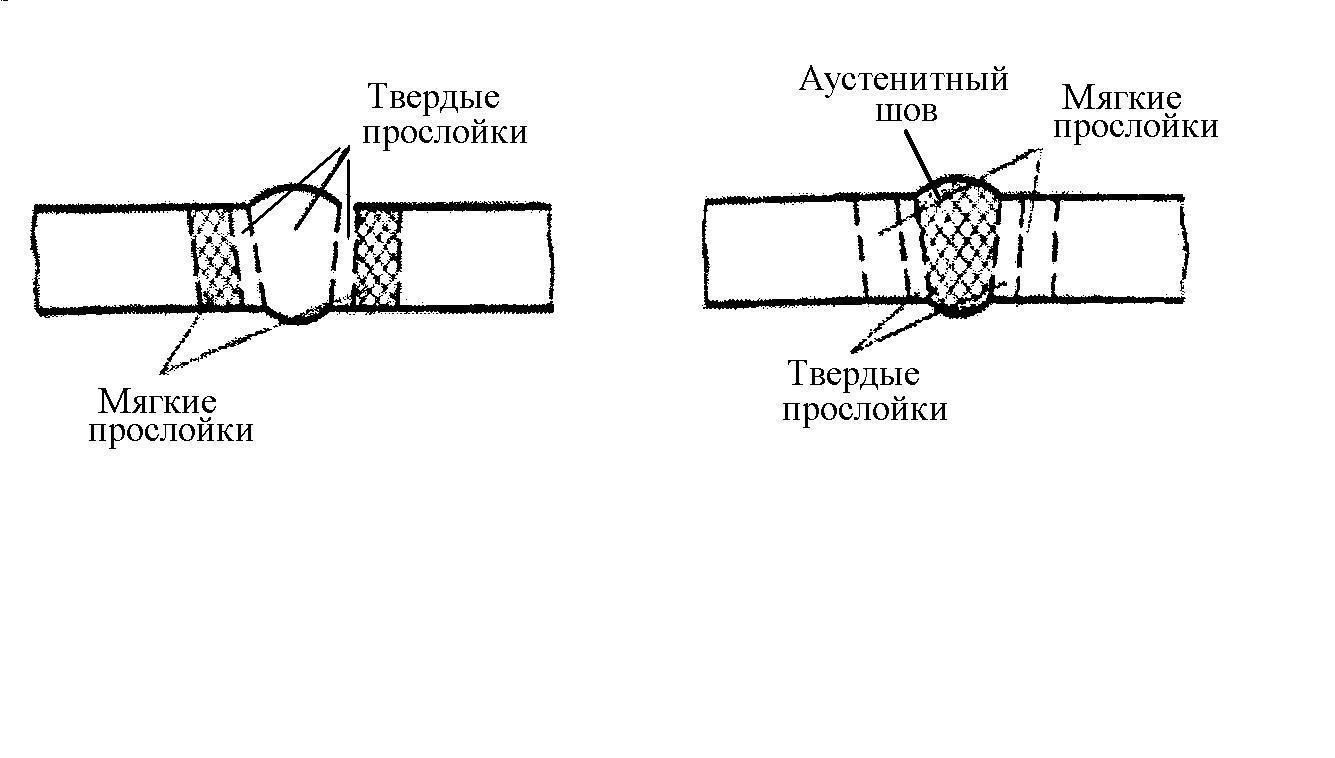
Рисунок 6.1 – Стыковое сварное соединение

Это сам шов 1, околошовная зона 2, материал которой в некоторых сталях претерпевает структурные преобразования и может иметь повышенную или пониженную твердость и прочность; зона высокого отпуска 3, прочность и твердость материала которой в термически обработанных сталях снижены в результате нагрева при сварке. Зона 4, нагревающаяся до более низких температур и материал которой по-разному изменяет свои свойства в зависимости от марки стали или сплава и предшествующей термической обработки.

Расхождение механических свойств металла в разных участках, соизме-римых с размерами сварного соединения, главным образом с толщиной свариваемых элементов, называется механической неоднородностью.

При установившемся режиме сварки ширина зон и их механические свойства мало изменяются по длине сварного соединения, поэтому обычно рассматривается неоднородность свойств и чередование зон в поперечном сечении сварного соединения. Различают мягкие и твердые прослойки (рис. 6.2).

При сварке термически обработанных сталей (рис.6.2,а) шов и около-шовная зона, нагретые до температуры Ас3, в процессе охлаждения закаливаются и имеют более высокую твердость и прочность, чем основной металл. Этот участок называют твердой прослойкой. Рядом с ней по обе стороны находятся участки высокоотпущенного металла, которые относительно основного металла и твердой прослойки имеют пониженный предел текучести. Эти зоны образовывают две мягкие прослойки.



***а б***

Рисунок 6.2 – Твердые и мягкие прослойки в сварных соединениях

Если термически обработанная сталь сваривается аустенитным швом (рис.6.2,б), то возникает сложное соединение зон мягкого аустенитного шва, двух твердых и двух мягких прослоек. Деление прослоек на мягкие и твер-дые зависит от отношения предела текучести металла прослойки к пределу текучести основного металла или примыкающего к прослойке металла. Если отношение пределов текучести прослойки и соседнего участка больше единицы, то прослойка будет твердой, в противоположном случае – мягкой.

**6.2 Напряженное состояние и прочность мягкой прослойки**

**при растяжении**

Механические свойства образца, вырезанного из мягкой прослойки и имеющего низкую прочность, еще не свидетельствуют о том, что сварное соединение в целом имеет такие же свойства. Взаимодействие отдельных зон соединения протекает сложным способом, а прочность сварного соединения, как правило, не совпадает с прочностью какой-нибудь прослойки.

Рассмотрим случай, когда растягивающая сила направлена вдоль шва и все прослойки получают одинаковые деформации (рис.6.3).

В случае продольного растяжения стыкового шва можно предполо-жить, что плоские сечения сохраняются, а зоны мягкого металла М, более твердой подкаленной зоны термического влияния СТ и твердого основного металла Т (рис.6.3,а,б) имеют одинаковые деформации (рис.6.3,.в). Из диаг-раммы растяжения σ-ε вытекает, что наблюдается определенный рост услов-ных напряжений в наиболее твердом металле (СТ) вплоть до уровня времен-ного сопротивления σв. Таким образом, при расположении шва вдоль растя-гивающего усилия пониженная деформационная способность одной из зон сварного соединения может снизить максимально возможную прочность в сравнении с элементом без швов.

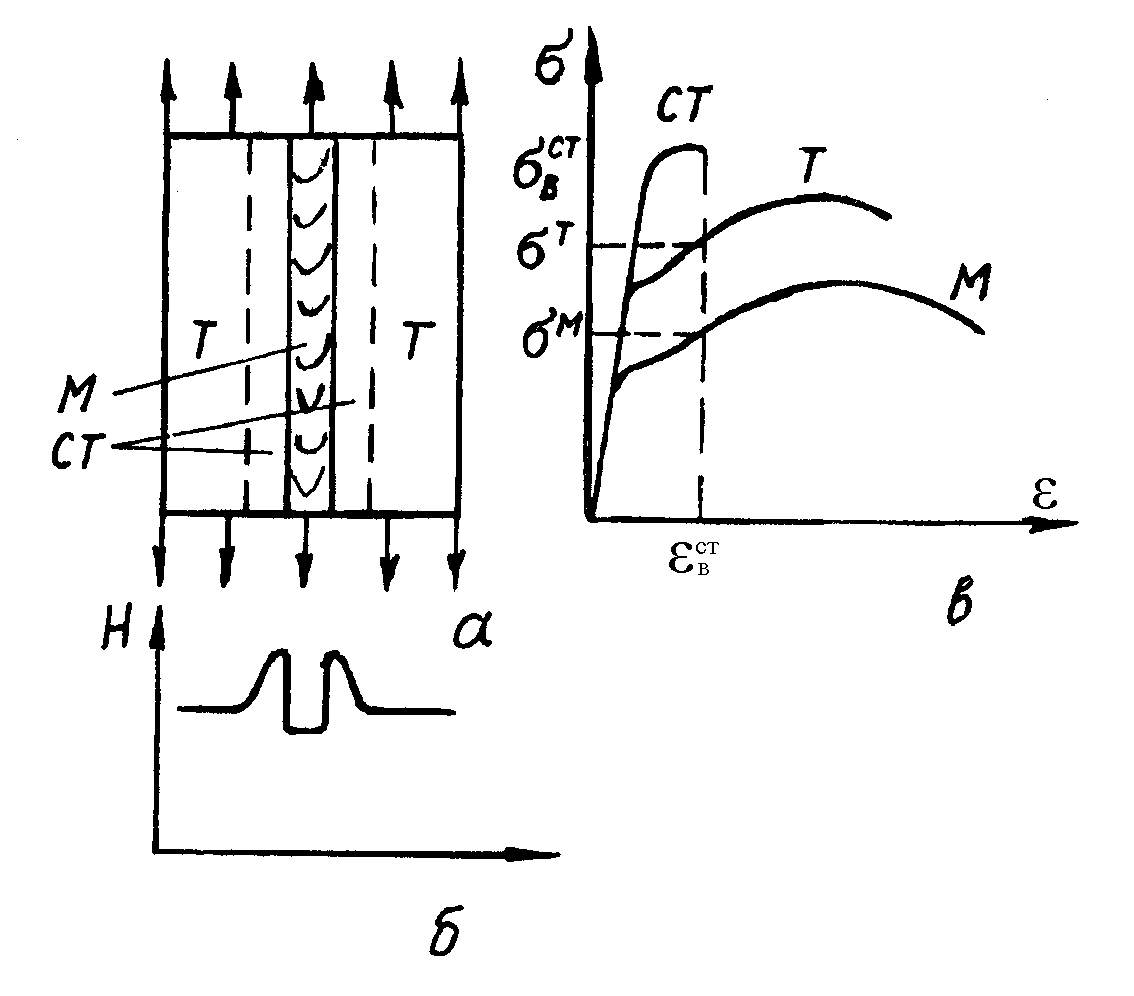


Рисунок 6.3 – Прочность элемента с продольным стыковым швом

Продольная растягивающая сила воспринимается преимущественно участком основного металла, так как его площадь намного превосходит и площадь поперечного сечения шва, и площадь твердой прослойки. И хотя уровень напряжений σ2 в твердой прослойке будет велик, средние напряжения будут близки к σ3, которые существенным образом ниже разрушающих напряжений в точке А3. Это означает, что прочность сварного соединения с твердой прослойкой, нагруженного вдоль шва, окажется ниже, чем прочность такого же эле-мента из основного металла, так как разрушение в последнем случае состоится при напряжениях, близких к σ3<σА3. Отрицательное влияние твердой прослойки сказывается сильнее, если по длине соединения встречаются резкие изменения сечения шва, вызывающие концентрацию напряжений, или еще хуже – поперечные трещины или другие дефекты в твердой прослойке.

При действии силы вдоль шва наличие малопрочных мягких прослоек практически не влияет на общую несущую способность нагруженного элемента, так как площадь прослоек невелика.

При поперечном расположении шва относительно растягивающей силы (рис.6.4) влияние неоднородности механических свойств обнаруживается иначе. Из-за различия значений коэффициента Пуассона в упругой и пласти-ческой областях участки более прочного металла, работающие в упругой об-ласти, препятствуют развитию пластических деформаций в соседней мягкой прослойке.

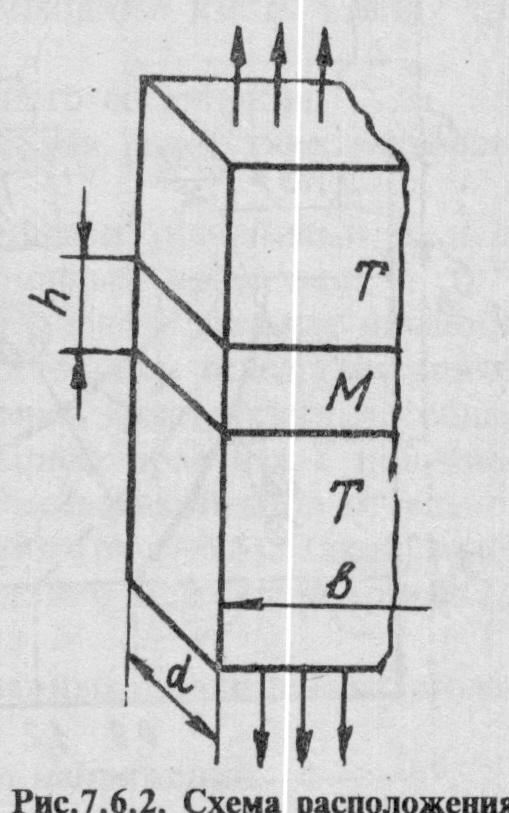


Рисунок 6.4 – Схема расположения шва поперек

растягивающего усилия

Стесненность деформаций мягкой прослойки предопределяет появле-ние объемного напряженного состояния и повышение сопротивления раз-витию в ней пластических деформаций. В результате возникает эффект “контактного упрочнения” мягкой прослойки, который зависит от относи-тельной толщины прослойки , где h – ширина мягкой прослойки; d-толщина металла, и формы поперечного сечения элемента.



Принимая, что материалы мягкой прослойки М и основного металла Т идеально упругопластичны и их пределы текучести находятся в соотношении σтм < σт, были получаем решения о наступлении текучести прослойки в составе сварного соединения в зависимости от размера прослойки, формы поперечного сечения и значения σтм в виде

σ/т = σтМ Кχ, (6.1)

где σ/т – предел текучести сварного соединения;

Кχ – коэффициент контактного упрочнения.

