

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра машиноведения

Е. В. Пояркова

МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Методические указания

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

Оренбург
2018

УДК 620.10
ББК 30.121
П75

Рецензент – доцент, доктор технических наук Ю. А. Чирков

П75 Пояркова, Е. В.

Микроструктура и механические свойства сварного соединения: методические указания / Е. В. Пояркова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2018. – 33 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторно-практических работ по дисциплинам «Современные методы оценки конструктивной и технологической прочности сварных соединений конструкций» и «Техническая диагностика и контроль качества» обучающимся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 15.04.01 Машиностроение.

Методические указания подготовлены в рамках проекта по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса («Новые кадры ОПК-2017»).

УДК 620.10
ББК 30.121

© Пояркова Е. В., 2018
© ОГУ, 2018

Содержание

Введение	4
1 Лабораторно-практическая работа с научно-исследовательским уклоном «Исследование структурно-механического состояния сварного шва»	6
1.1 Краткие теоретические сведения	7
1.1.1 Особенности структурообразования металла шва при сварке плавлением. 7	
1.1.2 Формирование структуры металла в зоне термического влияния сварных соединений	11
1.1.3 Влияние структурной неоднородности сварного шва на его механическое поведение	17
1.2 Оценка механических свойств материала по твердости	23
2 Практическая часть работы	28
3 Вопросы для самоконтроля	31
4 Список рекомендованных источников.....	32

Введение

Настоящие методические указания по выполнению лабораторно-практических работ предназначены для студентов – будущих магистров в области современного машиностроения, технической эксплуатации различных металлоконструкций ответственного назначения и оборудования опасных производственных объектов.

Цель методических указаний сводится к приобретению обучающимися навыков по выявлению структурно-механической неоднородности сварных соединений и определению качества сварки различных элементов конструкций и оборудования внешним осмотром, а также с помощью диагностических приборов и лабораторного оборудования, имеющихся в арсенале Аэрокосмического института ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

В задачу данного методического сопровождения дисциплин «Современные методы оценки конструктивной и технологической прочности сварных соединений конструкций» и «Техническая диагностика и контроль качества» входит также и привитие магистрантам знаний и умений, необходимых для участия в проектировании сварных конструкций в качестве экспертов, способных дать оценку технологических возможностей изготовления конструкций и обеспечения требуемых характеристик прочности и надежности сварных соединений.

При этом в процессе освоения указанных дисциплин при выполнении лабораторно-практических работ с научно-исследовательским уклоном будут сформированы следующие компетенции:

- способность выбирать и эффективно использовать методы оценки структурного состояния сварных элементов типовых деталей машиностроения;
- способность провести анализ отечественных и международных методов оценки прочности и долговечности сварных конструкций и выявить тенденции и пути развития этих методов;

- способность оценить воздействие послесварочной обработки на структурно-механическое состояние сварных элементов конструкций, направленной на повышение их конструктивной и технологической прочности.

В результате освоения теоретического материала, представленного в данном методическом сопровождении к дисциплинам, обучающиеся смогут в достаточной мере обладать знаниями, способствующими формированию компетенций, закрепленных за вышеуказанными дисциплинами.

В настоящих методических указаниях представлен достаточный объем иллюстративного материала, который может быть полезен не только обучающимся по программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 15.04.01 Машиностроение, но и по образовательным программам СПО специальности 15.02.08 Технология машиностроения, а также для специалистов сварочного производства и контролеров-дефектоскопистов различных уровней.

1 Лабораторно-практическая работа с научно-исследовательским уклоном «Исследование структурно-механического состояния сварного шва»

Сварные конструкции широко используются в самых различных областях человеческой деятельности. Значительную их часть составляют конструкции из углеродистых сталей. Механические характеристики сварных швов, как правило, сильно уступают характеристикам основного металла, что делает сварной шов наименее надежным местом всей конструкции. Получение сварных швов, не уступающих основному металлу по уровню механических свойств, является актуальной научно-практической задачей.

Цель лабораторно-практической работы – изучение структуры сварных соединений, выполненных сваркой плавлением, а также формирование количественной оценки влияния характера структурно-механической неоднородности на свойства сварных соединений.

При выполнении лабораторной работы необходимо:

- 1) изучить особенности образования структуры металла шва и околошовной зоны в условиях сварки плавлением;
- 2) произвести сравнительный анализ изменений структуры однородных и разнородных сварных соединений, полученных сваркой плавлением, дать оценку их качества.

Оснащение участка лабораторно-практической работы:

– *оборудование* – металлографические микроскопы МИМ-7, МИМ-8, структуроскоп МЕТЭК, приборы для измерения твердости и микротвердости металла Роквелла, ПМТ-3, твердомер ультразвуковой ТКМ-459С, фотоаппарат-микроскоп X-Loupe A500, портативный анализатор Delta Professional на базе рентгеновской трубки с Rh анодом;

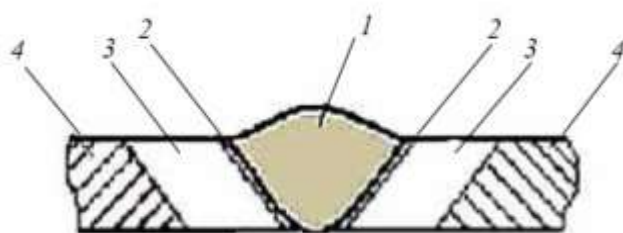
– *материалы* – коллекция шлифов, приготовленных из образцов, сваренных различными способами, реактивы;

– *плакаты* – термокинетическая диаграмма распада аустенита малоуглеродистой стали, микрофотографии структур углеродистых сталей после различных условий охлаждения;

– *справочная литература* – справочники, нормативно-техническая документация, отраслевые и межгосударственные стандарты.

1.1 Краткие теоретические сведения

В сварном соединении, выполненном сваркой плавлением, обычно выделяют 4 характерные зоны (рисунок 1.1): металл шва, участок неполного расплавления, зону термического влияния и основной металл, не подвергшийся термическому воздействию. Разделение сварного соединения на отдельные зоны вызвано тем, что структура и свойства металла шва и околошовной зоны после сварки отличаются от свариваемого металла в исходном состоянии.



