

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра технологии машиностроения

Составители
А. Н. Смирнов
Н. В. Абабков
Е. Е. Левашова
М. В. Пимонов

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Методические указания к лабораторным работам

Рекомендовано учебно-методическими комиссиями
направления подготовки 15.03.01 Машиностроение
в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2019

Рецензент

Клепцов А. А. – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения

Смирнов Александр Николаевич

Абабков Николай Викторович

Левашова Елена Евгеньевна

Пимонов Максим Владимирович

Контроль качества сварных соединений: методические указания к лабораторным работам [Электронный ресурс] для обучающихся направления подготовки 15.03.01 Машиностроение, профиль 01 Оборудование и технология сварочного производства, всех форм обучения / сост.: А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Е. Е. Левашова, М. В. Пимонов; КузГТУ. – Кемерово, 2019.

Методические указания предназначены обучающимся по направлению 15.03.01 Машиностроение, профиль 01 Оборудование и технология сварочного производства при изучении дисциплины «Контроль качества сварных соединений». В методических указаниях изложены лабораторные работы и форма контроля.

© КузГТУ, 2019

© Смирнов А. Н.

Абабков Н. В.,

Левашова Е. Е.,

Пимонов М. В.,

составление, 2019

Содержание лабораторных работ

Лабораторная работа №1

ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение основ кристаллизации металла при сварке.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Физико-химические процессы при сварке. Основными физико-химическими процессами, протекающими при сварке плавлением, являются: быстрое расплавление электродного (электродные стержни и проволока, присадочные проволоки) и части основного (части свариваемые детали) металлов, их взаимодействие с газами и шлаками, кристаллизация, неравномерный нагрев и охлаждение основного металла в околошовной зоне, возникновение напряжений в металле шва и околошовной зоне.

Нагрев металла и кристаллизация металла шва. При сварке плавлением электродный металл и некоторая часть основного подвергаются быстрому нагреву, при этом он расплавляется, перегревается в жидком состоянии, смешивается, охлаждается и кристаллизуется в металл шва.

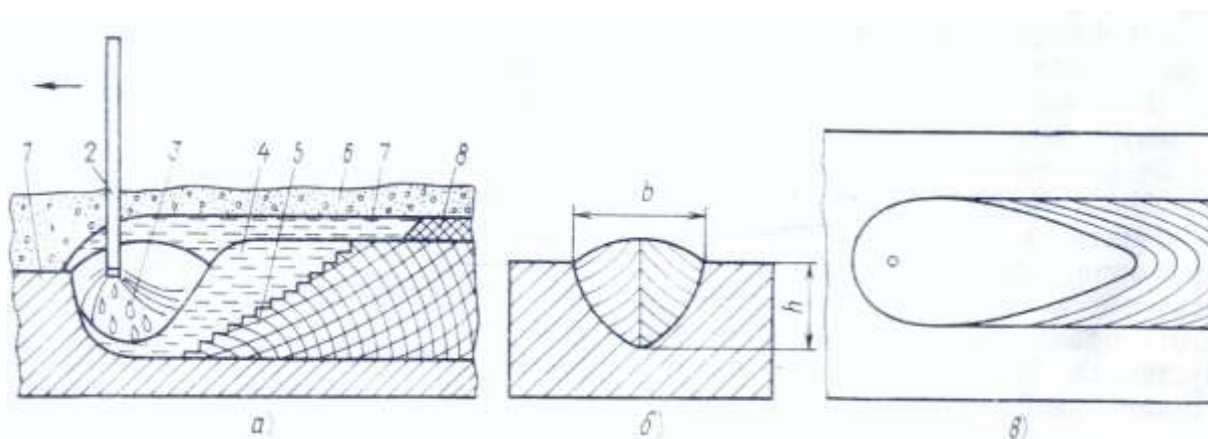


Рис. 1. Схема зоны сварки под флюсом: *а* – разрез вдоль оси шва; *б* – поперек шва; *в* – сверху после удаления флюса и шлака.