**6.3 Контактное упрочнение**

В упругой стадии нагружения мягкая прослойка и соседние участки де-формируются однородно и при достижении предела текучести материала мягкой прослойки σтм вней возникает пластическая деформация, в то время как соседние участки остаются в упругом состоянии. При дальнейшем повышении нагрузки и деформации коэффициент поперечной деформации в прослойке будет выше, чем у соседнего металла.



В меру развития пластической деформации в прослойке μ→0,5, в то время как в упругих частях μ = 0,3. Через неодинаковую поперечную дефор-мацию возникают касательные напряжения, максимальные на плоскостях растяжения. Они будут препятствовать поперечному сужению прослойки в направлении толщины листа. Чем уже прослойка, то есть чем меньше χ = h/d, тем меньшее поперечное сужение получает прослойка к моменту возникно-вения в ней средних истинных разрушающих напряжений σср.р. Так как сред-нее истинное разрушающее напряжение σср.р изменяется мало, то в более уз-ких мягких прослойках площадь утоненного поперечного сечения прослойки Fу к моменту разрушения будет больше, а следовательно, будет большей и разрушающая сила Pр:

Pр= σ ср.р Fу. (6.4)

В этом заключается эффект контактного упрочнения. Но повышение Рр не может происходить беспредельно, так как соседние с мягкой прослойкой более прочные участки также при определенных условиях начнут пластично деформироваться. Чем более прочны соседние зоны, тем больше эффект контактного упрочнения. Твердые прослойки, находящиеся рядом с мягкими, усиливают этот эффект. Идеальный случай работы мягкой прослойки, когда соседние с прослойкой участки металла считаются абсолютно твердыми, не способными к деформированию, соответствует выполнению условий плоской деформации. В этом случае временное сопротивление сварного соединения с мягкой прослойкой σ/В  можно определить по формуле (6.2):

Кχ = (π + 1/χ)/(2 3), (6.5)



где Кχ – коэффициент контактного упрочнения в случае плоской деформации.

Если прослойка не идеально прямоугольная, как это бывает в сварных соединениях, то

χ = F/ s 2, (6.6)

где F – площадь поперечного сечения прослойки.

Прочность сварного соединения достигнет прочности соседнего, более прочного металла, если временное сопротивление σВ станет равным σвт более прочного металла. При этом

Кχпр = σвт/σвм . (6.7)

Определим предельную относительную толщину прослойки χпр, при ко-торой достигается равнопрочность сварного соединения:

χпр = 1/(2 Кχгр – π). (6.8)



Например, если σтв/σвм = 1,2, то по формуле (6.8) получаем: χпр = 1.

При Кχпр>1,2 относительная толщина мягкой прослойки χпр должна быть еще меньше. Однако повышение прочности сварного соединения с мягкой прослойкой за счет уменьшения ограничено уровнем истинного разрушающего напряжения металла мягкой прослойки.



**6.4 Влияние относительной толщины и формы мягкой прослойки**

**на место и характер разрушения**.

Из рис. 6.5 видно, что в широких прослойках, когда эффект контактного упрочнения еще не наблюдается, относительное сужение Ψ остается постоянным при уменьшении χ, а относительное удлинение Δ постепенно падает по ме-ре уменьшения доли длины участка мягкой прослойки в общей длине образца.

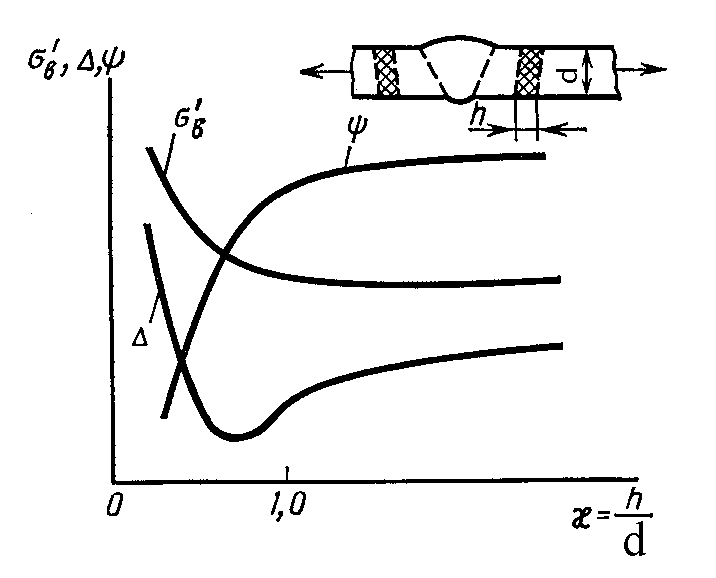


Рисунок 6.5 – Зависимость и от относительной



толщины прослойки



В области контактного упрочнения резко падает, так как возрастают поперечные касательные напряжения, препятствующие сужению прослоек. Удлинение образца при уменьшении также сначала уменьшается, но затем, когда реализуется повышение прочности, возрастает, поскольку в пластическую деформацию в большей мере вовлекается основной металл.



**Тема 7 Влияние низких температур на прочность**

**7.1 Изменение свойств металлов при понижении температуры**

Об изменении свойств металлов при понижении температуры обычно судят, ориентируясь на их свойства при комнатных температурах (18...20°С). Необходимо различать свойства металлов, установленные на гладких образцах и при статическом нагружении, (предел текучести σ0,2, предел прочности σВ, действительное разрушающее напряжение σр, относительное удлинение δ, поперечное сужение ψ) и свойства металлов при испытании образцов с надрезами при статическом или ударном нагружении.

Характер изменения свойств металлов при понижении температуры зависит от многих факторов: вида кристаллической решетки, химического состава, величины зерна, термической обработки – и проявляется по-разному в зависимости от условий нагружения и напряженного состояния.

Наиболее сильные изменения σв и σ0,2 характерны для коррозионно-стойких сталей и титановых сплавов. У металлов и сплавов с гранецентрированной кубической решеткой (Feγ, Al, Cu, Аu, Аg, Nі) с понижением температуры предел текучести в сравнении с пределом прочности повышается незначительно и они относятся к хладостойким. Пластичность и ударная вязкость у них почти не меняются.

У металлов и сплавов с объемно центрированной кубической решеткой (Feα, Сr, Мо, Та, Nв, W) предел текучести повышается более значительно, чем предел прочности, пластичность заметно понижается и они относятся к хладноломким.

Изменение предела текучести в сталях зависит от его уровня при ком-натных температурах. Чем ниже предел текучести при 20оС, тем более силь-но он изменяется при понижении температуры.

Особенности в изменении свойств металлов при понижении темпера-туры:

- Пластичность обычно уменьшается. Более резко – в углеродистых конструкционных сталях и низколегированных, слабее – у других металлов. У ряда алюминиевых и медных сплавов в некоторых случаях происходит увеличение пластичности.

- Сопротивление усталости при переменных нагрузках у большинства металлов возрастает.

- Чувствительность к концентрации напряжений при острых надрезах возрастает, а ударная вязкость (работа разрушения) уменьшается наиболее заметно у железа, углеродистых и низколегированных сталей невысокой прочности, которые имеют резко выраженную область перехода от вязкого к хрупкому разрушению.

**7.2 Методы оценки свойств металлов при изменении температуры**

Все свойства материалов зависят от температуры. Также от нее сущест-венно зависит и вязкость разрушения. При рассмотрении влияния температуры на свойства металлов необходимо обращать внимание также и на другие параметры, например на толщину. Относительно тонкая пластина может находиться в плоском напряженном состоянии и при комнатной температуре иметь высокие значения вязкости. При низких температурах металл имеет более высокий предел текучести и в пластине зона пластичности будет меньших размеров. В этом случае напряженно-деформированное состояние можно охарактеризовать как переходное или как плоско деформированное состояние с более низким значением вязкости. Таким образом, температура влияет на вязкость не только не-посредственно, но и косвенно через температурную зависимость предела текучести.

Высокая работоспособность многих деталей машин, сварных соединений и элементов сварных конструкций при пониженных температурах решающим образом зависит от их способности к сопротивлению хрупким разрушениям. Однако необходимо помнить, что для многих материалов даже комнатные температуры могут быть областью их хрупкого разрушения и лишь при повышенных температурах разрушение становится вязким.

Снижение температуры, увеличение скорости нагружения, увеличение концентрации напряжений способствуют переходу от вязких форм разрушения к хрупким.

Наиболее распространенным и простым методом оценки изменения свойств при понижении температуры является испытание на ударную вязкость, при котором выявляется абсолютный уровень ударной работы разрушения КСU (ан), сильно зависящий как от типа и остроты надреза, так и от характера раз-рушения – вязкого или хрупкого (рис.7.1).

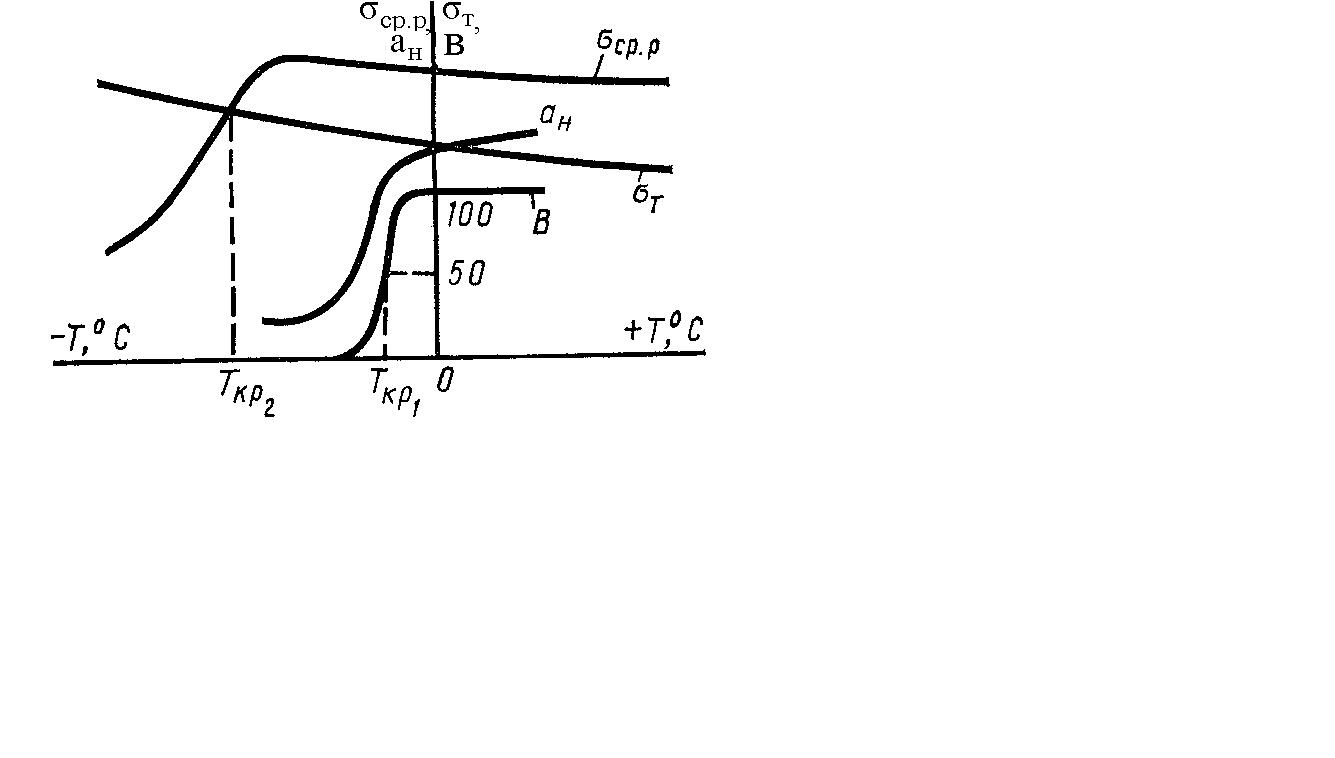


Рисунок 7.1 – Характер изменения площади с волокнистым изломом В (проценты), работы разрушения КСU (ан ), предела текучести σТ

и среднего разрушающего напряжения σср.р в зависимости

от температуры испытаний для низкопрочных сталей

Чем острее надрез, крупнее зерно, больше размеры образца и выше скорость нагружения, тем правее и ниже расположена кривая ан. Также смещается и кривая волокнистости излома В. Принято определять первую критическую температуру Ткр.1, при которой площадь волокнистого излома составляет 50%.

Для деталей, в которых возможно присутствие трещин или других тре-щиноподобных дефектов, проводят сериальные испытания (определение свойств металла или сварных соединений в некотором интервале изменения какого-нибудь параметра с достаточно мелким шагом его изменения); сериальные температурные испытания образцов металла проводят обычно с шагом ΔТ = 5…15 К при определении k1C(k); G1C(G) или δс (δ). Характер изменения кривых k1C, G1C и δс подобен кривой ан (см. рис.7.1). По полученным данным судят о безопасных уровнях напряжений и области температур эксплуатации.

Для некоторых деталей и узлов путем испытания может быть определена вторая критическая температура Ткр.2, при которой среднее разрушающее напряжение σср.р становится равным пределу текучести металла при этой температуре. Величина Ткр.2 может быть разной в зависимости от коэффициента концентрации напряжений в детали, характера приложения нагрузок, среды, наличия собственных напряжений. Разрушение при σср.р ≤ σт может произойти в пределах хрупкой зоны при температуре, когда трещина в основном металле может распространяться дальше только как вязкая. При возможности распространения трещины в металле на значительные расстояния (например, трубопроводы, корпусы кораблей) определяется удельная работа динамического (быстрого) распространения трещины Gсд в листовом металле. Существуют специальные расчетные методы для определения температур торможения движущихся трещин. Метод Робертсона предусматривает испытание листовых образцов большой ширины с натуральной толщиной металла (см. раздел 4).

