

Министерство образования Российской Федерации

Томский государственный педагогический университет

Структура сварного шва

Методические указания для студентов очного
и заочного отделений специальности
«Технология и предпринимательство»

Томск 2003

ББК 30.4 я 73
С 87
УДК 621.002.3 (075.8)

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
Томского государственного
педагогического университета

С 87 Структура сварного шва: Методические указания по курсу «Материаловедение и технологии производства материалов» // Составитель: В.П. Ротштейн. Томск: Центр учебно-методической литературы Томского государственного педагогического университета, 2003. 12 с.

Методические указания соответствуют Государственному образовательному стандарту «Технология и предпринимательство» для специализаций 03.06.00 и 03.06.08.

Описаны условия формирования и микроструктура сварного шва при сварке плавлением. Изложены методические указания для выполнения лабораторной работы. Пособие предназначено для студентов очного и заочного отделений специальности «Технология и предпринимательство».

Илл. 3.

ББК 30.4 я 73
УДК 621.002.3 (075.8)

Рецензент: к.т.н., доцент. Филимонова Е.П.

© Томский государственный педагогический университет, 2003

1. Цель работы

Ознакомление с физическими основами сварки.

Изучение строения и микроструктуры сварного шва, формируемого при электродуговой сварке углеродистых сталей.

2. Общие сведения о сварке

Сваркой называется технологический процесс образования неразъемных соединений за счет сил взаимодействия атомов (молекул) контактирующих поверхностей сопрягаемых деталей. Прочные атомно-молекулярные связи между соединяемыми деталями возникают при их сближении на расстояния, близкие к межатомным. Подобное сближение атомов контактирующих поверхностей возможно при сообщении им дополнительной энергии (энергии активации) путем нагрева (термическая активация) или упругопластической деформации (механическая активация). В первом случае образование межатомных связей происходит в жидкой фазе, во втором – в твердом состоянии. В зависимости от этого все способы сварки подразделяют на два основных вида: сварка плавлением и сварка давлением (пластическим деформированием). Остальные методы являются их разновидностями или комбинацией.

При *сварке плавлением* формирование соединения (сварного шва) осуществляется за счет местного сплавления соединяемых деталей без приложения давления. Расплавляются либо кромки свариваемых деталей (основной металл), либо дополнительный, присадочный или электродный металл. После кристаллизации общей сварочной ванны образуется сварочный шов, имеющий литую структуру.

Расплавление основного и присадочного металлов может осуществляться за счет энергии: дугового разряда (*электродуговая сварка*); тепловой энергии, выделяемой током, проходящим через шлаковую ванну – флюс (*электрошлаковая сварка*); потока быстрых электронов (*электронно-лучевая сварка*); плазменного потока (*плазменная сварка*); мощного лазерного луча (*лазерная сварка*); экзотермических реакций горения газов (*газовая сварка*) или порошковой горючей смеси (*термитная сварка*). Сварка плавлением является основным видом сварки: на ее долю в настоящее время приходится около 70% всех сварочных работ.

При *сварке давлением* сближение атомов в контактирующих поверхностях происходит в результате упругопластической деформации слоев, в процессе которой в поверхностных слоях свариваемых изделий выравниваются микронеровности, разрушаются окисные пленки, осуществляется взаимодействие атомов с образованием металлической

связи. Сварка давлением может производиться без предварительного нагрева соединяемых изделий – механическая сварка (*сварка трением, холодная сварка, сварка взрывом, ультразвуковая сварка*) и с предварительным нагревом до пластического состояния или до оплавления – термомеханическая (*контактная, диффузная, газопрессовая*).

3. Электродуговая сварка. Условия формирования сварного шва

Дуговая сварка занимает доминирующее ($\geq 60\%$) положение в производстве сварных соединений. Сварочной дугой называется мощный электрический разряд между электродами, находящимися в атмосфере ионизированных газов и паров.

Дуговая сварка выполняется неплавящимся и плавящимся металлическими электродами. В первом случае дуга возбуждается между основным металлом и вольфрамовым (реже угольным) электродом. Для заполнения разделки кромок обычно применяется присадочный материал в виде металлического стержня, подаваемого сварщиком в дугу.

При ручной дуговой сварке плавящимся металлическим электродом (**рис. 1**) дуга горит между основным металлом и электродом, служащим присадочным материалом. В качестве электрода применяется стержень из проволоки, близкой по химическому составу к свариваемому материалу.

