

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра машиноведения

Е.В. Пояркова

ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 15.04.01 Машиностроение

Оренбург
2017

УДК 620.10
ББК 30.121
П75

Рецензент – доцент, доктор технических наук А. Д. Припадчев

Пояркова, Е. В.
П75 Лабораторно-практические возможности исследования сварных соединений : методические указания / Е.В. Пояркова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2017. – 40 с.

В методических указаниях представлено описание лабораторного практикума, с помощью которого становится возможным выполнить оценку структурно-механической неоднородности исследуемых сварных соединений, проанализировать результаты механических испытаний материалов сварных элементов конструкций, а также сделать заключение об их напряженно-деформированном состоянии.

Материалы методических указаний способствуют формированию профессиональной компетентности студентов в процессе применения базовых физических знаний, могут быть использованы в качестве основных требований к выполнению лабораторно-практических работ по дисциплине «Современные методы оценки конструктивной и технологической прочности сварных соединений конструкций» и в системе итоговой аттестации обучающихся по направлению подготовки 15.04.01 Машиностроение.

Методические указания по дисциплине «Современные методы оценки конструктивной и технологической прочности сварных соединений конструкций» подготовлены в рамках проекта по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса («Новые кадры ОПК-2016»).

УДК 620.10
ББК 30.121

© Пояркова Е. В., 2017
© ОГУ, 2017

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторно-практическая работа «Изучение влияния структурной неоднородности на механические свойства сварных соединений».....	5
2 Лабораторно-практическая работа «Исследование характера распределения напряжений в сварных соединениях при приложении нагрузок».....	16
3 Лабораторно-практическая работа «Оценка сопротивления сварных элементов хрупким разрушениям в условиях концентрации напряжений».....	30
Заключение.....	35
Список использованных источников.....	36

Введение

В методических указаниях представлено описание лабораторного практикума, с помощью которого обучающимся становится возможным выполнить оценку структурно-механической неоднородности исследуемых сварных соединений, проанализировать результаты механических испытаний материалов сварных элементов конструкций, а также сделать заключение об их напряженно-деформированном состоянии. Также в методических указаниях в доступной для понимания форме представлено общее теоретическое обоснование развития и приобретения навыков оценки внешних воздействий на структурно-механическое и напряженно-деформированное состояние сварных элементов конструкций. Методические указания нацелены:

– на приобретение студентами знаний и умений осуществлять анализ отечественных и международных нормативных требований к качеству сварных соединений машиностроительных конструкций с целью определения возможности их гармонизации;

– на получение навыков установления критериев работоспособности сварных соединений машиностроительных конструкций и приемов обеспечения их заданного уровня прочности и надежности.

Лабораторный практикум нацелен на привитие магистрантам знаний и умений, необходимых для участия в проектировании сварных конструкций; развитие и усовершенствование способностей оценивать воздействие послесварочной обработки на структурно-механическое состояние сварных элементов конструкций, направленной на повышение их конструктивной и технологической прочности.

В методических указаниях также представлены прогноз и описания результатов механических испытаний материалов сварных элементов конструкций, теоретико-экспериментальные заключения об их напряженно-деформированном состоянии.

1 Лабораторно-практическая работа «Изучение влияния структурной неоднородности на механические свойства сварных соединений»

Цель работы: Получить количественную оценку влияния характера структурно-механической неоднородности на свойства сварных соединений

Материально-техническое оснащение

1. Образцы сварных соединений из низкоуглеродистой стали.
2. Набор наждачных шкур разной зернистости.
3. 3% спиртовой раствор азотной кислоты.
4. Спирт, вата, бумага.
5. Микроскоп.
6. Твердомер.
7. Машина испытательная разрывная.

Краткие теоретические сведения

Свойства сварных соединений во многом определяются характером возникающей при их образовании структурно-механической неоднородности, определяемой взаимным расположением и размерами прослоек. Так, в зависимости от свойств свариваемых материалов, в сварных соединениях могут иметь место мягкие и твердые прослойки.

Под *мягкими прослойками* понимают участки металла, предел текучести которых ниже, чем у соседнего металла. Соответственно, участки металла, обладающего повышенным значением предела текучести, называют *твердыми прослойками*. При нагружении сварного соединения прослойки сложным образом взаимодействуют между собой, в результате чего свойства сварного соединения в целом не совпадают со свойствами отдельных его участков.

Механические свойства сварных соединений зависят от свойств металла отдельных его участков, геометрии соединения, остаточных напряжений и степени рассеяния каждого из указанных факторов [2-4,14, 24].

Следует различать простейшие механические свойства металла отдельных участков сварного соединения и механические свойства сварного соединения в целом [2, 8, 14, 21, 22, 24, 30, 32-33]. Простейшие механические свойства металла отдельных зон оценивают временным сопротивлением, пределом текучести, относительным удлинением и поперечным сужением, которые определяются на стандартных образцах при статическом растяжении.

Свойства сварных соединений оценивают в ряде случаев теми же характеристиками или критериями, что и однородный основной металл, но при этом в них вкладывают иное содержание.

Например, распространенной характеристикой прочности является временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$. Можно говорить о временном сопротивлении металла шва или околошовной зоны, если образцы взяты достаточно малыми, чтобы содержать в себе относительно однородный по свойствам металл. Временное сопротивление сварного соединения $\sigma'_{\text{в}}$, напротив, следует определять на достаточно крупных образцах, которые бы включали в себя все типичные зоны сварного соединения и обеспечивали такое взаимодействие их между собой, которое характерно для работы сварного соединения в конструкции. Такая характеристика, как предел текучести сварного соединения, в большинстве случаев вообще не может быть определена, так как, во-первых, из-за неоднородности механических свойств пластические деформации возникают не по всей длине образца одновременно, во-вторых, пластические деформации неравномерны в поперечном сечении образца из-за эффекта контактного упрочнения, в-третьих, натурное сварное соединение с неснятым усилением создает концентрацию напряжений и может иметь естественные напряжения, что в принципе делает поле напряжений в образце неоднородным. Предел выносливости сварного

соединения следует определять для практических целей также на достаточно крупных образцах, содержащих в себе все особенности сварного соединения, в том числе и остаточные напряжения, хотя последнему условию часто трудно удовлетворить из-за необходимости увеличения размеров образца [2, 4, 8, 13, 24].

Таким образом, механические свойства сварных соединений – это способность сопротивляться деформированию и разрушению под действием внешних и собственных механических сил в условиях характерной для сварных соединений концентрации напряжений, неоднородности свойств и собственных напряжений.

Методы определения механических свойств сварных соединений регламентированы ГОСТ 6996-66 (ИСО 4136-89, ИСО 5173-81, ИСО 5177-81). Стандарт устанавливает методы определения механических свойств при следующих видах испытаний:

- 1) испытания металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое (кратковременное) растяжение;
- 2) испытания металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на ударный изгиб (на надрезанных образцах);
- 3) испытания металла различных участков сварного соединения на стойкость против механического старения;
- 4) измерения твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла;
- 5) испытания сварного соединения на статическое растяжение;
- 6) испытания сварного соединения на статический изгиб (загиб);
- 7) испытания сварного соединения на ударный разрыв.

Оценить характер распределения механических свойств по сечению сварного соединения можно проведением соответствующих испытаний отдельных его участков, либо косвенно на основании анализа результатов дюрометрического анализа (распределения значений твердости по сечению соединений). Результаты замеров твердости позволяют косвенно судить о

механических свойствах и структурном состоянии сварного соединения, а также определить размеры закаленных и отпущенных зон, степень упрочнения и разупрочнения металла в сварном соединении. Измерение твердости основного металла, металла околошовной зоны и шва производят на приборах Виккерса, Роквелла и Бринелля на макрошлифах поперечного сечения образцов.