**7.3 Основные факторы, снижающие хладостойкость сварных соединений**

Хладостойкость сварных соединений в основном определяется маркой основного металла. Однако присадочные материалы, технология изготов-ления сварных соединений, их конструктивное выполнение также в значи-тельной мере определяют поведение сварных конструкций при низких тем-пературах.

Химический состав металла шва зависит от состава присадочного металла, степени его смешивания с основным металлом, легирования элементами и выгорания их при сварке, защиты зоны расплавленного металла. Свойства металла шва также зависят от способа сварки, погонной энергии сварки, характера эксплуатации, температуры изделия и окружающей среды при сварке и других факторов. При определении приемлемого варианта получения шва обычно проводят совокупную оценку влияния всех факторов, оптимизируя отдельные из них.

Наиболее простой способ сравнительной оценки свойств – испытание на ударную вязкость с определением как абсолютного уровня вязкости металла при температуре выше порога хладноломкости, так и самого температурного порога хладноломкости Ткр.1. Верхним порогом хладнолом- кости считается температура, при которой полностью исчезают в изломе образцов хрупкие участки.

Естественно, что при изменении условий сварки одновременно изменяются химический состав шва и его кристаллизация. Термический цикл сварки, определяющий скорость охлаждения сварного соединения, весьма существенен для зон термического влияния. Удовлетворительные свойства этих зон при неизменном составе основного металла могут быть получены только за счет рационального термического цикла, зависящего от погонной энергии и скорости сварки. Он способен вызвать рост зерна, закалку металла, его старение, отпуск и т.д. Одни и те же условия сварки неоднозначно влияют на порог хладноломкости шва и околошовных зон двух близких по составу сталей -Ст.3сп и 20. Отрицательное влияние термического цикла сварки на свойства металла шва и околошовных зон можно уменьшить, применяя подогрев или последующую термическую обработку сварного изделия.

Для сталей, чувствительных к термическому циклу сварки, в особенности если металл сваривается в термически обработанном состоянии, в первую очередь необходимо оптимизировать условия сварки по термическому влиянию на околошовную зону, а затем, в случае недостаточно высоких свойств металла шва, улучшать их соответствующим выбором присадочных материалов.

Пластические деформации металла и деформационное старение отно-сятся к наиболее сильным отрицательным факторам, вызывающим хрупкость металла при понижении температуры в случае, если они происходят в небла-гоприятно ориентированных концентраторах напряжений, расположенных в зоне нагрева от сварки. К неблагоприятно ориентированным относятся кон-центраторы, плоскость которых перпендикулярна направлению главной де-формации удлинения. Например: непровары в перпендикулярно пересека-ющихся стыковых швах, непровары в корне многослойных швов, где кон-центрируются пластические деформации по мере наложения слоёв; стыки двух несваренных между собой элементов, пересекаемых перпендикуляр-ными швами; концы фланговых швов в зоне перехода стержневого элемента к косынке; места остановки процесса сварки, в которых возник непровар, плоскость которого перпендикулярна оси шва; места пересечения соедине-ний с не полностью проваренными швами. К неблагоприятно ориентирован-ным концентраторам относятся также линии перехода от шва к основному металлу и непровары в тех случаях, когда на некотором небольшом рассто-янии от них параллельно укладываются короткие швы, поперечная местная усадка которых вызовет концентрацию пластических деформаций.

Пластические деформации создаются, как правило, вследствие усадки металла или при его изгибе. Пластическая деформация в концентраторе, накопленная при температуре, когда металл находится в вязком состоянии, отрицательно сказывается затем в случае работы металла при низкой температуре. Если низкоуглеродистую или низколегированную сталь, склонную к деформационному старению, после пластической деформации нагревать до 200…300°С, то происходит заметное увеличение их хрупкости. Подобный эффект возникает, если пластические деформации происходят непосредственно при температуре 200…300°С в процессе сварки. Такое явление условно называют динамическим старением.

Форма сварных соединений в случае вязкого состояния металла и отсутствия дефектов при однократном нагружении не является причиной разрушения сварных конструкций при средних напряжениях, меньше расчетных или близких к ним, но при хрупком или квазихрупком состоянии металла может оказаться достаточной причиной для того, чтобы произошло разрушение через концентрацию напряжений. Опасность тех или других конструктивных форм зависит от степени хрупкости металла. Так как количественные соотношения еще не установлены, то можно лишь указать порядок возрастания опасности разрушения. Наименьшую концентрацию имеет стыковое соединение с плавным переходом от шва к основному металлу. Затем следуют соединения с угловыми швами с полным проваром. Нахлёсточные соединения, когда швы работают как лобовые или фланговые, уже имеют значительную концентрацию напряжений, но благодаря высоким пластическим свойствам металла шва и относительно небольшим размерам катетов это обычно не является причиной хрупких разрушений. Наибольшую опасность представляют стыковые и тавровые соединения с неполным проваром. Опасность разрушения при тех или иных формах соединения зависит от радиусов закругления и абсолютных размеров элементов, которые принимают участие в сварном соединении. Чем меньше радиусы и больше размеры свариваемых деталей, тем опаснее концентратор. В нахлёсточных соединениях широких элементов с косынками даже радиус закругления, формируемый концом флангового шва, может оказаться достаточным для начала хрупкого разрушения основного металла при низких температурах. Дефекты сварных соединений: несплавления, трещины, плоские по форме шлаковые включения, острые подрезы, места пересечения швов с участками расслоения металла, мелкие невидимые трещины в угловых швах нахлёсточных соединений, непроваренные места остановки процесса сварки, а также вырезы с маленькими радиусами после термической резки, неплавные переходы корневых валиков к основному металлу в многослойных швах, глубокие неровности от чешуйчатости поверхности шва, сильные сужения швов из-за нарушения ре-жима сварки - способны вызвать разрушение при низких температурах.

Опасность хрупкого разрушения также зависит от условий эксплуатации. Одной из причин подобного рода является усталость металла. Проявляется она двояко. На первой стадии из-за циклических нагрузок в зоне концентрации напряжений возникает усталость металла и появляются микротрещины. На этой стадии нет еще видимых трещин, однако сопротивляемость металла началу разрушения понижается. При ударном нагружении снижается работа начала разрушения – это увеличивает скорость распространения трещины, повышает критическую температуру хрупкости. Позднее, на второй стадии, появляются трещины усталости, которые являются опасными концентраторами, так как, достигнув критических размеров, вызовут внезапное разрушение сварной конструкции. Число разрушений оборудования растет по мере увеличения их срока службы и вызвано как накоплением усталости в металле, так и появлением ус-талостных микротрещин.

На сопротивляемость хрупкому разрушению сварных конструкций кроме усталости отрицательно влияют также старение (изменение свойств металла в процессе продолжительного его пребывания при высоких температурах), наводороживание и радиация. Эти факторы уменьшают вязкость металла и повышают критические температуры.

**7.4 Оценка хладостойкости сварных соединений**.

Из-за неоднородности механических свойств металла в разных зонах сварного соединения его хладостойкость определяют в нескольких местах по вязкости при ударном изгибе надрезанных образцов. Надрез располагают в разных зонах. В многослойных швах возможна неоднородность свойств по высоте поперечного сечения вследствие разных условий охлаждения металла и сегрегации вредных примесей по мере укладки отдельных слоёв. Соответственно образцы изготовляют из корневой, верхней и средней частей шва. При малом количестве проходов такое расхождение свойств не наблюдается.

В однопроходных швах на сопротивляемость металла шва разрушению влияет направление кристаллитов, формирующихся в процессе его кристаллизации. Наиболее слабым участком обычно является ось шва. Располагая надрез по оси шва, свойства металла можно определить по работе разрушения при движении трещины как в направлении сварки, так и в противоположном направлении. Непровар в шве создает концентрацию пластических деформаций металла при сварке и в некоторых случаях при определении кс представляет собой более опасный надрез, чем усталостная трещина.

Заранее бывает трудно сказать, какие участки зоны термического влияния имеют минимальную сопротивляемость хрупкому разрушению. Тогда надрезы располагают с небольшим шагом, чтобы проследить изменение свойств металла в зависимости от уровня максимальной температуры при сварке. Обычно исследуют ряд сечений от линии сплавления до зон с температурой нагрева 200…250°C.

Вторая особенность определения хладостойкости сварных соединений состоит в оптимизации условий сварки. По наименее хладостойкой зоне варьируют режимы сварки, чаще всего погонную энергию, добиваясь наилучших показателей ударной вязкости. При испытаниях определяют вторую критическую температуру Ткр.2. Рассеяние свойств металлов, режимов сварки, форм концентраторов, их радиусов приводит на практике к тому, что отдельные экземпляры изделий имеют более высокую критическую температуру хрупкости. Чтобы обнаружить свойства сварных узлов при температурах выше Ткр.2, определяют пластичность их как при низких, так и при более высоких температурах. Значения температур, при которых регистрируются стабильно высокие результаты по пластичности, обеспечивают максимально возможные механические свойства сварных соединений.

Расчетную оценку допустимости трещин при эксплуатации сварных конструкций проводят, ориентируясь на кривую минимальных значений k1с, как функции температуры. Характер кривой k1с по виду подобен кривой ан (см. рис.7.1). Если не учитывается длина трещины, то находят предельно допустимую минимальную температуру, при которой всё еще выполняются требования прочности при разных коэффициентах запаса.

**7.5 Методы повышения хладостойкости сварных соединений**

1 Используются такие сварочные материалы, которые при оптимальных режимах сварки и последующей термической обработке дают металл шва, не уступающий по хладостойкости основному металлу.

2 Осуществляется выбор режима сварки, обеспечивающий достаточную хладостойкость зон термического влияния (ЗТВ). Стремление уменьшить ЗТВ и разупрочнения в диапазоне температур высокого отпуска приводит к необходимости сваривать при малых погонных энергиях, которые, в свою очередь, создают высокие скорости охлаждения и вызывают сильную закалку в зоне перекристаллизации. Применение последующего отпуска может облегчить задачу выбора режимов сварки. Но высокий отпуск может реально снизить выносливость сварных соединений. Однако опасность хрупкого разрушения является более существенной, чем некоторое снижение выносливости, поэтому назначают высокий отпуск. Малые скорости электрошлаковой сварки, позволяющие избежать горячих трещин, вызывают сильный рост зерна вблизи линии сплавления. Для восстановления вязкости металла ЗТВ необходимо проводить нормализацию изделия с отпуском.

3 Рациональное конструктивное оформление сварных узлов, устранение малых радиусов перехода, отсутствие непроваров и применение эффективных методов контроля качества позволяют существенным образом повысить сопротивляемость хрупким разрушениям.

4 Выполняется предварительное нагружение конструкции при нормальных температурах, когда невозможны хрупкие разрушения. Появление в концентраторах больших пластических деформаций, которые должны были бы возникнуть при низких температурах, увеличивает радиус концентратора и создает после разгрузки в зоне концентратора остаточные сжимающие напряжения. Последующее нагружение при низких температурах вызывает незначительные пластические деформации в концентраторе или не вызывает их вовсе.

**Тема 8. Работа сварных соединений при высоких температурах**

**8.1 Механические свойства металлов при высоких температурах**.

С ростом температуры в металле снижается прочность межатомных связей. Поэтому деформации и напряжения могут изменяться во времени даже при постоянных нагрузках. Различают два основных процесса – ползучесть и релаксацию.

Ползучестьметалла – изменение деформаций во времени при постоянных напряжениях.

У большинства конструкционных металлов при нагревании до температуры (0,4…0,5)Тпл, где Тпл выражается в кельвинах, процесс ползучести выражен сравнительно слабо. При более высокой температуре характер кривых ползучести зависит от уровня приложенных напряжений (рис.8.1). Типичная кривая ползучести, например при σ =190МПа, содержит три участка, соответствующих трем стадиям ползучести. Первая стадия, неустановившаяся, когда скорость пластической деформации ползучести dε/dt уменьшается. На второй, установившейся стадии, процесс протекает с минимальной скоростью. На третьей стадии скорость пластической деформации возрастает и наступает разрушение.

