

М 194665
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

ХОВОВ Вячеслав Михайлович

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ
В ЛИСТОВОМ МЕТАЛЛЕ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ
ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

(05.04.05 — Технология и машины сварочного
производства)

(Диссертация написана на русском языке)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ



1194665

Ховов В.М. Методика иссле

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор Куркин С. А.

Официальные оппоненты:

Профессор, Д.т.н. Мельников Н.П.
С.н.с. Ктн. Симонов А.Г.

Ведущее предприятие: НИКИМТ, г. Москва.

Автореферат разослан « »

197 г.

Защита диссертации состоится « 21 » *июня*

1973 г.

на засе

Моск

Знаме

адре

вого Красного
Э. Баумана по
дом 5.

Е

сыл

ю, просьба вы-

С

ща.

блиотеке учили-

М194665

8 ю.А.

Количество ответственных сварных соединений, работающих в условиях низких температур, постоянно увеличивается. Реальная опасность хрупких разрушений в таких конструкциях определяет большое внимание к вопросам возникновения и развития разрушений при низком уровне напряжений.

Основные закономерности процесса хрупкого разрушения металла установлены в работах Иоффе А.Ф., Давиденкова Н.Н., Степанова А.В., Шевандина Е.М., Ужика Г.В. Особенности хрупких разрушений сварных соединений показаны Касаткиным Б.С., Жемчужниковым Г.В., Винокуровым В.А., Уэллсом, Бурдекиным.

С начала 60-х годов появилось много работ, посвященных раздельному подходу к изучению двух стадий разрушения - возникновению разрушения и развития трещины,

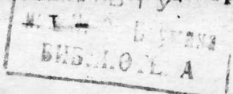
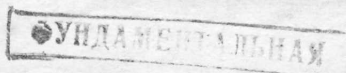
В настоящей работе стадия возникновения разрушения является основным объектом исследования. Работа состоит из четырех глав и общих выводов.

Глава I. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ, СПОСОБСТВУЮЩИХ ВОЗНИКНОВЕНИЮ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ НИЗКОМ УРОВНЕ СРЕДНИХ НАПРЯЖЕНИЙ

При статическом монотонном нагружении местом локализации пластических деформаций и возникновения разрушения является концентратор напряжений. Случаи, когда возникновению разрушения в концентраторе предшествуют большие пластические деформации всего сечения не являются опасными, так как отсутствие течения сечения с концентратором в процессе эксплуатации конструкции гарантируется расчетом. Напротив, опасность представляют разрушения элементов при нагрузках, не достигающих предела текучести, когда заметная макропластическая деформация сосредоточена лишь в непосредственной близости от вершины острого концентратора. Именно такие разрушения привлекают наибольшее внимание и обычно называются хрупкими.

Проведенный анализ литературы позволяет выделить наиболее важные факторы, влияние которых на возникновение хрупкого разрушения не вызывает сомнений: концентрация напряжений, плохое качество стали, низкая температура, повышенная толщина элементов, скорость нагружения, эффекты, связанные с технологическим процессом сварки.

Возникновение разрушения при низком уровне напряжений возможно лишь при наличии острого концентратора напряжений. При статическом нагружении в концентраторе имеет место медленное монотонное нарастание напряжений и деформаций. Поскольку в таких условиях механические свойства металла описываются его статической диаграммой деформации нам представляется целесообразной попытка разработки методики оценки чувствительности металла к концентрации напряжений



М 194665

с позиции возникновения разрушения по экспериментальным данным диаграмм деформации. Для измерений упругопластических деформаций гладких образцов, а также для непрерывной регистрации перемещений кромок концентратора в процессе испытаний образцов с надрезом требуется создание специальной высокочувствительной мерительной оснастки, способной работать при низкой температуре.

Характеристики возникновения разрушения в концентраторах сварных соединений целесообразно определять в условиях работы их в характерных типах сварных конструкций. В последние годы уделяется все большее внимание имитации условий работы сварных соединений реальных конструкций в исследовательских лабораториях.

Цель настоящей работы — разработка методики и оборудования для исследования условий возникновения разрушений в листовом металле и сварных соединениях при низкой температуре.

Задачи работы:

1. Создание мерительных устройств для непрерывной регистрации упругопластических деформаций гладких образцов и перемещений кромок острых концентраторов в процессе нагружения.

2. Разработка методики исследования изменений деформационной характеристики, связанных с понижением температуры, процессом сварки или термообработки и установление связи этих изменений с чувствительностью металла к концентрации напряжений при однократном статическом нагружении.

3. Экспериментальное исследование условий возникновения разрушения в концентраторе при нормальной и низкой температуре.