- 1 – металл шва;
- 2 – зона сплавления;
- 3 – зона термического влияния;
- 4 – основной металл

Рисунок 1.1 – Строение стыкового сварного соединения

1.1.1 Особенности структурообразования металла шва при сварке плавлением

При сварке плавлением под воздействием источника теплоты расплавляются кромки основного (свариваемого) металла и электродный металл, подаваемый в сварочную ванну, а также покрытие или флюс. Плавление происходит в зоне сварки – плавильном пространстве, которое перемещается вместе с источником теплоты. Плавильное пространство, или сварочная ванна, условно может быть разделено на две части: головную и

хвостовую. В головной части происходит плавление, а в хвостовой – кристаллизация металла и формирование шва.

В отличие от кристаллизации слитка для кристаллизации металла сварочной ванны характерны следующие условия:

- незначительный объем расплавленного металла;
- быстрый локальный нагрев металла источником теплоты и быстрое его охлаждение;
- наличие подвижного температурного поля, создаваемого источником теплоты, вследствие чего средняя скорость кристаллизации в первом приближении равна скорости сварки.

По сравнению с основным металлом сварной шов имеет типичную структуру литого металла, быстро затвердевшего в условиях интенсивного отвода теплоты. Литой металл, как правило, уступает прокатному или кованому по своим пластическим и вязким свойствам, так как имеет более крупнозернистую структуру. Однако в отличие от слитков сварной шов обычно содержит меньше N, S, P и C, имеет меньшие зональную и внутрикристаллическую ликвации. Кроме того, из-за особенностей первичной кристаллизации металл шва имеет более мелкозернистую структуру.

В большинстве случаев сварные швы из малоуглеродистой и низколегированной сталей обладают высокими механическими свойствами даже без дополнительной термической обработки. Микроструктура металла шва зависит, главным образом, от условий первичной кристаллизации, которая во многом определяет его свойства.

Переход металла сварочной ванны из жидкого состояния в твердое называется *первичной кристаллизацией*. Процесс затвердевания представляет собой рост кристаллов в результате присоединения к их поверхности атомов из окружающего расплава.

Для большинства сварных швов характерна столбчатая структура. Рост столбчатых кристаллов в сварочной ванне начинается от частично оплавленных зерен основного металла. На них, как на своеобразной подкладке, начинают свой рост первичные кристаллы, количество которых ограничено. Кристаллы

развиваются нормально к поверхности охлаждения, в направлении, обратном отводу тепла, – в глубь жидкого металла ванны. В результате они приобретают столбчатую форму (рисунок 1.2).

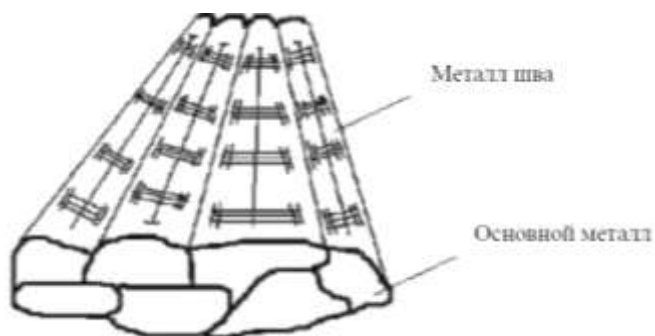


Рисунок 1.2 – Схема роста кристаллов от границы сплавления в сварочной ванне

Размеры столбчатых кристаллов зависят от способа и режимов сварки. Снижение температуры ванны и длительности пребывания металла в жидком состоянии способствует образованию крупных кристаллов. Рост столбчатых кристаллов способствует удалению из расплавленного металла газов и шлаковых включений.

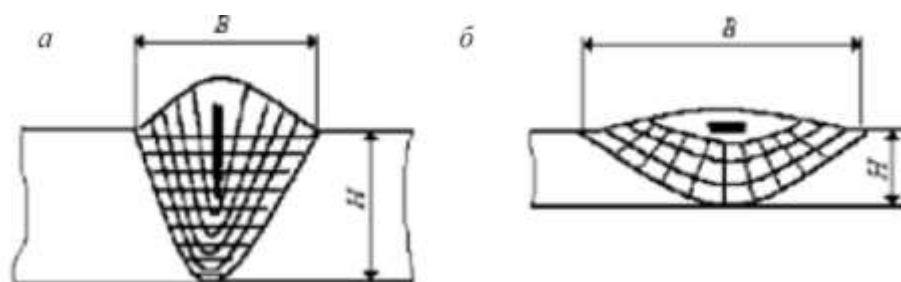
Поскольку температура кристаллизации зависит от чистоты металла, то в первую очередь затвердевает менее загрязненный примесями металл. В процессе затвердевания сварных швов перед фронтом растущих кристаллов маточный раствор непрерывно обогащается примесями. В последнюю очередь затвердевает средняя часть шва, в которой сосредотачивается максимальное количество примесей.

Химическая неоднородность, называемая *ликвацией*, снижает механические свойства металла шва, так как ослабляет связь между кристаллами и является одной из причин возникновения горячих (межкристаллизационных) трещин.

Ликвация зависит от формы шва. В узком шве максимальное количество примесей концентрируется в средней части (рисунок 1.3, а), а в широком – в

верхней части (рисунок 1.3, б). Вследствие этого влияние примесей в широком шве менее опасно.

При сварке сплавов на основе железа кристаллы имеют аустенитную структуру при первичной кристаллизации. В процессе дальнейшего охлаждения у этих сплавов происходят аллотропические превращения α -железа в γ -железо с появлением новых образований в пределах первичного зерна аустенита. Этот процесс называется **вторичной кристаллизацией**, а возникающая в результате структура – **вторичной структурой**.



а – узкий шов;

б – широкий шов

Рисунок 1.3 – Влияние формы шва на химическую неоднородность (ликвацию) металла

По химическому составу металл шва представляет собой нечто среднее между основным и электродным металлом (с учетом возможного выгорания легирующих элементов, окисления и азотирования за счет окружающей среды).

Участок неполного расплавления представляет собой узкую полоску металла, в которой он в процессе сварки находится в твердожидком состоянии. За время контакта жидкой и твердой фаз в нем протекают диффузионные процессы и развивается химическая неоднородность, а структура металла напоминает видманштеттову структуру (иглообразное расположение структурных составляющих). На этом участке, представляющем собой тонкую переходную полоску от металла шва к основному металлу, и происходит собственно сварка, т. е. формирование кристаллов шва на частично оплавленных зернах основного металла. Свойства этого участка и металла шва во многих случаях оказывают решающее влияние на работоспособность

сварного соединения, так как здесь часто образуются трещины, ножевая коррозия, хрупкие разрушения и т. п. Ширина участка неполного расплавления невелика и для дуговой сварки составляет примерно 0,1...0,5 мм.