Под *твердостью* понимается свойство поверхностного слоя материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора) определенной формы и размера [8]. Твердость определяют по глубине отпечатка, получаемого при вдавливании алмазного конуса или стального шарика.

Образец для измерений должен иметь тщательно зашлифованную плоскую поверхность, в которую вдавливается конус или шарик, а противоположная параллельная поверхность также должна быть ровной, зачищенной.

Твердость измеряется в поперечном сечении сварного соединения при помощи сфероконического алмазного индентора (шкала А и С) и шарикового стального наконечника диаметром 1,5875 мм в соответствии с ГОСТ 6996-66 согласно схеме, представленной на рисунке 1.1. Числа твердости по Роквеллу можно пересчитать с помощью таблиц на числа твердости по Бринеллю.

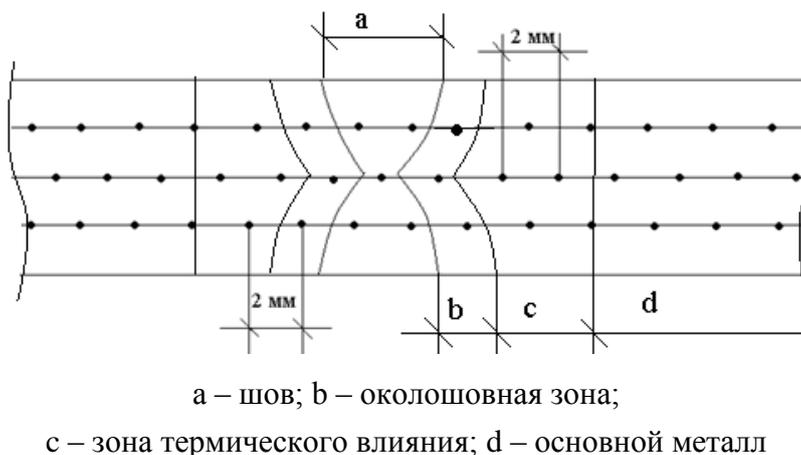


Рисунок 1.1 – Примерная схема проведения измерений твердости

Измерения рекомендуется проводить по трем линиям сечения, причем на каждую зону сварного соединения требуется отвести следующее количество точек замера твердости: 2-3 – сварной шов; 1-2 – околошовная зона (ОШЗ); 3-7 – зона термического влияния (ЗТВ); остальное – основной металл. Затем необходимо построить топографическую карту результатов твердометрии различных сечений сварных соединений по среднеарифметическому значению для каждой линии измерения.

Для обеспечения необходимого уровня надежности работы сварных конструкций необходимо проводить тотальную диагностику. При этом стандартные методы оценки напряженно-деформированного состояния сварных соединений конструкции не могут в значительной степени отразить реальную картину нагрузок, возникающих при различных условиях эксплуатации. Поэтому разработка объективного метода оценки является важной задачей в повышении надежности и предотвращении аварийных ситуаций.

Основным препятствием к эффективному проведению диагностических исследований является отсутствие основных принципов анализа оборудования, что приводит к появлению многочисленных узкоспециализированных методик, тесно увязанных с конкретной отраслью.

Для оперативного определения общего состояния конструкции или ее элементов, учитывая ее конструктивные особенности, специфику эксплуатации, результаты диагностических и ремонтно-восстановительных работ, весьма необходимым является метод определения механических свойств неразрушающим контролем по всему сечению сварного шва. Данный метод при дальнейшем анализе полученных результатов позволяет с высокой точностью дать оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) сварного соединения любой конструкции.

Как уже отмечалось выше, почти все методы механических испытаний сварных соединений (за исключением метода испытания твердости) являются разрушающими, что исключает возможность стопроцентного контроля механических свойств по всем сечениям сварного шва и

обуславливает весьма высокие требования к точности механических испытаний образцов.

Твердость является наиболее простой в определении характеристикой материала и отражает многие эксплуатационные свойства сварных соединений из сталей. Величина твердости может быть использована для оценки изменения механических характеристик под воздействием эксплуатационных факторов.

Полученные в работах [5, 17, 23-25, 27, 33] результаты о применимости и степени надежности безобразцового метода контроля свидетельствуют о достаточно высокой степени достоверности косвенного определения механических свойств.

Для анализа механических характеристик сварных (однородных или разнородных) соединений в процессе эксплуатации по всем сечениям сварного шва исследуемых сталей замеряется твердость. За среднее значение твердости принимались значения HRB по результатам нескольких замеров в аналогичной точке минимум на 5 образцах каждого сварного соединения. (При большом числе эмпирических данных среднее арифметическое с большой вероятностью приближается к математическому ожиданию.)

Характеристики прочности σ_B , $\sigma_{0,2}$ и пластичности δ и ψ_K являются функциями пластической твердости H , которую определяют при помощи твердомера (например, ТШ-2М) в соответствии с ГОСТ 6996-66, 9012, 9013 .

Значения прочности σ_B , $\sigma_{0,2}$ вычисляют по формулам [5, 17, 23-24]:

$$\begin{aligned}\sigma_B &= 95,5(\sqrt{122 + H} - 12,2), \text{ МПа}, \\ \sigma_{0,2} &= K_S * H, \text{ МПа}\end{aligned}$$

где K_S – безразмерный коэффициент, являющийся функцией модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ .

Для углеродистых сталей $K_S = 2$.

Относительное сужение и удлинение соответственно вычисляют по твердости, пользуясь выражениями:

$$\psi_K = \frac{6100}{H} + 36,6, \%$$

$$\delta = 1725 * H^{-0,79}, \%$$

Проведенные расчеты механических характеристик прочности σ_B , $\sigma_{0,2}$ и пластичности δ и ψ_K позволяют выявить критические сечения сварного шва (в которых происходят разрушения), а также оценить потенциально опасные участки сварного оборудования, на которые во время диагностики следует обратить особое внимание, стало быть, в дальнейшем принять меры по повышению устойчивости конструкции к воздействиям возможных нагрузок, неучитываемых при стандартных методах расчета.

Таким образом, существует возможность выявления неравномерного (в некоторых случаях – скачкообразного) изменения механической прочности сварных соединений (см. результаты подобного анализа в [23-27, 32, 36]) и образования различных дефектов под воздействием эксплуатационных факторов. Обнаружение микротрещин (или других опасных дефектов) определенного размера связано с возможностью методов неразрушающего контроля (НК).

Применение метода НК, как определение твердости, открывает новые возможности в создании измерительных средств НК, позволяющих получить количественные характеристики структурного состояния и остаточного ресурса работы металлических конструкций.

Определение механических свойств сварных соединений в результате испытаний на центральное растяжение регламентировано ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств». Назначение этих методов испытаний состоит в определении механических свойств, которые используются для количественной и качественной оценки работоспособности сварных соединений и конструкций, а также для сравнения механических свойств основного металла и металла сварных соединений с целью оценки соответствия принятой технологии сварки тем требованиям, которые предъявлены к сварной конструкции.

Для определения прочности стыковых соединений используют плоские образцы, представленные на рисунке 1.2. Утолщение шва снимают механическим путем. Разрушение происходит обычно по наименее прочному участку соединения. Уровень прочности, определяемый таким путем, характеризует прочность сварного соединения в целом, а не прочность отдельной слабой зоны.

Для определения прочности металла шва в образцах делают выкружку, ослабляющую среднюю часть образца (рисунок 1.3). Определяют временное сопротивление по формуле [24]:

$$\sigma'_B = k \cdot P/F,$$

где k – поправочный коэффициент, для сталей $k = 0,9$;
 F – площадь наименьшего поперечного сечения до испытания.