Для подавления окисления расплавленного металла на электроды наносят специальные покрытия, обеспечивающие: образование шлака или газа, защищающих зону сварки от воздействия воздуха; легирование металла шва полезными компонентами; улучшение стабильности горения дуги путем использования элементов с низким потенциалом ионизации (например, калия); раскисление наплавленного металла путем добавления в покрытие таких элементов, как Mn, Si, Al, Ti.

Процесс сварки металлическим электродом открытой дуги после возбуждения дугового разряда схематически показан на **рис. 1**. Сначала производят короткое замыкание электрода 7 на изделие 1, в результате чего в месте контакта происходит сильный нагрев конца электрода и соприкасающегося с ним участка изделия. Отвод электрода от изделия обрывает шейку контакта и вызывает эмиссию электронов с его торца. Взаимодействие электронов с молекулами газов приводит к ионизации последних, газ становится электропроводным, что приводит к зажиганию дугового разряда. Для надежного зажигания дуги электрод следует отводить от изделия на 3–5 мм.

В области столба электрической дуги температура достигает $\sim 6000^\circ\text{C}$. Электрод и кромки металла начинают плавиться, образуя

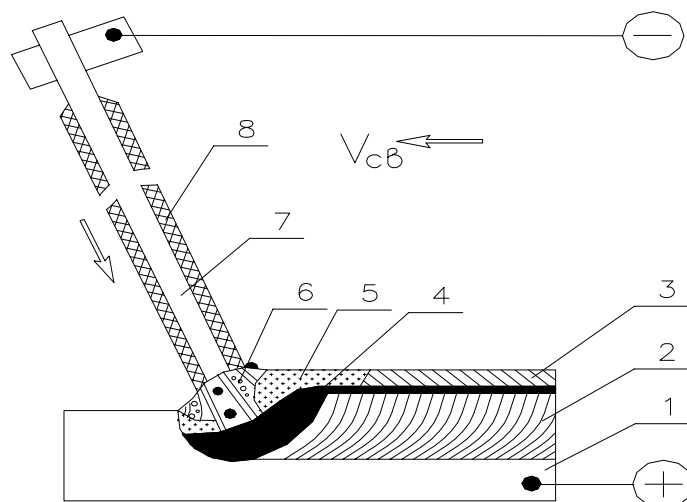


Рис. 1. Схема сварки металлическим электродом открытой дугой:
 1 – изделие, 2 – сварной шов, 3 – шлаковая корка, 4 – сварочная ванна, 5 – жидкий шлак, 6 – защитная атмосфера, 7 – электрод, 8 – обмазка электрода

сварочную ванну 4. Вместе со стержнем плавится и обмазка электрода 8, создавая газовую защитную атмосферу 6 вокруг дуги и жидкую ванну 5 на поверхности расплавленного металла. Удаление сварочной дуги приводит к остыванию и кристаллизации металла сварочной ванны 4; расплавленное покрытие всплывает на поверхность и, застывая, образует на поверхности шва шлаковую твердую корку 3.

4. Структура сварных соединений

4.1. Кристаллизация металла шва

При сварке плавлением кромки соединяемых элементов и дополнительный металл переходят в жидкое состояние. Если же дополнительный металл отсутствует, то плавится только основной металл. Плавление происходит в зоне сварки – плавильном пространстве. Расплавленные основной и дополнительные металлы, сливаясь, образуют общую сварочную ванну, находящуюся в состоянии непрерывного движения и перемешивания. Границами ванны служат оплавленные участки основного металла и ранее образовавшегося шва. В процессе сварки источник теплоты перемещается вдоль соединяемых кромок, а вместе с ним движутся плавильное пространство и сварочная ванна. При дуговой сварке плавильное пространство можно условно разделить на две области: головную, где горит дуга и происходит плавление основного и дополнительного металлов, и хвостовую, где располагается сварочная ванна и начинается ее кристаллизация (**рис.1**).

Как и при обычном затвердевании отливок, переход металла сварочной ванны из жидкого в твердое состояние называют первичной

кристаллизацией. Как и в случае кристаллизации слитка, характерным структурным элементом сварочных швов являются дендриты – древовидные кристаллы со стволами и ветвями. Рост кристаллов наиболее активно идет в направлении, перпендикулярном поверхности теплоотвода. Поэтому процесс первичной кристаллизации обычно заканчивается формированием столбчатых кристаллов.