Далее следует околошовная зона, называемая *зоной термического влияния* (ЗТВ).

1.1.2 Формирование структуры металла в зоне термического влияния сварных соединений

Зона термического влияния является обязательным спутником сварного шва при всех способах сварки плавлением и давлением, кроме холодной сварки. Эта зона охватывает основной металл, не расплавляющийся в процессе сварки и сохраняющий неизменным свой химический состав, но изменивший свою структуру и механические свойства вследствие нагрева и охлаждения (термообработки) в процессе сварки.

Прочность сварного соединения и его эксплуатационные свойства во многом зависят от структурных изменений, которые происходят в ЗТВ.

Строение и размеры ЗТВ зависят от химического состава и теплофизических свойств свариваемого металла, мощности источника теплоты, степени его концентрированности, скорости движения и других факторов. Ширина ЗТВ меняется от 1...3 мм при ручной дуговой сварке до 20 мм и более при электрошлаковой сварке.

Термический цикл любой точки металла сварного соединения характеризуется максимальной температурой нагрева, длительностью нагрева до определенной температуры и скоростью охлаждения. Для ЗТВ характерно неравномерное распределение максимальных температур нагрева (рисунок 1.4).

Результат теплового воздействия на металл в ЗТВ зависит от его отношения к термообработке. В зависимости от способа и погонной энергии сварки возможны два предельных случая:

1) закалка – при быстром охлаждении – с образованием твердых и хрупких структур и возникающих при этом значительных по величине напряжений;

2) перегрев – при медленном охлаждении, – характеризующийся чрезмерным ростом зерна и снижением пластических и вязких свойств металла.

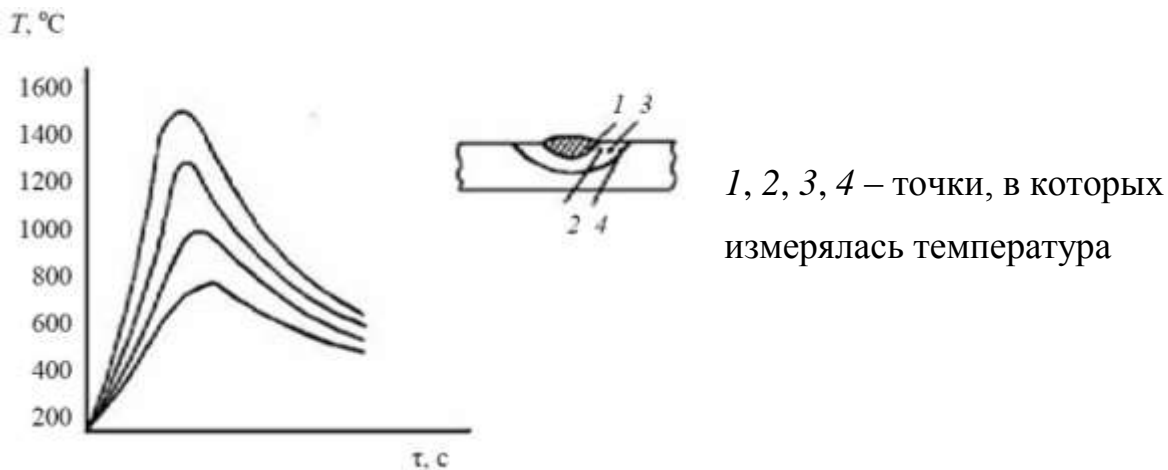


Рисунок 1.4 – Термический цикл при сварке плавлением

Оценить общий характер возможных превращений, протекающих в ЗТВ при сварке низкоуглеродистых сталей, можно по диаграмме железо–цементит, а при различных скоростях охлаждения – по термокинетическим диаграммам распада аустенита, которые построены для большинства марок углеродистых и легированных сталей. Скорость охлаждения обычно оценивается в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита (от 500°C до 550 °C). При малых скоростях охлаждения, соответствующих электрошлаковой и ванной сварке, превращение аустенита приводит к формированию структуры, состоящей из феррита и перлита.

При средних скоростях охлаждения (автоматическая сварка под флюсом) в зависимости от марки стали образуются перлит и бейнит или бейнит и мартенсит с небольшим количеством феррита. При скорости охлаждения выше критической образуется только мартенсит. Мартенситное превращение сопровождается увеличением объема стали и возникновением больших напряжений, которые могут вызвать разрушение металла.

В подобных случаях приходится принимать специальные меры к улучшению структуры металла ЗТВ и предотвращению образования мартенсита. Эти меры сводятся к изменению теплового режима в процессе сварки, выбору рациональной формы разделки кромок под сварку и последующей термообработке.

На рисунке 1.5 показана схема структур, образующихся в зоне термического влияния при сварке стыкового соединения из малоуглеродистой стали за один проход.

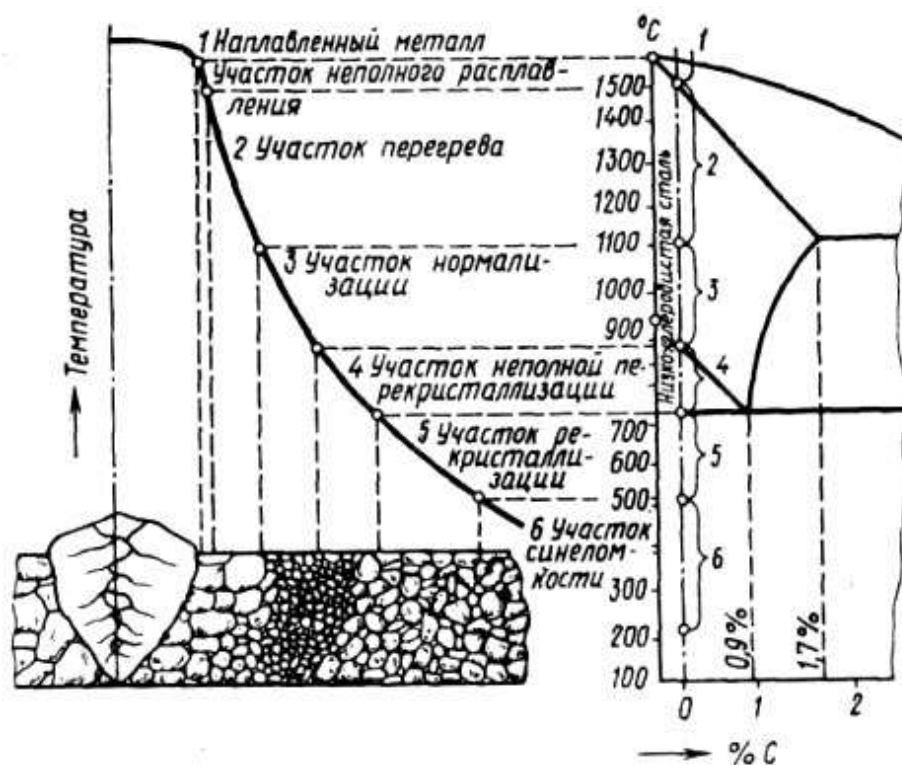


Рисунок 1.5 – Строение ЗТВ при сварке низкоуглеродистой стали

Над сечением шва показана кривая температур, а рядом – часть диаграммы железо–цементит в том же масштабе. В зависимости от температуры нагрева в ЗТВ различают следующие участки:

- перегрева;
- нормализации;
- неполной перекристаллизации;
- рекристаллизации.

Участок перегрева. Он включает металл, нагретый до температур выше 1100 °С, то есть несколько ниже температуры плавления. Металл на этом участке в процессе нагрева претерпевает аллотропические превращения (α -железа в γ -железо), сопровождающиеся ростом аустенитного зерна. В тех случаях, когда перегрев сочетается с последующим быстрым охлаждением (закалка), металл на этом участке после сварки обладает пониженной пластичностью и прочностью по сравнению с основным металлом. Участок особенно опасен для закаливаемых сталей, поэтому выбор рациональной технологии сварки сводится в первую очередь к обеспечению наименьшего ухудшения свойств на этом участке ЗТВ.

Участок нормализации (перекристаллизации). Этот участок охватывает металл, нагретый до температуры, немного превышающей температуру аллотропических превращений (от 900 °С до 1050 °С). Происходящий здесь процесс перекристаллизации при нагреве и охлаждении приводит к значительному измельчению зерен металла. Структура металла становится более мелкозернистой по сравнению с исходной. Механические свойства металла этого участка обычно лучше, чем основного металла.

Участок неполной перекристаллизации. Он включает металл, нагретый до температур от 700°С до 850 °С. При этих температурах происходит частичная перекристаллизация, то есть часть феррита остается в исходном состоянии, другая – образует аустенит. При последующем охлаждении и распаде аустенита образуется мелкозернистая структура, поэтому здесь, наряду с зернами основного металла, не изменившимися в процессе сварки, присутствуют зерна, образовавшиеся при перекристаллизации.

Участок рекристаллизации (старения). Он наблюдается при сварке сталей, предварительно подвергшихся пластической деформации (ковке, прокатке). Температурный интервал участка от 450 °С до 650 °С. На этом участке ЗТВ происходят сращивание (укрупнение) раздробленных при нагартовке зерен основного металла и некоторое его разупрочнение по сравнению с исходным состоянием. При сварке изделий из литья рекристаллизации не наблюдается.

Для металлов и сплавов, склонных к старению, необходимо учитывать некоторое снижение пластичности на этом участке.

Металлографическому исследованию подвергаются стыковые, тавровые и угловые соединения для выявления возможных внутренних дефектов (трещин, непроваров, шлаковых и металлических включений и других дефектов), а также для установления глубины проплавления и структуры металла шва.

Контроль производится путем исследования поверхности шлифа, вырезанного поперек сварного шва. Контролируемая поверхность должна включать в себя сечение шва с зоной термического влияния и прилегающей к ней участком основного металла.

Вырезка заготовок для шлифов производится режущим (фрезеровка, строгание) или абразивным инструментом. Допускается газовая или плазменная резка, если при этом будут исключены структурные изменения металла в исследуемом сечении.

К металлографическим относятся макроструктурные и микроструктурные исследования.

Макроисследование проводится визуально или при увеличении до 30 раз. Макроструктурный анализ выявляет форму и размеры шва, площадь и форму провара основного металла, направленность, рост и размеры кристаллитов, размеры и форму околошовной зоны, наличие в соединении непроваров, трещин, пор, шлаковых включений, химической неоднородности.

Перед травлением поверхность темплетов шлифуется на плоскошлифовальных станках или вручную. Окончательная обработка макрошлифа осуществляется шлифовальной шкуркой марки К-3 зернистостью 240–280. Для травления шлифов применяют различные реактивы в зависимости от материала сварного соединения и предполагаемых особенностей макроструктуры

Для выявления структуры сварных швов на углеродистых и легированных сталях применяют реактив из хлористого железа (20 г на 100 г воды) или раствор соляной кислоты (10 мл на 100 мл воды). Травят образцы в

растворе, подогретом до 60 °С. После травления шлиф осветляется в 10 %-ном водном растворе азотной кислоты.

Универсальным раствором для выявления структуры сварных швов практически на всех сталях является раствор хлористого железа (200 г) и азотной кислоты (300 мл) в 100 мл воды. Образец травят протираанием ватным тампоном, смоченным в растворе.

Микроструктурный анализ позволяет изучить строение металлов и сплавов с помощью микроскопа. Он определяет:

- структуру наплавленного металла, основного металла и зоны термического влияния (в том числе по ранее рассмотренным характерным участкам: перегрева, нормализации, неполной перекристаллизации, рекристаллизации);

- примерное содержание углерода в наплавленном металле (более точное установление содержания химических элементов в металле возможно при помощи высокоточного материаловедческого оборудования, например, портативного анализатора Delta Professional на базе рентгеновской трубки с Rh анодом, имеющегося в арсенале кафедры машиноведения Аэрокосмического института ОГУ);

- перегрев и пережог, выгорание отдельных элементов, микротрещины, микропоры, шлаковые включения и другие дефектные составляющие.

Размер поверхности микрошлифа обычно не превышает 20x20 мм. Поверхность микрошлифа обрабатывается более тщательно, чем макрошлифа, и заканчивается полировкой на сукне алмазными пастами или растворами окиси хрома или окиси алюминия.

Для травления сталей применяют 4 %-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте (травят до 1 минуты), 4 %-ный раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте (травят от 20 секунд до 15 минут). После травления микрошлифы обследуют под микроскопом при увеличении от 150 до 1000 раз и более.

Данные подобного структурного анализа совместно с измерениями твердости дают довольно точное представление о качестве сварного

соединения и об изменениях, которые нужно ввести в технологию сварки для улучшения качества швов.