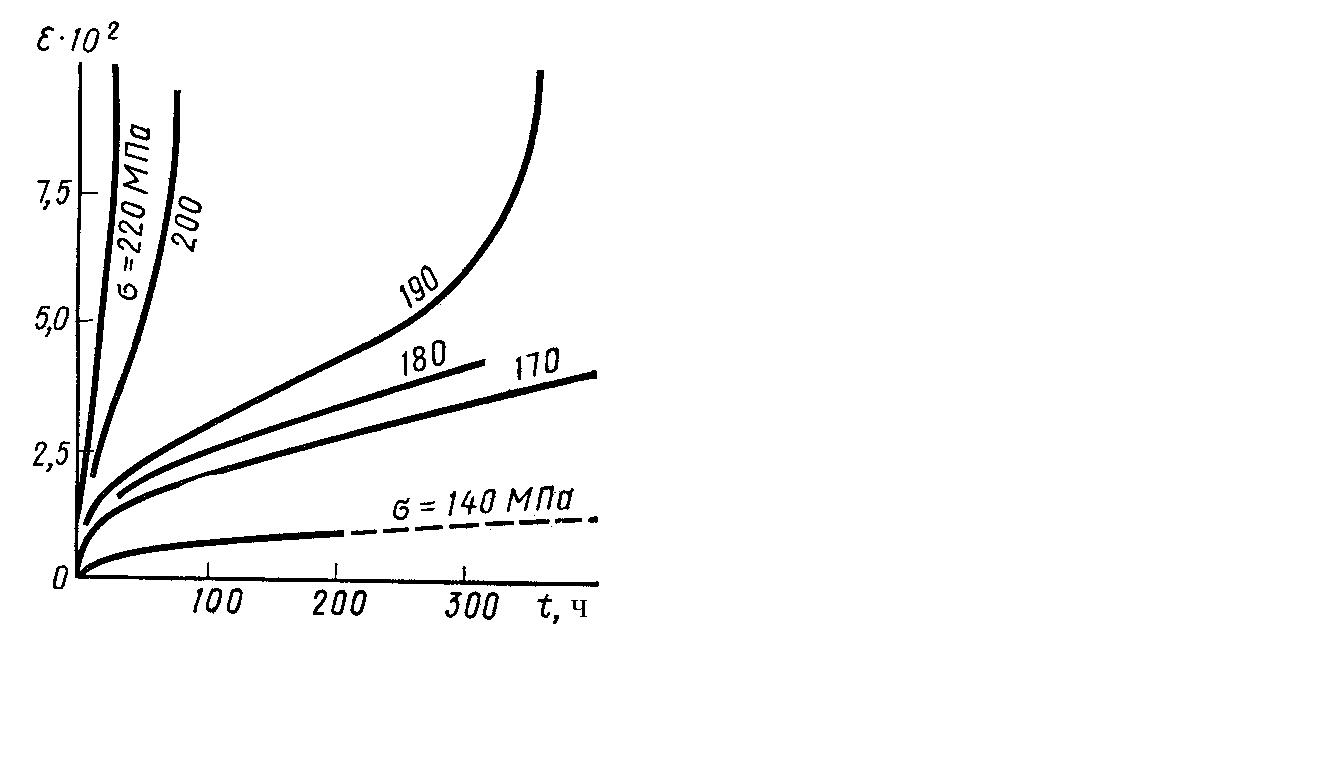
**

Рисунок 8.1 – Кривые ползучести стали ЭИ 756 при

температуре 600оС

При невысоких температурах и малых напряжениях 2-я и 3-я стадии могут отсутствовать. При высоких температурах и напряжениях 1-я стадия может непосредственно перейти в 3-ю и кривая приобретет вид, анало-гичный кривой σ = 200 МПа.

Для деталей установок, работающих при высоких температурах, уста-навливаются допускаемые напряжения в зависимости от величины пласти-ческой деформации, возникающей вследствие ползучести. В качестве услов-ной характеристики сопротивляемости металла ползучести принимают пре-дел ползучести σп, который определяется двояко. Для машин и установок с малой общей продолжительностью работы (не более сотен часов) за предел ползучести принимают напряжение, при котором деформация за заданный промежуток времени достигает значения, установленного техническими ус-ловиями. В деформацию включают и деформацию на 1-й стадии ползучести.

Для деталей установок, работающих длительное время, учитывают де-формации на установившейся стадии. Пределом ползучести в этом случае является напряжение, при котором скорость деформации отвечает установ-ленной техническими условиями. Для деталей стационарных энергетичес-ких установок скорость деформации обычно принимают равной 1% за 105 ч (приблизительно 11,5 лет) и предел ползучести обозначают как σТ105, где Т – температура испытаний, К. Прочность находящегося под напряжением в течение продолжительного времени материала при высокой температуре оценивается пределом длительной прочности σтм напряжением, которое вызовет разрушение при заданной температуре через определенный про-межуток времени. Для стационарных установок принимают σтм = σ105, вызывающее разрушение через 105 часов. Для транспортных установок используют σ102, σ103, σ104.

**8.2 Прочность и пластичность металла при высоких**

**температурах**

Испытание металла на длительную прочность проводят до разрушения образца. Чем выше температура и напряжение, тем раньше происходит разрушение. Точка перелома прямой линии (рис.8.2) отвечает переходу от вязких разрушений с образованием шейки, которые характерны для высоких напряжений, невысоких температур и сравнительно коротких промежутков времени до разрушения, к хрупким межзеренным (интеркристаллическим) разрушениям, которые происходят при более низких напряжениях, высоких температурах и продолжительных выдержках. Переход к хрупким разрушениям происходит за счет постепенного ослабления границ зерен.

Пластичность металла, оцениваемая по величине удлинения образцов до разрушения, существенным образом зависит от характера разрушения (рис.8.2). При вязком разрушении происходит монотонное уменьшение пластичности по мере увеличения времени до разрушения. При переходе от вязкого разрушения к хрупкому межзеренному (t1, t2) пластичность резко снижается. Разрушение конструкций при высоких температурах, как прави-ло, происходит без заметной пластической деформации, то есть хрупко.

Установлены следующие закономерности изменения пластичности при высоких температурах При относительно невысоких температурах в случае вязкого разрушения пластичность снижается с уменьшением скорости деформации, хотя это снижение и небольшое. При более высоких температурах с уменьшением скорости деформации происходит переход к межзеренному разрушению, что влечет за собой существенное уменьшение пластичности.

В некотором диапазоне скоростей деформации пластичность достигает минимума и при дальнейшем уменьшении скорости не изменяется или слабо повышается. Значение минимальной пластичности может быть одним из критериев склонности стали к хрупкому разрушению.

При испытаниях с постоянной скоростью деформации, но разных температурах пластичность имеет минимум, положение которого смещается в область более низких температур при меньшей скорости деформации. В перлитных сталях минимальная пластичность наблюдается в области 500…600оС и составляет 3...5 %. Аустенитные стали более склонны к хрупким разрушениям. Минимальная пластичность в них составляет доли процента в диапазоне 550…-6000С. У сплавов на никелевой основе пластичность падает при 600…7500С. Значение минимальной пластичности определяется характером легирования, структурой, зависящей от терми- ческой обработки и предыдущей пластической деформации.

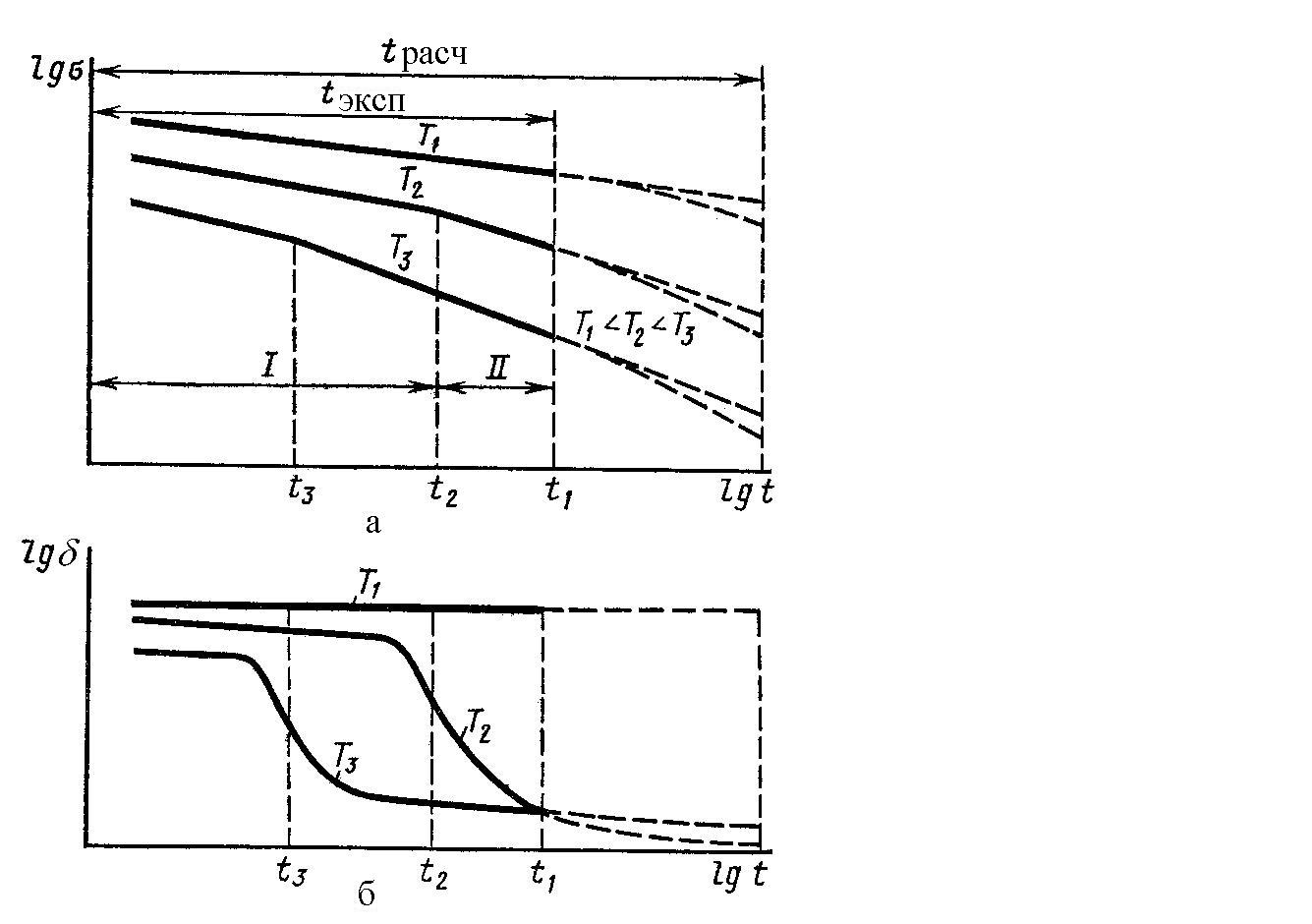


Рисунок 8.2 – Зависимость длительной прочности (а) и пластичности (б)

от температуры и времени испытания до разрушения

Для сокращения времени испытаний на длительную прочность исполь-зуют параметрические зависимости между температурой испытаний и време-нем до разрушения при неизменном напряжении (зависимость Ларсона-Миллера):

П = T(C+lgt) (8.1)

где П – параметр, являющийся постоянным числом для конкретного металла и уровня приложенных напряжений;

T – температура, 0С;

С – постоянная, близкая к 20;

t – время приложения нагрузки в часах до разрушения, ч;

Эта зависимость позволяет по данным кратковременных испытаний при более высоких температурах определить длительную прочность при более низких (эксплуатационных) температурах. Для получения значения параметра П необходимо иметь результаты нескольких испытаний при постоянном напряжении, разных температурах и однотипном разрушении. При этом максимальная температура испытаний не должна превышать ра-бочую более, чем на 50-100оС. Например, если температура испытаний металла, для которого С = 20 возрас-тает от 800 до 1000оС, то время разру-шения уменьшится от 100 ч при 800оС до 0,035 ч при 1000оС, то есть время до разрушения образца при заданном уравне напряжений изменяется в зави-симости от температуры таким образом, что этот параметр П остается неиз-менным.

**8.3 Влияние концентраторов напряжений на прочность и пластичность металла при высоких температурах**

Чувствительность материала к концентрации напряжений выявляется при растяжении цилиндрических образцов со спиральным надрезом и оцени-вается следующими коэффициентами:

Kσ = σд.п.н/σд.п.г; Kδ = δн/δг, (8.2)

где σд.п.н и δн –длительная прочность и пластичность надрезанного образца;

σд.п.г и δг  – то же гладкого образца.

Значения Kσ находятся в пределах 0,5...1,0, а Kδ может изменяться от 0,8 до 0,04. Особенно низкие значения Kδ у высокопрочных аустенит ных сталей и сплавов на никелевой основе.

**8.4 Свойства сварных соединений при высоких температурах**

**эксплуатации и влияние на них механической неоднородности**

Свойства сварных соединений при высоких температурах эксплуатации отличаются от свойств основного металла при тех же температурах по двум причинам:

1 В сварных соединениях возникают участки (металл шва и зоны термического влияния) с иными механическими свойствами, чем в основном металле. Отличия обусловлены разным химическим составом металла шва и его структурой в сравнении с основным металлом. В зоне термического влияния (ЗТВ) могут происходить глубокие изменения из-за ослабления границ зерен в результате перегрева, дисперсионного упрочнения этих зон в процессе действия рабочих температур.

2 В сварных соединениях возникает концентрация напряжений, которая при высоких температурах действует как фактор концентрации пластических деформаций ползучести и как фактор постоянно действующего напряжения в местах объемных схем напряженного состояния, где ползучесть затруднена.

Оценка механических свойств шва и зон термического влияния в отдельности не может дать ответа на вопрос о поведении сварного соединения в целом, так как при высоких температурах в процессе ползучести металла происходит сложное механическое взаимодействие отдельных зон, приводящее как к исчерпанию пластичности металла некоторых мест, так и к образованию объемного напряженного состояния в прослойках с последующим хрупким разрушением.

Предел ползучести сварного соединения, характеризующий сопротивление ползучести на установившейся стадии, обычно не определяют, так как участок сварного соединения составляет лишь небольшую часть сварной конструкции и не может оказать заметного влияния на общее изменение ее при эксплуатации. Предел ползучести в отдельности для металла шва определяют, чтобы выбрать такую композицию шва, которая обеспечивает предел ползучести, не уступающий основному металлу. Для этого достаточно провести сравнительные испытания образцов разных составов при температуре эксплуатации и при одном уровне напряжения. Главными свойствами сварных соединений являются длительная прочность и пластичность.

Сварные соединения для определения длительной прочности чаще всего испытывают на одноосное растяжение. Расположение шва поперек образца позволяет выявить наименее прочный участок, а при расположении шва вдоль образца – наименее пластичный участок сварного соединения. Но из-за малого сечения цилиндрического образца в полной мере не удается обнаружить эффект контактного упрочнения и возможную локализацию пластических деформаций в отдельных зонах, а также пластичность отдельных очень узких участков, так как общее удлинение образца регистрируется как сумма пластических деформаций всех зон.

