

Министерство образования Российской Федерации

Томский государственный педагогический университет

Дефекты сварных соединений

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

Томск 2003

ББК 30.4 я 73
Д 39
УДК 621.002.3 (075.8)

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
Томского государственного
педагогического университета

Д 39 Дефекты сварных соединений: 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 типы дефектов сварных соединений, причины их возникновения, а также методы изучения этих дефектов с помощью макроанализа. 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

Изучение макростроения, химических и структурных неоднородностей сварных соединений методами макроанализа.

2. Общая характеристика и виды сварных соединений

Сварным соединением называется неразъемное соединение, выполненное сваркой. При сварке плавлением в сварном соединении (**рис. 1**) формируются различные участки, нагретые до различных температур, и отличающихся по этой причине физическими, химическими и механическими свойствами.

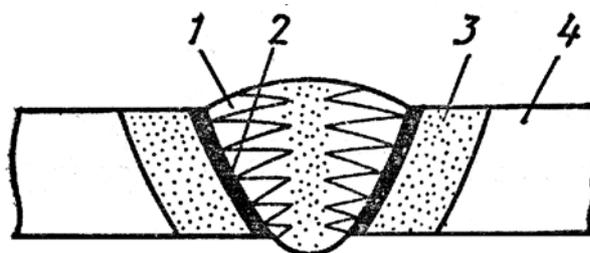


Рис. 1. Сварное соединение: 1 – сварной шов; 2 – зона сплавления; 3- зона термического влияния; 4- основной металл.

Расплавившийся и закристаллизовавшийся металл образует **сварной шов 1** с литой структурой; частично оплавившийся металл образует **зону сплавления 2**. Примыкающие к ней участки металла, нагретые до температуры выше $\sim 1000^{\circ}\text{C}$, в которых протекают структурные превращения и возникают остаточные напряжения, образуют **зону термического влияния 3**. Далее следует **основной металл 4**, структура и свойства которого в процессе сварки не изменяются.

Взаимное расположение соединяемых элементов определяет тип сварного соединения. При ручной дуговой сварке наиболее часто применяют следующие сварные соединения (**рис. 2**): **встык (а)**, **внахлестку (б)**, **тавровые (в)**, **угловые (г)** и **боковые (д)**.

Соединение **встык** предпочтительнее других в силу своей экономичности и лучшей работоспособности. При стыковом соединении свариваемые кромки предварительно обрабатывают. При сварке тонких изделий кромки загибают для усиления шва (**рис. 2, е, г**). При толщине металла до 8 мм сварку производят без разделки кромок при зазоре до 2 мм (**рис 2, ж**) Металл толщиной 8–15 мм сваривают с односторонней V-образной разделкой кромок (**рис 2, з**); толщиной 15–20 мм – с двусторонней X-образной разделкой кромок (**рис. 2, и**); толще 20 мм – с U-образной односторонней или двусторонней разделкой кромок.

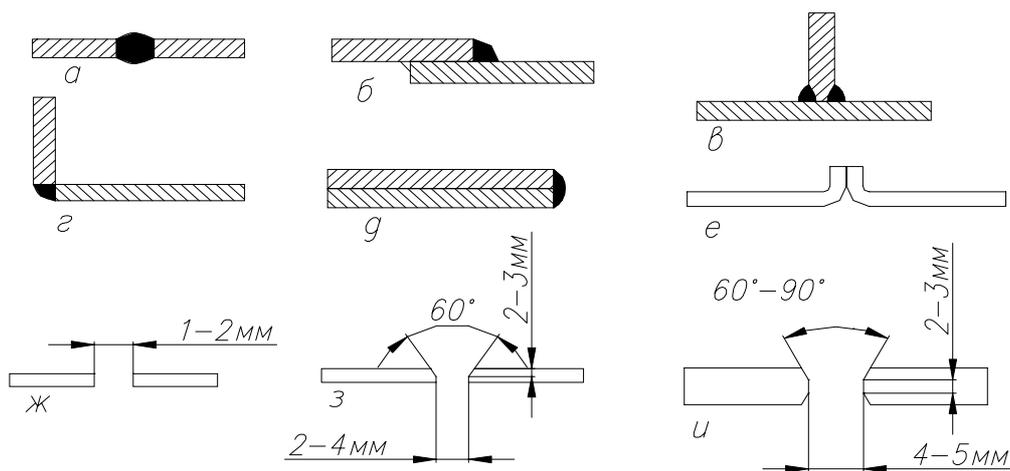


Рис. 2. Типы сварных соединений (а-д) и подготовка кромок шва (е-и):
а – встык; б- внахлестку; в – тавровые; г – угловые; д – боковые;
е, ж, з, и – подготовка кромок.