1.1.3 Влияние структурной неоднородности сварного шва на его механическое поведение

Об изменении прочностных и в определенной степени пластических свойств в различных участках металла шва и ЗТВ можно судить по изменению твердости (рисунок 1.6).

Повышение твердости обычно связано с повышением прочности и снижением пластичности. Характер распределения твердости в ЗТВ может быть различным, он определяется химическим составом стали и режимом сварки. Обычно в сварных изделиях не допускается твердость в зоне сварки более $HV = 300$ МПа.

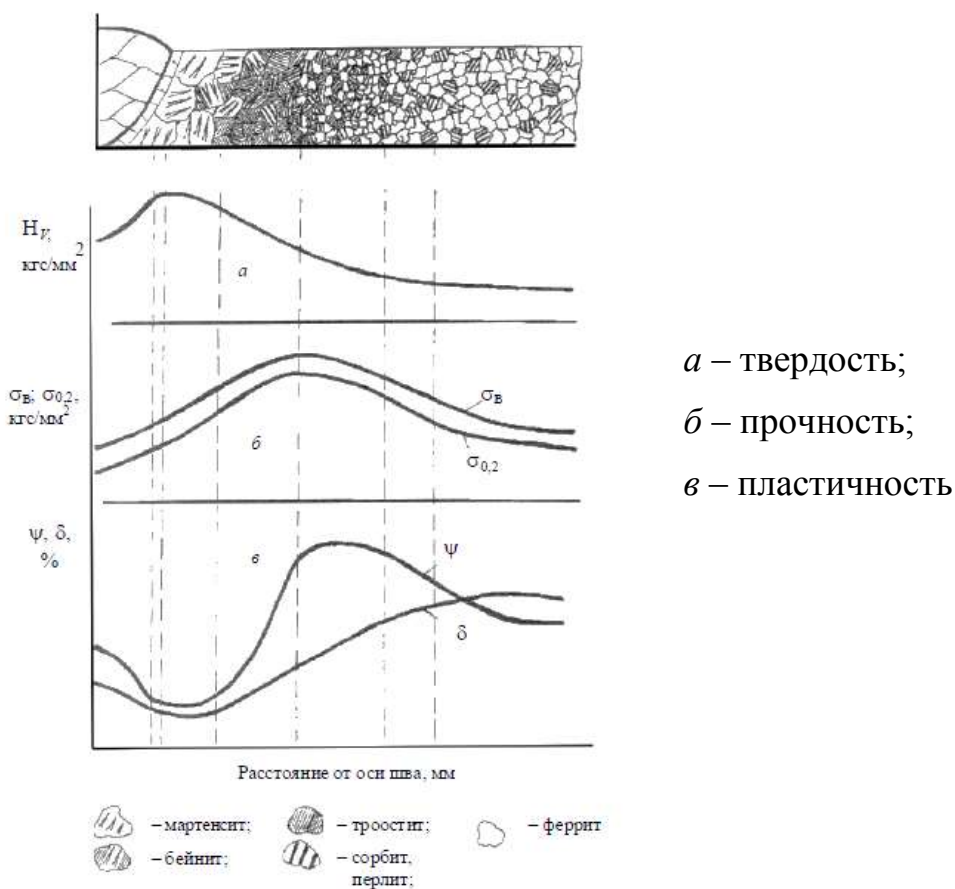


Рисунок 1.6 – Изменение механических свойств в металле шва и околошовной зоне

Таким образом, зона термического влияния неоднородна по структуре и механическим свойствам. Наиболее ослабленным является участок перегрева, а наилучшие механические свойства имеет участок нормализации. В целом механические свойства ЗТВ хуже, чем у основного металла, поэтому ее размеры необходимо ограничивать.

Чувствительность стали к изменению термического цикла сварки зависит от содержания в ней углерода, а также элементов, повышающих ее прокаливаемость и склонность к перегреву.

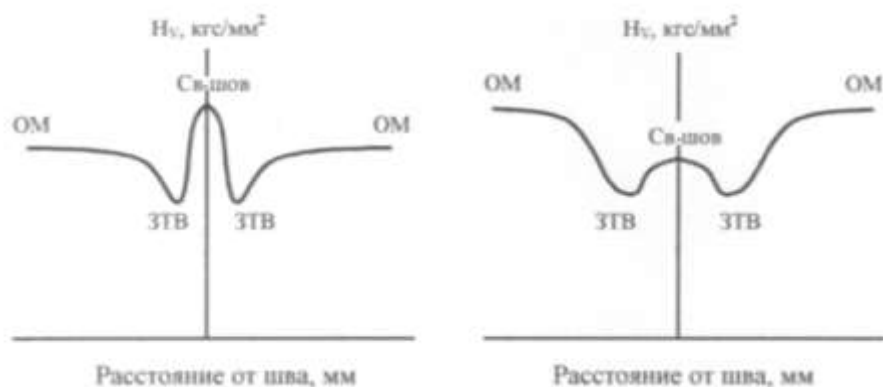
В сварных соединениях низкоуглеродистой и большинства низколегированных сталей рост зерна в околошовной зоне не оказывает заметного влияния на свойства металла.

При сварке углеродистых и особенно легированных сталей быстрое охлаждение околошовной зоны вызывает часто закалку металла и образование структур, имеющих значительные твердость и хрупкость.

В этих случаях для улучшения структуры и свойств ЗТВ применяют термическую обработку, обычно высокий отпуск.

В последние годы в машиностроении возрос объем сварочных работ с применением углеродистых и низколегированных сталей, поставляемых в термоупрочненном состоянии. По сравнению с горячекатаным термоупрочненный металл (закаленный и отпущенный при определенной температуре) имеет более высокие механические свойства и более низкую температуру хладноломкости.

При сварке такой стали в зоне термического влияния может наблюдаться разупрочнение (рисунок 1.7). Протяженность разупрочненной зоны («мягкой прослойки») и величина разупрочнения оказывают большое влияние на прочностные свойства сварного соединения. При правильном выборе сварочных материалов и режимов сварки прочность сварных соединений может быть практически равной прочности основного металла, если протяженность разупрочненного участка и величина разупрочнения малы.



ОМ – основной металл; св. шов – сварной шов,
ЗТВ – зона термического влияния.

Рисунок 1.7 – Схема возможных вариантов распределения твердости в сварном соединении

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.

