

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

В.М. Самойленко, О.Е. Зубов, Д.Н. Кочкин

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ
Часть III**

**ПОСОБИЕ
по выполнению практических занятий
и лабораторных работ**

*по направлениям 25.03.01, 25.04.01,
20.03.01, 23.03.01, 25.03.03
всех форм обучения*

Москва-2016

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

Кафедра авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов

В.М. Самойленко, О.Е. Зубов, Д.Н. Кочкин

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ
Часть III**

ПОСОБИЕ

по выполнению практических занятий
и лабораторных работ

*по направлениям 25.03.01, 25.04.01,
20.03.01, 23.03.01, 25.03.03
всех форм обучения*

Москва - 2016

ББК 606

С 17

Рецензент д-р техн. наук, проф. Коняев Е.А.

Самойленко В.М., Зубов О.Е., Кочкин Д.Н.

С 17 Материаловедение и технология материалов Ч III: пособие по выполнению практических и лабораторных работ. – М.: МГТУ ГА, 2016. – 24 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Материаловедение и технология материалов» по учебному плану для студентов по направлениям подготовки 25.03.01, 25.04.01, 20.03.01, 23.03.01, 25.03.03, 25.05.03 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 28.04.16 г. и методического совета 10.05.16 г.

Подписано в печать 12.05.2016 г.

Печать офсетная

Формат 60x84/16

1,1 уч.-изд. л.

1,4 усл.печ.л.

Заказ № 77

Тираж 80 экз.

Московский государственный технический университет ГА

125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20

Редакционно-издательские услуги ООО «Имидж-студия Арина»

127051 Москва, М. Сухаревская пл., д. 2/4 стр.1

Содержание

Предисловие.....	4
Лабораторная работа №7 Исследование качества сварных соединений. Общие сведения	5
1. Строение сварного соединения.....	6
2. Влияние процесса сварки на механические свойства и структуру соединения.....	7
3. Методы контроля качества сварных швов.....	13
3.1. Неразрушающие методы контроля.....	14
3.2. Разрушающие методы контроля.....	20
Методические указания по выполнению практической (лабораторной) работы.....	23
Контрольные вопросы.....	24
Литература.....	24

Предисловие

Настоящее пособие по выполнению практических занятий и лабораторных работ предназначено для студентов – будущих инженеров в области технической эксплуатации различных металлоконструкций оборудования аэропортов, заправочных комплексов, авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов, а также транспортного оборудования и УВД. Целью лабораторного практикума является исследование качества сварных соединений, применяемых в металлоконструкциях авиационной отрасли в условиях комплексного воздействия на них эксплуатационных факторов. Особое внимание при этом уделяется формированию у обучаемых понимания физической сущности процессов сварки, которые приводят к изменению рабочих характеристик элементов металлоконструкций и устройств, в процессе длительной их эксплуатации, а также умению анализировать причины отказа и принимать решение о выборе способов сварки.

При подготовке настоящего руководства использован материал, изложенный в следующих работах:

Самойленко В.М., Зубов О.Е., Кочкин Д.Н. Технология материалов: учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2014. – 104с.;

Основы технического диагностирования изделий. Под редакцией А.И. Гневко. – Учебное пособие. – М.: ВА РВСН. 2013. – 331с.;

Воскобойникова Л.С., Дубилин Г.Н., Тутнова Е.В. Материаловедение: пособие по выполнению лабораторных работ. – М.: МГТУ ГА, 2008;

Самойленко В.М., Зубов О.Е., Кочкин Д.Н. Материаловедение и технология материалов: пособие по выполнению практических занятий и лабораторных работ. – М.: МГТУ ГА, 2014.

Лабораторная работа № 7

Исследование качества сварных соединений

Цель занятия: изучение системы методов средства контроля качества сварных соединений и освоение методики контроля качества сварных соединений.

Задачи работы: исследование строения металла сварного шва, выявление дефектов в сварном соединении, определение качества сварного соединения и его соответствия требованиям чертежа.

Общие сведения

Сварка является одним из основных технологических процессов соединения деталей. Сваркой называется процесс получения неразъемного соединения посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании.

Создание сварной конструкции, полностью отвечающей своему служебному назначению, экономичной при изготовлении и надежной в эксплуатации, представляет собой комплексную задачу, которая включает проектирование и рациональное построение технологии изготовления с применением средств механизации и автоматизации.

Процесс сварки делят на три класса (ГОСТ 19521 – 74): термический, термомеханический и механический. Наиболее распространенный в производстве авиационной техники термический класс объединяет виды сварки, осуществляемые плавлением металла.

К основным физическим процессам при сварке плавлением относятся плавление основного и электродного (присадочного) металла, их перемешивание, формирование и кристаллизация сварочной ванны, ввод и распространение тепла в свариваемом соединении, приводящие к изменению структуры металла в шве и зоне термического влияния и образованию собственных сварочных деформаций и напряжений.

Характерными особенностями сварки, в частности сталей, являются:

1. Высокая температура нагрева металла. При дуговой сварке температура ванны достигает 2300° С (вместо 1700° С в мартеновской печи);
2. Малый объем расплавленного металла в сварочной ванне;

3. Кратковременность процесса. Время от начала расплавления до застывания сварочной ванны составляет несколько секунд; охлаждение протекает со скоростью $5 - 15^{\circ} \text{C}/\text{с}$.

Высокая температура приводит к быстрому плавлению электродного материала, покрытия, флюса, а также свариваемых частей. Молекулы кислорода, азота, водорода, находящиеся в воздухе в зоне дуги, частично распадаются, на атомы и ионы и, обладая высокой активностью, вступают в соединения с элементами расплавленной стали и растворяются в ней, вызывая после остывания охрупчивание металла. Высокая температура при сварке приводит также к испарению и выгоранию веществ, находящихся в зоне сварки. Небольшой объем расплавленного металла в сварочной ванне (при ручной сварке $0.5 - 1.5 \text{ см}^3$; при автоматической сварке $24 - 300 \text{ см}^3$) вызывает интенсивный отвод тепла в свариваемые изделия, в результате чего реакции между расплавленным металлом и шлаком протекают за очень короткое время, не успевая полностью завершиться. Быстрое затвердевание и кристаллизация металла шва отражается на структуре и механических свойствах шва и металла свариваемых частей.