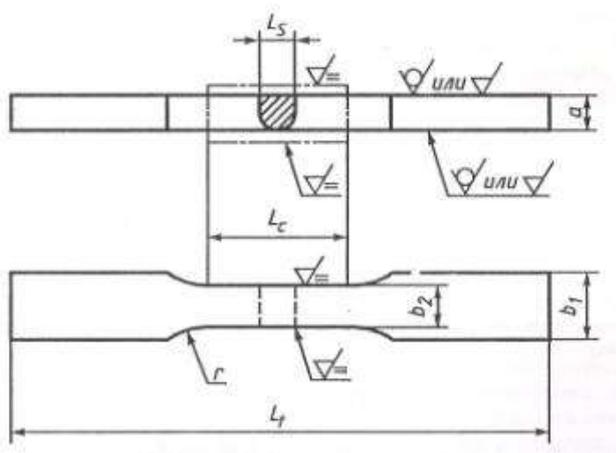


Рисунок 1.2 – Образцы для определения прочности стыкового соединения

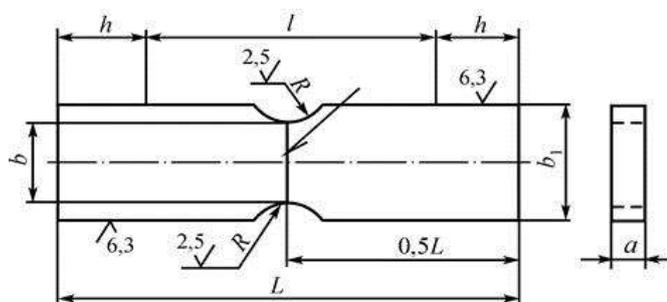


Рисунок 1.3 – Образец для определения временного сопротивления металла шва

Для анализа механического поведения сварных соединений определялись стандартные характеристики прочности и пластичности сварного соединения и основного металла, а также удельная работа разрушения, используемая для оценки сопротивления материала хрупкому разрушению. Величина удельной работы разрушения определяется отношением площади под σ - ε диаграммой к объему образца, однако для оценки способности материала сопротивляться внезапному приложению нагрузки с некоторым допущением ее можно принимать равной произведению $\sigma_B \cdot \delta$ [4, 24].

Механические испытания сварных образцов проводятся в соответствии с ГОСТ 1497-84 на разрывной машине Р-5 при комнатной температуре. Определяются механические свойства сварных соединений, основного металла, и ослабляющей зоны сварного соединения. Для определения свойств основного металла необходимо использовать гладкие плоские образцы (общей длиной 55 мм) или образцы типа 5 с рабочей частью в виде цилиндра или (см. рисунок 1.4).

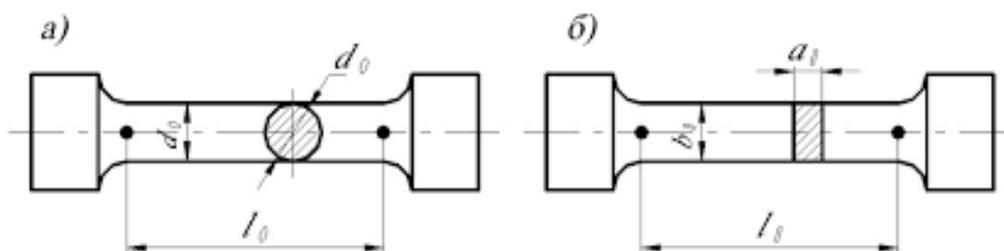


Рисунок 1.4 – Стандартный образец для испытаний на одноосное растяжение

Задание:

1. Оценить структурное состояние и распределение механических свойств по участкам контрольных сварных соединений на основании данных дюрOMETрического контроля.

2. Посредством испытаний на растяжение определить механические свойства сварных соединений, основного металла и мягкой прослойки.

3. Сопоставить показатели прочности мягкой прослойки и сварного соединения. Рассчитать коэффициент контактного упрочнения и предельную толщину мягкой прослойки, при которой достигается равнопрочность сварного соединения и основного металла. Сделать выводы.

Порядок выполнения работы

1. Для дюрOMETрического анализа подготовить 3 макрошлифа сварных соединений. Для идентификации характерных зон поверхность шлифов требуется протравить.

2. Произвести замеры твердости на макрошлифах согласно описанной в теоретической части методике. Результаты измерений оформить в форме протокола.

3. На основании полученных результатов сделать выводы о наличии мягких и твердых прослоек, считая участки с минимальными значениями твердости мягкими прослойками.

4. Измерить ширину прослоек, для этого образец протравленной стороной установить на предметный столик микроскопа таким образом, чтобы в окуляре видеть границу зоны сварного соединения, соответствующей той прослойке, ширину (протяженность) которой необходимо измерить. Далее необходимо добиться совмещения границы прослойки с границей видимого в окуляре изображения. Зафиксировать положение предметного столика относительно шкалы находящейся в контакте с ним линейки, считая деление шкалы, возле которого располагался край столика, за «ноль». Вращая рукоятку перемещения предметного столика до тех пор, пока вторая граница измеряемой прослойки не совместится с той же границей видимой области, отсчитать количество делений от зафиксированного условного нуля шкалы линейки и умножить его на цену деления шкалы – эта величина и есть искомая ширина прослойки.

5. После измерений вычислить величину χ , называемую относительной толщиной прослойки: $\chi = h/s$ (h – толщина прослойки, s – толщина листа).

Найденные величины относительной толщины прослоек занести в протокол и определить среднюю величину.

6. С учетом установленной геометрии прослоек изготовить образцы для испытаний на растяжение металла мягкой прослойки.

7. Произвести испытания на разрыв металла мягкой прослойки, основного металла и сварного соединения. По результатам рассчитать механические свойства и занести в протокол. Сопоставить значения показателей прочности сварного соединения и мягкой прослойки и сделать выводы.

8. По известным формулам рассчитать коэффициент контактного упрочнения и предельную толщину мягкой прослойки, при которой достигается равнопрочность сварного соединения и основного металла.

9. Сделать общие выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие зоны сварных соединений называют мягкими и твердыми прослойками?

2. Какое влияние на прочность сварных соединений оказывает наличие мягких прослоек?

3. Какими методами неразрушающего контроля можно оценить структурное состояние и распределение механических свойств по сечению сварных соединений?

4. В чем заключается эффект контактного упрочнения?

5. С помощью каких параметров можно количественно описать характер механической неоднородности сварных соединений?

2 Лабораторно-практическая работа «Исследование характера распределения напряжений в сварных соединениях при приложении нагрузок»

Цель работы: Познакомиться с картиной распределения нормальных напряжений в сварном соединении, экспериментально определить наличие концентраторов напряжений в сварных швах, оценить достоверность расчетной методики определения прочности угловых сварных швов.

Теоретические сведения

Напряженно-деформированное состояние углового шва зависит от его положения относительно действующей силы. Поэтому угловые швы делятся на фланговые (рисунок 2.1, а), направление которых совпадает с направлением внешней силы, и лобовые (рисунок 2.1, б), в которых силовой поток направлен поперек шва. Прочность лобового шва на 15 % - 25%, а модуль сдвига в 2 раза выше, чем у флангового шва.