1 – основной металл, 2 – электродная проволока,
 3 – электродные капли, 4 – металл сварочной ванны,
 5 – металл шва, 6 – флюс, 7 – жидкий флюс (шлак),
 8 – твердый шлак, *b* – ширина шва, *h* – высота шва

Зону сварки эллипсообразного очертания, в котором металл находится в жидком состоянии называют сварочной ванной. В передней части сварочной ванны происходит плавление, а в задней – кристаллизация (рис. 1). Средняя температура сварочной ванны при дуговой сварке составляет 1600 – 1900 °С: наиболее низкая – для дуговой в защитных газах, наиболее высокая – для автоматической под флюсом. Температура в ванне под дугой достигает до 2300 °С, однако продолжительность пребывания ванны при этой температуре очень мала, поэтому полное растворение тугоплавких примесей не происходит.

Высокая температура жидкого металла обуславливает его интенсивное взаимодействие с присутствующими в зоне сварки шлаками и активными газами (O_2 , H_2 , N_2), что может способствовать ухудшению свойств металла шва и возникновению в нем дефектов (пор, свищей).

Попадание из металла, электродного покрытия, или флюса в ванну соединений таких элементов как W, Mo, V, Ti, Zr, Nb, B, использование в качестве раскислителей Al, Ti, Zr может способствовать сохранению в ванне к началу кристаллизации тугоплавких частиц.

Процесс перехода жидкого металла сварочной ванны в твердое состояние называют первичной кристаллизацией.

Кристаллизация происходит в интервале температур. Температура, при которой в жидком металле происходит образование первого кристалла называют температурой *ликвидуса*, при которой закристаллизовалась последняя частица жидкости – температура *солидуса*.

Основные особенности первичной кристаллизации: большая скорость и направленность роста кристаллов, обусловленная направленным подводом и отводом теплоты; наличие в сварочной ванне и по ее сторонам готовых центров кристаллизации, которыми являются зерна основного металла и различные тугоплавкие частицы.

Если мгновенно прекратить сварку и создать условия для предотвращения растекания головной части ванны, то характер кристаллизации можно представить так, как показано на рис. 2.

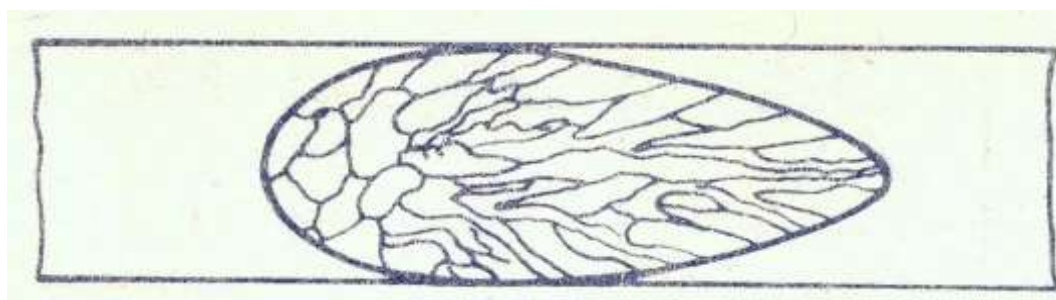


Рис. 2. Кристаллическое строение сварочной ванны при мгновенном прекращении сварки

Рост кристаллов начинается с закристаллизовавшейся поверхности металла шва. Кристаллы из хвостовой части вытягиваются вдоль шва, они имеют большую протяженность. Кристаллы с боковых поверхностей, растущие с кромок в задней части ванны, составляют с осью шва определенный угол.