1. Стрoение сварного соединения.

Соединение, выполняемое сваркой плавлением, состоит из четырех зон (рис. 7.1): первая – металл шва; вторая – зона сплавления; третья – зона термического влияния; четвертая – основной металл. Основной металл – металл подвергающихся сварке соединяемых частей. Зона термического влияния – участок основного металла, не подвергшийся расплавлению, структура и свойства которого изменяются в результате нагрева и пластической деформации при сварке. Зона сплавления – металл, находящийся на границе основного металла и шва. Под металлом шва понимают сплав, образованный переплавленным основным и наплавленным металлами или только переплавленным основным металлом.

Зерна металла шва обычно имеют форму, удлиненную в направлении теплоотдачи. Зерна основного металла по форме отличаются от зерен металла шва тем, что они деформированы и вытянуты в направлении прокатки. Находящиеся в сварочной ванне примеси и загрязнения (окислы, шлаки и др.) имеют более низкую температуру затвердевания, чем металл; они расположены по границам зерен, ослабляя их сцепление между собой. Форма шва влияет на расположение неметаллических включений. В широких и неглубоких швах эти

включения вытесняются наверх и могут быть легко удалены; в узких и глубоких швах включения часто остаются между зернами.

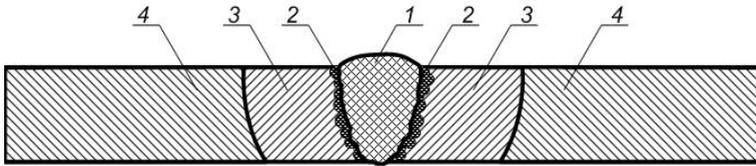


Рис. 7.1. Зоны сварного соединения: 1 – шов; 2 – зона сплавления; 3 – зона термического влияния; 4 – основной металл.

2. Влияние процесса сварки на механические свойства и структуру соединения.

В зоне термического влияния сварного соединения (для примера взята низкоуглеродистая сталь – холоднокатаная) различают следующие участки: неполного расплавления, перегрева, полной перекристаллизации или нормализации, неполной рекристаллизации, рекристаллизации и синеломкости (рис. 7.2).

Участок неполного расплавления 1 – переходный от наплавленного металла к металлу свариваемой детали. Ширина этого участка измеряется микронами, но его роль очень важна. Если между зёрнами имеется пленка окислов или осажденных газов, то в этом месте не произойдет прочной металлической связи и этим можно объяснить образование трещин в зоне сплавления.

Участок перегрева 2 находится в границах температур нагрева металла 1100 – 1450° С и характеризуется значительным ростом зерна. Перегрев снижает механические свойства стали, главным образом, пластичность и сопротивление ударным нагрузкам. Эти свойства тем ниже, чем крупнее зерна и шире участок перегрева. Перегретый металл является самым слабым местом в сварном соединении.

По мере удаления от шва температура металла понижается. В пределах температур 900 – 1100° С находится участок 3 полной перекристаллизации с мелкозернистой структурой. Мелкозернистая сталь обладает высокой прочностью и пластичностью, большей, чем основной металл.

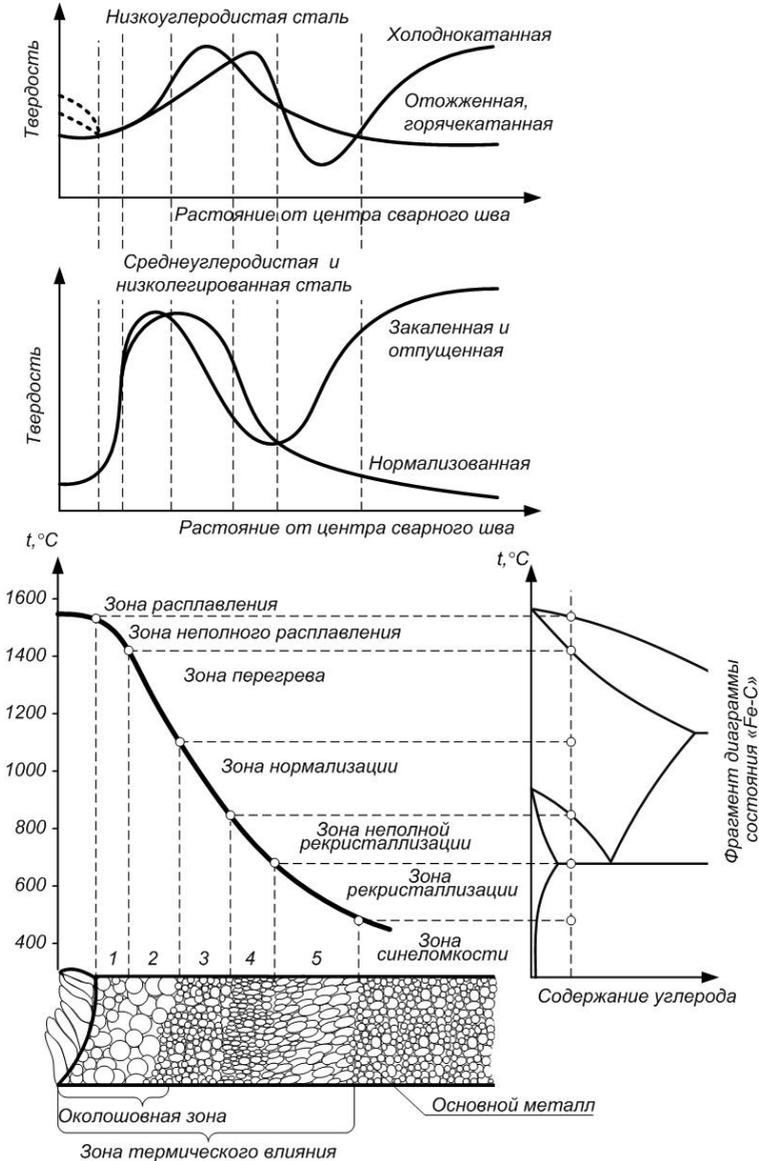


Рис. 7.2. Схема влияния процесса сварки на твердость и структуру зоны соединения в низкоуглеродистой стали: 1 – наплавленный металл; участок неполного расплавления; 2 – участок перегрева; 3 – участок нормализации; 4 – участок неполной рекристаллизации; 5 – участок рекристаллизации; 6 – участок синеломкости.