4. Разработка экспериментальной установки для исследования возникновения и распространения разрушения в сварных образцах, имитирующих условия работы металла в сосудах и трубопроводах при низкой температуре.

Глава II. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ В КОНЦЕНТРАТОРЕ ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Разработанные мерительные устройства и методика измерений позволяют производить непрерывную запись на ленту осциллографа перемещений баз при испытании гладких образцов и перемещение кромок в корне концентратора при испытании образцов с надрезом.

Датчик деформации на базе 20 — 40 мм состоит из упругого элемента в виде плоского полукольца, к которому крепятся сменные ножки. На упругом элементе наклеены тензометры сопротивления, сигнал с которых поступает в тензоусилитель и записывается осциллографом. Два рабочих тензодатчика на сжатой и растянутой по-

верхностях упругого элемента обеспечивают высокую чувствительность и температурную компенсацию, что позволяет использовать мерительные устройства для работы при низких температурах (до -196°C).

Миниатюрный датчик аналогичной конструкции позволяет производить измерения перемещения кромок концентратора на малых базах, вплоть до $1,0 - 0,8$ мм с точностью до $0,001$ мм. Малые размеры прибора и высокая чувствительность получены при применении тензодатчиков сопротивления с базой 5 мм и сопротивлением 50 ом.

При установке ножек датчика в отверстие или в зазор не требуется его дополнительного закрепления. Датчики такой конструкции оказались надежными и удобными в работе и применяются в настоящее время в ряде организаций для измерения накапливания пластических деформаций в концентраторе при статическом или циклическом нагружении.

Острые сквозные надрезы в виде щели выполняли пропилом вольфрамовой нитью с абразивом. Применение вольфрамовых проволок диаметром $0,15$; $0,10$ и $0,06$ мм позволяло получить ширину реза соответственно $0,16$; $0,11$ и $0,07$ мм. В качестве абразива применяли алмазную пасту АМС-10 или порошок окиси кремния с грануляцией частиц 10 мк.

Для регистрации перемещений в корне надрезов более узких, чем $0,8$ мм разработана методика координатных измерений. В этом случае датчик перемещений может быть установлен в середине внутреннего сквозного надреза. Из перемещений кромок Δ средней части надреза графическим или расчетным способом вычитается величина $\Delta_{\text{упр}}$, связанная с упругим искривлением кромок на длине надреза. Эта величина прямо пропорциональна среднему уровню напряжений в пластине или образце.

Измерение перемещений кромок концентратора на плоских образцах шириной 100 мм и толщиной $1-2$ мм из стали Ст.3КП и высокопрочной стали СП-28 в двух состояниях показало, что пластическая деформация в корне надреза становится ощутимой только когда напряжения достигают величины примерно равной половине предела текучести.

Так как при напряжениях меньше половины предела текучести не происходит существенного изменения геометрии корня концентратора, то для подсчета максимальных величин напряжений и деформаций можно пользоваться формулой Нейбера

$$K_t = \sqrt{K_\sigma \cdot K_\epsilon} \quad (I)$$

устанавливающей связь между коэффициентами концентрации напряжений и деформаций в пластической области нагружения.

$K_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ср}}}$; $K_\delta = \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\text{ср}}}$; K_t - теоретический коэффициент концентрации напряжений и деформаций в упругой области.

Если разрушение в концентраторе возникает до $0,5 \sigma_t$, когда $\sigma_{\text{ср}} = E \delta_{\text{ср}}$, зависимость (1), видимо, остается справедливой вплоть до момента возникновения разрушения. Условие возникновения такого разрушения может быть получено путем подстановки в уравнение (1) $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{разр}}$; $\delta_{\max} = \delta_{\text{разр}}$; $\sigma_{\text{ср}} \approx \sigma_n$

$$\text{Тогда} \quad \frac{\sigma_{n \text{ разр}}}{\sigma_t} = \frac{1}{K_t} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_{\text{разр}} \cdot \delta_{\text{разр}} \cdot E}}{\sigma_t} \quad (2)$$

Для использования этого выражения необходимо определить величины $\sigma_{\text{разр}}$ и $\delta_{\text{разр}}$. В первом приближении $\sigma_{\text{разр}}$ и $\delta_{\text{разр}}$ могут быть определены при испытании гладких образцов на осевое растяжение.

При сопоставлении условий возникновения разрушения в корне щелевого надреза и в шейке гладкого образца необходимо иметь в виду следующее. По мере увеличения толщины металла или уменьшения остроты надреза на поверхности корня надреза, вследствие стесненности деформаций, появляется поле двухосных растягивающих напряжений. Соотношение главных компонентов напряжений $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ может при этом изменяться от 0 до 0,5.