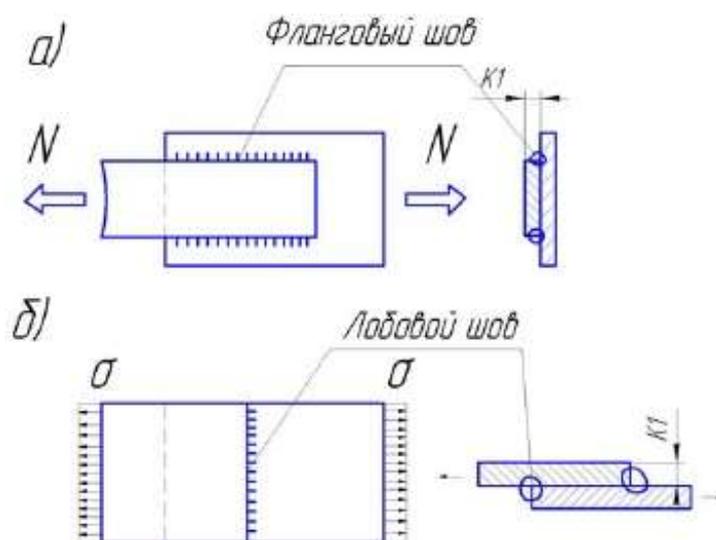


Рисунок 2.1 – Фланговый (а) и лобовой (б) сварные швы

Фланговые швы при действии внешней нагрузки приводят к неравномерному распределению силового потока, что вызывает концентрацию

напряжений у концов шва (рисунок 2.2, а). Большая неравномерность распределения напряжений характерна и по поперечному сечению соединения (рисунок 2.2, б), так как силовой поток в растянутом листе сгущается в зоне фланговых швов, а средняя часть накладки напряжена мало. Поэтому такие соединения не рекомендуется применять в конструкциях, воспринимающих переменные или динамические нагрузки, а также эксплуатируемые при низких температурах. Разрушение фланговых швов происходит в результате среза по биссектрисе шва, выражается криволинейной траекторией с переходом на основной металл по концам шва (рисунок 2.2, в).

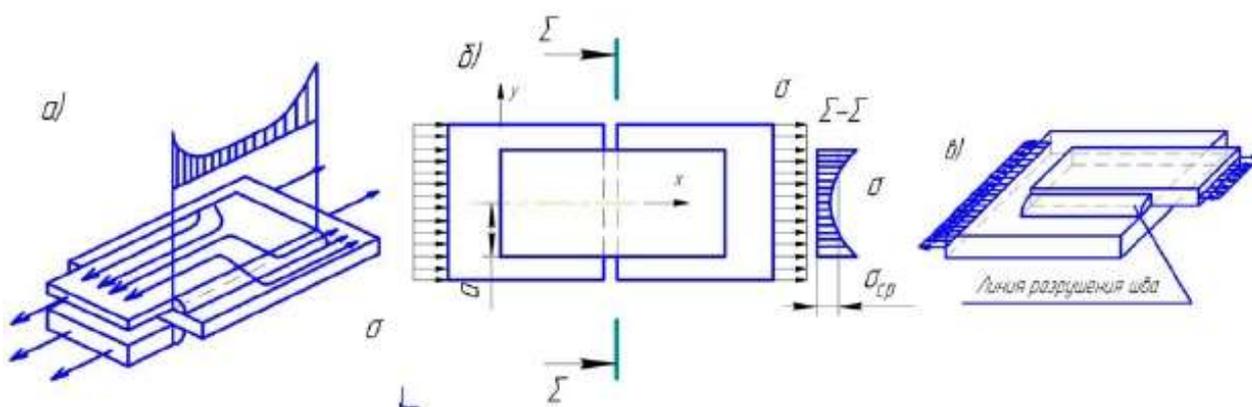


Рисунок 2.2 – Распределение напряжений в нахлесточных соединениях с фланговыми швами

Концентрация напряжений характеризуется коэффициентом концентрации, теоретическое (упругое) значение которого представляет собой отношение максимальных напряжений к номинальным, то есть:

$$k_T = \sigma_{max} / \sigma_n \text{ или } k_T = \tau_{max} / \tau_n.$$

Максимальные напряжения в крайних точках флангового сварного шва (рисунок 2.3, точки а и б) зависят от соотношения площадей соединяемых деталей A_1 и A_2 и могут быть вычислены по формулам:

$$\tau_a = \frac{(A_1 + A_2 ch \cdot \gamma_i) \gamma_i}{(A_1 + A_2) sh \gamma_i} \tau_n,$$

$$\tau_b = \frac{(A_1 ch \cdot \gamma_i + A_2) \gamma_i}{(A_1 + A_2) sh \gamma_i} \tau_n,$$

$$\gamma = \frac{2G(A_1 + A_2)}{EA_1 A_2}, \quad (1)$$

где A_1 и A_2 – соответствующие площади поперечного сечения образца (рисунок 2.3);

G и E – соответственно модули сдвига и упругости материала сварного шва;

τ_n – номинальные (средние) напряжения по длине флангового шва, равные:

$$\tau_n = \frac{F}{n_w l_w k_f y_f},$$

где $l_w = (l - 10)$, мм – расчетная длина шва, принимаемая меньше его конструктивной длины на 10 мм;

k_f – катет углового шва;

y_f – коэффициент проплавления, принимаемый в зависимости от вида сварки (табличная величина);

n_w – количество швов, воспринимающих внешнюю нагрузку.

Учитывая, что $G = E / 2 (1 + \mu)$, где $\mu=0,3$ – коэффициент Пуассона, формулу (1) можно записать:

$$\gamma = (A_1 + A_2) / 1,3 A_1 A_2.$$

Вследствие концентрации напряжений в нахлесточных соединениях с фланговыми швами ограничивается максимальная расчетная длина шва,

которая не должна превышать $l_{max} = 85k_f\gamma_f$, за исключением швов, в которых усилие действует на всем протяжении шва.

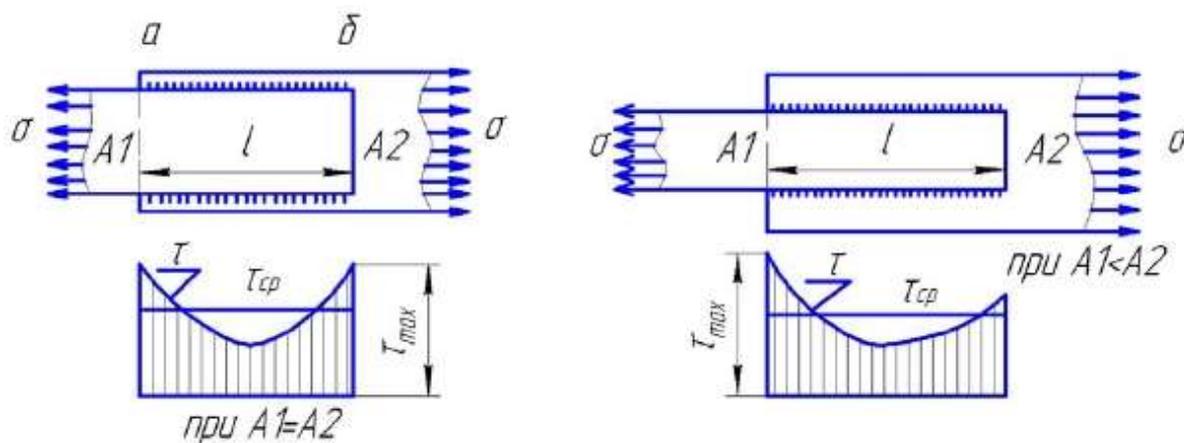


Рисунок 2.3 – Концентрация напряжений во фланговых швах

Лобовые швы передают усилия более равномерно по ширине, чем фланговые, но крайне концентрированно, вследствие малой ширины шва (рисунок 2.4, а). Исследования подтверждают наличие значительной концентрации напряжений в лобовых швах и большое влияние на распределение напряжений конфигурации поперечного сечения шва:

- глубины проплавления $h_{пр}$,
- угла при вершине α ,
- формы свободной поверхности шва.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений в лобовом шве таврового соединения (рисунок 2.4, б) определяется по формуле:

$$k_{\tau} = 1 + [\alpha \sin\varphi / \sqrt{\frac{\rho}{t}}], \quad (2)$$

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{B}{t} - 1\right) (B/t)^2 + 1.6}, \quad (3)$$

где ρ – радиус перехода шва к основному металлу;

t – толщина основного металла;

φ – угол перехода от поверхности шва к основному металлу;

B – расстояние между швами в соединении.