При температурах нагрева $720 - 900^{\circ} \text{C}$ происходит неполная перекристаллизация; наряду с крупными зернами в этом участке 4 остаются и более мелкие. По прочности металл этого участка занимает промежуточные положения между металлом на участке полной перекристаллизации и основным металлом.

Участок 5, нагретый от 450 до 720°C , называется участком рекристаллизации. В нем структура стали не изменяется, а происходит лишь восстановление исходной формы и размеров зерен, деформированных при холодной прокатке металла. Если до сварки основной металл не подвергался холодной пластической деформации, то процесс рекристаллизации происходить не будет.

На участке 6, нагретом ниже 450°C , структура стали не отличается от структуры основного металла. Однако сталь, нагретая от 100 до 450°C , обладает пониженными механическими свойствами, что объясняется выпадением из твердого раствора чрезвычайно мелких частиц различных примесей, располагающихся по границам зерен. Это явление называют синеломкостью (температура синих цветов побежалости). Кроме того, снижение пластичности происходит и под влиянием пластических деформаций сварки. Для низкоуглеродистых сталей это соответствует температурам нагрева свыше 100°C .

Ширина зоны термического влияния зависит прежде всего от энергии сварки. При ручной сварке она составляет $5 - 6$ мм; при автоматической под флюсом, в зависимости от толщины металла и режима – от $0,5$ до 10 мм; при газовой 25 мм.

Главное требование, которое предъявляется к сварке, - высокое качество соединений, т.е. достижение необходимых механических свойств шва и сварного соединения в целом при отсутствии в них дефектов.

На качество сварных соединений влияет большое число различных факторов, из которых наибольшее значение имеют следующие:

- свариваемость металлов и сплавов, т.е. свойство образовывать соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия;
- выбор технологий сварки, что, в свою очередь, зависит от подготовки изделий под сварку, состава и качества применяемых материалов и т.д.;
- исправность сварочного оборудования и квалификация сварщика.

Определяющим из вышеперечисленных факторов является свариваемость.

Свариваемость металлических материалов зависит от ряда факторов, которые в первую очередь связаны со свойствами материалов, т.е. с его химическим составом, механическими характеристиками, структурой, чувствительностью к поглощенным газам, склонностью к окислению, поведением при высоких температурах и быстром нагреве или охлаждении, способностью к превращениям (подкалка, дисперсионное твердение), с состоянием материала (отжиг, старение, холодная деформация).

Большое влияние на свариваемость металлов и сплавов оказывает их химический состав. Это особенно наглядно видно на примере низкоуглеродистых

сплавов. Углерод является наиболее важным элементом в составе стали, определяющим почти все основные свойства стали в процессе обработки, в том числе и свариваемость. Низкоуглеродистые стали ($C < 0,25\%$) и среднеуглеродистые стали ($C < 0,35\%$) свариваются хорошо. Стали с содержанием $C > 0,35\%$ свариваются хуже. С увеличением содержания углерода в стали свариваемость ухудшается. В околошовных зонах появляются закалочные структуры и трещины, а шов получается пористым. Поэтому для получения качественного сварного соединения возникает необходимость применять различные технологические приемы. Марганец не затрудняет сварку стали при содержании его $0,3 - 0,8\%$.

Однако при повышенном содержании марганца ($1,8 - 2,5\%$) прочность, твердость и закаливаемость стали возрастают, и это способствует образованию трещин.

Кремний содержится в обычной углеродистой стали в пределах $0,02 - 0,3\%$ и существенного влияния на свариваемость не оказывает. При повышенном содержании ($0,8 - 1,5\%$) кремний затрудняет сварку, так как придает стали жидкотекучесть и образует тугоплавкие оксиды и шлаки. Сера образует в металле сульфид железа, который имеет более низкую температуру плавления, чем сталь, и плохо растворяется в сварочной ванне. При кристаллизации частицы сульфида располагаются между кристаллами металла шва и способствуют образованию горячих трещин. Фосфор является также вредной примесью. Он ухудшает свариваемость стали, так как образует хрупкий фосфат железа, придающий стали хладноломкость. Содержание фосфора в свариваемой стали ограничивают до $0,05\%$.

В целом свариваемость стали принято оценивать по следующим показателям: склонности металла шва к образованию горячих и холодных трещин; склонности к изменению структуры в околошовной зоне и к образованию закалочных структур; физико-механическим свойствам сварного соединения; соответствием специальных свойств (жаропрочность, износостойкость и др.) сварного соединения техническим условиям.

Дефекты сварных соединений. Высокое качество сварных соединений обеспечивается прежде всего точным соблюдением установленного технологического процесса. Однако и в этом случае нет достаточной гарантии в отсутствии дефектов в сварном шве. Поэтому в изделиях ответственного назначения даже при применении самой совершенной технологии сварки необходимо контролировать дефекты сварных соединений.

Дефектами сварных соединений называют отклонения размеров, форм, состава, сплошности и свойств металла от требуемых. Они разделяются на внешние и внутренние. К внешним относятся: нарушение размеров и формы шва, непровар, подрез зоны сплавления, поверхностное окисление, прожог, наплыв, поверхностные поры, незаваренные кратеры и трещины продольные. К внутренним дефектам

относятся внутренние поры, неметаллические включения, непровар и микротрещины. Рассмотрим основные виды дефектов подробнее.