На процесс сварки и качество сварного шва сильно влияют загрязнения поверхности металлов оксидами, жировыми пленками и пр. Поэтому перед сваркой производят подготовку свариваемых поверхностей. Помимо устранения загрязнений поверхности металла принимаются меры для уменьшения загрязнений в процессе сварки, в первую очередь окислами. Для этой цели используют **флюсы, шлаки, вакуум, защитные газы**.

Сварное соединение должно быть таким же прочным, как и основной металл, и не уступать ему при всех видах нагрузок (статических, ударных, циклических). **Равнопрочность** сварного соединения определяется отсутствием внутренних и внешних дефектов, а так же структурой и свойствами металла шва и зоны термического влияния.

3. Дефекты сварных соединений

В процессе сварки в металле шва и в зоне термического влияния могут возникать различные **дефекты**, которые снижают прочность соединения, приводят к негерметичности швов и снижению эксплуатационной надежности изделия.

По расположению в сварном соединении **дефекты** делятся на **наружные и внутренние**. К **наружным** относятся **надрезы, наплывы, наружные трещины и газовые поры**. Эти дефекты, как правило, могут быть выявлены при наружном осмотре.

Подрез представляет собой углубление (канавку) на основном металле вдоль линии сплавления сварного шва с основным металлом (рис. 3, а). Обычно образование подреза связано с формированием большой сварочной ванны за счет большого сварочного тока.

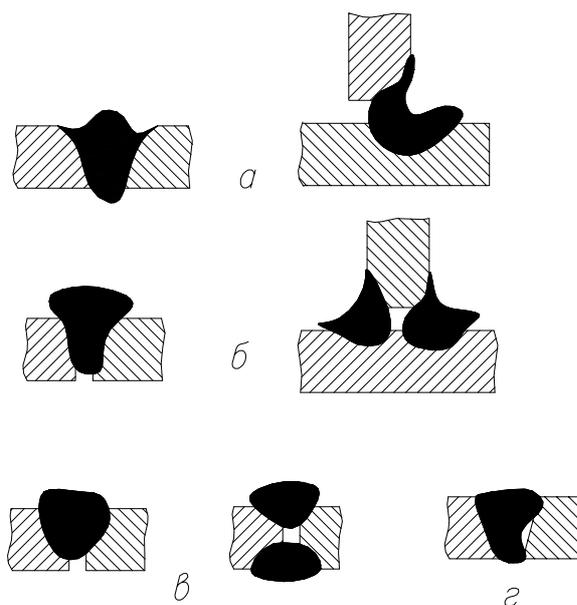


Рис. 3. Дефекты при сварке плавлением: а – подрез; б – наплыв; в – непровар по толщине; г – непровар по кромке шва.

Наплыв – это натекание металла шва на поверхность основного металла или ранее выполненного валика без сплавления с ним (**рис. 3, б**).

Непровар – местное несплавление вследствие неполного расплавления кромок свариваемых деталей (**рис. 3, в, г**). Место непровара в большинстве случаев заполнено шлаком, который, благодаря легкоплавкости и жидкотекучести, заполняет образующееся при непроваре полости.

При дуговой сварке образование непровара связано с недостаточным сварочным током.

Непровар является одним из наиболее опасных дефектов. Это связано с тем, что при нагружении непровар является концентратором напряжений. Напряжения, возникающие в этом месте, могут в несколько раз превышать средние напряжения в изделии. Это приводит к разрушению изделия при нагрузках, значительно меньших, чем расчетные.

Кроме того, непровар часто сопровождается появлением трудно-выявляемых трещин в металле шва. Непровары обязательно устраняют *подваркой* дефектных участков.

Трещины – частичное местное разрушение (разрыв) в сварном шве и/или в околошовной зоне. При сварке трещины могут образовываться в процессе кристаллизации (*горячие трещины*) и в процессе фазовых и структурных превращений в твердом состоянии (*холодные и другие виды трещин*).