Эффект контактного упрочнения может быть выявлен на образцах больших размеров. Степень разупрочнения сварного соединения относительно основного металла зависит от свойств основного металла и его реакции на термический цикл сварки, а также от температуры испытания и времени до разрушения. Сварные соединения термически неупрочненных сталей (углеродистые, хромомолибденовые и аустенитные с карбидным упрочнением) равнопрочны основному металлу и разрушение происходит вне границ сплавления.

Длительная прочность сварных соединений термически упрочненных сталей может быть существенно ниже из-за разупрочнения в зонах термичес-кого влияния. В хромомолибденованадиевых сталях разупрочняется участок высокого отпуска и неполной перекристаллизации; в аустенитных сталях и сплавах с интерметаллидным упрочнением – участок вблизи линии сплавления, нагреваемой до температур аустенизации. Зоной разупрочнения может быть и сам шов, если не обеспечена его равнопрочность основному металлу, что характерно для сталей с высокой степенью легирования. Разупрочненные участки выступают в роли мягких прослоек.

Общая закономерность подкрепляющего действия соседних более прочных участков на мягкую прослойку при высоких температурах сохраняется, если разрушение прослойки происходит вязко. Влияние высоких температур из-за ползучести металла оказывается слабее в подкрепляющем действии соседних участков, однако при длительных выдержках разрушение в прослойке может проходить хрупко, причем уровень прочности при этом может оказаться даже ниже уровня металла самой мягкой прослойки.

В зависимости от относительной толщины мягкой прослойки(рис.8.3) изменяется отношение предела длительной прочности сварного соединения σ'д.пк пределу длительной прочности основного металла σд.п , а также пластичность металла до разрушения(δ или Ψ). Причем это изменение зависит от времени t до разрушения.



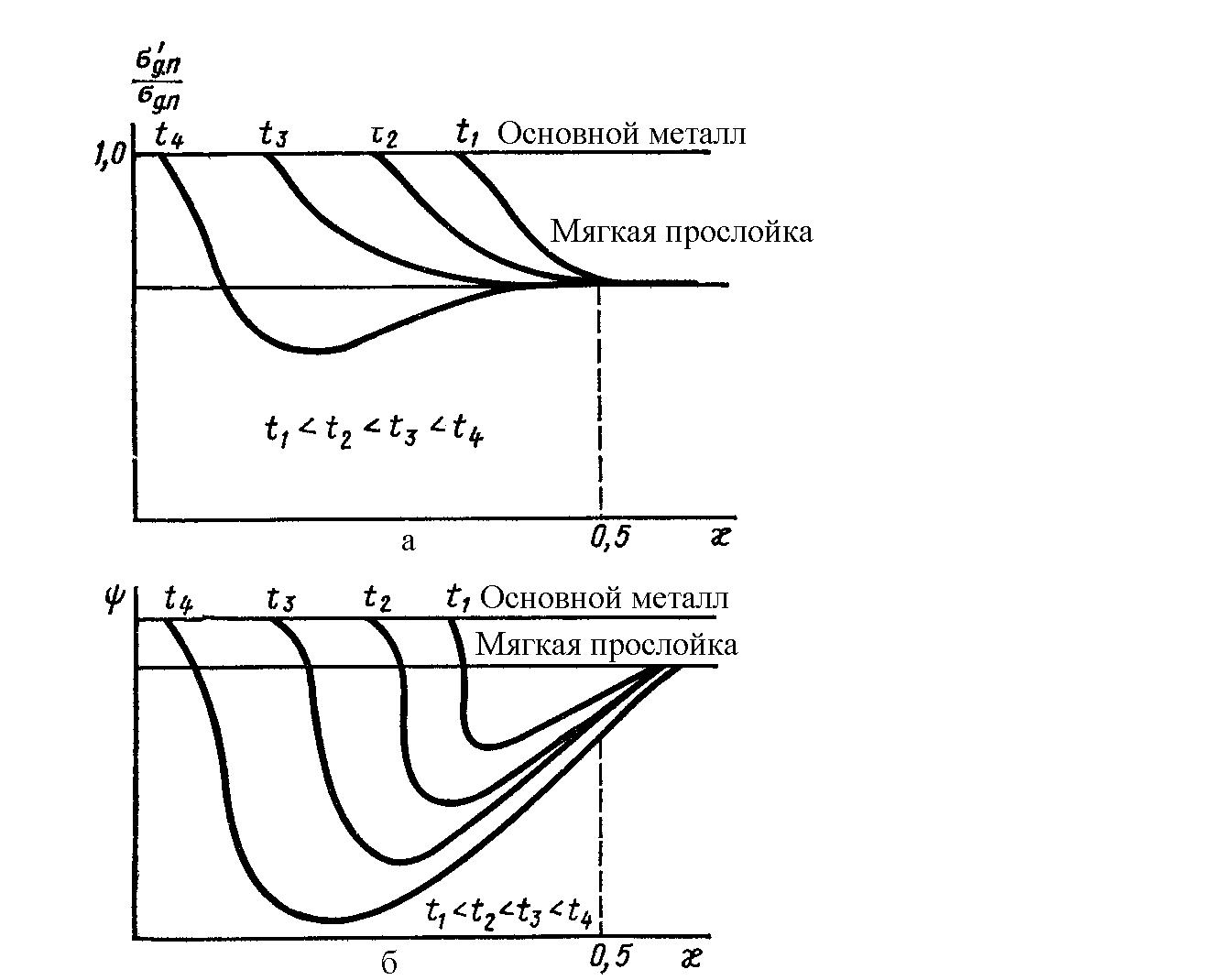


Рисунок 8.3 – Влияние относительной толщины мягкой прослойки на длительную прочность (а) и пластичность (б) сварного соединения

Для широкой прослойки (>0,5) контактного упрочнения недостаточно и прочность сварного соединения отвечает прочности мягкой прослойки. В случае непродолжительного времени до разрушения (кривая t1) прочность сварного соединения оказывается равной прочности основного металла и при сравнительно широких прослойках (= 0,3-0,4). Соединения с узкими прослойками равнопрочны основному металлу и при большем времени до разрушения, но имеют меньшую пластичность. При очень большом времени до разрушения (кривая t4) принципиально возможно разрушение, при котором прочность соединения окажется даже ниже прочности металла мягкой прослойки.



Из рис.8.3 видно, что уменьшение длительной прочности сопровож-дается снижением пластичности и служит надежным признаком перехода сварного соединения к хрупкому разрушению.

**8.5 Локальные разрушения и методы оценки склонности к ним**

**сварных соединений**

Часто местами хрупкого разрушения являются зоны вблизи линии сплавления, охватывающие сравнительно небольшие по длине участки, которые получили название локальных разрушений. Для оценки склонности сварных соединений к локальным разрушениям используют следующие методы:

1 Жесткие технологические пробы. Выполняется сварка образцов, воссоздающих неблагоприятные условия, при которых сварка влияет на смену свойств металла и образование остаточных напряжений. Последующая выдержка образцов в печах должна приводить к образованию трещин. Их выявляют или обзором, или разрезкой образцов на части для определения количества трещин. Определяется также минимальное время до появления трещин. Технологические пробы подходят для выявления более предрасположенных к локальным разрушениям сталей и относятся к качественным методам испытаний.

2 Имитация термического цикла сварки на образцах. Методы этой группы основаны на воспроизведении термического цикла сварки на ос новном металле и с последующим испытанием образца в условиях, отвечающих режиму эксплуатации. Эти методы дают количественную оценку, но они не в полной мере воссоздают влияние сварки, например деформационный цикл и диффузионные процессы. Преимущество их в том, что они не предусматривают проведение сварки и могут быть использованы для оценки качества стали на металлургических заводах.

3 Испытание образцов, вырезанных из сварных соединений. В данном

случае образец несет в себе термодеформационное влияние сварки, а термические и силовые условия эксплуатации создаются во время испытаний. Недостатком таких испытаний является отсутствие собственных напряжений, присущих натуральным сварным соединениям. Испытания образцов обычно выполняются на изгиб с постоянной скоростью деформации и определяют склонность сварных соединений к локальным хрупким разрушениям. За показатель стойкости сварного соединения к хрупкому разрушению принимают относительное удлинение крайнего волокна до появления трещины в образце. Склонность к хрупким разрушениям возрастает с уменьшением скорости деформации, которая в данном случае отвечает увеличению продолжительности испытания . Одной из главных причин хрупкости является дисперсионное упрочнение. Ослабление его возможно путем соответствующего выбора химического состава основного и наплавленного металла, режимов сварки и термической обработки.

**8.6 Расчет сварных соединений на прочность при высоких температурах.**

Расчет сварных соединений, работающих при высоких температурах, выполняют по допускаемым напряжениям, которые назначают в зависимости от допускаемых напряжений для основного металла и берут равными, с учетом способа сварки, термической обработки и контроля качества сварных соединений, минимальному из следующих соотношений:

[σ] = σв/n1; [σ] = σт/n2; [σ] = σд.п/n3; [σ] = σп/n4,

где σв, σт, σд.п, σп – гарантированные при температуре эксплуатации, сответственно, временное сопротивление, предел текучести, предел длительной прочности и предел ползучести (для очень точных узлов). Коэффициенты запаса n1, n2, n3 и n4 берут в соответствии с таблицей 8.1.

В зависимости от рабочей температуры характеристиками для расчета на прочность являются:

- при температуре ниже 250оС (для углеродистых сталей и стали 12Х1МФ) - временное сопротивление σв;

- при температуре 260…420оС (для углеродистых сталей) и ниже 550оС (для стали 12Х18Н10Т) – предел текучести σт;

- при температуре выше 420оС (для стали 12Х1МФ), выше 550оС (для сталей 12Х18Н10Т и 12Х18Н12Т) – предел длительной прочности σд.п.

Допускаемые напряжения для сварных соединений [σ/] определяют умно- жением допускаемых напряжений для основного металла [σ] на коэффициент прочности, учитывающий отрицательное влияние сварки.



Таблица 8.1 – Коэффициенты запаса

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип конструкции | n1 | n2 | n3 | n4 |
| Стационарные котельные ус-тановки (трубы, барабаны и др) | 2,6 | 1,5 | 1,5 | 1,0 |
| Стационарные турбинные  установки | 3,75...4,0 | 1,65...2,0 | 1,5...3,0 | 1,0 |

При полном проваре по всей толщине, проведении в необходимых случаях термической обработки и контроля качества шва по всей длине неразрушающими методами коэффициент =1 для углеродистой, низколегированной марганцовистой и хромомолибденовой стали, сталей типа 12Х18Н10Т и им подобных; для хромомолибденованадиевых и высокохромистых сталей = 0,8. Коэффициент прочности стыковых соединений из углеродистой и низколегированной марганцовистой стали, контроль качества которых неразрушающими методами выполняется не по всей длине, принимается в зависимости от способа сварки: = 0,85 - при автоматической двусторонней сварке под флюсом, электрошлаковой сварке, контактной сварке, односторонней ручной и автоматической сварке в СО2 или в аргоне; = 0,7 - при всех других, не указанных выше видах сварки.



Для других сварных соединений и новых марок сталей допускаемые напряжения должны устанавливаться по результатам испытаний сварных соединений.

**Тема 9. Влияние коррозионной среды на прочность**

**9.1 Коррозионные среды и виды коррозионных повреждений**

**металла и сварных соединений**

Много сварных конструкций эксплуатируются в условиях действия активных рабочих и внешних сред, которые могут существенно влиять на механические свойства сварных соединений, и для обеспечения высокой конструкционной прочности изделия требуется проведение дополнительных конструктивных и технологических мероприятий. Склонность сварных конструкций к разрушению при одновременном влиянии механических нагрузок и активных сред зависит от следующих факторов:

- степени электрохимической активности металла разных зон сварного соединения, определяющей его термодинамическую неустойчивость;

- напряженного состояния металла, реализующего механическое разру-шение;

- агрессивности коррозионной среды, зависящей от ее ионного состава, рН-свойств, газонасыщенности, температуры, давления и других параметров.

Одним из существенных факторов влияния внешней среды на прочность металлов и сварных соединений является коррозионное влияние. Наиболее распространенными средами, оказывающими коррозионное воздействие являются: влажный воздух, вода и водные растворы солей и щелочей, разные химические среды в химическом производстве.

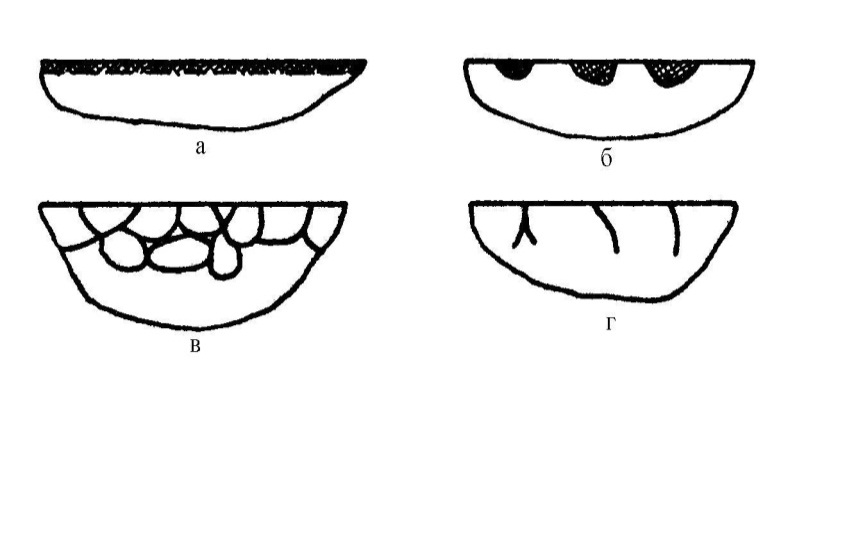
Коррозия – это разрушение металлов вследствие химического или элек-трохимического взаимодействия их со средой.