Непровар и несплавления (рис. 7.3, а) – местное несплавление свариваемых кромок основного и наплавленного металлов. В большинстве случаев непровары заполняются шлаком, который, имея более низкую температуру плавления, чем металл, затекает в образовавшиеся несплошности. Непровары являются следствием низкой квалификации сварщика, некачественной подготовки свариваемых кромок, смещения электрода и одной из кромок, быстрого перемещения электрода по

Подрез (рис. 7.3, б) – узкое углубление в основном металле вдоль края сварного шва. Подрезы являются серьезными дефектами шва, потому что они ослабляют сечение основного металла в наиболее опасной зоне – переходной. На вертикальной плоскости они возникают, главным образом, в результате стекания низкого металла под действием силы тяжести.

Основным фактором, влияющим на смачивание твердого металла жидким, является температура. А смачивание имеет непосредственное отношение к возникновению подрезов. Чем лучше твердый металл смачивается жидким, тем меньше возможность возникновения подрезов. Таким образом, для предотвращения подрезов при сварке нужно хорошо подогреть металлическое основание сварочной ванны и не допускать, чтобы скорость расплавления основного и присадочного металлов опережала скорость подогрева основного металла, контактирующего со сварочной ванной.

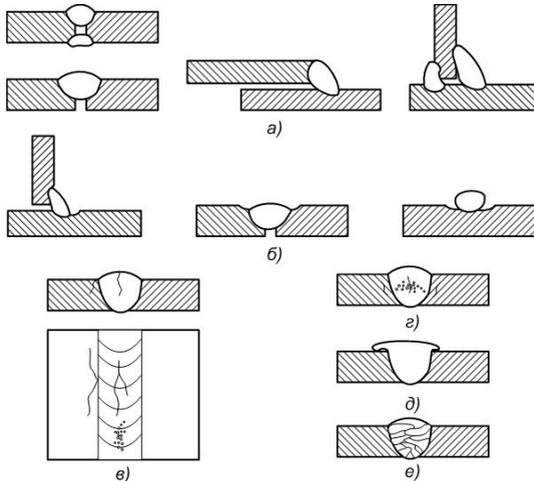


Рис. 7.3. Виды дефектов в сварных соединениях: а) непровар; б) подрезы; в) наружные трещины и поры; г) внутренние трещины и поры; д) наплыв; е) шлаковые включения.

Допустимая глубина подреза должна оговариваться в технических условиях и других документах. Например, при сварочных работах подрезы швов допускаются глубиной 0,5 мм; для неответственных конструкций – не более 10% толщины свариваемых элементов, но не глубже 1,5 мм.

Согласно ГОСТ 14892 – 69 для сварочных конструкций, работающих в районах с холодным климатом, допускаются подрезы вдоль направления усилий глубиной до 5% толщины металла для толщин до 20 мм и не более 1 мм при большей толщине.

Прожег – сквозное отверстие в сварном шве. Основными причинами прожога являются большой сварочный ток, завышенная мощность сварочной горелки, малая толщина основного металла.

Поры являются наиболее распространенным дефектом металла швов, выполненных на низколегированных и низкоуглеродистых сталях, а также на многих цветных металлах и сплавах (рис. 7.3, в, г). Они представляют собой пузырьки газа различных размеров (0,005 – 5 мм) и формы, не успевшие выделиться из жидкого металла. Поры, выходящие на поверхность шва, называют свищами. Они имеют округлую поверхность, поэтому менее опасны для работоспособности сварочных соединений, чем трещины. Основными газами, выделяющимися из жидкого металла в процессе сварки сталей, являются окись углерода, азот и водород. Связано это с проникновением в зону дуги воздуха и влаги. В период кипения металла, растворенные в нем газы и их соединения, эффективно удаляются в виде пузырей. Но одновременно идет и процесс насыщения жидкого металла газами. Если процесс дегазации металла в период кипения проходит недостаточно эффективно, то к началу кристаллизации, когда растворимость газа в металле резко снижается, они выделяются из раствора в виде отдельной газовой фазы, образуя пузыри. Если газовые пузыри не успели удалиться в атмосферу до начала кристаллизации или возникли в период активной кристаллизации, то они останутся в металле в виде газовых пор.

Неметаллические включения образуются при сварке малым сварочным током, применении некачественных электродов, сварочной проволоки, флюса, загрязненных кромок и плохой очистке шва от шлака при многослойной сварке. При неправильно выбранном режиме сварки шлаки и оксиды не успевают всплыть на поверхность сварочной ванны и остаются в металле шва.

Трещины наружные и внутренние (микротрещины) являются критическими, недопустимыми дефектами сварных соединений. Они образуются вследствие напряжений, возникающих в металле от его

неравномерного нагрева и охлаждения и усадки. Высокоуглеродистые и легированные стали при охлаждении после сварки закаляются, в результате чего также могут образовываться трещины. Причиной возникновения трещин служит также повышение содержания в стали вредных примесей (серы и фосфора).

Следует отметить, что такие дефекты, как шлаковые включения, несплавления, непровары и даже поры, являясь концентраторами напряжений, могут быть причинами зарождения трещин.

3. Методы контроля качества сварных швов.

Для получения качественных сварных соединений необходимо вести контроль за соблюдением технологических процессов до начала сварки, а также контроль качества шва и сварного соединения в целом после сварки.

До начала сварки следует проверить документацию (сертификаты) на основной металл и сварочные материалы (электроды, проволоку, флюсы и т.д.); состояние свариваемых металлов на наличие ржавчины, окалины и различных дефектов, а также сварочных материалов на влажность, загрязненность и пр.; качество подготовки и сборки металлов, прежде всего величину зазоров между свариваемыми элементами, правильность разделки кромки – углы скоса и притупления; исправность аппаратуры; правильность выбранной технологии на образце.

В процессе сварки контролируют правильность ведения процесса, а именно: постоянство режимов, стабильность горения дуги, отсутствие видимых дефектов (трещин, пор, подрезов и т.д.), получение сварного шва заданной геометрии.

При сварке ответственных изделий правильность выбора металлов, материалов, режимов и техники сварки проверяют по контрольным образцам, которые сваривают одновременно с изделиями. На контрольных образцах проверяют механические свойства сварного соединения и наплавленного металла, макро – и микроструктуру (металлографические исследования), наличие скрытых трещин и микротрещин, газовых пор, шлаковых включений, а также непровар, коррозионную стойкость металла шва и зон термического влияния согласно ГОСТам и техническим условиям.