Для сварных соединений, имеющих непровар ($2h_{np} < b$), коэффициент концентрации напряжений k_{m1} определяется по формуле:

$$k_T^1 = k_T \left[1 + D((b - 2h_{np}) \sin(\varphi - 15^\circ)/t^2) \right] \quad (4)$$

где $D = 3,7$ – коэффициент при растяжении; $\varphi = \arctg \frac{k_n}{k_T}$.

Другие обозначения, принятые в формулах (1-4), понятны из рисунка 2.4, б.

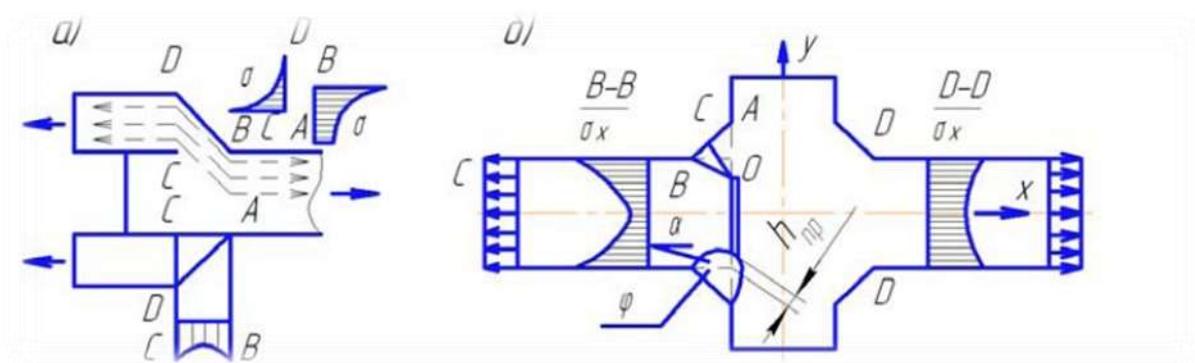
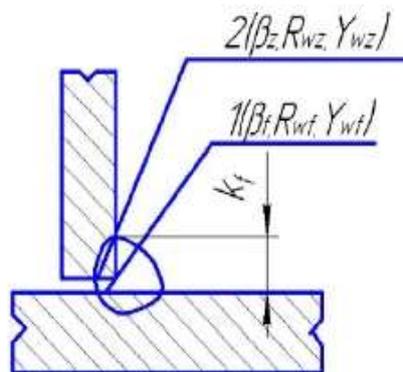


Рисунок 2.4 – Распределение напряжений в соединениях с лобовыми швами

Предельным состоянием соединений с угловыми швами принята опасность их *разрушения*, а не повышенные деформации. Такой подход позволяет устанавливать нормативное сопротивление для соединений с угловыми швами по *временному сопротивлению металла шва*, а не по пределу текучести.

Нормативный метод расчета соединений с угловыми швами [24] является условным, так как основан на предположении, что предположении,

что в предельном состоянии металл шва находится в пластическом состоянии и напряжения по длине и сечению шва выравниваются. Поэтому независимо от типа сварного соединения (тавровое или нахлесточное) и расположения угловых швов по отношению к нагрузке (лобовые или фланговые) угловые сварные швы рассчитывают на срез по металлу шва и по зоне сплавления (см. рисунок 2.5).



- 1 – сечение по металлу шва;
- 2 – сечение по металлу границы сплавления

Рисунок 2.5 – Схема расчетных сечений сварного соединения с угловым швом

Расчет сварного соединения рекомендуется выполнять по формулам:

– по металлу шва (сечение 1):

$$F / \beta_f k_f l_w \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c;$$

– по металлу зоны сплавления (сечение 2):

$$F / \beta_z k_f l_w \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c,$$

где l_w – расчетная длина шва;

β_f, β_z – коэффициенты проплавления, которые зависят от способа сварки, положения шва и величины катета шва (табличные данные);

γ_{wf}, γ_{wz} – коэффициенты условий работы шва;

γ_c – коэффициент условий работы соединения;

R_{wf}, R_{wz} – расчетные сопротивления соответственно металла шва и металла зоны сплавления.

Расчетное сопротивление металла шва R_{wf} зависит от прочности используемых сварочных материалов и определяется для наименее прочных фланговых швов по формуле:

$$R_{wf} = \frac{0,55R_{wun}}{\gamma_{wun}}.$$

Расчетное сопротивление углового шва по металлу границы сплавления R_{wz} определяется прочностью основного металла и вычисляется по формуле:

$$R_{wz} = 0,45R_{un},$$

где R_{un} – нормативное сопротивление основного металла по временному сопротивлению.

Из предыдущих выражений видно, что увеличение прочности шва выше определенного уровня нецелесообразно, так как несущая способность соединения будет определяться его разрушением по границе сплавления. Поэтому для угловых швов, размеры которых определяются расчетом, следует так выбирать электроды и сварочную проволоку, чтобы выполнялось условие

$$R_{wf} \leq \frac{R_{wz}\beta_z}{\beta_f}.$$

К размерам и форме угловых сварных швов предъявляются некоторые конструктивные требования, а именно:

- катеты угловых швов k_f следует принимать по расчету, но не более $1,2t$, где t – наименьшая толщина соединяемых элементов;
- минимальная расчетная длина углового сварного шва должна быть не менее $4k_f$ и не менее 40 мм.

Порядок выполнения работы

Испытанию подлежит модель таврового сварного соединения, выполненная из листовой стали с угловыми сварными швами. Общий вид модели и универсальной испытательной машины показан на рисунке 2.6.

Первый этап работы – обследование экспериментальной конструкции.

При обследовании необходимо решить следующие вопросы:

- проверить геометрические размеры сварного соединения;
- вычислить геометрические характеристики сечения балки;
- составить схемы установки тензодатчиков;
- установить образец в захватных приспособлениях испытательной машина, отцентрировать его и надежно закрепить в захватах;
- проверить схему и работу системы для создания испытательной нагрузки;
- проверить работоспособность измерительных приборов путем пробного нагружения соединения и снятия отсчетов по приборам.

Второй этап работы – теоретическая часть. В теоретической части работы, используя правила строительной механики и результаты обследования, определить величину и характер распределения нормальных напряжений в пяти сечениях образца. Результаты теоретического расчета представить в виде эпюр нормальных напряжений. Для сварного соединения и сварного шва вычислить несущую способность по формуле:

$$F = b \cdot t \cdot R_y,$$

где R_y – расчетное сопротивление материала образца;

b и t – соответственно ширина и толщина пластины образца.

Материал образца – сталь Ст3, $R_y = 23,0 \text{ кН/см}^2$, $R_{um} = 37,0 \text{ кН/см}^2$.

Сварка выполнена полуавтоматом в углекислом газе сварочной проволокой Св08Г2С.

Вычислить значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений при заданной нагрузке F для образца.

Для измерения фибровых деформаций и определения экспериментальных напряжений в пяти сечениях модели сварного соединения установлены тензорезисторы с базой 20 мм. Схема расположения датчиков и их номера показаны на рисунках 2.6 и 2.7.

Датчики подсоединены к тензометрическому мосту ИДЦ-1, который позволяет в ручном режиме опрашивать все измерительные каналы (датчики), имея для этого встроенный коммутатор на 10 измерительных каналов. Цена деления измерителя деформаций в единицах относительной деформации (ЕОД) определяется следующим образом:

$$\text{ЦДЕОД} = 10 \cdot \Delta C \cdot 10^{-6} \text{ ЕОД},$$

где $\Delta C = 1$ (одно деление шкалы измерителя деформаций);

тогда (при модуле упругости материала конструкции $E = 2,06 \cdot 10^6$ Па для стали) цена деления измерителя деформаций в единицах напряжений составит

$$\text{ЦД}_\sigma = (10 \cdot \Delta C \cdot 10^{-6}) \cdot E = (10 \cdot \Delta C \cdot 10^{-6}) \cdot 2,06 \cdot 10^6 = 20,6 \text{ Па}.$$

Третий этап работы – экспериментальная часть.