При сварке кристаллы металла шва растут не монотонно, а с периодическими остановками, которые вызываются дискретным выделением скрытой теплоты плавления при кристаллизации каждого слоя металла. Толщина каждого слоя металла не превышает десятых долей миллиметра и находится в прямой зависимости от размеров сварочной ванны и в обратной зависимости от скорости теплоотвода. Фронт кристаллизации (граница между твердым и жидким металлом) имеет зубчатый контур, так как в

середине каждого кристалла затвердевает более чистый тугоплавкий металл, а на его границе более легкоплавкий (содержащий большое количество примесей). При таком прерывистом росте слоев кристаллизации сначала застывает наиболее чистый металл, а затем металл с большим содержанием примесей (рис. 3).

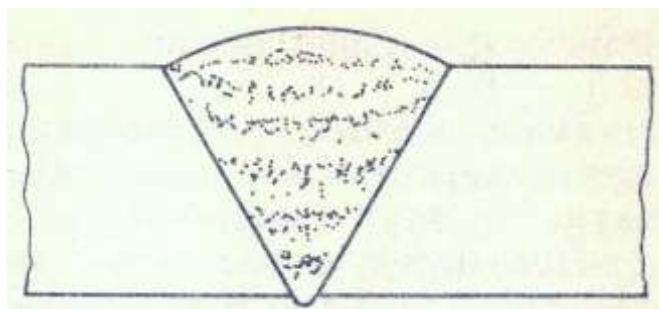


Рис. 3. Химическая неоднородность металла сварного соединения по слоям кристаллизации

Протекающая в закристаллизованном металле диффузия элементов не успевает в условиях сварки полностью выравнять химическую неоднородность металла. В зависимости от способа и режимов дуговой сварки поперечный размер столбчатых кристаллов может изменяться в пределах 0,3–3 мм. При электрошлаковой сварке, характеризующейся медленным охлаждением, поперечный размер кристаллов достигает 3–7 мм. Столбчатые кристаллы растут от основного металла практически перпендикулярно его поверхности, при росте они несколько изгибаются и встречаются в середине шва. При электрошлаковой сварке вследствие медленного охлаждения иногда в центре шва образуются не столбчатые, а равноосные кристаллы.

Аллотропические превращения при сварке. Нагрев металла или охлаждение в твердом состоянии может вызвать переход одного типа кристаллической решетки в другой в соответствии с минимумом свободной энергии. Такой переход называют *аллотропическим или полиморфным превращением*. После первичной кристаллизации из жидкого состояния вторичная кристаллизация (перекристаллизация) в твердом состоянии изменяет кристаллическое строение металла. Возникают и растут новые зерна. Появляются новые границы зерен. Характерной особенностью перекристаллизации является ее способность происходить

при различных (даже больших) степенях переохлаждения. Вторичная кристаллизация может иметь как диффузионный характер, так и бездиффузионный (большие степени переохлаждения).

Обычно тип решетки, соответствующий более низкой температуре обозначают α , а соответствующую более высокой – β, γ .

Процессы перекристаллизации оказывают значительное влияние на сварные соединения, а именно: 1) при охлаждении после сварки при вторичной перекристаллизации нарушается неблагоприятное строение вытянутых столбчатых кристаллов, возникает новая, мелкозернистая структура, часто из мелких равноосных зерен; 2) перегретые при сварке зоны основного металла (околошовные зоны) можно вновь сделать мелкозернистыми при выполнении дополнительного малого перенагрева выше температуры полиморфного превращения и с последующим охлаждением; 3) при сварке давлением после обеспечения необходимого контакта и создания активных центров при перекристаллизации в твердом состоянии, сопровождающейся образованием и ростом новых зерен, происходит их перераспределение через бывшую границу раздела и повышается качество и физико-механические характеристики сварного соединения; 4) диффузионные процессы ускоряются, и довольно значительно при некоторых видах полиморфных превращений.

Эффект улучшения свойств при полиморфных превращениях иногда используют подвергая сварные соединения при сварке давлением многократным циклическим нагревам и охлаждениям с переходом через температуру перекристаллизации.