Методы контроля качества швов сварных соединений устанавливает ГОСТ 3242 – 79, согласно которому для выявления наружных дефектов применяют такие виды контроля, как внешний осмотр и измерения, капиллярный, магнитный и некоторые другие.

Внутренние дефекты выявляют методами течеискания (вскрытие, технологическая проба), радиационными или акустическими (ультразвуковым).

Сквозные дефекты обнаруживают одним из методов контроля течеискания (радиационный, капиллярный, монометрический, пузырьковый и др.).

Указанные виды контроля качества сварки можно разделить на две основные группы: неразрушающие виды контроля и разрушающие виды контроля. Рассмотрим только некоторые из основных видов.

3.1. Неразрушающие методы контроля.

1. Контроль внешним осмотром и измерениями. Внешний осмотр сварных швов применяется во всех случаях, независимо от других методов контроля, после тщательной очистки сварного соединения от шлака, брызг и других загрязнений. При осмотре выявляют: непровар, наплывы, прожоги, незаваренные кратеры, подрезы, трещины в сварных швах и зоне термического влияния, пористость, смещение свариваемых элементов, правильность формы, размеров и расположения сварных швов, их соответствие чертежам, ГОСТам, нормам, техническим условиям на изготовление сварного изделия. Дефекты внутри труб выявляют с помощью эндоскопа (например, с помощью волоконной оптики).

Осмотр производят без применения лупы или с помощью лупы с увеличением до 10^x . Границы трещин выявляют после шлифовки дефектного участка наждачной бумагой и травления (методика подготовки контролируемого участка и реактивы травления приведены в лабораторной работе №1).

2. Капиллярный метод контроля. ГОСТ 3242 – 79 предусматривает выявление красками и люминофорами дефектов, имеющих размеры 0,002 – 0,5 мм при сварке сталей (аустенитного класса, нержавеющей), титана и его сплавов. В 1973 г. введен ГОСТ 18442 – 73 «Неразрушающий контроль. Капиллярные методы» для выявления невидимых или слабо видимых глазом дефектов, выходящих на поверхность материалов и изделий любой формы. По способу выявления и регистрации дефектов аппаратуру подразделяют на люминесцентную, цветную и комбинированную (люминесцентно-цветную и т.д.).

Капиллярный контроль (рис. 7.4) проводится следующим образом. Тщательно очищают поверхность 1 от загрязнения, обезжиривают ее и высушивают. Эти операции проводят для того, чтобы имеющиеся на

поверхности дефекты 2 были полностью освобождены от загрязнения и влаги (рис. 7.4, а). На изделие наносят слой вещества, обладающего высокой проникающей способностью (рис. 7.4, б). Это вещество – пенетрант 3 заполняет дефекты, находящиеся на поверхности. В дефект в виде поверхностной трещины, которая имеет ширину раскрытия, измеряемую единицами или десятками микрометров, благодаря капиллярному эффекту втягивается пенетрант и заполняет его. Затем пенетрант удаляют с поверхности различными очищающими составами или водой. Вещество, попавшее в трещину, остается в ней (рис. 7.4, в). Затем на поверхность изделия наносят специальное вещество – проявитель 4, при этом в результате взаимодействия проявителя с пенетрантом окрашиваются места над дефектом. Пенетрант при диффузии в проявляющее вещество вытягивается из трещины и расплывается в виде индикаторного пятна (рис. 7.4, г).

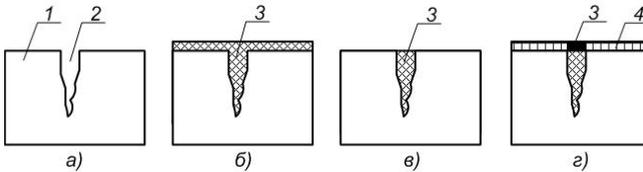


Рис. 7.4 Схема контроля капиллярным методом: а) поверхностная трещина после очистки; б) трещина после нанесения проникающего вещества; в) трещина после удаления проникающего вещества промывкой (узкие трещины едва заметны); г) выявление трещины после проявления; 1 – поверхность; 2 – дефекты; 3 – пенетрант; 4 – проявитель.

Капиллярные методы неразрушающего контроля наиболее просты, для их проведения не требуются большие затраты. Используемые материалы дешевы и доступны. Нет необходимости в операторах высокой квалификации. Однако методы имеют существенные недостатки, так как требуют, чтобы контролируемая поверхность имела шероховатость не ниже $R_z = 10$ мкм.

3. Магнитные методы контроля (ГОСТ 21104 – 75 и ГОСТ 21105 – 75) основаны на свойстве магнитных силовых линий изменять свое направление в местах дефектов металла (рис. 7.5).

Если магнитная проницаемость внезапно изменяется, например, в связи с наличием трещины, то в этом месте изменяется магнитное сопротивление и образуется магнитный поток рассеяния, который можно сделать видимым, например, с помощью взвеси металлических опилок в масле (см. рис. 7.5, а, б). При этом опилки стремятся перекрыть трещину и образуют над ней бугорок. При дефектных участках, расположенных под поверхностью, напряженность магнитного поля быстро уменьшается (см. рис. 7.5, б). Этим методом можно

обнаружить трещины, расположенные вблизи от поверхности. Существенно также направление магнитных силовых линий по отношению к трещинам. Отчетливо обнаруживаются дефекты, перпендикулярные магнитному потоку, и не выявляют дефекты, параллельные потоку. Существуют три магнитных метода контроля металла: магнитно-порошковый, магнитно-феррозондовый и магнитно-графический.

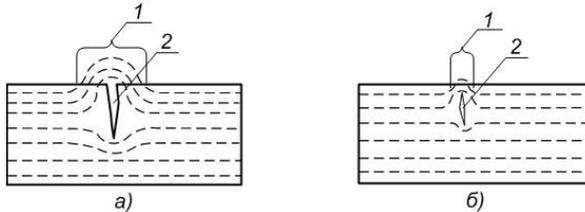


Рис. 7.5. Магнитный поток рассеяния 1 у поверхностной (а) и подповерхностной (б) трещины 2.