Оценить характер распределения механических свойств по сечению сварного соединения можно проведением соответствующих испытаний отдельных его участков, либо на основании анализа результатов дюрOMETрического 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 проводят на приборах Виккерса, Роквелла и Бринелля на макрошлифах поперечного сечения образцов.

Образец для измерений должен иметь тщательно зашлифованную плоскую поверхность, в которую вдавливается конус или шарик, а противоположная параллельная поверхность также должна быть ровной, зачищенной. Замеры твердости производят в соответствии с ГОСТ 6996-66 согласно схеме, представленной на рисунке 1.8.

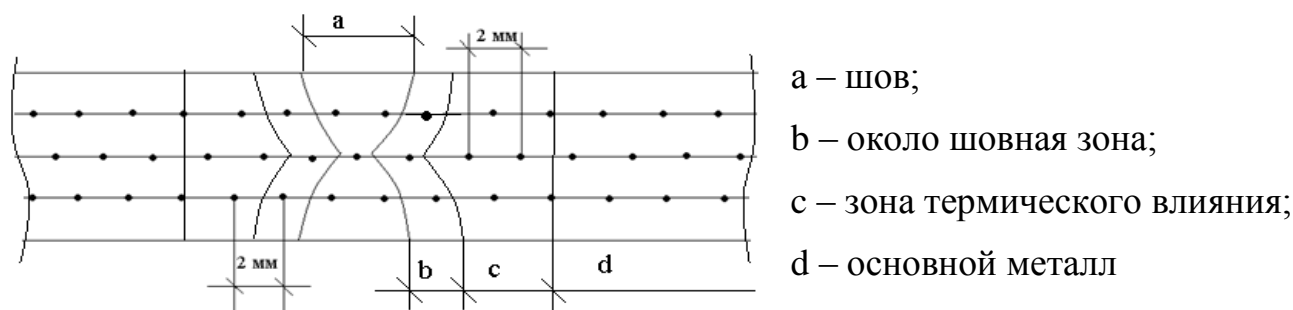


Рисунок 1.8 – Схема проведения измерений твердости в сварном соединении

Измерения необходимо проводить не менее чем по трем линиям сечения.

Применительно к определению механических свойств сварных соединений испытания на растяжение регламентирует 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 1.9. 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.

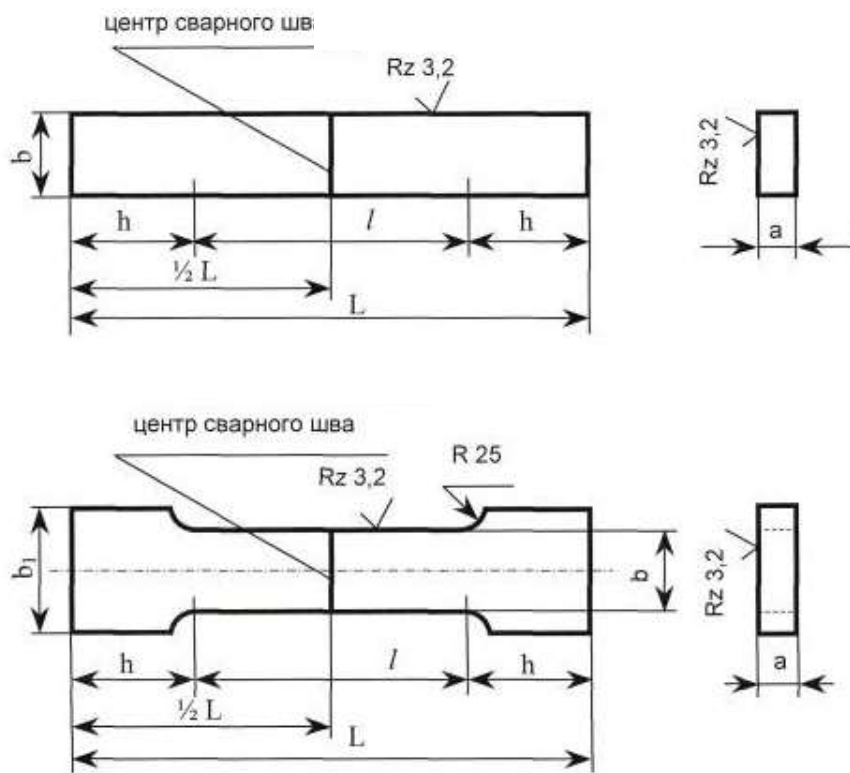


Рисунок 1.9 – Форма и размеры образцов для испытаний сварного соединения на статическое растяжение

Для определения прочности металла шва в образцах делают выкружку, ослабляющую среднюю часть образца (рисунок 1.10). Определяют временное сопротивление по формуле:

$$\sigma'_B = kP/F, \quad (2.1)$$

где k – поправочный коэффициент, для сталей $k = 0,9$;

F – площадь наименьшего поперечного сечения до испытания.

Для достоверного анализа механического поведения сварных соединений необходимо также определять стандартные характеристики прочности и пластичности сварного соединения и основного металла, а также удельную

работу разрушения, используемую для оценки сопротивления материала хрупкому разрушению.

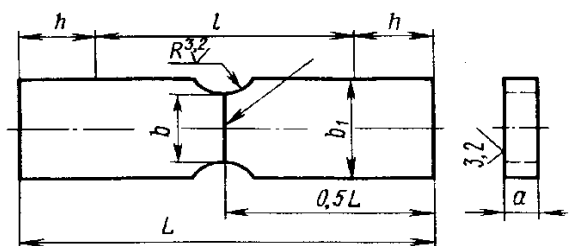
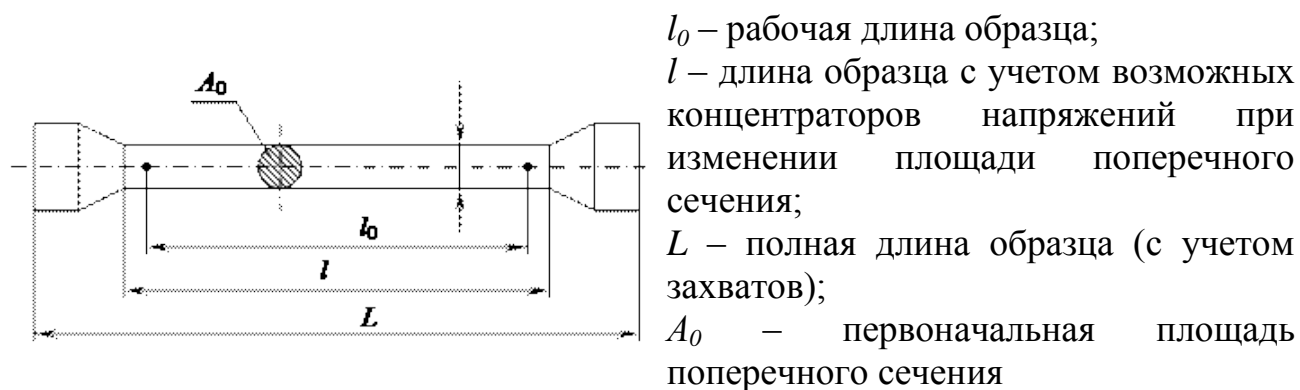


Рисунок 1.10 – Образец для определения временного сопротивления металла шва

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 $\sigma_b \cdot \delta$.