Механизм образования *горячих трещин* заключается в следующем. Расплавленный металл шва после удаления источника нагрева начинает охлаждаться. При температуре ниже ликвидуса в расплаве начинают

появляться кристаллы. По мере дальнейшего охлаждения объем, занимаемый кристаллитами, увеличивается, а сами кристаллиты объединяются в каркас, разделенный жидкими прослойками. В таком состоянии циркуляция жидкости между кристаллитами затруднена. Это приводит к снижению деформационной способности системы и опасности ее хрупкого разрушения за счет усадочных кристаллизационных напряжений. Разрушению способствует образование на границах кристаллитов выделений (сегрегаций) легкоплавких фаз (сульфидов, фосфидов, оксидов), ослабляющих связи между растущими зернами. Склонность к образованию горячих трещин тем выше, чем шире температурный интервал кристаллизации и чем ниже металлургическое качество стали. Углерод расширяет интервал кристаллизации и усиливает склонность стали к образованию горячих трещин.

Холодные трещины образуются при охлаждении сварного шва ниже 200–300°C преимущественно **в зоне термического влияния**. Процесс их образования имеет, как правило, замедленный характер, что делает их особо опасными. Причиной образования холодных трещин являются внутренние напряжения, возникающие при структурных превращениях (особенно мартенситном) в результате местной закалки стали. В низкоуглеродистых сталях, где объемный эффект мартенситного превращения мал, холодные трещины встречаются редко. С ростом содержания углерода фазовые напряжения увеличиваются, что способствует появлению холодных трещин.

В углеродистых сталях холодные трещины являются наиболее распространенным дефектом. Для оценки склонности легированных сталей к образованию холодных трещин используют значение углеродного эквивалента

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2},$$

где символы легирующих элементов обозначают их массовые доли в данной марке стали, а числа – их коэффициенты активности.

Склонность к образованию горячих и холодных трещин определяет **свариваемость металла** – способность получения сварного соединения, равнопрочного с основным металлом. Углерод и все основные легирующие элементы отрицательно влияют на свариваемость.

Низкой склонностью к образованию холодных трещин (высокой свариваемостью) обладают стали, у которых $C_{\text{экв}} \leq 0,45\%$, т.е. содержащие до ~ 0,25% С. В эту группу входят углеродистые стали Ст1 – Ст4, 05, 08, 10, 15, 20, 25, а так же низколегированные стали 09Г2(Д), 14Г2, 17ГС и др., применяемые для изготовления различных металлоконструкций.

Поры – округлые или вытянутые полости, заполненные газом. Они могут быть микроскопическими и крупными (до 4–6 мм). Поры образуются в швах или на границе сплавления с основным металлом. Склонность к образованию пор зависит от концентрации газа в сварочной ванне, растворимости его в твердом или жидком металле при температуре кристаллизации, скорости кристаллизации металла, коэффициента диффузии газа в жидком и твердом металлах.

Газовыделение связано с химическими реакциями в расплавленном металле, например: $FeO + C \leftrightarrow Fe + CO\uparrow$. Из-за нерастворимости в железе CO в процессе реакции выделяется в виде пузырьков. Снижение растворимости газов по мере охлаждения сварочной ванны также является причиной образования пористости.

При сварке строительных сталей основная причина образования пор – плохое раскисление сварочной ванны.

Неметаллические включения – это дефекты в виде инородных частиц в металле шва. Различают **шлаковые, флюсовые, окисные** и другие неметаллические включения.

Шлаковые включения образуются в результате плохой очистки кромок свариваемых деталей, а так же недостаточно полного удаления шлака при многослойной сварке.

При сварке плавлением основной металл и электрод плавятся, образуя жидкую ванну. В результате жидкофазного перемешивания компонентов и последующей кристаллизации формируется литая структура шва, химический состав которой отличается от состава основного металла. Рассмотрим возможные виды химической неоднородности металла шва (**ликвации**). Как и при кристаллизации слитка в литейной форме, можно выделить три вида ликвации: **зональную, дендритную и гравитационную** (по плотности). **Зональная ликвация** может наблюдаться в объеме шва. По мере кристаллизации шва по направлению от границы сплавления к центру металл будет обогащаться различными примесями, поэтому химический состав литой структуры по сечению будет неодинаков. Например, при сварке стали в центральной части шва может увеличиваться концентрация углерода и вредных примесей – серы и фосфора. Помимо зональной ликвации в структуре шва может наблюдаться **дендритная ликвация** – неоднородность химического состава по сечению зерна (дендрита). Центр зерна будет обогащен более тугоплавкими элементами, а междендритное пространство, затвердевающее в последнюю очередь, будет содержать наибольшее количество легкоплавких примесей.