а) Магнитно-порошковый метод согласно ГОСТ 3242 – 79 применим только для стыковых сварных соединений. Размер выявляемого дефекта – не менее 0,10 мм. Метод заключается в том, что на поверхность контролируемого металла равномерным слоем наносят порошок (сухой метод) или эмульсию (мокрый метод), намагничивают металл и визуально фиксируют наличие дефектов. Порошок или эмульсия, попадая в магнитный поток рассеяния, вызванного дефектом, принимают форму дефекта. После контроля металл размагничивают. Дефекты фиксируются на глубину до 5 мм. Поверхность контролируемой детали должна быть тщательно очищена и обезжирена. Шероховатость должна быть не менее $R_z = 20$ мкм.

б) Магнитно-феррозондовый метод отличается тем, что магнитное расстояние фиксируется с помощью индукционной катушки – феррозонда и других устройств, реагирующих на изменение магнитного потока. Для контроля сварных соединений применяют магнитные дефектоскопы.

с) Метод вихревых токов. Контролируемый образец вносят в зону действия переменного магнитного поля, генерируемого с помощью испытательной катушки, через которую протекает переменный ток (рис. 7.6 и 7.7). В контролируемом образце индуцируются вихревые токи, вызывающие образование своего переменного магнитного поля, которое направлено противоположно полю катушки. Измеряется изменение первоначального магнитного поля, вызываемое магнитным полем образца. Контроль ведут следующим образом. Вначале устанавливают на ноль показание

измерительного инструмента на бездефектном материале. Затем перемещают катушку вдоль детали. При встрече с дефектным участком поле изменяется и стрелка отклоняется. Это фиксируется прибором. Применяют зондовые и проходные катушки (см. рис. 7.6, 7.7).

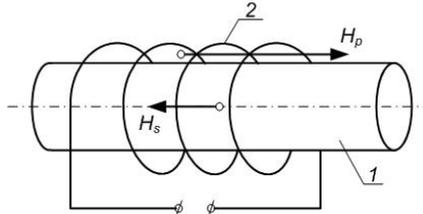


Рис. 7.6. Способ проходной катушки: 1 – образец; 2 – катушка; H_p – первичное поле катушки без образца; H_s – вторичное поле образца.

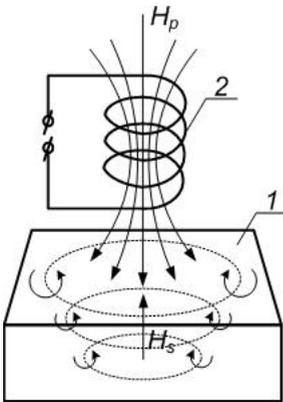


Рис. 7.7. Способ зондовой катушки: 1 – образец; 2 – катушка; H_p – первичное поле катушки без образца; H_s – вторичное поле образца.

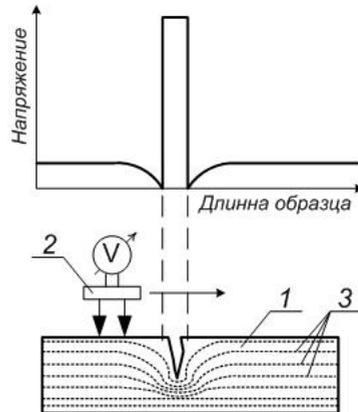


Рис. 7.8. Способ потенциального зонда: 1 – образец; 2 – потенциал-зонд; 3 – силовые линии тока

4. Контроль электрическими методами. Деталь обследуют потенциал-зондом (рис. 7.8). В области поверхностной трещины путь тока и сопротивление увеличиваются, в результате чего получается пик напряжения, который можно измерить чувствительный гальванометром. Высота пика напряжения зависит от глубины и геометрии трещины.

5. Радиационный контроль сварных соединений. Радиационные методы контроля сварных соединений основаны на регистрации излучения, прошедшего через контролируемый объект. Плотность материала в месте

дефекта в сварном соединении отличается от плотности прилегающего материала, в результате чего изменяются параметры проникающего излучения.

Широкое применение получил радиографический контроль. Источник излучения размещают вблизи контролируемой зоны объекта, а с противоположной стороны – рентгеновскую пленку (рис. 7.9). На объекте также устанавливают эталоны. Это может быть либо пластина с просверленными отверстиями различных диаметров, либо пластина с фрезерованными канавками различной глубины, либо набор проволок различных диаметров. Эталоны используют для оценки качества шва путем сравнения степени изменения фотографической пленки, вызванного дефектом и эталоном. После экспозиции пленки в поле прошедшего через контролируемый объект излучения ее обрабатывают для получения изображения и затем оценивают распределение плотности почернения.

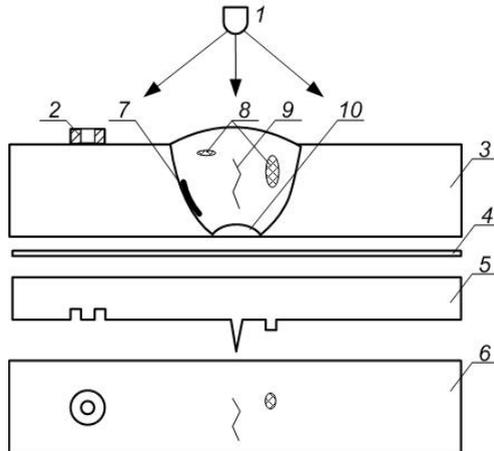


Рис 7.9. Схема радиографического контроля: 1 – источник излучения; 2 – эталон; 3 – объект контроля; 4 – пленка; 5 – распределение мощности дозы; 6 – детектор; 7 – несплавление; 8 – шлак; 9 – трещина вертикальная 10 - непровар.

Индикация несплошностей на рентгеновской пленке зависит от размеров дефекта (длины, ширины, протяженности вдоль направления просвечивания, ориентации), а также от материала, заполняющего несплошность (шлака, вольфрама или разряженного газа). Радиографическим методом достаточно легко выявляются объемные дефекты в виде пор, шлака и вольфрамовых включений.