Структуру шва, сформированную в результате первичной кристаллизации, называют первичной. При затвердевании металла в нем развиваются диффузионные процессы, стремящиеся выровнять химический состав различных участков образовавшихся кристаллитов. Однако из-за значительных скоростей остывания металла и медленного протекания процессов диффузии в твердых растворах не происходит полного выравнивания химического состава в металле шва. Это и определяет наличие в микроструктуре шва химических неоднородностей по отдельным зонам литого металла (зональная ликвация), оказывающей существенное влияние на его свойства.

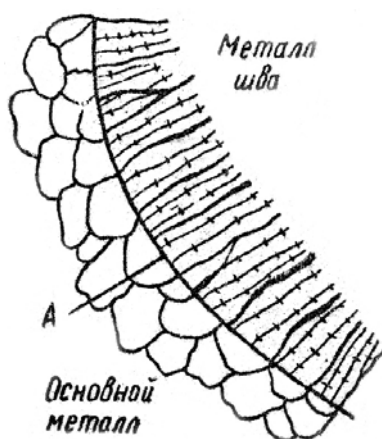


Рис. 2. Граница сплавления А

Первичная кристаллизация сварочной ванны начинается от частично оплавленных зерен основного металла или столбчатых кристаллитов (при многопроходной сварке), являющихся готовыми центрами кристаллизации. Условную поверхность раздела между зернами основного металла и кристаллитами шва называют *границей шва или границей сплавления* (рис. 2). Как отмечалось выше, микроструктура металла шва при сварке плавлением имеет столбчатое строение. Столбчатые кристаллы имеют сравнительно крупные размеры (0,3–3 мм) и легко различимы с помощью металлографии. При однослойной сварке и сравнительно малом времени существования сварочной ванны (малый объем ванны, повышенная скорость сварки) столбчатые кристаллы могут прорасти до встречи в области центральной линии шва, не изменяя своего направления.

При большой ванне и медленной ее кристаллизации в центральной части шва образуется небольшая зона равноосных кристаллов, возникших в условиях естественной кристаллизации.

При многопроходной (многослойной) сварке рост кристаллитов последующего слоя начинается, как отмечалось выше, от частично оплавленных кристаллитов предыдущего слоя. Направления кристаллитов отдельных слоев, как правило, не совпадают. При многослойной сварке скорость охлаждения каждого из слоев обычно больше скорости охлаждения ванны при однослойной сварке металла такой же толщины. Поэтому кристаллическое строение отдельных слоев в целом оказывается более мелким и плотным с менее выраженной ликвацией примесей по зонам.

Для металлов и сплавов, претерпевающих при охлаждении полиморфные превращения, первичная структура сохраняется до температуры полиморфного превращения. Для сплавов на основе железа полиморфное превращение проявляется в переходе $\alpha - Fe \rightarrow \gamma - Fe$. Переход металла шва в твердом состоянии из одного полиморфного состояния в другое называют вторичной кристаллизацией.

При вторичной кристаллизации зародыши новых зерен образуются на границах старых. Число этих зародышей и скорость их роста зависит от скорости нагрева и охлаждения, степени перегрева и переохлаждения. Это позволяет влиять на размеры зерен металла в сварном соединении.

Если металл после сварки подвергнуть вторичной кристаллизации, то нарушается неблагоприятное дендритное строение и возникает новая, более мелкозернистая структура.

4.2. Строение зоны термического влияния

Теплота, выделяемая сварочным источником нагрева, распространяется на прилегающие ко шву участки основного металла. При нагреве и последующем остывании в этих участках изменяется структура и свойства металла. Участок основного металла, подвергающийся в процессе сварки нагреву до температур, при которых происходят структурные изменения, называют *зоной термического влияния*. Наряду с тепловым воздействием основной металл околошовной зоны, как правило, подвергается также пластической деформации под действием термических напряжений, вызванных неравномерным нагревом.

Температура нагрева различных участков зоны термического влияния находится в пределах от температуры плавления (вблизи шва) до начальной температуры основного металла. Строение и размеры зоны термического влияния зависят от химического состава

и теплофизических характеристик свариваемого металла, а так же от температурного режима (термического цикла) сварки.

Рассмотрим строение зоны теплового влияния на примере малоуглеродистой стали (рис. 3). В соответствии с диаграммой состояния Fe-Fe₃C (рис. 3, справа), зона термического влияния состоит из шести характерных участков.