Известно, что переход от простого растяжения к двухосному может сопровождаться существенным снижением пластичности металла, особенно при $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0,5$. Причем, степень снижения пластичности увеличивается при уменьшении показателя степени упрочнения деформационной характеристики металла. Нами обнаружено, что отмеченный эффект снижения пластичности в условиях неравноосного двухосного растяжения проявляется уже при испытании обычных плоских образцов на осевое растяжение.

Сопоставление величин $\delta_{\text{разр}}$, полученных при испытании плоских и круглых образцов низкоуглеродистой стали и высокопрочной стали СП-28 после закалки и низкого отпуска выявило следующую картину. Если для низкоуглеродистой стали пластичность на обоих типах образцов оказалась примерно одинаковой, то в случае стали СП-28 пластичность, зарегистрированная на плоском образце, была в 2,5 раза меньше, чем на образце круглом.

Отмеченное снижение пластичности на плоском образце при осевом растяжении связано с возникновением стесненности деформаций в шейке в направлении ширины образца. Стесненность деформаций и появление компонента напряжений σ_2 мало сказывается в слу-

чае низкоуглеродистой стали (показатель степени упрочнения $n = 0,2$) и приводит к резкому снижению $\epsilon_{разр}$ в случае стали СП-28 ($n = 0,05$). Решающее влияние упрочняемости стали на снижение пластичности в условиях стесненности деформаций было показано ранее С.А. Куркиным и В.Ф. Лукьяновым и подтверждается в настоящее время данными экспериментальных работ отечественных и зарубежных исследователей.

Поскольку характеристики разрушения в шейке плоского тонкого образца ближе соответствуют условиям возникновения разрушения в корне концентратора напряжений, именно эти величины были использованы для постановки в расчетную зависимость (2) для установления связи номинальных напряжений в образце в момент возникновения разрушения с величиной K_t .

Оценку возможности возникновения разрушения в корне концентратора можно осуществлять следующим образом. По данным испытаний плоских образцов осевым растяжением определяются величины σ_T , $\sigma_{разр}$, $\epsilon_{разр}$, по выражению (2) строится зависимость $\frac{\sigma_{нразр}}{\sigma_T} = f(K_t)$ в пределах $0 < \sigma_n < 0,5\sigma_T$ (рис. 1). Крайняя точка этой кривой (точка А) разделяет значения коэффициентов K_t на два интервала. Концентраторы, характеризуемые $K_t < K_{t(A)}$, при нагружении до $\sigma_n < 0,5\sigma_T$ не могут вызвать разрушения, так как напряжения и деформации σ_{max} и ϵ_{max} еще не достигают разрушающей величины. Концентраторы более резкие, характеризуемые $K_t > K_{t(A)}$, уже в пределах нагружения до $\sigma_n < 0,5\sigma_T$, когда форма концентратора остается практически неизменной, способны обеспечить достижение предельного уровня напряжений и деформаций $\sigma_{max} = \sigma_{разр}$ и $\epsilon_{max} = \epsilon_{разр}$, а следовательно, и вызвать зарождение разрушения в корне концентратора.

Из рассмотрения такого подхода к оценке возможности возникновения разрушения видно, что опасность возникновения разрушения при напряжениях ниже $0,5\sigma_T$ зависит от положения точки А. Чем меньше величина $K_{t(A)}$ для конкретного материала, тем больше опасность возникновения разрушения и тем, очевидно, больше чувствительность металла к концентрации напряжений. Мерой чувствительности стали к концентрации напряжений может быть величина K_t , при которой расчетный уровень разрушающих напряжений и деформаций в вершине концентратора достигается к моменту, когда $\sigma_n = 0,5\sigma_T$. Эта величина $K_{t(A)}$ граничной точки расчетной кривой $\frac{\sigma_{нразр}}{\sigma_T} = f(K_t)$ может быть получена по формуле:

$$K_{t(A)} = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{разр}} \cdot \sigma_{\text{разр}} \cdot E}}{0,5 \sigma_t} \quad (3)$$

Экспериментальная проверка полученной связи $\sigma_{\text{н разр}}$ с величиной теоретического коэффициента концентрации напряжений и применимости изложенного подхода к оценке чувствительности металла к концентрации напряжений выполнена на трех характерных материалах при нормальной температуре.^{х)} Для сталей Ст.3КП, СП-28 в состоянии высокого отпуска и в состоянии закалки и низкого отпуска были построены зависимости $\frac{\sigma_{\text{н разр}}}{\sigma_t} = f(K_t)$ в пределах $0 < \frac{\sigma_{\text{н}}}{\sigma_t} < 0,5$.