Структурные и фазовые превращения в сталях при сварке. Прежде чем приступить к обсуждению вопросов, связанных со структурными и фазовыми превращениями при сварке необходимо четко представить какие материалы предстоит сваривать. Наиболее широко применяются в промышленности сплавы железа с углеродом и с добавками различных легирующих элементов. Эти сплавы называются сталями. В зависимости от содержания легирующих элементов стали имеют различные классы. Среди основных химических элементов, оказывающих определяющее влияние на процессы структурообразования явля-

ется углерод, поэтому сталь будем рассматривать, прежде всего, как сплав железа с углеродом. Диаграмма стабильного состояния системы Fe-C и соответствующее ей строение зоны термического влияния в сварном соединении показаны на рис. 4.

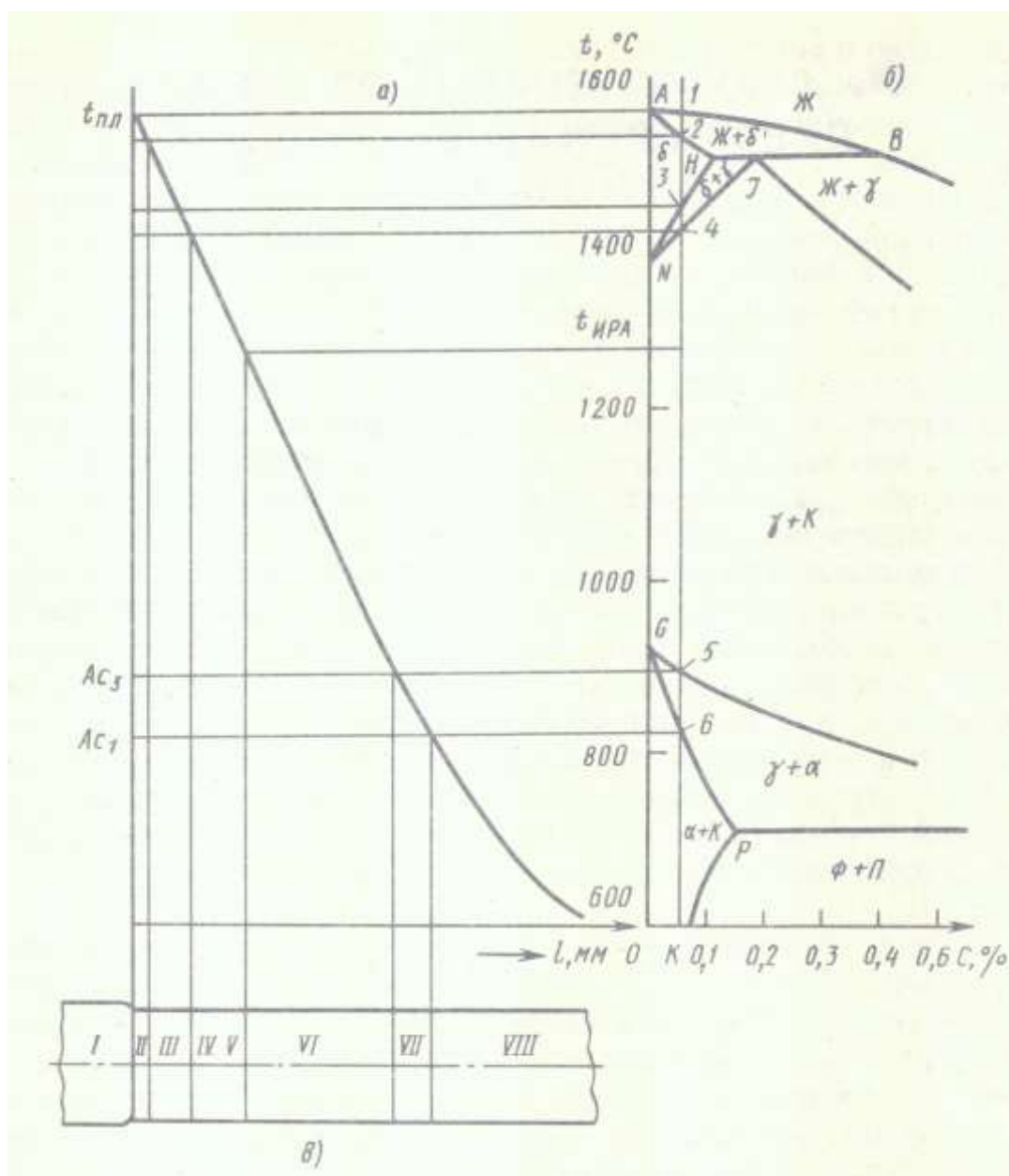


Рис. 4. Распределение максимальных температур (а), предопределяющих строение ЗТВ сварного соединения (в) в соответствии с диаграммой состояния Fe-C (б)

В системе сплавов железо – углерод существуют следующие фазы: жидкий раствор (Ж) углерода в железе; аустенит – твердый

раствор углерода в γ – Fe (A); феррит – твердый раствор углерода в α – Fe (Φ); цементит (C) – карбид железа (Fe_3C) и другие карбиды (K). В высокоуглеродистых сплавах (например, чугунах) может присутствовать графит (G). В высокотемпературной области присутствует δ – Fe. В сплавах железа с углеродом присутствуют механические смеси: перлит (эвтектоид) – механическая смесь феррита и цементита образуется при вторичной кристаллизации; ледобурит (эвтектика) – смесь аустенита и цементита образуется при первичной кристаллизации. Существует первичный цементит (C_1), выделяющийся из жидкого раствора при кристаллизации металла, цементит вторичный (C_{11}), выделяющийся из твердого раствора (A) и цементит третичный (C_{111}), образующийся при распаде феррита, пересыщенного углеродом.

Для примера рассмотрим процесс кристаллизации сплава (сварного соединения) концентрации K с содержанием углерода менее 0,1 %. Первичная кристаллизация (рис. 4, б) начинается в точке 1 с выделением δ – Fe. В интервале точек 2–3 существует только твердый раствор δ – Fe. Ниже точки 3 происходит превращение δ – Fe \rightarrow γ – Fe. В интервале точек 4–5 структура становится чисто аустенитной, в точке 5 начинается выделение из аустенита C_{11} и Φ , а также образование незначительной доли перлита (межкритический интервал), и в точке 6 аустенит полностью распадается. Ниже точки 6 микроструктура состоит из феррита и C_{111} .