Химическая коррозия – это образование соединений в средах, которые не проводят электрический ток (прямое соединение металла с агрессивными составляющими среды).

Электрохимическая коррозия – это произвольное разрушение металла вследствие электрохимического взаимодействия с электролитически проводящей средой, при котором ионизация атомов металла (анодная реакция) и восстановление оксидного компонента коррозионной среды (катодная реакция) протекают не в одном акте. Ионы металла направляются из анодных участков поверхности в раствор (анодный процесс), оставляя в металле электроны, которые перемещаются к катодному участку, где забираются каким- либо содержащимся в растворе ионом или атомом, способным восстанавливаться на катоде. Разрушаются анодные участки, имеющие более отрицательный в данной среде заряд.

Механизм коррозионных разрушений сварных соединений принципиально не отличается от механизма разрушений основного металла. Однако сварные соединения имеют большую неоднородность, которая вызвана расхождением химического состава, структуры отдельных зон, геометрией соединения, остаточными напряжениями и пластическими деформациями. Наибольшее влияние коррозионной среды отмечается в тех случаях, когда в сварных конструкциях действуют остаточные напряжения.

На рисунке 9.1 приведены основные виды коррозионных повреждений металла.



а – общая равномерная; б – местная;

в – межкристаллическая; г – коррозионное растрескивание

Рисунок 9.1 – Виды коррозионных повреждений основного металла

Это общая равномерная коррозия (а), местная коррозия в виде отдельных язв и углублений (б), межкристаллическая коррозия (МКК), вызывающая разрушение по границе зерен (в). Указанные виды коррозионного повреждения приводят в основном к уменьшению несущего сечения детали и созданию концентраторов напряжений вследствие изменения геометрической формы поверхности. Имеют место виды коррозионного повреждения, которые изменяют сопротивление металла разным видам нагрузки. Например, с образованием в металле сетки мелких трещин появляется так называемая коррозионная хрупкость. Под влиянием коррозионной среды может снизиться сопротивление усталости или сопротивление продвижению трещины, что ведет к снижению критерия интенсивности напряжений(К).

Опасным видом коррозионного разрушения является коррозионное растрескивание, когда в напряженном металле при наличии агрессивной среды появляется трещина от гладких поверхностей металла(рис. 9.1, г).

Основные виды коррозионных повреждений сварных соединений приведены в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Основные виды коррозионных повреждений сварных

соединений

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Тип коррозии | Вид коррозии | Характер  разрушения |
| Общая | Равномерная сварного  соединения |  |
|
| Равномерная основного  металла |  |
|
| Сосредоточенная на шве |  |
|
| Сосредоточенная в зоне  термического влияния |  |
|
| Местная | Межкристаллитная  структурная : |  |
| в зоне термического влияния |  |
| в сварном шве |  |
| ножевая |  |
| Точечная питтинговая  язвенная |  |
| Под напряжением | Коррозионное растрес-кивание (межкристал-литное и транскристал-литное разрушение) |  |
|
| Коррозионная усталость (межкристаллитное и транскристаллитное разрушение) |  |
|
|
|

Коррозия может быть общая и местная. Общая коррозия может быть равномерной в границах всего сварного соединения, включая и основной металл. Это случаи, когда процесс сварки оказывает очень слабое влияние на коррозионную стойкость. Если отрицательное влияние отсутствует, а металл шва является даже более стойким, чем основной металл, то наблюдается равномерная коррозия основного металла. Напротив, если шов менее стоек в сравнении с основным металлом, то коррозия сосредоточена в шве. Слабыми участками в отношении общей коррозии могут быть зоны термического влияния. Тогда коррозия будет сосредоточена в них. Сосредоточение общей коррозии на шве или в околошовной зоне является опасным видом разрушения, свидетельствующим о заметном отрицательном влиянии процесса сварки.

Местные виды коррозии характерны для сварных соединений некоторых легированных сталей и цветных металлов. Например, структурная межкристаллитная коррозия типична для аустенитных и хромоникелевых сталей. Она может происходить в зоне, нагревавшейся до 600…900оС, в шве, а также в узкой зоне, примыкающей к шву, которая нагревалась при сварке свыше 1250оС. Последний вид получил название ножевой коррозии. Точечная коррозия может возникать вследствие повреждения поверхностной пленки металлов во время нагрева при сварке.

Собственные и эксплуатационные напряжения влияют на общую и местную коррозию. Растягивающие напряжения увеличивают скорость общей коррозии металлов в кислых средах и незначительно - в нейтральных и основных средах. Более существенно влияние напряжений на местные виды коррозии.

К отдельному типу коррозионного повреждения относят коррозионное растрескивание и коррозионную усталость под напряжением (см.табл.9.2). Типичными средами, в которых происходит растрескивание сварных соединений, являются: для углеродистых сталей – растворы щелочей и нитратов; для нержавеющих сталей – хлориды; для алюминия и его сплавов – растворы солей; для титановых сплавов – растворы неорганических кислот.

В сварных соединениях кроме собственных напряжений присутствует значительное количество других факторов, оказывающих влияние на коррозионное растрескивание (это пластическая сварочная деформация, химическая и структурная неоднородность, наличие разных дефектов и др.).

Пластическая деформация в зависимости от схемы ее создания и величины влияет на коррозионное растрескивание. На рис.9.2 показана зависимость времени до растрескивания от величины пластической деформации, созданной при разных температурах. Величины пластических деформаций до 2...3% наиболее неблагоприятно влияют на прочность.

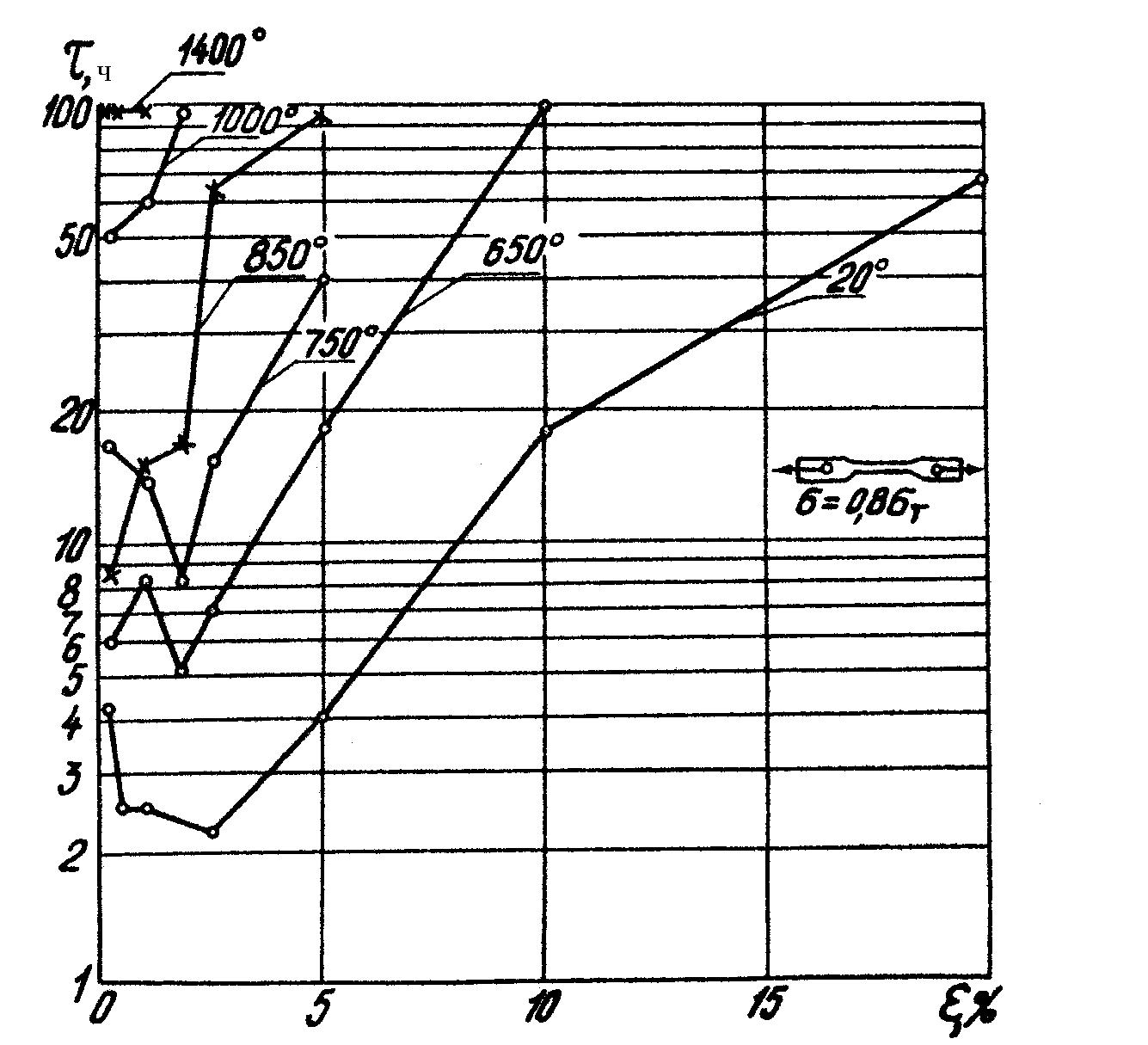


Рисунок 9.2 – Влияние пластической деформации , температуры на



коррозионное растрескивание при напряжении σ = 0,8σТ стали Ст.3, находящейся в кипящем растворе нитратов: 45% Са(NО3) + 35% NH4NO3

**9.2 Методы оценки работоспособности сварных соединений**

**в коррозионных средах**

Методы коррозионных испытаний сварных соединений пока не стандартизированы. Используются методы, которые применяются для исследования основного металла, с внесением в них особенностей испытаний сварных соединений. Применяют также специальные методы, разработанные для сварных соединений. Оценка основного металла при испытании на общую коррозию выполняется по массовому показателю К, который определяет изменение массы по формуле

(9.1)



где Р0 – масса образца до испытания, г;

Р1 – масса образца после испытания, г;

F – площадь образца, м2;

t – время исспытания, ч.

Распространен также показатель глубины коррозионного слоя. Существующие металлы разбиты на 6 групп и оцениваются по 10-балльной шкале (табл.9.2).

Таблица 9.2 – Показатель глубины коррозионного слоя

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Группы | Балл | Глубина коррозионного слоя, мм/год |
| 1 Совсем стойкие | 1 | 0,001 |
| 2 Очень стойкие | 2/3 |  |
| 3 Стойкие | 4/5 |  |
| 4 Пониженно –  стойкие | 6/7 |  |
| 5 Малостойкие | 8/9 |  |
| 6 Нестойкие | 10 | Свыше 10 |

Работоспособность сварных конструкций в коррозионных средах зависит главным образом от работоспособности сварных соединений. На нее влияют свойства основного металла и сварочных материалов, метод и технология сварки, конструктивное оформление сварного соединения, условия эксплуатации: коррозионная среда, температура, нагрузка. Более качественная оценка стойкости сварного соединения проводится по следующим признакам (табл.9.3):

**–** стойкость против общей коррозии;

**–** склонность к межкристаллитной коррозии;

– степень изменения механических свойств под влиянием коррозионной среды;

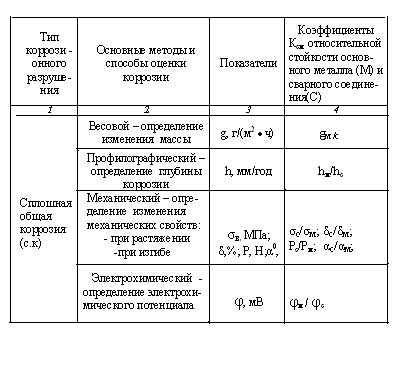
**–** стойкость против растрескивания при наличии коррозионной среды и напряжений.

Лабораторные испытания сварных соединений проводятся в два этапа:

- испытания на общую и местную коррозию без нагрузки;

- в случае достаточной стойкости при испытаниях на первом этапе определяют коррозионную стойкость под напряжением.

Таблица 9.3 – Показатели стойкости металлов и сварных соединений в разных коррозионных средах



|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Местная коррозия (м.к) | Механический –  определение изменения механических свойств:  – при растяжении  – при изгибе | σ,МПа; δ, %  Р, Н; α0, | σс/σм ;δс /δм  Рс /Рм ;αс /αм |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Определение глубины разрушения | h, мм/год | hм /hс |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Коррозионная  усталость | Условный предел  корозионно-цикличе- ской прочности | σN, МПа | σN (с) /σN (м) |
| Количество циклов до  разрушения | Np | Np(с) / Np(м) |
| Коррозионное  растрескива -  ние | Время растрескивания | t, год | tм / tс |
|
| Величина критической нагрузки | σкр, МПа | σкр(с)/σкр(м) |
|
| Величина коэффици-ента интенсивности  напряжений | К1с,МПам1/2 | К1с(с)/К1с(м) |
|
|
|
|

Испытания на общую коррозию по глубинному показателю проводятся в соответствии с ГОСТ 5272-85. Так как глубина коррозии в разных зонах сварного соединения может быть разной, целесообразно для более объективной оценки стойкости разных зон снимать профилограмму по ширине сварного соединения.

Испытания аустенитных и аустенитно-ферритных сталей на межкристаллитную коррозию проводятся по ГОСТ 6032-85. Определение склонности к МКК основано на кипячении образцов в соответствующих растворах. Последующее исследование шлифов позволяет определить характер коррозии. Применяют также специальные методы: травление, измерение электросопротивления, изменение металлического звука и др. С помощью механических испытаний сварных соединений определяют снижение несущей способности соединения как вследствие ослабления сечения при общей коррозии, так и вследствие снижения прочности и пластичности металла от местной коррозии. Испытание на изгиб имеет некоторый перевес перед испытанием на растяжение, в особенности при определении пластичности. Испытание на изгиб позволяет более четко выявлять изменение свойств на поверхности металла.