Величина $K_{t(A)}$ для рассматриваемых металлов оказалась соответственно для стали Ст.3КП - 74, стали СП-28 после высокого отпуска - 40, СП-28 после закалки и низкого отпуска - 16. Меньшая величина $K_{t(A)}$ для стали СП-28 после закалки и низкого отпуска должна свидетельствовать о том, что соответственно меньшие величины K_t реальных концентраторов способны вызвать возникновение разрушения до предела текучести сечения. Следовательно, этот металл имеет большую чувствительность к концентрации напряжений.

Испытания образцов с концентраторами подтвердили возможность такого подхода к оценке чувствительности стали к концентрации напряжений при однократном статическом нагружении. Пластины шириной 100 мм с внутренним надрезом имели величину K_t , изменяющуюся от 4,4 до 35. На таких образцах разрушения в корне надреза при $\frac{\sigma_{\text{н}}}{\sigma_t} < \frac{\sigma_t}{\sigma_t}$ возникали лишь на стали СП-28 в состоянии закалки и низкого отпуска. Характер уменьшения $\sigma_{\text{н разр}}$, полученный экспериментально, оказался достаточно близким к гиперболическому, однако абсолютный уровень напряжений возникновения разрушения был примерно вдвое выше расчетного.

Количественное несовпадение расчетного и экспериментального уровня $\sigma_{\text{н разр}}$ связано как со значительным упрощением механизма зарождения разрушения, так и с явным запаздыванием экспериментального определения момента возникновения трещины. Качественное подтверждение принятых представлений позволяет располагать металлы в ряд по чувствительности к концентрации напряжений по данным их диаграмм деформации.

х) - Работа выполнена совместно с инж. Н.С.Мешайкиным.

Глава III. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ ДЕЙСТВИЯ ФАКТОРА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ОСНОВНОМ МЕТАЛЛЕ И СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В качестве характерных состояний металла взяты кипящая сталь Ст.3КП в виде холоднокатаного листа толщиной 2 мм в состоянии поставки, отжига и закалки, а также сталь М21 – горячекатаный лист толщиной 14 мм в состоянии поставки.

Диапазон изменения температуры был принят от +20 до -196°C с характерными точками +20, -40, -100, -150, -196°C.

Для построения диаграмм деформаций плоские образцы шириной 10 мм, толщиной 2 мм и длиной рабочей части 50 мм охлаждались в специально сконструированной холодильной камере, закрепленной на захвате машины растяжения. Низкая температура в камере создавалась путем испарения жидкого азота в развитом медном коллекторе. Температура образца измерялась в двух точках медь-константановой термпарой и автоматически поддерживалась с помощью электронного потенциометра ПСР1-03, управляющего подачей азота в систему охлаждения.

Общей закономерностью диаграмм деформации низкоуглеродистой стали при понижении температуры является прогрессивный рост предела текучести и уменьшение деформации к моменту разрушения. Перестроение начальных участков диаграмм $\sigma_1 = f(\epsilon_1)$ в логарифмических координатах показало, что закон упрочнения рассматриваемых зависимостей с достаточной точностью может описываться степенной функцией вида $\sigma = A\epsilon^n$, и, следовательно, характеризоваться двумя параметрами A и n .

Характерным для всех испытанных состояний низкоуглеродистых сталей является сохранение сравнительно высоких значений пластичности и упрочняемости при снижении температуры до -150°C.

Испытанные образцы с надрезами узкие (ширина 15 мм, толщина 2 мм, длина надреза 5 мм, наибольшая величина $K_t = 11$) показали, что возникновение разрушения при температурах -150°C и выше на всех состояниях произошло при напряжениях выше σ_T , что вполне согласуется с положением расчетных зависимостей $\sigma_{н.разр} = f(K_t)$.

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов возникновения разрушения в более толстых и широких образцах ($\delta = 14$ мм, $b = 75$ мм) с острым надрезом длиной 25 мм ($K_t = 21$) на стали М21 выявило некоторые расхождения. Разрушение при $\sigma_n < \sigma_T$ возникло раньше, чем это предсказывается рассматриваемым методом оценки чувствительности материала к концентрации напряжений.

Обнаруженное расхождение свидетельствует о нектором снижении пластичности металла в остром концентраторе при действии низкой температуры. В большей степени это снижение пластичности обнаружено на образцах, имитирующих испорченный металл зоны сварного шва.