Строение зоны термического влияния (ЗТВ). Вышеприведенные данные дают возможность схематически представить строение сварного соединения в соответствии с диаграммой состояния и максимальных температур, достигаемых в отдельных участках ЗТВ. При сварке плавлением основной металл, расположенный на границе с металлом шва нагревается до температуры плавления, а металл, отстоящий от металла шва на некотором расстоянии – до более низких температур. Зачастую химические составы основного металла и металла шва различны и поэтому в зоне сплавления фиксируется наибольший градиент изменения содержания легирующих элементов и примесей.

Ширина ЗТВ зависит от способа и режимов сварки. Наименьшая зона (1–3 мм) при лазерной и электроннолучевой сварке и наибольшая (до 30 мм и более) при электрошлаковой. Протяженность отдельных участков возрастает с уменьшением градиента распределения максимальных температур нагрева.

Зависит она, прежде всего, от содержания углерода, а также других химических элементов в стали. Процессы, протекающие в основном металле под влиянием термического цикла сварки, определяются составом металла, температурой его нагрева и временем нахождения при этой температуре.

Участок I – металл шва, **II, III, IV** – **участки**, прилегающие к линии сплавления. Они, в частности, образуются в сварных соединениях низкоуглеродистых сталей, претерпевающих перитектическую реакцию. В этих участках ЗТВ зачастую происходит образование высокотемпературной химической микронеоднородности, наличие которой, может привести к снижению технологических и служебных свойств сварных соединений. В металле шва и в зоне сплавления возникают границы зерен двух типов – первичные и вторичные. Считается, что первичные границы образуются в ЗТВ у линии сплавления вследствие образования и кристаллизации жидкой фазы. При высокотемпературном нагреве подплавляются отдельные участки структуры основного металла, в первую очередь границы зерен аустенита, участки сегрегаций легирующих элементов, неметаллические включения. Фактором, способствующим образованию химической микронеоднородности является $\gamma \rightarrow \delta$ процесс при нагреве до температуры 1400 °С. При охлаждении расплавленные участки ЗТВ кристаллизуются и образуют первичные и вторичные границы (при дальнейшем снижении температуры).