Испытания сварных соединений на коррозионное растрескивание проводят как при отсутствии внешних нагрузок, так и при их действии (рис.9.3, 9.4) . Испытания без внешних нагрузок отвечают условиям эксплуатации слабонагруженных сварных конструкций, они позволяют также оценить роль остаточных собственных напряжений. Простейшим слу чаем является испытание сварных пластин с одним или двумя пересекающимися швами (рис.9.3,а). Здесь собст-венные напряжения при одном шве одноосные, а при двух швах имеют незна-чительное дополнительное (второе) напряжение. В трубчатых образцах с про-дольным и кольцевым швом имитируются условия работы трубопроводов (рис. 9.3, б).

В круглых образцах диаметром 100...150мм с толщиной 2...5мм и асим-

метричным швом диаметром 20...40мм (рис. 9.3, в) возникают двухосные растягивающие напряжения, которые оказывают более сильное влияние на растрескивание, чем одноосные напряжения. В качестве объектов исследова-ния могут быть взяты и сварные узлы (рис. 9.3, г).

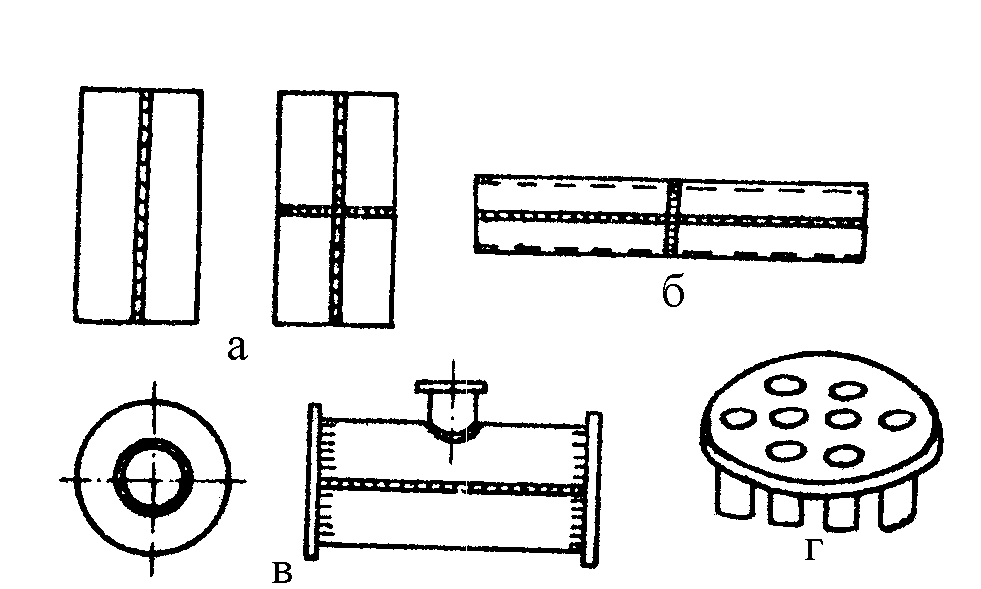


Рисунок 9.3 – Примеры сварных образцов и узлов, используемых в исследованиях на коррозионное растрескивание

Приложение внешних нагрузок позволяет интенсифицировать процесс коррозионного растрескивания, в особенности при наличии значительных собственных напряжений. Нагрузки могут быть приложены по схеме постоянной деформации (рис. 9.4, а) или постоянного напряжения (рис 9.4,б).

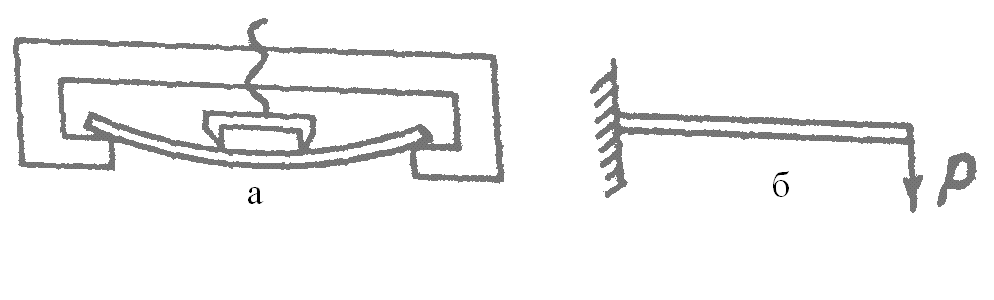


Рисунок 9.4 **–**  Нагрузка по схеме постоянной деформации (а) и

постоянного напряжения (б)

Схема постоянного напряжения в большей степени отвечает реальным условиям эксплуатации сварных конструкций. Способы нагружения сварных элементов разнообразные: растяжения одноосные и двухосные с разными со-отношениями главных компонентов; изгибы одноосные и двухосные и т.д.

При применении малых по величине сварных образцов, не имеющих больших собственных напряжений, данные методы могут быть использованы лишь для сравнительной оценки разнообразных технологических вариантов получения сварного соединения.

Сведения о действительной стойкости сварного узла могут дать только методы, в которых используются довольно большие образцы, сохраняющие все основные отрицательные последствия сварки. В таблице 9.5 приведены ориентировочные показатели стойкости металлов и сварных соединений в разных коррозионных средах.

Таблица 9.4 **–**  Показатели стойкости металлов и сварных

соединений в разных коррозионных средах

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Мате-  риал | Коррозион-  ная среда | Стойкость основного металла | | | | Основной  вид корро-зионного разрушения сварного соединения | |
| Общая коррозия | | Местная коррозия МКК, то-чечная | Коррози -онное рас-трескива-  ние |
| 1 | 2 | 3 | | 4 | 5 | 6 | |
| Угле-  родис-тая сталь типа Ст.3 | Атмо-сферные условия | Стойкий3 (4...5 баллов) | | Стойкий1 | Стойкий1 | Общая  коррозия | |
| Морская  вода | Мало-стойкий3 (7...8 баллов) | | Стойкий1 | Стойкий1 | Общая сосредо-  точенная кор-розия | |
| Едкий натр, 50% | Понижен-но-стой-кий (6 бал-лов) | | – | Растрес-кивается3 | Коррозионное растрескива-ние | |
| Техни- ческий титан  ВТ-1-1 | Атмосфер-  ные усло-вия и мор-ская вода | Совершен-но стойкий1  (1 балл) | | Стойкий1 | Стойкий1 | Стойкий | |
| Азотная кислота, 65% | Стойкий2 | | Возмож-на МКК2 | Возможно растрески-  вание | МКК | |
| Соляная кислота, 20°С | Пониженно – стойкий3  (6 баллов) | | Стойкий3 | Стойкий2 | Общая  коррозия | |
| Нер-жаве-ющая сталь типа Х18Н9 | Атмосфер-  ные условия | | Весьма стойкий  (2-3 балла) | Стойкий1 | Стойкий1 | | Стойкий | |
| Морская  вода | | Стойкий2 (4-5 баллов) | Подверже-на точечной коррозии2 | Стойкий1 | | Точечная коррозия | |
| Азотная кислота, 65% | | Стойкий3  (5 баллов) | Подверже-на МКК3 | Стойкий3 | | Межкрис-  таллитная коррозия | |
| Соляная  кислота (0…50°С) | | Пониженно- стойкий3 (6 баллов) | Стойкий3 | – | | Общая сосре-  доточенная  коррозия | |
| Насыщен-  ный раствор хлористого магния | | – | – | Растрес-кивается3 | | Коррозионное растрес-  кивание | |

Примечание. Показатель степени характеристики означает:

1 – сварное соединение равноценно основному металлу;

2 – стойкость сварного соединения близка к стойкости основного металла;

3- стойкость сварного соединения ниже стойкости основного металла.

**9.3 Прочность сварных соединений в агрессивных средах**

В общем случае прочность сварных соединений в агрессивных средах определяется следующими факторами:

МА.С = М + Н + С, (9.2)

где М – свойства материала,

М = Ми + Мт + Мэ, (9.3)

где Ми – исходные свойства материала;

Мт – изменение свойств материала при технологической обработке;

Мэ – изменение свойств материала при эксплуатации;

Н – напряженное состояние;

Н = Нс + Нэ, (9.4)

где Нс – собственные напряжения;

Нэ – напряжения при эксплуатации;

С – свойства среды,

С = Си + Св, (9.5)

где Си – исходные свойства среды (химический состав, степень активности);

Св – влияние на свойства среды внешних условий (температура, давление и др.)

**9.4 Общие и специальные методы повышения стойкости сварных соединений против коррозионного разрушения**

Повышение стойкости сварных соединений может осуществляться общими методами, которые пригодны для металлических конструкций вообще, и специальными методами, характерными для сварных соединений.

Общие методы включают:

- рациональный выбор основного металла, стойкого против разных видов коррозионного разрушения;

- рациональное конструирование;

- использование технологических процессов изготовления деталей, обеспечивающих их максимальную стойкость;

- применение различного рода защитных покрытий: а) на органической основе (лакокрасочные покрытия); б) на неорганической основе (оксидные, фосфатные, хромистые и др.); в) металлические, образованные плакированием, диффузией, горячей металлизацией, напылением, наплавкой и др.;

- рациональная эксплуатация изделия, включающая в себя проведение профилактических осмотров, ремонтов, испытаний;

- применение методов торможения коррозии за счет обработки коррозионной среды, введения замедлителей коррозии и электрохимической защиты, осуществляемой за счет подачи внешнего тока (рис. 9.5, а) или путем применения протекторов (рис.9.5,б), играющих роль анода. В обоих случаях существенным образом замедляются процессы разрушения конструкции.

Специальные методы направлены на уменьшение неоднородностей, внесенных сварочным швом или самим процессом сварки. При использовании сварочных материалов необходимо стремиться к тому, чтобы химический состав шва как можно больше совпадал с химическим составом основного металла. Выполняя процесс сварки, необходимо добиваться уменьшения термопластического влияния процесса сварки на свойства металла.

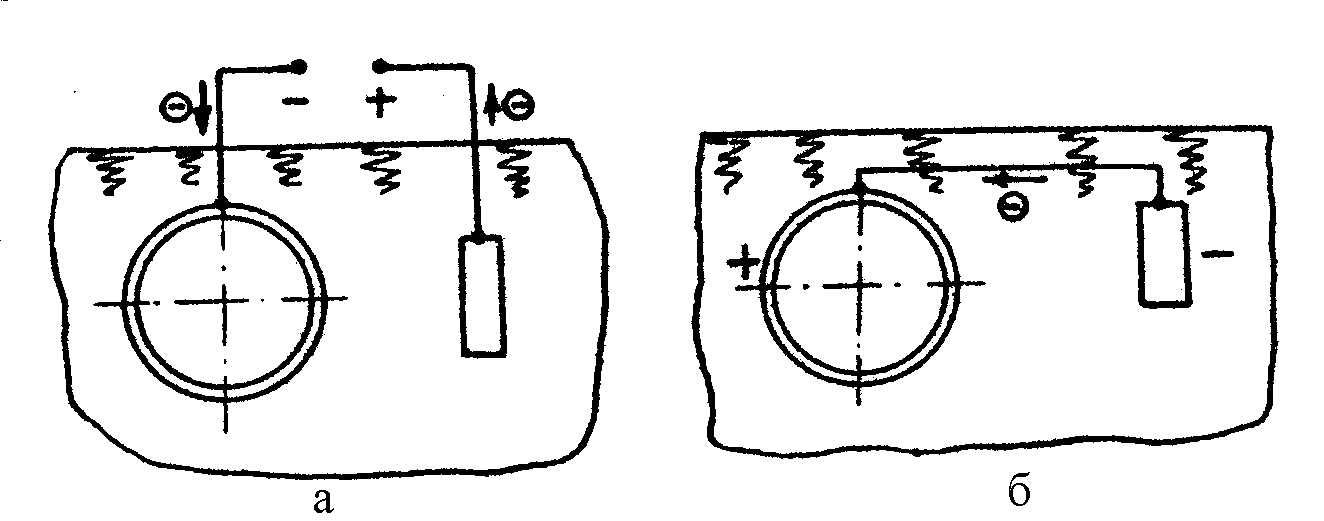


Рисунок 9.5 – Примеры электрохимической защиты подземного трубопровода за счет подведения внешнего тока (а) или

применения протектора (б)

К специальным методам относятся:

- подбор рациональных присадочных материалов;

- назначение таких сварных соединений, которые позволяют регулиро-вать химический состав металла шва;

- регулирование термического цикла сварки и условий кристаллизации, а также использование разных приемов с целью улучшения структуры шва и око-лошовной зоны (сварка с минимальными погонными энергиями, концентрированными источниками тепла, дополнительным охлаждением и др.);

- регулирование процесса сварки с целью получения минимальных оста-точных напряжений;

- получение сварного соединения без дефектов сварки с минимальной концентрацией напряжений;

- устранение дефектов сварки;

- термическая и механическая обработка сварных соединений с целью стабилизации структуры, снятия напряжений, уменьшения концентрации напряжений.