В настоящее время твердо установлено принципиальное различие поведения сварных образцов с естественными дефектами и с надрезами, нанесенными после сварки. Как показали отечественные и зарубежные исследования последних лет, именно эту особенность сварки часто следует считать главной причиной хрупкости металлоконструкций, особенно в условиях низких температур. Работами ИЭС им. Патона, МВТУ, ЛПИ и других организаций установлено, что ухудшение свойств металла в зоне сварного соединения связано с протеканием пластической деформации при повышенной температуре.

При пластическом деформировании стали в диапазоне температур до $+700^{\circ}\text{C}$ (особенно при малых скоростях нагружения) наблюдается интенсивное повышение сопротивляемости металла протеканию деформаций, связанное с явлением динамического старения. Резкое ухудшение качества металла после динамического старения проявляется, в частности, в том, что металл становится особенно чувствительным к действию низкой температуры. Критическая температура перехода в хрупкое состояние образцов с надрезом по данным Гиренко В.С. смещается в сторону более высоких температур на $80 - 100^{\circ}\text{C}$.

На основании литературных данных и предварительных экспериментов динамическое старение стали по режиму $T=250^{\circ}\text{C}$, $\epsilon = 10\%$ было выбрано в качестве наиболее жесткой имитации термопластического воздействия сварки в зоне концентраторов напряжений. Выполняли динамическое старение путем деформирования нагретых заготовок в машине растяжения.

При испытании гладких плоских образцов, вырезанных из таких заготовок с целью построения деформационных характеристик, выявилась следующая картина. Даже при комнатной температуре появление пластической деформации на гладком образце сразу приводило к ее локализации в одном сечении. Такой механизм развития деформаций свидетельствует о крайне малой упрочняемости металла от пластической деформации. Пластичность, полученная на этих образцах, оказалась достаточно большой и мало изменялась в пределах температур до $-100 + -130^{\circ}\text{C}$ ($\epsilon_{\text{разр}} \approx 0,5$).

Испытания тонких ($\delta = 2 \text{ мм}$) и толстых ($\delta = 14 \text{ мм}$) образцов

с острыми надрезами показали, что в то время как пластичность, измеренная на гладких образцах, практически не изменяется в диапазоне температур $+20 + -100^{\circ}\text{C}$, пластическое раскрытие кромок в корне надреза монотонно уменьшается и приближается к нулю уже при температуре -50°C . Поэтому и возникновение разрушения до предела текучести наступает при температурах более высоких, чем этого следовало бы ожидать по результатам испытаний плоских образцов.

Сохранение высокого уровня пластичности состаренного металла при растяжении гладких образцов в интервале температур от $+20^{\circ}$ до -100°C и резкое снижение критического раскрытия кромок надреза для этого же металла при растяжении образцов с надрезом требует разъяснения.

Показанное выше (в главе II) снижение пластичности сталей по мере увеличения их предела текучести в условиях неравноосного двухосного растяжения ($\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0,5$) при сохранении неизменной величины пластичности при осевом растяжении образцов круглого сечения, по-видимому, не является частным случаем, но свидетельствует о наличии вполне определенной общей закономерности в поведении сталей при нагружении в условиях различной стесненности протекания пластических деформаций. Справедливость такого предположения подтверждается сопоставлением результатов экспериментальных работ, выполненных в последние годы рядом авторов (Клаузинг, Дейч А.Ш., Саидов Г.И., Барсом). Эти данные показывают, что такое же влияние на пластичность стали в условиях осевого растяжения и двухосного ($\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0,5$) может оказывать понижение температуры и увеличение скорости деформации. Как известно, влияние этих двух факторов на механические свойства стали проявляется прежде всего в увеличении предела текучести и соответствующем снижении способности к упрочнению в процессе пластической деформации. Следовательно, чем слабее металл упрочняется при деформации, тем в большей степени следует ожидать снижения его пластичности в условиях плосконапряженного состояния при $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0,5$. При запрещении деформации в одном направлении, т.е. при $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0,5$, появление третьего растягивающего компонента σ_3 в условиях плоской деформации, по-видимому, должно способствовать снижению пластичности слабо упрочняющегося металла в еще большей степени.

На основе изложенных соображений результаты испытаний плоских образцов толщиной 14 мм с острым надрезом можно пояснить следующим образом.

Металл стали М21 в исходном состоянии при низких температурах вплоть до -150°C обладает упругностью, а следовательно и пластичностью, достаточной для преодоления условий плоской деформации в корне надреза без разрушения вплоть до средних напряжений, близких к пределу текучести. Разрушение таких образцов происходило при средних напряжениях порядка $0,7 - 0,8 \sigma_T$, т.е. в интервале напряжений, когда (как показывает осциллограмма) начинает резко возрастать скорость раскрытия кромок надреза. Увеличение скорости деформирования металла ведет к увеличению его сопротивления пластической деформации, уменьшению упругости и, следовательно, к снижению пластичности в условиях, близких к плоской деформации. Вероятно, именно это и приводит к разрушению раньше, чем это следует из формулы (2) при использовании данных о пластичности гладкого плоского образца.