Механические испытания образцов должны проводиться при комнатной температуре в строгом соответствии ГОСТ 1497–84 на имеющейся лабораторной испытательной разрывной машине (с предельным усилием нагружающих устройств не менее 5 кН). Далее необходимо установить механические свойства сварных соединений, основного металла, и ослабляющей зоны сварного соединения. Для определения свойств основного металла рекомендуется использовать гладкие образцы типа 5 с рабочей частью в виде цилиндра.



l_0 – рабочая длина образца;
 l – длина образца с учетом возможных концентраторов напряжений при изменении площади поперечного сечения;
 L – полная длина образца (с учетом захватов);
 A_0 – первоначальная площадь поперечного сечения

Рисунок 1.11 – Стандартный образец для испытаний на одноосное растяжение

1.2 Оценка механических свойств материала по твердости

Как известно, между твердостью пластичных металлов, определяемой способом вдавливания, и другими механическими свойствами (главным образом, временным сопротивлением) существует количественная зависимость.

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.

Значения прочности σ_B , $\sigma_{0,2}$ вычисляют по формулам [3-5]:

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

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:

$$\begin{aligned}\psi_K &= \frac{6100}{H} + 36,6, \% \\ \delta &= 1725 * H^{-0,79}, \%\end{aligned}$$

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. При дальнейшей диагностике следует принять меры по обеспечению надежности сварной конструкции к воздействиям различных нагрузок, не учитываемых при стандартных методах расчета.

Таким образом, существует возможность выявления неравномерного (в некоторых случаях – скачкообразного) изменения механической прочности

сварных соединений и образования различных дефектов под воздействием эксплуатационных факторов. Обнаружение микротрещин (или других опасных дефектов) определенного размера связано с возможностями современных методов неразрушающего контроля (НК).

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

Величина твердости взаимосвязана с временным сопротивлением металлов и сплавов, проявляющих при растяжении сосредоточенную пластическую деформацию (*шейку*), а именно сталей (кроме сталей с аустенитной и мартенсистой структурой) и многих цветных сплавов.

Это вызвано тем, что при испытаниях на растяжение наибольшей нагрузке, предшествующей растяжению, отвечает предельная равномерная деформация, после которой начинает развиваться шейка. В этих случаях предельная равномерная деформация при растяжении примерно совпадает со средней пластической деформацией поверхностных слоев металла при измерении твердости вдавливанием сферического индентора. Обычно такая зависимость не соблюдается для хрупких металлов, однако в ряде случаев (например, серые чугуны) она есть.

Предел пропорциональности:

$$\sigma_{\text{пл}} = 0,636P/d^2,$$

где P – приложенная нагрузка, Н;

$0,636/d^2$ – коэффициент, учитывающий особенность структурного строения хрупких материалов и зависящий от размеров поперечного сечения испытываемого образца, мм^2 .

Условный предел текучести для конструкционных углеродистых и перлитных легированных сталей:

$$\sigma_{0,2} = 0,367 \text{ HB} - 240 \quad ([\sigma_{0,2}] = [\text{HB}] = \text{МПа}).$$

Это соотношение основывается на том, что для углеродистых и перлитных легированных сталей с увеличением твердости возрастает условный предел текучести.

Временное сопротивление:

– для конструкционных углеродистых и перлитных легированных сталей:

$$\sigma_{0.2} = 0,365 HB^{0,989} \quad ([\sigma_{0.2}] = [HB] = \text{МПа});$$

– для аустенитных сталей:

$$\sigma_{\sigma} = 0,365 HB + 140 \quad ([\sigma_{\sigma}] = [HB] = \text{МПа});$$

– для нимоников:

$$\sigma_{\sigma} = 0,28 HB + 280 \quad ([\sigma_{\sigma}] = [HB] = \text{МПа}).$$

Истинное сопротивление разрыву для конструкционных углеродистых и перлитных легированных сталей:

$$S_{\kappa} = 809 + 0,190 H_{0.2} + 7,83 \cdot 10^{-5} H_{0.2}^2,$$

где $H_{0.2}$ – твердость, при которой в лунке возникает деформация, равная 0,2 %.

Величина $H_{0.2}$ связана с условным пределом текучести соответствующим соотношением, которое с учетом выражения может быть представлено так:

$$H_{0.2} = 20\sigma_{0.2}^{1/1.37} = 20(0,367HB - 240)^{1/1.37}.$$

В выражениях размерности $[S_{\kappa}] = \sigma_{0.2} = [H_{0.2}] = [HB] = \text{МПа}$.

Взаимосвязь обосновывается тем, что на пределе текучести – начальный акт разрушения, а при напряжении разрыва происходит полное разрушение.

Относительное поперечное сужение для углеродистых сталей:

– закалка + отпуск:

$$\psi = 105 - 0,0186HB \text{ ([H] = МПа, } [\psi] = \%);$$

– нормализация:

$$\psi = 85,6 - 0,0134HB \text{ ([HB] = МПа, } [\psi] = \%);$$

– отжиг:

$$\psi = 105 - 0,0316 HB \text{ ([HB] = МПа, } [\psi] = \%).$$

Данные соотношения получены с учетом того, что в некоторых частных случаях с увеличением твердости пластичность материала падает (например, это утверждение верно для углеродистых сталей при определенном виде термообработки).