При испытании исследуемый образец сварного соединения загружается ступенями по 2-10 кН. Максимальная суммарная величина нагрузки не должна превышать 50 кН. Нагрузка контролируется по силоизмерителю испытательной машины МУП-100.

Испытание начинается при условной нулевой нагрузке. При «нулевой» нагрузке и на каждом последующем этапе загрузки по всем приборам снять отсчеты. Все отсчеты и необходимые вычисления выполняются в журнале лабораторных работ (таблица 2.1).



a)



б)



в)

а) общий вид модели шва в испытательной машине; б) расположение датчиков на образце; в) измеритель деформаций ИДЦ-1

Рисунок 2.6 – Испытательная установка и опытный образец

Таблица 2.1 – Протокол испытаний

Нагрузка, кН	Тензорезисторы																											
	1			2			5			6			11			12			16			17			19			
	С	ΔС	б	С	ΔС	б	С	ΔС	б	С	ΔС	б	С	ΔС	б	С	ΔС	б	С	ΔС	б	С	ΔС	б	С	ΔС	б	
0																												
10																												
20																												

После проведения экспериментальных измерений выполнить обработку результатов:

– вычислить нормальные напряжения для каждой точки установки датчика:

$$\sigma = \Delta C \cdot ЦД\sigma,$$

ΔC – разница отсчетов между «нулевой» и испытательной нагрузками;

– для всех сечений по ширине и толщине образца построить эпюры нормальных напряжений. Примерный вид эпюр показан на рисунке 2.7;

– вычислить экспериментальную величину концентратора напряжений для двух точек, расположенных в зоне «непровара» при заданной испытательной нагрузке:

$$k = \sigma_{max} / \sigma_{nom}$$

σ_{max} – максимальные напряжения в зоне непровара;

σ_{nom} – номинальные напряжения в зонах, расположенных вдали от непровара.

При обработке результатов экспериментальных определений напряжений исключить возможные изгибы в плоскости и из плоскости образца.

Провести испытания образцов при заданной нагрузке F не менее двух раз.

Вычислить экспериментальные значения коэффициентов концентрации напряжений по формулам и сравнить их с теоретическими значениями, приведенными в таблице 2.2. Сделать выводы по результатам сравнений коэффициентов концентрации.

Таблица 2.2

Вид сварки при диаметре сварочной проволоки d, мм	Положение шва	Коэффициент	Значения коэффициентов β_f и β_z при катетах швов, мм			
			3...8	9...12	14...16	18 и более
Автоматическая при d=3...5	В лодочку	β_f	1,1		0,7	
Автоматическая при d=3...5	В лодочку	β_z	1,5		1,0	
Автоматическая при d=3...5	Нижнее	β_f	1,1	0,9	0,7	
Автоматическая при d=3...5	Нижнее	β_z	1,15	1,05	1,0	
Автоматическая и полуавтоматическая при d=1,4...2	В лодочку	β_f	0,9	0,8	0,7	
Автоматическая и полуавтоматическая при d=1,4...2	В лодочку	β_z	1,05	1,0		
Автоматическая и полуавтоматическая при d=1,4...2	Нижнее, горизонтальное, вертикальное	β_f	0,9	0,8	0,8	
Автоматическая и полуавтоматическая при d=1,4...2	Нижнее, горизонтальное, вертикальное	β_z	1,05	1,0		
Ручная; полуавтоматическая проволокой сплошного сечения при d<1,4 или порошковой проволокой	В лодочку, нижнее, горизонтальное, вертикальное, потолочное	β_f	0,7			
Ручная; полуавтоматическая проволокой сплошного сечения при d<1,4 или порошковой проволокой	В лодочку, нижнее, горизонтальное, вертикальное, потолочное	β_z	1,0			

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют сварные соединения по конструктивному признаку?
2. Как классифицируют сварные швы по форме поперечного сечения?
3. Для чего делают разделку кромок при сварке стыковых соединений?

4. Чем определяется форма разделки кромок? От чего это зависит?
5. Какие способы сварки применяются при изготовлении стальных конструкций?
6. Какие функции выполняет обмазка на электродах?
7. Какие процессы механизированы при автоматической сварке под слоем флюса?
8. Как различают угловые швы по отношению к направлению внешнего усилия?
9. Почему минимальную длину углового шва ограничивают $4k_f$ или 40 мм?
10. Что такое расчетная длина сварного шва в стыковом соединении и в нахлесточном соединении, чему она равна?
11. Какой из угловых швов, лобовой или фланговый, вызывает в соединяемых элементах большую концентрацию напряжений?
12. Какой из угловых швов является более податливым: лобовой или фланговый?
13. Что является предельным состоянием соединений с угловыми швами?
14. Что характеризует теоретический коэффициент концентрации напряжений и чему он равен?
15. От чего зависит величина коэффициента концентрации напряжений в шве?
16. Что понимается под свариваемостью?

3 Лабораторно-практическая работа «Оценка сопротивления сварных элементов хрупким разрушениям в условиях концентрации напряжений»

Цель работы: оценка влияния трещиноподобных дефектов на сопротивление сварных конструкций нестабильному разрушению в зависимости от характера их нагружения.

Материально-техническое оснащение:

1. Машина для испытаний образцов при циклическом нагружении.
2. Машина испытательная универсальная.
3. Станок шлифовально-полировальный.
4. Сварные образцы с нанесенным концентратором напряжений.

Краткие теоретические сведения

Наличие трещин и трещиноподобных дефектов создает многократное повышение напряжений в материале в их вершинах, что создает опасность их внезапного разрушения при нагрузках, гораздо меньших предельных. Сопротивляемость материала внезапному разрушению в этом случае определяется его склонностью к локальным пластическим деформациям.

В свою очередь, это состояние определяется собственно пластическими свойствами металла, а также внешними факторами – характером рабочей среды, температурой, качеством поверхности, условием нагружения. Исследуют сопротивляемость материалов хрупкому разрушению при статическом, динамическом и циклическом нагружении. Количественной мерой является вязкость разрушения – трещиностойкость при различных видах нагружения.

Методика определения коэффициента интенсивности напряжений при статическом нагружении. Величину разрушающей силы для образца с

трещиной определяют проведением испытаний на статическую трещиностойкость в соответствии с ГОСТ 25.506-83. Для испытаний используют образцы с предварительно нанесенной усталостной трещиной.

Надрез изготовляли электроэрозионным, электроискровым и другими способами. Усталостную трещину наносили при знакопеременном консольном изгибе. Циклическое нагружение можно осуществлять на установке с кривошипно-эксцентриковым возбуждением, силовая схема которой представлена на рисунке 3.1.