При сварке плавлением металлов, сильно отличающихся по плотности, возможна **гравитационная ликвация**. Верхняя часть шва будет обогащена более легкими компонентами, а нижняя более тяжелыми.

4. Изучение дефектов сварных соединений методами макроскопического анализа (макроанализа)

4.1. Общая характеристика макроанализа

Макроанализ состоит в определении макроструктуры металлов и сплавов невооруженным глазом или с помощью лупы при небольшом (20–30 раз) увеличении. В отличие от **микроанализа** макроанализ не позволяет исследовать микроструктуру металла. **Макроанализ** используется для контроля качества металлических деталей, изготовленных методами литья, обработки давлением, сварки, резания, термообработки. Макроанализ позволяет определить **вид излома (вязкий, хрупкий и др.)**; нарушения сплошности металла (**усадочную рыхлость, газовые пузыри, трещины** и др.); **дендритное и волокнистое строение; химические неоднородности** литого металла (**ликвацию серы, фосфора и других элементов**).

Для выполнения макроанализа из изучаемой части детали изготавливают образец, который подвергают шлифовке и травлению специальными реактивами. Такой образец называют **макрошлифом**. На шлифованной поверхности не должно быть загрязнений, следов масла и т.п.

Для **макроотравления** используют более сильные реактивы по сравнению с микроотравлением. Результаты макроанализа можно зафиксировать, сделав фотоснимок макроструктуры при увеличении от 0,5 до 20 раз.

4.2. Макроанализ сварных соединений

Макроанализ позволяет определить форму, размеры и дендритное строение сварного шва, наличие в шве и основном металле различных дефектов: непроваров, трещин, шлаковых включений, газовых пор, ликваций углерода и вредных примесей (P и S), усадочных рыхлостей.

Для выявления макростроения сварных соединений из низко- и среднеуглеродистых сталей чаще всего используют методы поверхностного травления (**реактив Гейна и метод Баумана**).

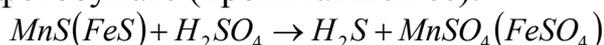
Реактив Гейна имеет следующий состав: 85 гр. хлорной меди CuCl_2 , 53 гр. хлорида аммония NH_4Cl на 1000 мл воды. Макрошлиф протирают спиртом и погружают шлифованной поверхностью на 30–60 секунд в реактив; при этом происходит обменная реакция, по которой железо вытесняет медь из водного раствора. Медь оседает на поверхности шлифа. На участках, в которых обменная реакция не развивается полностью, и поэтому недостаточно защищенных медью (поры, трещины, непровары, неметаллические включения), происходит травление. После травления макрошлиф вынимают из раствора, снимают ватой под струей воды слой меди и просушивают, обдувая грушей, чтобы предохранить шлиф от быстрого окисления на воздухе.

Данный метод выявляет поры в месте стыка в наплавленном металле, а также участки, обогащенные углеродом, серой и фосфором. Участки стали с различным содержанием этих элементов травятся неодинаково. В участках, обогащенных углеродом и фосфором, медь выделяется менее интенсивно и меньше защищает поверхность металла от травящего действия хлористых солей реактива. В результате эти участки окрашиваются в более темный цвет. Лучшие результаты дает макроанализ стали, содержащей до 0,6% С. В стали с большим содержанием углерода осадок меди плохо смывается с макрошлифа.

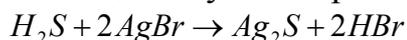
Реактив Гейна выявляет одновременно и ликвацию серы, поскольку характер распределения серы, фосфора и углерода в стали практически одинаков.