Металл образцов из М21 после динамического деформационного старения обладал весьма малой упругостью уже при нормальной температуре и можно предполагать, что с понижением температуры способность его к упрочнению от деформации снизилась еще в большей степени. Вероятно этим дальнейшим снижением упругости состаренного металла при понижении температуры и следует объяснить расхождение между сохранением сравнительно высокой пластичности при растяжении плоского гладкого образца и резким снижением величины раскрытия кромок надреза из-за падения пластичности такого металла в условиях, близких к плоской деформации.

Возвращаясь к результатам испытаний надрезанных образцов при нормальной и низкой температуре следует ограничить область применимости методики оценки чувствительности металла к концентрации напряжений в том виде, как она была изложена в главе II.

Коэффициент концентрации напряжений щелевого сквозного надреза плоского элемента никак не связан с толщиной этого элемента. Однако степень стесненности пластических деформаций в корне надреза увеличивается с ростом отношения толщины к радиусу надреза, приближаясь к условиям плоской деформации. С ростом среднего напряжения и расширением зоны, охваченной пластической деформацией, эти условия смягчаются. При высокой упругости металла от деформации его пластичность мало зависит от схемы напряженного состояния и поэтому такой металл оказывается не чувствительным к весьма острым надрезам даже при большой толщине элементов. С уменьшением упругости возрастает влияние стесненности дефор-

маций на пластичность металла и появляется опасность возникновения разрушения в корне концентратора раньше, чем стеснение будет снято развитием деформаций. Определение пластических свойств металла при испытании тонких плоских образцов позволяет учесть это снижение для материалов с показателем степени упрочнения порядка до $n = 0,04-0,05$ при нормальной температуре. Вероятно такими условиями и следует ограничить область применения разработанной методики оценки чувствительности металла к концентрации напряжений.

Снижение упрочняемости металла ниже этого уровня, а также при низкой температуре, когда упрочняемость низкоуглеродистой стали зависит и от скорости деформации, способно уменьшить пластичность при приближении к условиям плоской деформации настолько резко, что количественно оценить это влияние с помощью испытания простого образца не удается.

Решающее влияние, которое оказывает деформационная характеристика материала на его чувствительность к концентрации напряжений, а также отсутствие отработанных методов ее исследования в условиях низких температур и неодноосного нагружения требует интенсивного развития работ такого направления. Однако при оценке опасности хрупкого низкотемпературного разрушения даже самая полная характеристика свойств металла может оказаться недостаточной, если не учтена специфика изготовления и эксплуатации конструкции. Применительно к сварной конструкции такая специфика определяется не только выбором металла заготовок, но типом сварного соединения, технологией его сборки, сварки, термообработки, наличием остаточных напряжений и дефектов сварных соединений, условиями нагружения, низкой температурой, действием окружающей среды и т.д. Для оценки раздельного и совокупного влияния этих факторов требуется создание специализированного испытательного оборудования. Многообразие конструктивных форм и условий эксплуатации сварных конструкций крайне затрудняет создание какой-либо универсальной системы испытаний, которая позволила бы оценить опасность хрупкого разрушения любого изделия. Особый интерес в настоящее время представляет изучение условий разрушения сосудов и трубопроводов при низких температурах. Поэтому дальнейшая работа была направлена на создание установок для испытаний узлов именно таких конструкций. Эта установка в условиях низких температур наряду с исследованием деформационных характеристик листового металла в условиях двухосного рас-

тяжения ($\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1$ и $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \approx 0,5$) должна обеспечивать статические и повторностатические испытания сварных узлов, имитирующих условия изготовления и эксплуатации сосудов и трубопроводов.

Глава IV. РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И УЗЛОВ СОСУДОВ И ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Для сосудов давления и трубопроводов, представляющих большую опасность с точки зрения возникновения разрушения при низком уровне напряжений, характерно нагружение внутренним давлением и двухосное растяжение с компонентами напряжений $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0,5$.

Отмеченным особенностям близко соответствует предложенная проф. Куркиным С.А. и инж. Мешайкиным Н.С. схема испытания методом гидростатического выпучивания листового полуцилиндрического образца через эллиптическое отверстие в цилиндрической матрице. В этом случае на образце простой формы создается поле напряжений и деформаций, которое хорошо имитирует условия работы трубы под внутренним давлением вплоть до величины деформации 10-15%. По сравнению с испытанием цилиндрических сосудов или обечаек такая методика испытания помимо большей простоты образца имеет существенное преимущество, поскольку позволяет производить раздельную оценку прочности продольных и кольцевых сварных швов.