Относительное удлинение для конструкционных углеродистых и перлитных легированных сталей (для пятикратных образцов):

$$\delta_5 = 420 \cdot 100\% / (2\sigma_s + \sigma_{0,2}).$$

Соотношение получено с учетом того, что для сталей, образующих шейку, площадь диаграммы растяжения в координатах σ - δ одинакова и может быть определена приблизительно так:

$$A_y = [(2 \cdot \sigma_s + \sigma_{0,2})/3] \cdot \delta / 100\%.$$

Ударная вязкость для конструкционных углеродистых и перлитных легированных сталей со средним размером зерна:

$$KC = 27,2 - 52,8 (H_{0,2}/HB) + 25,6 (H_{0,2}/HB)^2 \text{ [МДж/м}^2\text{]}.$$

Соотношение получено на основе того, что ударная вязкость связана с объемом, вовлекаемым в пластическую деформацию в месте надреза. Деформируемый объем зависит от упрочняемости металла, которая может быть охарактеризована равномерной деформацией при растяжении или отношением $\sigma_{0,2}/\sigma_B$.

Предел выносливости:

– для углеродистых сталей:

$$\sigma_{-1} = 0,1 HB + 100 \quad ([\sigma_{-1}] = [HB] = \text{МПа})$$

– для перлитных легированных сталей:

$$\sigma_{-1} = 0,1HB + 150 \quad ([\sigma_{-1}] = [HB] = \text{МПа}).$$

Однако следует отметить, что изменение твердости вдавливанием стального шарика – это не универсальный способ. Он не позволяет испытывать материалы твердостью $HB > 4,5$ ГПа и измерять твердость тонкого поверхностного слоя толщиной 1:2 мм, так как стальной шарик продавливает этот слой и проникает на большую глубину.

2 Практическая часть работы

Практическую часть работы рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. Шлифы, изготовленные из сварных образцов, подвергнуть травлению 10...25 %-ным водным раствором азотной кислоты для выявления макроструктуры, которую исследовать невооруженным глазом или при небольшом увеличении (до 5 раз).

2. По макроструктуре определить форму и размеры шва, глубину проплавления, форму и размеры зерен, ширину ЗТВ, размеры крупных зерен в околошовной зоне.

3. Выявить дефекты сварного соединения: непровары, трещины, шлаковые включения и другие. Результаты представить в виде зарисовок макроструктуры с изображением выявленных дефектов.

4. Произвести переполировку и повторное травление шлифов 2...4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Микроструктуру исследовать на микроскопах МИМ-7, МИМ-8. До травления на полированной поверхности шлифа исследовать распределение и характер неметаллических включений. После травления изучить структуру шва и зоны термического влияния: определить структурные составляющие (феррит, перлит, сорбит и другие) и их относительное количество. Результаты исследований представить в виде зарисовок микроструктуры.

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

6. Произвести измерение твердости на макрошлифах (согласно описанной в теоретической части методике) на приборе Роквелла или микротвердости на приборе ПМТ-3 в поперечном направлении сварного соединения. Результаты измерений занести в таблицу и построить график распределения твердости по сечению сварного соединения. Распределение твердости сопоставить со схемой микроструктур и сделать общий вывод о качестве сварного соединения.

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

8. 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.

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

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

11. Рассчитать коэффициент контактного упрочнения и предельную толщину мягкой прослойки, при которой достигается равнопрочность сварного соединения и основного металла

12. Сделать общие выводы по работе

13. Оформить отчет, в который должны входить следующие пункты:

1) Цель и задачи работы.

2) Особенности формирования структуры металла сварного шва, выполненного сваркой плавлением (конспективно).

3) Структура и свойства зоны термического влияния (конспективно).
Дополнить иллюстративным материалом, полученным самостоятельно.

4) Результаты выполнения практической части работы. Дополнить иллюстративным материалом по результатам эксперимента, полученным самостоятельно или в команде.

5) Выводы по работе.

3 Вопросы для самоконтроля

1. Из каких этапов состоит процесс образования сварного соединения?
2. Что такое термический цикл сварки?
3. Попробуйте нарисовать термический цикл при сварке (в координатах температура – время). Сравните с графиком какого-либо вида термической обработки, например, закалки в воду, нормализации. Проанализируйте, в чем сходство и различие вида кривых.
4. Из каких зон состоит сварное соединение? Опишите характерные признаки зон сварного соединения. Как эти зоны образуются при сварке?
5. Как добиваются равнопрочности сварного шва с основным металлом?
6. Всегда ли нужно добиваться равнопрочности шва и основного металла?
7. От каких факторов зависит ширина зоны сплавления?
8. Что называется зоной термического влияния? Из каких участков она состоит?
9. От чего зависит величина зоны термического влияния?
10. Отличается ли химический состав металла в зоне термического влияния от химического состава основного свариваемого металла?
11. Какие изменения происходят в металле участка перегрева?
12. Опишите свойства металла на участке нормализации.
13. Опишите основные структурные превращения металла на участке неполной перекристаллизации.
14. Какие дефекты влияют на качество шва?
15. Как устранить внутренние напряжения в сварном соединении?

4 Список рекомендованных 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. 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.
4. Пояркова, Е. В. Прочность сварных конструкций : учебное пособие / Е. В. Пояркова, Л. С. Диньмухаметова, Ж. Г. Калеева. – Орск : Изд-во Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ОГУ, 2012. – 222 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. Марковец, М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – М. : Машиностроение, 1979. – 191 с.
7. Пояркова, Е. В. Долговечность разнородных сварных соединений трубопроводных систем : автореф. дисс. ... к.т.н. / Е. В. Пояркова. – Уфа, 2008. – 24 с.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

11. Пояркова, Е. В. Лабораторно-практические возможности исследования сварных соединений [Электронный ресурс] : методические указания для обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 15.04.01 Машиностроение / Е. В. Пояркова. – Оренбург : ОГУ. – 2017. – Загл. с тит. экрана.

12. ИСО 6520-82. Классификация дефектов швов при сварке металлов плавлением (с пояснениями).

13. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – Введ. 01.01.66. – М. : Изд-во стандартов, 1966. – 28 с.

14. Волченко, В. Н. Контроль качества сварки : учеб. пособие для машиностроительных вузов / В. Н. Волченко [и др.]; под. ред. В. Н. Волченко. – М. : Машиностроение , 1975. – 328 с.

15. Пояркова, Е. В. Диагностика повреждений металлических материалов и конструкций [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е. В. Пояркова, С. Н. Горелов. – 2-е изд. – Москва : Флинта. – 2015. – 202 с. – Загл. с тит. экрана.

16. 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.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660173 Установление связи между структурой, конструктивной прочностью и эксплуатационной надежностью сварных элементов конструкций / Е.В. Пояркова, С.Ю. Шамаев. – Заявка № 2014617927. Дата поступления 08.08.2014 г. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 02.10.2014 г.