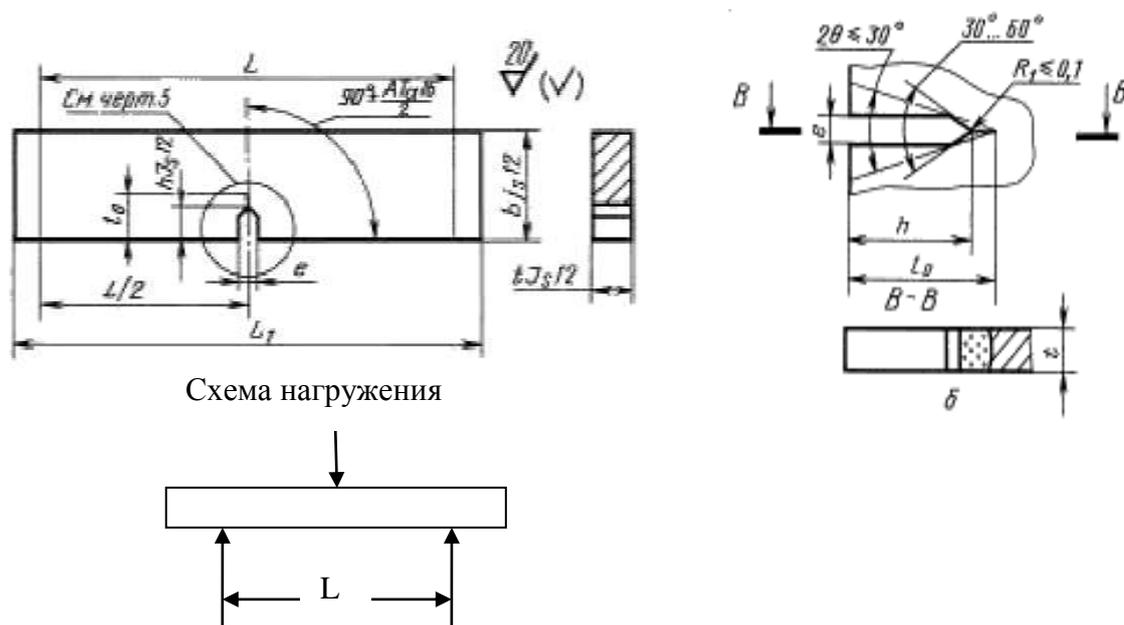


Рисунок 3.1 – Образцы, используемые для испытаний на трещиностойкость и их схема нагружения

Нагружаемый образец 1 одним концом закреплен в шарнирно-подвижной опоре, а другим – шарнирно соединен с шатуном 2, через который он получает циклические перемещения от кривошипного механизма 3. Число циклов нагружения при нанесении усталостной трещины принимали равное 5×10^4 в соответствии с [24].

Статические испытания образцов осуществляли способом трехточечного изгиба. Испытания проводили на универсальной испытательной машине МИ-40КУ с максимальным усилием 40кН, обеспечивающей

получение диаграмм разрушения в координатах усилие-смещение в автоматическом режиме. Величину смещения измеряли с помощью двухконсольного датчика, иницирующий надрез наносили в центре шва.

Размеры образца были установлены следующими:

$t = 10$ мм; $b = 20$ мм; $l_0 = 8,5$ мм; $e = 1,2$ мм; $L = 80$ мм; $L_1 = 90$ мм; $h = 10$ мм.

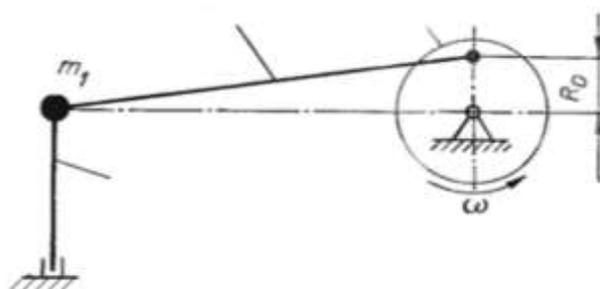


Рисунок 3.2 – Силевая схема установки для испытания прямоугольных образцов при консольном изгибе

В ходе испытаний получают диаграммы усилие-смещение, вид которых соответствовал IV типу по ГОСТ 25.506-83.

В соответствии с этим стандартом производят обработку результатов:

1) По диаграммам определяли значение нагрузок P_c и P_Q и по ее значениям вычисляли величины K_Q :

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} Y_4,$$

где Y_4 – поправочная функция, учитывающая геометрию образца:

$$Y_4 = 3,494 \left[1 - 3,396 \left(\frac{1}{b} \right) + 5,389 \left(\frac{1}{b} \right)^2 \right],$$

2) По полученным величинам K_Q и пределам текучести при той же температуре вычисляли расчетные сечения для плоских образцов:

$$t_{PK} = \beta_K \left(\frac{K_Q}{\sigma_{0.2}} \right)^2$$

3) Выполняли проверку соблюдения условий корректности результатов испытаний:

а) $P_c \leq 1,1P_Q$;

б) $\frac{t_{PK}}{t} \leq 1$ и $\varphi_c = \frac{t-t_c}{t} 100\% \leq 1.5\%$;

в) $n_c \leq 1,2n_Q$.

Если соблюдается условие «а», а также выполняются неравенства одной из групп «б» или «в» – результаты признаются корректными, и величину K_Q принимают равной коэффициенту интенсивности напряжений K_{IC} . В противном случае необходимо выполнить испытания образцов расчетных размеров, что и было осуществлено, то есть проводили серию испытаний образцов размерами:

$$t = 15 \text{ мм}; b = 30 \text{ мм}; l_0 = 15 \text{ мм}; e = 1,8 \text{ мм}; L = 120 \text{ мм}; L_1 = 130 \text{ мм}; h = 12 \text{ мм}.$$

Искомую величину максимальной разрушающей силы для образца с трещиной P_c определяют по построенным в ходе испытаний образцов диаграммам.

Исследование сопротивления материала распространению усталостных трещин проводят на специальных резонансных испытательных установках. Для определения зависимости длины усталостной трещины от числа циклов нагружения использовали плоские образцы с расчетными размерами сечения, боковую поверхность которых полировали.

Для эксперимента используют подготовленные образцы длиной 175, 150, 125, 100 и 75 мм, варьируя тем самым величину размаха коэффициента интенсивности напряжений (всего получается пять значений ΔK).

Измерение длины трещины проводили с помощью оптического микроскопа ЕС МЕТАМ-РВ 22.

Определение скорости роста усталостной трещины осуществляли с помощью интерполяционного сплайна. Для построения кинетической диаграммы усталостного разрушения размах коэффициента интенсивности напряжений вычисляли по формуле:

$$\Delta K = \frac{\Delta F \sqrt{\lambda}}{t \sqrt{B}} Y ,$$

где ΔF – размах приложенной нагрузки, действующей в ослабленном сечении;

B – ширина образца в сечении нетто;

λ – относительная длина трещины, определяемая как частное полной длины трещины и ширины образца B ;

t – толщина образца;

Y – поправочная функция, учитывающая геометрию образца, вычисляемая по формуле:

$$Y = \frac{2 + \lambda}{\sqrt{\lambda(1 - \lambda)^3}} (0,886 + 4,64\lambda - 13,32\lambda^2 + 14,72\lambda^3 - 5,6\lambda^4)$$

За значение ΔK_{th} принимали такое значение ΔK , при котором скорость роста усталостной трещины была порядка 10^{-9} м/цикл.

Обработку результатов испытаний осуществляли стандартными методами. По описанной методике определяли циклическую трещиностойкость наплавленного металла сварных образцов в исходном состоянии и подвергаемых коррозии в керосине в течение 26000 часов (или трех лет).

Заключение

Закончив рассмотрение методов расчета и проведения испытаний сварных элементов конструкций, студент может считать себя подготовленным к осуществлению профессиональной деятельности в области рационального выбора материалов, планирования и реализации научно-исследовательских работ.

Самой важной и одновременно тяжелой задачей, стоящей перед современными технологами машиностроительного производства, является осуществление выбора современных материалов, обеспечивающих достаточную прочность и надежность элементам конструкций при соблюдении экономичности подбора необходимой геометрии объекта и материала для его изготовления.

Экономия металла при производстве металлоконструкций достигается на основе реализации следующих основных направлений: применения низколегированных и высокопрочных сталей, внедрения новейших материалов на основе полимеров, и композитов, использования высокоэффективных технологий упрочнения материалов. Выполнение сложной задачи проектирования сварных конструкций на современном этапе развития производства невозможно без совершенствования методов расчета и изыскания оптимальных технолого-конструктивных решений. Немаловажным вопросом также остается диагностика текущего состояния конструкций, в основу которой также необходимо закладывать усовершенствованные методики выполнения прочностных расчетов и проведения испытаний. Эффективным решением по оптимизации процессов проектирования и диагностики сварных конструкций является внедрение реализуемых на ЭВМ комплексных расчетных систем, для создания и усовершенствования которых в свою очередь необходимо проведение глубоких исследований поведения структурно-неоднородных сварных элементов при различных внешних условиях.