Испытание листовых образцов в условиях двухосного растяжения методом гидростатического выпучивания требует создания больших усилий для зажатия их фланцевой части. В построенных ранее в МВТУ установках усилие зажатия воспринималось поворотным запорным кольцом со шлицевым соединением, рассчитанным на усилие в 600 тонн.

При разработке схемы установки для испытаний полуцилиндрических образцов было принято решение использовать запорный элемент одновременно и в качестве матрицы. В связи с тем, что образец, матрица и пуансон должны иметь цилиндрическую форму, силовой запорный элемент оказалось целесообразным выполнить замкнутым в виде цилиндрической толстостенной трубы, надвигаемой на блок других основных деталей. Преимуществом такой схемы является отсутствие изгибных напряжений по толщине стенки запорной трубы и, как результат, более равномерное распределение напряжений в наиболее нагруженном сечении. Оригинальность такой схемы подтверждается авторским свидетельством [2].

Конструкция силовой части установки показана на рис. 2. На раме неподвижно закреплено основание I, в котором расположены цилиндры, соединенные каналами и трубопроводами с насосом высоко-

кого давления. В цилиндрах размещены поршни 2, усилие с которых передается на пуансон 3, выполненный в виде цилиндрического сегмента. Пуансон прижимает образец к внутренней поверхности обечайки 4, являющейся одновременно корпусом и матрицей установки. Корпус 4 имеет опорные ролики 5, с помощью которых он может сдвигаться в сторону для удобства установки образца и извлечения его из установки после испытания. Установка рассчитана на усилие зажатия образца 1000 тонн при давлении 700 ат и позволяет испытывать листы из алюминиевых сплавов и сталей низкой прочности толщиной до 12 мм.

Для охлаждения образца до температуры -60°C в процессе статических или циклических испытаний предусмотрено охлаждение всего силового устройства в холодильной камере. Надежная работа при низких температурах толстостенного цилиндрического корпуса - наиболее нагруженной детали - обеспечена за счет изготовления его из аустенитной стали ЭП-56, обладающей высокой прочностью и пластичностью при низких температурах.

Разработанная испытательная установка является универсальной поскольку позволяет решать широкий круг задач. Достаточно большая зона равномерно-й деформации образца позволяет производить оценку как условий возникновения разрушения в основном металле и сварных соединениях, так и характеристик распространения хрупкой трещины. Испытания основного металла могут быть выполнены для построения диаграмм деформации в условиях двухосного растяжения с соотношением компонентов $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ близким к 0,5, а так же после несложной переналадки с соотношением $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1$.

При испытании образцов в настоящей установке используется методика измерений средней и локальной деформации с помощью датчиков, конструкция которых изложена в главе II настоящей работы.

Опытный образец установки изготовлен и успешно эксплуатируется в МВТУ им. Баумана.^{х)}

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Разработанные датчики перемещений позволяют производить измерения как при испытаниях с целью построения деформационной характеристики, так и при исследовании развития упруго-пластических деформаций и разрушения в корне концентратора, в том числе и при определении критериев механики разрушения K_{Ic} и СОД. Датчи-

х) - Установка создана совместно с аспирантом Реморовым В.Е.

ки перемещений обеспечивают высокую точность измерений, удобны в работе и нашли применение в лабораторной практике в МБТУ и других организациях.

2. При растяжении плоских образцов с внутренним симметричным надрезом в пределах напряжений меньше $0,5 \sigma_T$ очертание корня надреза (при $Z_0 > 0,03$ мм) остается практически неизменным. Это позволяет для подсчета величин истинных напряжений и деформаций σ_{max} и ϵ_{max} использовать зависимость Нейбера $K_t = \sqrt{K_6 \cdot K_\epsilon}$, учитывая диаграмму деформации материала.

3. Принятие величины $K_{t(A)}$ за показатель чувствительности материала к концентрации напряжений позволяет располагать металлы в ряд, которым можно пользоваться при выборе, например, оптимальной термической обработки.

4. Сохранение высокой пластичности и упрочняемости у малоуглеродистой стали вплоть до температур близких к -150°C определяет высокий относительный уровень напряжений возникновения разрушения даже на образцах с достаточно острыми и длинными надрезами.

5. Резкое уменьшение пластичности стали в условиях двухосного растяжения при $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0,5$ наблюдается для состояний металла, характеризующихся малой упрочняемостью от пластической деформации. Возрастание чувствительности такого металла к острому концентратору при статическом нагружении вероятно связано именно со снижением его пластичности при приближении к условиям плоской деформации.