При увеличении скорости охлаждения после высокотемпературного $\gamma \rightarrow \delta$ – превращении можно значительно уменьшить размер зерна аустенита в результате полиморфного превращения при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей, кристаллизующихся из расплава с образованием δ – феррита.

Наличие крупнозернистой структуры в результате перегрева аустенитных зерен (особенно при сварке с термическими циклами) является характерным признаком **V участка**. В низкоуглеро-

дистых и низколегированных сталях при замедленном дальнейшем охлаждении образуется феррито-перлитная структура видманштеттового типа. Максимальные температуры нагрева на этом участке превышают $t_{ИРА}$ – *температуру начала интенсивного роста зерна аустенита*.

Участок VI – участок нормализации с температурой нагрева в пределах $t_{ИРА} - A_{C_3}$. Характерным признаком этого участка является мелкозернистая структура с повышенной неоднородностью распределения углерода и легирующих элементов.

Участок VII – участок неполной перекристаллизации с температурой нагрева в интервале $A_{C_3} - A_{C_1}$. Здесь металл имеет аустенитно-перлитную структуру с присутствием мелкодисперсных карбидов. В периферийных зонах во вновь образовавшихся аустенитных зернах обнаружено их обогащение марганцем. Образование этих зон снижает термодинамическую активность углерода в аустените при сохранении относительно низкоуглеродистой сердцевины. Отсюда при относительно умеренных скоростях охлаждения из межкритического интервала температур более углеродистая часть γ – фазы превращается по мартенситному механизму, а менее углеродистая – по диффузионному.

Участок VIII – участок отпуска, металл здесь нагревается до температур $A_{C_1} \approx 600$ °С, при этих температурах наиболее активно происходят процессы дифференциации цементита и коалесценция карбидов.

Однако в низколегированных сталях, содержащих повышенное содержание растворенного кислорода, а особенно азота, при температурах около 300 °С может снижаться ударная вязкость. При многопроходной сварке влияние последовательных термических циклов сварки на структуру и свойства металла в околошовной зоне будет более сложным.

В ЗТВ сварных соединений образуются и другие участки с максимальной температурой менее 600 °С, при которых в сталях в различной степени могут развиваться процессы отпускной хрупкости и дисперсионного упрочнения. Однако следует отметить, что во всех участках ЗТВ процессы структурно-фазовых превращений, состав, характеристики конечной структуры, а сле-

довательно, и механические характеристики сварных соединений в значительной степени зависят от параметров термических циклов сварки и термической обработки, химического состава и исходной структуры сталей.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, уясняются вопросы кристаллизации сварных соединений.

На втором этапе студент самостоятельно составляет отчет, в котором освещает определенный раздел настоящих методических указаний.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по практическому занятию оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

1. Название и цель занятия.
2. Изложение заданного студенту раздела настоящих методических указаний.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие физико-химические процессы происходят при сварке.
2. Какую зону сварки называют сварочной ванной.
3. Почему в сварочной ванне сохраняются тугоплавкие частицы.
4. Что такое первичная и вторичная кристаллизация.
5. Какие температуры называют температурами ликвидуса и солидуса.
6. Почему в закристаллизованном металле диффузия элементов не успевает в условиях сварки полностью выравнять химическую неоднородность металла.
7. Какие превращения называют полиморфными.
8. Какое влияние оказывают процессы перекристаллизации на сварные соединения.