**Тема 10. Расчетная и конструкционная прочность**

**10.1Свойства сварных соединений**

Свойства сварных соединений отличаются от свойств основного ме- талла, так как они формируются под влиянием многочисленных факторов. К ним относят: исходный основной металл, сварочные материалы, воздействие источников энергии, сложные процессы плавления и кристаллизации металла в процессе сварки, взаимодействие его с окружающими жидкой и газовой фазами, структурные превращения при воздействии изменяющихся температур, случайное возникновение разного рода несплошностей и др. Поэтому свойства сварных соединений могут изменяться в широких пределах, так как на них влияют следующие факторы:

их более значительное рассеяние в сравнении с основным металлом;

неоднородность свойств и химического состава отдельных участков сварного соединения;

форма соединения, вызванная не только условиями образования, но и возможными дефектами несплошности, которые создают в некоторых случаях очень высокую концентрацию напряжений; концентрация пластических деформаций в процессе сварки и термическое влияние могут вызвать в ряде сталей деформационное старение, которое неблагоприятно сказывается на их хладостойкости;

наличие в сварных соединениях в большинстве случаев высоких ос- таточных собственных напряжений; остаточные напряжения при переменных нагрузках и низкой пластичности могут существенным образом влиять на механические свойства сварного соединения в целом.

Таким образом, механические свойства сварных соединений зависят от свойств металла отдельных его участков, геометрических форм сварного соединения, остаточных напряжений и степени рассеяния любого из указанных факторов. Стандартными механическими свойствами сварных соединений являются: пределы прочности и текучести, относительное удлинение и сужение, твердость, ударная вязкость.

Механические свойства сварных соединений - это их способность сопротивляться деформированию и разрушению под влиянием внешних и собственных механических сил в условиях концентрации напряжений, неоднородности свойств и собственных напряжений.

**10.2 Конструкционная и расчетная прочность, причины их расхождения**

**Конструкционная прочность** - это установленная в результате эксплуатации или испытаний при конкретных свойствах материала, значении и характере действия нагрузок, температуры, среды, а также технологии изготовления способность конструкции сопротивляться наступлению тех предельных состояний, от которых зависят ее служебные свойства.

**Расчетная прочность** - это установленная в результате расчета путём использования характеристик материалаи аппарата теории, связывающей эти характеристики с искомой величиной прочности, способность сварного соединения или конструкции сопротивляться наступлению тех предельных состояний, которые соответствуют наступлению их отказа в работе. Расчетные методы непрерывно совершенствуются, но они не достигают степени усовершенствования, позволяющей получить полное совпадение расчетной и конструкционной прочности. Приводятся шесть причин расхождения расчетной и конструкционной прочности.

Конструкционная прочность является величиной, имеющей рассеяние, так как имеют рассеяние свойства материала и размеры. Уровень рассеяния различных составляющих прочности может иметь разные значения. Например, если ведется оценка прочности по предельному состоянию текучести стенки сосуда, работающего под давлением, торассеяние будет зависеть от рассеяния свойств металла по пределу текучести σт и толщине листового металла**.** Эторассеяние обычно небольшое. При оценке прочности по предельному состоянию разрушения сосуда, изготовленного из высокопрочной и чувствительной к концентрации напряжений стали, рассеяние будет зависеть от концентрации напряжений, которая, в свою очередь, зависит от радиусов закруглений в зонах концентрации. Рассеяние в данном случае окажется более значительным. Сравнение по долговечности во время испытания сосудов при изменяющемся давлении даст еще большее рассеяние результатов. Поэтому одному полученному расчетному уровню прочности будет всегда отвечать некоторая совокупность неодинаковых значений конструкционной прочности, наблюдаемой фактически. Это одна из причин расхождения расчетной и конструкционной прочности, которая вытекает из самого принципа построения расчета, так как не рассматривает рассеяние факторов, принимающих участие в расчете.

Вторая причина –значительное влияние на расхождение уровней расчетной и конструкционной прочности оказывает возможное появление и распределение дефектов в сварных конструкциях. В современных расчетах не принято заранее включать дефект как фактор, подлежащий учету на стадии проектирования. Технологические требования к сварным конструкциям обычно таковы, что не допускают наличия в них опасных дефектов. Однако даже при 100%–ном контроле качества неразрушающими методами сохраняется некоторая вероятность пропуска дефекта, поэтому остается и вероятность отклонения расчетной прочности от конструкционной. Проблема влияния дефектов на прочность – наиболее острая при использовании высокопрочных конструкционных материалов, которые, с одной стороны, воспринимают высокие напряжения, а с другой стороны, крайне чувствительны к концентрации напряжений. Эти мате-риалы крайне чувствительны к таким концентраторам, размеры которых близки к возможностям физических методов контроля.

Третья причина – недостаточность значений комплексного влияния нескольких одновременно действующих факторов. Большая часть расчетных методов разработана для определения влияния какого-нибудь одного фактора. Учет в расчетах каждого фактора отдельно является недостаточным, что и приводит к расхождению расчетной и конструкционной прочности. Соединение в одном методе расчета двух и более факторов при взаимодействии между собой – задача редкая при современном уровне развития науки о прочности.

Четвертая причина – недостаточность учета влияния слабоизученных факторов также является одной из причин расхождения расчетной и конструкционной прочности. Например, неучет низких температур, существенно влияющих на чувствительность материала к концентрации напряжений. Методы расчета, учитывающие это влияние, только создаются, а разрушения конструкций при низких температурах довольно часты.

Пятая причина – неправильный выбор предельных состояний и критериев для оценки прочности конструкций. Например, распространен расчет сварной конструкции по предельному состоянию текучести, тогда как она должна быть рассчитана на выносливость по предельному состоянию разрушения от усталости или на сопротивляемость разрушению через концентрацию напряжений. Много ошибок и при выборе критериев. Например, за критерий работоспособности принимают ударную вязкость металла. Однако несовпадение коэффициента концентрации напряжений в лабораторном образце (10х10х55 мм) с самой конструкцией не позволяет переносить эти результаты на оценку изделия. Иногда для оценки несущей способности конструкции используются только силовые критерии вместо комбинации их с деформационными, которые в отличие от силовых одинаково хорошо чувствительны к изменению коэффициента кон-центрации напряжений α во всем диапазоне его изменений, в то время как силовые критерии хорошо реагируют на смену α, пока среднее разрушающее напряжение σср. р остается ниже σт). Критерий критического раскрытия конца трещины перед разрушением δс также имеет преимущество перед силовыми критериями, если конструктивные элементы разрушаются после протекания пластической деформации.

Шестая причина–вероятностная природа формирования конструкционной прочности. Здесь имеется два аспекта. Один связан с комбинацией разных фак-торов и их неблагоприятным сочетанием, а второй заключается в том, что каждый из факторов имеет рассеяние. Статистический метод используется редко, в отдельных случаях. В обозримом будущем невозможность учета статистической природы формирования конструкционной прочности будет одной из главных причин расхождения расчетной и конструкционной прочности. Расчетная прочность может совпадать с конструкционной только при применении вероятностных методов с учетом рассеяния действующих факторов.

**10.3 Пути сближения расчетной и конструкционной прочности**.

Сближение, а в некоторых случаях и совпадение расчетной и конструкционной прочности обеспечиваются системой различных мероприятий. В области расчетов это достигается непрерывным усовершенствованием расчетных методов.

Если расчетная прочность выше конструкционной, то при небольших коэффициентах запаса не исключены выходы конструкции из строя по причине наступления предельного состояния. Если расчетная прочность ниже конструкционной, то это означает, что допущен перерасход металла. Для совпадения расчетной и конструкционной прочности необходимо выполнение следующих условий:

- правильный выбор предельных состояний, по которым производится определение прочности;

- в пределах каждого из рассматриваемых предельных состояний выбор таких показателей, которые наилучшим образом подходят для количе-ственного определения величины несущей способности;

- применение такого аппарата теории, который бы позволял вычислить запасы прочности или вероятность разрушения на основе использования простейших характеристик металла;

- учет в расчетах дополнительных факторов (факторов условий работы), которые в используемом расчетном методе не являются основными (например, схемы напряженного состояния, неоднородности свойств металла; наличие дефектов, собственных напряжений; температура, характер действующих нагрузок, среды, статистическое рассеяние характеристик металла и др);

- использование коэффициентов запаса при правильно выбранных рас-

четных предельных состояниях является методом назначения таких условий эксплуатации (уровня напряжений, числа нагружений) по сравнению с расчетной прочностью, при которых неблагоприятное рассеяние факторов, не учтенных расчетом, не понизит конструкционную прочность изделия до уровня, со-ответствующего эксплуатационным условиям;

- при применении вероятностных методов расчета обходятся без коэф-фициентов запаса, а оперируют допустимой вероятностью разрушения - в этом случае только при правильно учтенных факторах возможно совпадение расчетной и конструкционной прочности в том смысле, что совпадут средние величины, законы распределения и дисперсии расчетной и конструкционной прочности.

На стадии проектирования кроме выполнения задач, связанных со слу-жебным назначением конструкции, стремятся принимать такие решения, которые бы по возможности исключали действие неясных в расчетном и физическом плане факторов (например, назначают такие формы конструкции, которые позволяют определить в них напряжение; применяют апробированные материалы и др). Если металл чувствителен к концентрации напряжений, необходимо в расчете учитывать трещину, эквивалентную дефекту, который может быть выявлен. При разработке технологии сварки необходимо стремиться устранить те факторы, которые трудно учесть расчетом. Например, термическая обработка устраняет неоднородность механических свойств, снимает остаточные напряжения, наличие которых трудно учесть, правкой устраняются несовершенства геометрической формы, которые могут вызывать концентрацию напряжений, не предусмотренную расчетом. Проводится контроль готовых изделий с целью выявления возможных дефектов, которые, как правило, расчетом не учитываются. Ответственная продукция подвергается испытаниям при повы-шенных нагрузках, что является эффективным средством повышения вероят-ности их неразрушимости и сближения расчетной и конструкционной прочности.

В некоторых случаях осуществляют контроль неразрушающими методами с целью обнаружения дефектов, которые могли появиться в процессе эксплуатации.

Перечисленные выше мероприятия являются общими (не конкретизированными), потому что каждое из них настолько обширно, что может явиться предметом деятельности проектного института, лаборатории, завода.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1 ГОСТ 9.903-81. Стали и сплавы высокопрочные. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание.– М.: Изд-во стандар-тов,1981. – 21с.

2 ГОСТ 25506-85. Методы механических испытаний металлов. Оп-ределение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62с.

3 ГОСТ 26294-84. Соединения сварные. Методы испытаний на коррозионное растрескивание //Сварочное производство.–1985.– №7.-С.11-12.

4 Золотаревский, В.С. Механические свойства металлов: учебник/ В.С. Золотаревский .– М.: Металлургия, 1983. – 350 с.

5 Писаренко, Г.С. Опір матеріалів: підручник / Г.С. Писаренко, О.Л.Квітка, Є.С. Уманський. – К. : Вища шк., 2004. – 655 с. –

ISBN 966-642-056-2.

6 Александров, А.В. Сопротивление материалов: учебник для вузов / А.В.Александров, В.Д.Потапов, Б.П.Державин. – М.: Высш. школа, 2001. – 560с.

7 Броек, Д. Основы механики разрушения /Д. Броек. – М.: Высш. школа, 1980.– 368с.

8 Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В. А. Винокуров, С.А.Куркин, Г.А.Никола-ев; под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с. –

ISBN 5-217-02776-2.

9 Винокуров, В.А.Теория сварочных деформаций и напряжений/ В.А.Винокуров, А.Г.Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1984. – 284 с.

10 Винокуров В.А. Специальные главы прочности сварных конст-рукций/ В.А. Винокуров. – М.: МВТУ, 1973. – 110с.

11 Иванова, В.С. Разрушение металлов/ В.С. Иванова. – М.: Метал-лургия,1979.– 167с.

12 Качанов, Л.М. Основы механики разрушения/ Л.М. Качанов.– М.: Наука,1974.– 312с.

13 Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов. – М: Наука.1969. – 420с.

Качанов, Л.М. Основы механики разрушения / Л.М. Качанов. – К.: Вища шк., 1986. – 775с.

15 Куркин, С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работа-ющих под давлением / С.А. Куркин. – М.: Машиностроение, 1976. – 184с.

16 Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1978. – 400с.

17 Макклинток, Ф. Деформация и разрушение материалов/ Ф.Мак-клинток, А.Аргон. – М.: Мир, 1970. – 443с.

18 Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соеди-нений и деформации конструкций / Г.А.Николаев, С.А.Куркин, В.А.Вино-куров. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с.

19 Стеклов, О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных сре-дах / О.И. Стеклов. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.

20 Херцберг, Р.В. Деформация и механика разрушения конструкцион-ных материалов / Р.В. Херцберг. – М.: Металлургия,1989. – 576с.

24 Чертов, І.М. Зварні конструкції : підручник / І.М. Чертов. –К.: Арістей, 2006.-376с. - ISBN 966-8458-88-5.

25 Ковтун, В.В. Опір матеріалів. Розрахункові роботи: навч. посіб-ник / В.В. Ковтун, В.С. Павлов, О. А. Дорофеєв. – Львів: Афіша, 2002. – 280с.

26 Карпенко, В.М.Спеціальні розділи міцності зварних конструкцій: навч. посібник / В. М. Карпенко, А. Ф. Власов. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – 168 с. –ISBN 5-7763-0314-1.

27 Шимановский, А.В. Техническое состояние строительных метал-лических конструкций в Украине / А.В. Шимановский [и др.] // Автомати-ческая сварка..– 2001.- №9.– С. 33-38.

28 Власов, А.Ф. Основи механіки руйнування. Міцність зварних кон-струкцій в особливих умовах експлуатації: навч. посібник / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко, О. Г. Гринь, В. А. Пресняков. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – 252с. –ISBN 978-966-379-171-5.

29 Власов, А.Ф. Основы механики разрушения. Прочность сварных кон-струкций в особых условиях эксплуатации: уч. пособие / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко, О. Г. Гринь, В. А. Пресняков. – Краматорск: ДДМА, 2008. – 267с. –ISBN 978-966-379-288-0.