6. Динамическое деформационное старение стали, которое имеет место в металле в процессе сварки, может приводить к снижению упрочняемости металла. При низких температурах такой металл теряет способность к упрочнению от деформации еще в большей степени, резко увеличивая чувствительность к концентрации напряжений по мере приближения к условиям плоской деформации.

7. Существующие методы оценки опасности низкотемпературного хрупкого разрушения как правило дают характеристику свойств металлу без учета специфики его работы в конструкции. Многообразие конструктивных форм и условий эксплуатации сварных конструкций крайне затрудняет создание такой универсальной системы испытаний, которая позволила бы оценивать опасность низкотемпературного хрупкого разрушения любого изделия. Поэтому актуальной задачей является создание устройств для испытаний, имеющих конкретное целевое назначение применительно к определенному типу сварных конструкций.

8. Разработано оригинальное силовое устройство, позволяющее производить испытания основного металла и сварных соединений в условиях двухосного растяжения с соотношением компонентов напряжений $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ равным 1 или близким к 0,5. Для испытаний при низких температурах предлагаемое устройство целесообразно располагать в холодильной камере для обеспечения равномерного распределения температуры по образцу в процессе испытания.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Умаров Д.И., Ховов В.М. Механические свойства основного металла и сварных соединений алюминиевого сплава АМг5 и стали А18Н10Т при температуре -196°C в условиях двухосного растяжения. Остаточные напряжения и прочность сварных соединений и конструкций, Труды МВТУ, № 133, Машиностроение, М., 1969.
2. Куркин С.А., Крумбольдт М.Н., Кохаев Ю.С., Лукьянов В.Ф., Мешайкин Н.С., Ховов В.М. Установка для испытания листового металла и сварных соединений в условиях двухосного растяжения. Авторское свидетельство № 261745. Бюллетень изобретений № 5, 1970.
3. Куркин С.А., Ховов В.М., Методика измерения перемещений кромок концентратора в процессе нагружения, Известия вузов, Машиностроение, 1971, № 4.
4. Куркин С.А., Ховов В.М., Мешайкин Н.С. Условия возникновения разрушения в концентраторе при однократном нагружении. Известия вузов, Машиностроение, 1972, № 3.
5. Куркин С.А., Умаров Д.И., Ховов В.М. Модернизированная установка для испытания тонколистового металла и сварных соединений в условиях двухосного растяжения. Известия вузов, Машиностроение, 1973, № 1.
6. Куркин С.А., Реморов В.Е., Ховов В.М. Методика исследования низкотемпературной хрупкости основного металла и сварных соединений сосудов и трубопроводов. Прочность сварных конструкций и точность их изготовления, МВТУ им. Баумана, Тезисы докладов, М., 1973.

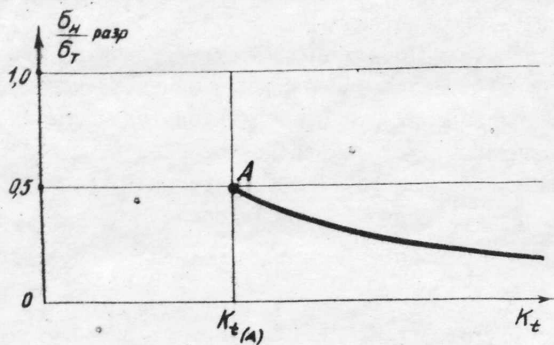


Рис. 1. Характер зависимости $\frac{\sigma_H}{\sigma_T} = f(K_t)$.

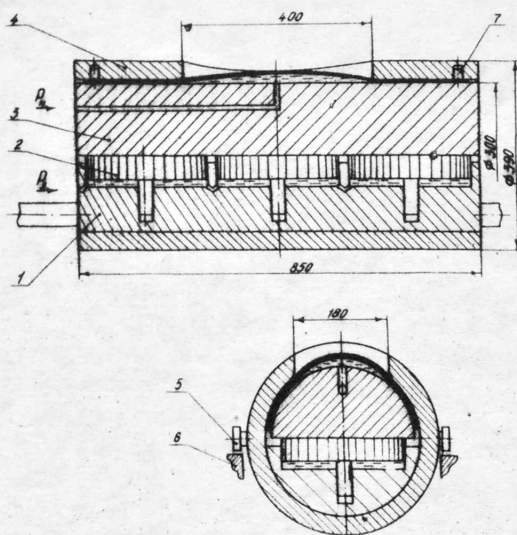


Рис. 2. Конструкция универсальной установки для испытаний образцов в условиях двухосного растяжения. Схема нагружения полуцилиндрического образца.