Для определения *ликвации серы* в сварном шве используют **метод фотоотпечатков (метод Баумана)**. Бромсеребряную фотобумагу на свету смачивают или выдерживают 5–10 минут в 5% водном растворе серной кислоты и слегка просушивают между листами фильтровальной бумаги для удаления излишнего раствора. После этого на приготовленный макрошлиф укладывают фотобумагу и осторожно, не допуская ее смещения, проглаживают резиновым валиком или рукой (в резиновой перчатке) для удаления оставшихся между бумагой и макрошлифом пузырьков воздуха (пузырьки оставляют белые пятна и маскируют результаты анализа). Фотобумагу выдерживают на макрошлифе 3–15 мин.

Сернистые включения (FeS , MnS), имеющиеся в наплавленном металле на его поверхности, реагируют с серной кислотой, оставшейся на фотобумаге (пропитавшей ее):



Образующийся сероводород непосредственно в очагах своего выделения воздействует на кристаллики бромистого серебра фотоэмульсии:



Темные участки сернистого серебра, образующиеся на фотобумаге, показывают форму и характер распределения сульфидов в сварном шве и зоне термического влияния. Снятую с макрошлифа фотобумагу промывают под струей воды, фиксируют 20–30 минут в растворе гипосульфита, затем промывают ≈ 10 минут в воде и просушивают. Если в сварном шве содержится повышенное количество фосфора, то в участках со значительной его ликвацией фосфор участвует в реакции с бромистым серебром и образует фосфиды серебра темного цвета.

5. Оборудование, материалы и инструменты

1. Макрошлифы сварного шва, приготовленные для макроанализа
2. Реактивы для поверхностного травления: реактив Гейна (85 г $\text{CuCl}_2 + 53$ г NH_4Cl на 1000мл воды); 5% раствор H_2SO_4 ; тиосульфат натрия (безводный гипосульфит), спирт.
3. Фотобумага бромсеребряная.
4. Лупы с увеличением $\times 4$; $\times 5$; $\times 10$. Микроскоп бинокулярный с увеличением от $\times 0,4$ до $\times 80$ с окулярами.
5. Фотоаппарат с фотопленкой; проявитель и закрепитель для фотосъемки.
6. Атлас макроструктур сварных швов.

6. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с общей характеристикой, видами и дефектами сварных соединений, а так же с методами их изучения с помощью макроанализа.
2. Приготовить макрошлифы сварных соединений.
3. Приготовить реактив для поверхностного травления макрошлифов (реактив Гейна).
4. Используя реактив Гейна, лупу или микроскоп изучить макроструктуру сварного соединения:
 - выявить и зарисовать макростроение сварного соединения с указанием примерных размеров и структуры зоны литого металла (дендриты) и зоны термического влияния;
 - указать на полученном изображении характерные дефекты (поры, непровары, трещины и др.) и определить площадь, занимаемую дефектами;
 - выявить и зарисовать ликвацию фосфора в сварном соединении.
5. Используя метод Баумана (метод фотоотпечатков), выявить и зарисовать ликвацию серы в сварном соединении.

ВНИМАНИЕ! При приготовлении 5% водного раствора H_2SO_4 необходимо соблюдать правила безопасности: нельзя вливать воду в серную кислоту, а нужно обязательно подливать понемногу кислоту в воду, перемешивая при этом жидкость, осторожно обращаться с раствором серной кислоты во избежание ожогов и повреждения одежды; работать только в закрытых очках.

6. Проанализировать результаты изучения макроструктуры и сделать выводы относительно качества сварного соединения.

7. Составление отчета

Отчет должен содержать:

1. Цель работы и описание основных видов дефектов сварных соединений при сварке плавлением
2. Методы приготовления макрошлифов и выявления макроструктуры сварных соединений
3. Изображения макроструктуры сварных соединений с указанием типов дефектов
4. Анализ полученных результатов и выводы относительно качества сварных соединений.

8. Контрольные вопросы

1. Общая характеристика сварных соединений
2. Основные виды дефектов сварных соединений и причины их возникновения
3. Методы изучения макростроения и дефектов сварных соединений с помощью макроанализа
4. Понятие ликвации, виды ликвации, методы определения ликвации фосфора и серы в сварных соединениях.

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.: Metallургия. 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.
5. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. М.: «Металлургия», 1983, 384 с.
6. Атлас макро- и микроструктур сварных соединений. Малевский Ю.Б. и др. Москва-Киев, 1961, 120 с.

Владимир Петрович Ротштейн

Дефекты сварных соединений

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