Первый участок (*участок неполного расплавления*) непосредственно примыкает к металлу шва (*наплавленному металлу*). Этот участок формируется из двухфазного (жидкость – твердое тело) состояния, и, подобно наплавленному металлу, имеет дендритное строение. Именно здесь и происходит сварка. Участок имеет небольшую ширину и по химическому составу и структуре отличается от соседнего участка 2 основного металла.

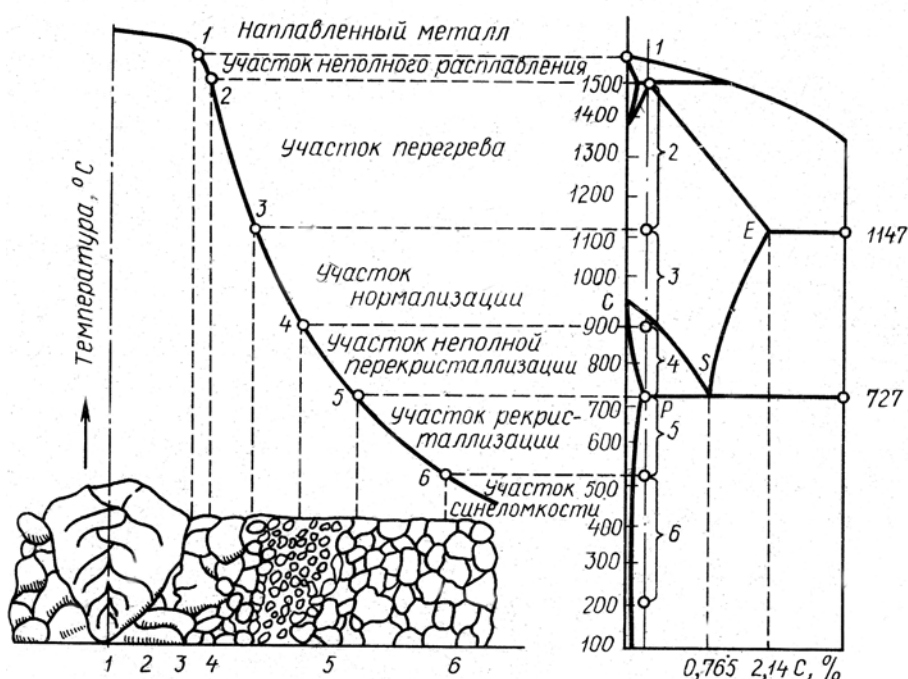


Рис. 3. Изменение микроструктуры металла в зоне термического влияния при сварке низкоуглеродистой стали

Совокупность первого участка околошовной зоны и пограничного участка металла шва называют *зоной сплавления или переходной зоной*. Свойства этой зоны в ряде случаев оказывают решающее влияние на работоспособность сварных конструкций, т.к. при динамических нагрузках здесь чаще всего образуются трещины.

Второй участок околошовной зоны, получивший название *участка перегрева 2* (участок крупного зерна), включает металл, нагретый от температуры ~ 1200°C до температуры плавления. Металл на этом

участке претерпевает полиморфное превращение $\alpha - Fe \rightarrow \gamma - Fe$. При значительном перегреве относительно точки A_{c3} происходит рост аустенитного зерна. Обычно металл на втором участке околошовной зоны обладает худшими свойствами, чем основной металл. Задача выбора рациональной технологии сварки сводится в первую очередь к обеспечению наименьшего ухудшения свойств металла на этом участке.

Третий участок околошовной зоны получил название **участка перекристаллизации (нормализации)**. Он включает металл, приобретший в процессе нагрева выше A_{c3} полностью аустенитную структуру, а при умеренном охлаждении мелкокристаллическое строение. Этот участок обладает хорошими механическими свойствами.

Четвертый участок околошовной зоны, получивший название **участка неполной перекристаллизации**, включает металл, нагретый от температуры, при которой начинается превращение $\alpha - Fe \rightarrow \gamma - Fe$ (727°C), до температуры $\sim 880^{\circ}\text{C}$ (между точками A_{c1} и A_{c3}). Металл на этом участке подвергается только частичной перекристаллизации. Поэтому здесь наряду с зернами основного металла, не изменившимися в процессе сварки (феррит), присутствуют зерна, образовавшиеся при перекристаллизации (перлит).