Список использованных источников

- 1 ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – Введ. с 1960-07-01. – М. : Стандартиформ, 2007. – 39 с.
- 2 Винокуров, В. А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В. А. Винокуров, Г. А. Николаев ; под ред. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1996. – 576 с., ил.
- 3 Волченко, В. Н. Теория сварочных процессов : учебник для вузов по спец. «Оборудование и технология сварочного производства» / В. Н. Волченко и др. ; под ред. В. В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.
- 4 Грызунов, В.И. Механика материалов (методы механических испытаний материалов) : учебное пособие / В.И. Грызунов, Е.В. Пояркова, И.Р. Кузеев. – Орск : ОГТИ (филиал) ОГУ. – 2012. – 227 с.
- 5 Данилов, В. И. Применение безобразцового метода контроля механических свойств сталей в условиях металлургического производства / В. И. Данилов, М. С. Дрозд, Ю. И. Славский // Заводская лаборатория. – 1972. – № 2. – С. 217-221.
- 6 Диньмухаметова, Л.С. Применение магнитных методов при контроле качества сварных конструкций из сталей повышенной прочности / Л.С. Диньмухаметова, Е.В. Пояркова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 4. – С. 352-360.
- 7 Диньмухаметова, Л.С. Оптимизация режимов термоциклической обработки сварных соединений стали 09Г2С с целью повышения их эксплуатационной надежности / Л.С. Диньмухаметова, Е.В. Пояркова // Мировое сообщество: проблемы и пути решения : сб. науч. ст. – Уфа : Изд-во УГНТУ. – 2009. – №25. – С. 59-61.
- 8 Корчагин, И. Б. Проектирование сварных конструкций : учебное пособие / И. Б. Корчагин. – Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. – 140 с.
- 9 Кузеев, И.Р. Эволюция градиентных структурно-механических состояний сварных соединений при термоциклическом воздействии / И.Р.

Кузеев, Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 1. – С. 254-267.

10 Кузеев, И.Р. Прогнозирование безопасности эксплуатации сварных конструкций в условиях нефтесодержащих сред / И.Р. Кузеев, Л.С. Диньмухаметова, Е.В. Пояркова // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 6. – С. 254-262.

11 Кузнецов, И. Л. Справочные данные по расчету металлических конструкций : методические указания по проведению практических занятий и курсового проектирования для студентов специальности 290300 и направления 55010 / И. Л. Кузнецов, Г. Н. Шмелев, Д. М. Хусаинов. – Казань : Изд-во КГАСА, 2004. – 66 с.

12 Куркин, В. А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением / В. А. Куркин. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.

13 Лившиц, Л. С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л. С. Лившиц, А. Н. Хакимов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1989. – 334 с.

14 Логвинова, Н. А. Расчет сварных соединений : методические указания к практическим занятиям по курсу «Детали машин и основы конструирования» для студентов III и IV курса, обучающихся по специальностям 151001 «Технология машиностроения», 150202 «Оборудование и технология сварочного производства», 150402 «Горные машины и оборудование», 110304 «Технология обслуживания и ремонта машин в агропромышленном комплексе», всех форм обучения / Н. А. Логвинова, Э. Ф. Кусова. – Юрга : Изд-во Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета, 2012. – 33 с.

15 Мандриков, А. П. Примеры расчета металлических конструкций : учебное пособие / А. П. Мандриков. – 3-е изд., стер. – СПб. : Издательство «Лань», 2012. – 432 с., ил.

- 16 Марковец, М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – М. : Машиностроение, 1979. – 191 с.
- 17 Матлин, М. М. Основы расчета деталей и узлов транспортных машин : учебное пособие / М. М. Матлин и др. ; под ред.
- 18 Л. Н. Рыжих. – Волгоград : Изд-во ВолГТУ, 2010. – 250 с.
- 19 Матохин, Г. В. Основы проектирования сварных конструкций (руководство для курсового проектирования) : учебное пособие / Г. В. Матохин, А. В. Гридасов. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2007. – 152 с.
- 20 Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность и деформации конструкций : учебное пособие / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1982. – 272 с.
- 21 Окерблом, Н. О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций. / Н. О. Окерблом. – М.-Л. : Машиностроение, 1964. – 420 с., ил.
- 22 Пояркова, Е. В. Долговечность разнородных сварных соединений трубопроводных систем : автореф. дисс. ... к.т.н. / Е. В. Пояркова. – Уфа, 2008. – 24 с.
- 23 Пояркова, Е. В. Прочность сварных конструкций : учебное пособие / Е. В. Пояркова, Л. С. Диньмухаметова, Ж. Г. Калеева. – Орск : Издательство Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ОГУ. – 2012. – 221 с.
- 24 Пояркова, Е. В. Изучение механического поведения однородных и разнородных сварных соединений для оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазового оборудования / Е. В. Пояркова, И. Р. Кузеев // Прочность и разрушение материалов и конструкций : материалы V Международной научной конференции, 12-14 марта 2008 г. Оренбург, Россия / ред. С. Н. Летута, Г. В. Клевцов. – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ, 2008. – Т.2. – С. 229-237.
- 25 Пояркова, Е. В. Оценка напряженно-деформированного состояния нефтегазового оборудования на основании исследования

механического поведения однородных и разнородных сварных соединений / Е. В. Пояркова, И. Р. Кузеев // Мировое сообщество : проблемы и пути решения : сб. науч. ст. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2008. – № 23. – С. 12-20.

26 Пояркова, Е.В. Влияние механической неоднородности на предельную несущую способность сварных соединений из сталей повышенной прочности / Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 6. – С. 160-163.

27 Пояркова, Е.В. К вопросу о решении проблемы повышения надежности оборудования нефтегазовой отрасли на основании контроля качества сварных соединений / Е.В. Пояркова, И.Р. Кузеев // Нефтегазовое дело. – 2008. – Т.6. – №1. – С. 239-244.

28 Пояркова, Е.В. Роль остаточных напряжений в оценке напряженно-деформированного состояния сварных соединений / Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова, Т.Ф. Халитов // Инновации. Инициатива. Опыт. – Орск : Изд-во ОГТИ. – 2011. – № 1. – С. 77-82.

29 Пояркова, Е.В. Взаимосвязь механического поведения разнородных сварных соединений с морфологией их усталостных изломов / Е.В. Пояркова, И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин // Нефтегазовое дело. – 2011. – Т.9. – № 2. – С. 80-86.

30 Пояркова, Е.В. Структурно-механическое поведение сварных соединений при термоциклической обработке. / Е.В. Пояркова, Л.С. Диньмухаметова // Инновации. Инициатива. Опыт. – Орск : Изд-во ОГТИ. – 2011. – №1. – С. 70-77.

31 Стариков, Е. В. Определение механических характеристик стали как функций пластической твердости для оценки напряженно-деформированного состояния аппаратов / Е. В. Стариков, А. С. Симарчук, М. М. Хисамов // Мировое сообщество : проблемы и пути решения. – 2007. – № 21. – С. 56-58.

32 Терентьев, В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов / В. Ф. Терентьев. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 288 с.

33 Шишкин, А. В. Электротехническое материаловедение : учебное пособие / А. В. Шишкин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1997. – 145 с.

34 Щипачев, А.М. Влияние усталостной повреждаемости на твердость и внутреннюю накопленную энергию металла / А.М. Щипачев, Е.В. Пояркова // Вестник УГАТУ. – 2007. – Т.9. – № 6(24) – С. 152-157.

35 Щипачев, А.М. Связь твердости и внутренней накопленной энергии с усталостной повреждаемостью металлов / А.М. Щипачев, Е.В. Пояркова // Мировое сообщество: проблемы и пути решения : сб. науч. ст. – Уфа : Изд-во УГНТУ. – 2006. – №19. – С. 27-33.