9. Какие фазы существуют в системе железо-углерод.
10. Опишите характер изменения микроструктуры сплава *K* при охлаждении.
11. От каких факторов зависит ширина ЗТВ.
12. Укажите причины образования микроструктуры вид-манштеттового типа.
13. Опишите строение ЗТВ.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новожилов Н. М. Основы металлургии дуговой сварки в газах. – Москва: Машиностроение, 1979. – 231с.
2. Лифшиц Л. С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л. С. Лифшиц, А. Н. Хакимов. – Москва: Машиностроение, 1989. – 331 с.
3. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке. – Москва: Металлургия, 1976. – 698 с.
4. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. – Москва: Металлургия, 1962. – 435 с.
5. Технология электрической сварки металлов и сплавов сплавление / под ред. Б. Е. Патона. – Москва: Машиностроение, 1974. – 788 с.

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРВИЧНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ШВА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить процесс кристаллизации на модельных сплавах, ознакомиться с основными закономерностями формирования первичной структуры наплавленного металла шва.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Процесс образования кристаллической фазы из жидкости называется первичной кристаллизацией. Теория кристаллизации литого металла основана на зародышевом механизме, согласно которому для затвердения необходимо образование центров кристаллизации и их последующий рост за счет остаточной жидкости, с которой контактирует зародыш. Для зарождения центров кристаллизации и их последующего роста необходимо, чтобы процесс перехода из жидкого в твердое состояние сопровождался уменьшением свободной энергии системы.

Схематически характер изменения свободной энергии жидкого и твердого состояния в зависимости от температуры системы показан на рис. 2.1. Как видно, выше температуры T_0 металл будет находиться в жидком состоянии, т. к. при этих температурах расплав обладает меньшей свободной энергией по сравнению с твердой фазой. Ниже температуры равновесия система будет находиться в твердом состоянии. При T_0 процесс кристаллизации, равно как и плавления, не протекает, т. к. свободные энергии жидкого и твердого металла равны. Переход из жидкого в твердое состояние начнется лишь тогда, когда сплав будет переохлажден ниже температуры равновесного состояния T_0 и будет достигнуто некоторое переохлаждение Δt (рис. 2.2).

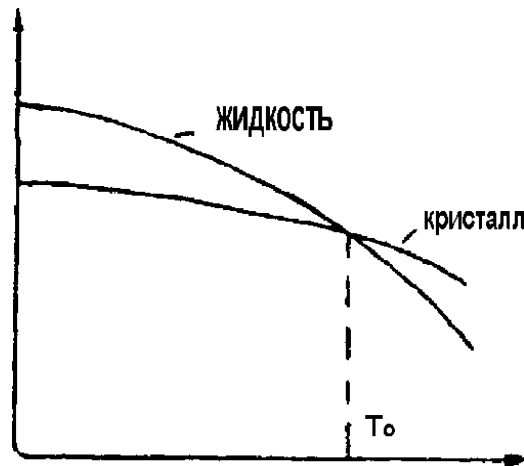


Рис. 2.1. Изменение свободной энергии жидкого и кристаллического состояния в зависимости от температуры

Процесс перехода из жидкого состояния в кристаллическое можно изобразить кривыми в координатах время–температура (рис. 2.2). Охлаждение металла в жидком состоянии сопровождается плавным понижением температуры и может быть названо простым охлаждением, т. к. при этом нет качественного изменения состояния. При достижении температуры кристаллизации на кривой температура–время появляется горизонтальная площадка, т. к. отвод тепла в окружающее пространство компенсируется выделяющейся при кристаллизации скрытой теплотой кристаллизации. По окончании перехода металла в твердое состояние температура снова начинает снижаться и твердое кристаллическое вещество охлаждается.