На пятом участке основной зоны, именуемом **участком рекристаллизации**, металл нагревается до 727°C . Здесь происходит перекристаллизация раздробленных при пластическом деформировании зерен основного металла и некоторое разупрочнение его по сравнению с исходным состоянием. Структура этой зоны мало отличается от структуры основного металла.

Кроме того, в зону термического влияния входит **участок синеломкости 6**. При температуре $200-500^{\circ}\text{C}$ происходит процесс старения – закрепление атомами внедрения дислокаций, вызывающих уменьшение их подвижности и повышение хрупкости.

В случае многопроходных швов околошовная зона располагается не только в основном металле, но и в металле шва. При этом ее строение в пределах шва значительно отличается от строения в основном металле. Как правило, в пределах первых трех участков наблюдается образование мелкозернистых структур, обладающих повышенной пластичностью. При этом зона крупного зерна отсутствует.

5. Оборудование, приборы, материалы

1. Набор образцов сварных соединений, изготовленных из углеродистых сталей (сталь 20, сталь 45).
2. Шлифовально-полировальный станок.
3. Набор шлифовальных бумаг.

4. Набор полировальных паст и эмульсий.
5. Реактив для травления углеродистых сталей (2–5% раствор HNO_3 в этиловом спирте).
6. Металлографический микроскоп МИМ-7.
7. Твердомер ТК-2.
8. Микроскоп ПМБ-2.

6. Порядок выполнения работы

1. Изготовить поперечные микрошлифы сварных соединений.
2. Осуществить травление микрошлифов.
3. Изучить макроструктуру сварного шва и зарисовать ее общее строение.
4. Изучить микроструктуру литого металла и зоны термического влияния, выявить и зарисовать ее характерные участки, определить примерные размеры этих участков.
5. Измерить твердость в литом металле и различных участках зоны термического влияния и построить зависимость твердости от расстояния до оси симметрии сварного шва.

7. Составление отчета

Отчет должен включать:

1. цель работы;
2. краткую классификацию видов и методов сварки;
3. схему сварки металлическим электродом открытой дуги (**рис. 1**) и описание процесса сварки;
4. описание кристаллического строения металла шва (**рис.2**);
5. анализ строения зоны термического влияния на основе диаграммы состояния $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ (**рис. 3**);
6. изображения (рисунки) структуры литого металла и различных участков зоны термического влияния, выявленных при травлении шлифа, с указанием их названий, структурных составляющих и характерных размеров;
7. зависимость твердости сварного соединения от расстояния до оси симметрии шва;
8. анализ данной зависимости на основе строения и условий формирования зоны термического влияния.

8. Контрольные вопросы

1. Привести классификацию видов и способов сварки.
2. Описать процесс сварки металлическим электродом открытой дуги.
3. Описать условия кристаллизации сварочной ванны и кристаллическое строение металла шва.
4. Пользуясь диаграммой состояния Fe – Fe₃C (**рис. 3**) объяснить строение зоны термического влияния в сварном соединении.
5. Объяснить влияние условий формирования зоны термического влияния на твердость различных участков этой зоны.

9. Литература

1. Алаи С.И., Григорьев П.М., Ростовцев А.Н. Технология конструкционных материалов. Под ред. Ростовцева А.Н. М.: Просвещение. 1986, 304 с.
2. Технология металлов и материаловедение. Кнорозов Б.В., Усова Л.Ф., Третьяков А.В. и др. Под ред. Усовой Л.Ф. М.: Металлургия. 1987, 800 с.
3. Материаловедение и технология металлов. Учебн. для студентов машиностроительных спец. вузов. Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. Под ред. Г.П. Фетисова. М.: Высш. шк., 2000, 638 с.
4. Материаловедение. Учебник для вузов. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. Под общей ред. Арзамасова Б.Н. 3-е изд., стереотип., М.: Изд-во МГПУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 648 с.

Владимир Петрович Ротштейн

Структура сварного шва

методические указания

Ответственный за выпуск: Л.В. Домбраускайте

Технический редактор: С.Н. Чуков

Сдано в печать 24.10.2003 г.

Подписано в печать 24.09.2003 г.

Тираж 100 экз.

Формат 60x84/16

Печать трафаретная

Бумага офсетная

Уч. изд. л. 0,45

Усл.-печ. л. 1,00

Центр учебно-методической литературы ТГПУ

Отпечатано в типографии ТГПУ,

г. Томск, ул. Герцена, 49. Тел. (3822) 52-12-93