Выявление плоскостных дефектов в виде трещин, несплавлений и непроваров зависит от их ориентации, а также от величины их раскрытия. Плоские дефекты хорошо видны на пленке только в том случае, если плоскость дефекта совпадает с направлением лучей источника. Однако для надежного обнаружения дефекта раскрытие его должно быть не менее 0,2 – 0,8 мм от толщин изделий 10 – 200 мм соответственно.

Достигнутая чувствительность радиографического метода (1 – 2% толщины стенки) в настоящее время удовлетворительна для большинства ответственных конструкций, но плоскостные, наиболее ответственные, дефекты, могут быть пропущены.

6. Акустический (ультразвуковой) метод контроля. Ультразвуковой метод дефектоскопии основан на принципе приема ультразвуковых импульсов, отраженных от дефекта внутри металла. Принцип действия импульсного ультразвукового дефектоскопа заключается в следующем.

На поверхности детали устанавливают пьезоэлектрический вибратор (щуп) с пластиной титаната бария (или кварца), электрически связанной с прибором (рис. 7.10). Пластина титаната бария (кварца) возбуждается электрическими импульсами высокой частоты на короткий промежуток времени (1 – 3 мкс). Вследствие явления обратного пьезоэффекта пластина титаната бария (кварца) излучает ультразвуковой импульс, который проходит в металл. Отраженный от дефекта и дна контролируемой детали ультразвуковой импульс частично возвращается в обратном направлении и попадает на пьезоэлектрический вибратор, который теперь служит приемником.

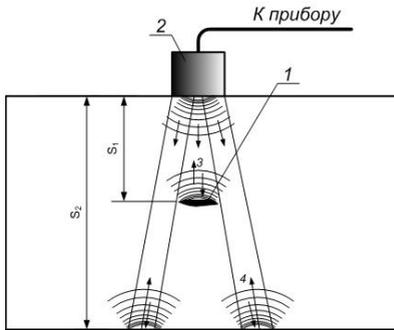


Рис. 7.10. Схема прохождения ультразвукового импульса: 1 – дефект; 2 – пьезоэлектрический вибратор; 3 – сигнал, отраженный от дефекта; 4 – сигнал, отраженный от дна.

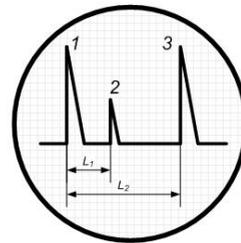


Рис. 7.11. Картина распределения импульсов на электронно-лучевой трубке при обнаружении дефекта: 1 – начальный импульс; 2 – импульс, отраженный от дефекта; 3 – импульс, отраженный от дна образца (донный импульс).

Вследствие явления прямого пьезоэффекта титаната бария (кварца) пластина преобразует ультразвуковые (механические) импульсы в электрические, которые усиливаются и регистрируются на экране индикатора – электронно-лучевой трубке (рис. 7.10). На экране возникает временная диаграмма, соответствующая распространению ультразвукового импульса в металле. Горизонтальная линия на экране индикатора представляет собой ось времени. Ее начало совпадает с временем посылки импульса в металл, а конец – с временем возвращения к вибратору ультразвукового импульса, отраженного от дна детали (образца), так как ультразвук распространяется в данном металле с постоянной скоростью:

$$v = \frac{S}{\tau},$$

где v - скорость звука;

S – расстояние;

τ – время.

Время распространения прямо пропорционально пройденному пути, т.е. длина горизонтальной оси времени на экране индикатора представляет масштабное изображение контролируемой длины. Время, необходимое для распространения ультразвукового импульса, отраженного от дефекта, будет меньше времени распространения импульса, отраженного от дна детали. Поэтому дефект, находящийся внутри металла и отразивший ультразвук, будет зарегистрирован на экране индикатора в виде четко выраженного всплеска импульса (см. рис. 7.11). Расстояние l_1 соответствует глубине залегания дефекта.

В практике ультразвуковой дефектоскопии принято использовать частоты 0,5 – 10 МГц. В сталях длины волн на этих частотах составляют 12 – 0,6 мм. Так как выявление дефектов с размерами, меньшими длины волн ультразвука, в материале затруднено, указанные значения дают ориентировочное представление о чувствительности контроля. Поэтому ограничивается возможность ультразвукового контроля литых материалов и крупнозернистых металлов.

3.2. Разрушающие методы контроля.

1. Металлографическое исследование сварных соединений. Металлографический анализ включает исследование макро- и микроструктуры сварного шва.

Образец для изучения микроструктуры вырезается поперек шва таким образом, чтобы он охватывал сварной шов, зону термического влияния и

неподверженный изменениям основной металл. Подготовка темплетов (шлифовка, глубокое травление) производится по обычной методике, изложенной в лабораторной работе №1. Изучение макроструктуры позволяет установить границу между основным и наплавленным металлом, а также зону термического влияния. Кроме того, при этом исследовании хорошо выявляются различные макродефекты: непровар, газовые пузыри, трещины и т.д.

При микроструктурном анализе образцы вырезаются из места сварки и после полировки для оценки загрязненности стали неметаллическими включениями исследуются под микроскопом при увеличении 100^{\times} . После травления шлифов обычными реактивами изучают микроструктуру при увеличении $200 - 500^{\times}$. Микроструктурное исследование позволяет установить структуру основного и наплавленного металла и, следовательно, оценить правильность режима сварки и качество сварного шва. Кроме того, выявляются микродефекты – неметаллические включения, поры, трещины и др.

Металлографический анализ связан с разрушением сварного шва и поэтому, как правило, проводится на пробных пластинах, сваренных по заданному режиму.

2. Определение механических свойств. Методы определения механических свойств сварного соединения в целом, отдельных его участков, а также направленного металла при всех видах сварки металлов и сплавов установлены ГОСТ 6996 – 66. Назначение этих методов испытаний состоит в определении механических свойств, которые используются для количественной и качественной оценки работоспособности сварных соединений с целью составления принятой технологии сварки тем требованиям, которые предъявлены к сварной конструкции.

В испытаниях на статическое растяжение применяют цилиндрические образцы, на которых определяют условный или действительный предел текучести B_t , временное сопротивление разрыву B_b , относительное удлинение после разрыва δ , относительное сужение после разрыва ψ . Образцы изготавливают из металла шва, участков околошовной зоны или наплавленного металла. Отбор образцов ведут либо непосредственно из конструкции, либо из специально сваренных соединений.

Для определения сопротивляемости металла разрушению при ударных нагрузках проводят испытания на ударный изгиб надрезанных образцов.

Измерение твердости металла позволяет косвенно судить о его механических свойствах и структурном состоянии, а также позволяет 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.

Испытание сварного соединения на статическое растяжение предназначено для определения прочности сварного соединения. Для определения прочности стыковых соединений используют плоские образцы, представленные на рис. 7.12.

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 зоны.

Временное сопротивление разрыву по формуле:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{KP}{F},$$

где K – поправочный коэффициент (для сталей $K = 0,9$);

F – площадь поперечного сечения до испытания;

P – внешняя нагрузка.

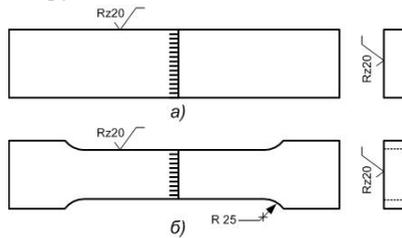


Рис. 7.12. Образцы для определения прочности стыкового соединения: а) без уширения образца в захватной части; б) с уширением образца.

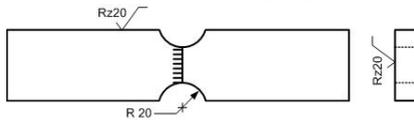


Рис. 7.13. Образец для определения временного сопротивления металла шва при испытаниях на статическое растяжение.

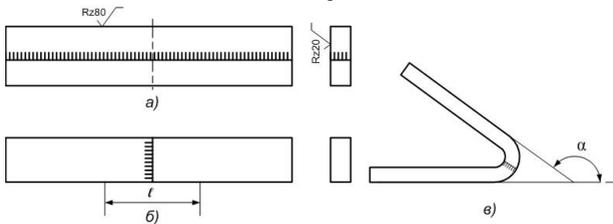


Рис. 7.14. Образцы для определения угла загиба: а) шов расположен вдоль образца; б) шов расположен поперек образца; в) вид образца после испытания.

Для определения пластичности металла стыковых сварных соединений проводят испытания образцов на статический изгиб. Образцы прямоугольной формы, вырезанные вдоль (рис. 7.14, а) или поперек (см. рис. 7.14, б) стыкового шва и механически обработанные со всех сторон, помещают на две опоры специального приспособления и производят изгиб образцов посередине пуансоном, имеющим радиус закругления, который соответствует конкретной толщине образца. Изгиб производят до появления трещины или надрывов длиной более 5 мм на растянутой стороне образца. Угол α (см. рис. 7.14, в) характеризует пластичность металла сварного соединения.

Методические указания по выполнению практической (лабораторной) работы

Для выполнения лабораторной работы студенты получают требования чертежа к сварному соединению, сварное соединение, эскиз сварного соединения с указанием мест вырезки из него образцов для определения твердости, исследования макро- и микроструктуры, результаты химического анализа основного и наплавленного металла.

На основании имеющихся результатов химического анализа металла сварного соединения, студенты устанавливают соответствие химического состава требованиям марки стали по ГОСТу.

Выявление наружных дефектов проводится на сварном соединении путем внешнего осмотра, а результаты наружного осмотра заносятся в отчет.

Выявление внутренних дефектов сварного соединения происходит путем анализа рентгенограммы, а обнаруженные дефекты прилагаются к отчету.

Исследование микроструктуры сварного соединения проводится на макрошлифах. В отчете приводится схематическое изображение микроструктуры соединения с указанием всех его зон и также выявленных макродефектов.

На специальных нетравленных микрошлифах студенты исследуют загрязненность стали сварного соединения, неметаллическими включениями под микроскопом МИМ – 7 при увеличении 100^x , после сравнения со стандартной шкалой, оценивают степень загрязненности стали отдельно по сульфидам и по оксидам в баллах.

После травления микрошлифа реактивом 3% HNO_3 в $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, определяют микроструктуру основного и наплавленного металла,

микродефекты сварного соединения, размер зерна в баллах с применением микроскопа МИМ – 7 при увеличении $100\times$.

Определение механических свойств сварного соединения проводится на специальных образцах, путем измерения твердости по сечению с интервалом 5 мм на приборе ТЭМП – 3 и строят график изменения твердости по сечению сварного соединения.

На основании результатов химического анализа, наружного осмотра сварного соединения, рентгеновской дефектоскопии, металлографического исследования сварного шва, механических испытаний сварного соединения дается общее заключение о качестве металла сварного шва и его соответствие требованиям чертежа на сварное соединение.

Контрольные вопросы

1. Что называется сваркой.
2. Назовите составные части сварного соединения.
3. Каковы предельные значения ЗТВ при ручной, автоматической под флюсом и газовой сварке.
4. Факторы, влияющие на качество сварных соединений.
5. Что такое свариваемость металлов и сплавов.
6. На какие группы делятся виды контроля качества сварных соединений.
7. Перечислите внешние и внутренние дефекты сварных соединений.
8. Перечислите методы контроля качества сварных соединений для выявления наружных и внутренних дефектов. В чем заключается их сущность.
9. Сущность макро- и микроструктурного исследования сварных соединений.
10. Какие механические свойства определяются при оценки качества сварных соединений.

Литература

1. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С., Крымов В.В. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебник для вузов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
2. Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М. и др. Материаловедение и технология материалов: учебник для студентов под ред. Г.П. Фетисова – 6-е изд. доп. –М.: Высшая школа, 2008.
3. Самойленко В.М. Зубов О.Е., Кочкин Д.Н. Технология материалов: учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2014.