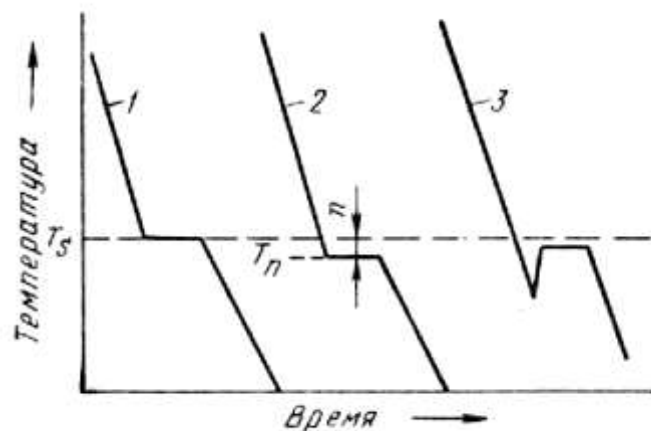


Рис. 2.2. Кривые охлаждения при кристаллизации:
1 – теоретическая; 2 – фактическая

Процесс образования кристаллов путем зарождения центров кристаллизации и их роста можно проследить на модели, представленной на рис. 2.3. Предположим, что на площади, изображенной на рисунке, за секунду образовалось пять зародышей, которые растут с определенной скоростью. К концу они выросли и одновременно с их ростом возникло еще пять зародышей будущих кристаллов. Так в результате образования зародышей и их роста происходит процесс кристаллизации, который, как показано на данной схеме, заканчивается на седьмой секунде. Как видно, пока растущий кристалл окружен жидкостью, он часто имеет правильную форму, но при столкновении и срастании кристаллов их правильная форма нарушается.

В реальных условиях кристаллы из жидкости растут перпендикулярно к поверхности охлаждения в направлении, обратном отводу тепла. Однако, если на боковой поверхности растущего кристалла возникает бугорок, то кристалл приобретает способность расти и в боковом направлении. В результате образуется древовидный кристалл, получивший название дендрит. Следовательно, после первичной кристаллизации литые металлы (в том числе и сварной шов из наплавленного металла) имеют дендритную структуру.

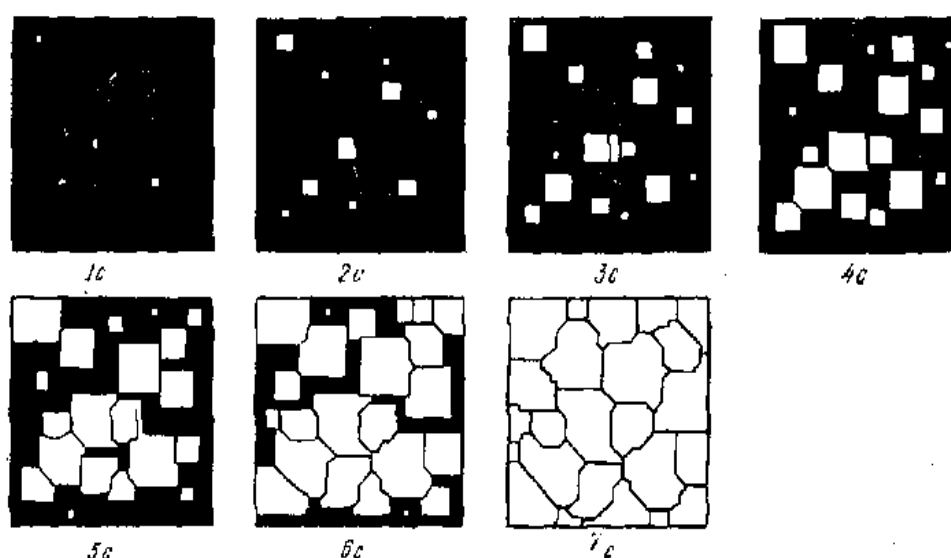


Рис. 2.3. Модель процесса кристаллизации

При сварке плавлением металл в месте нагрева доводится до жидкого состояния энергией, выделяемой дугowym зарядом.

Расплавленный основной и электродный металл сливается в общую сварочную ванну, которая под действием дугового давления находится в состоянии непрерывного движения и перемещения. В головной части ванны, непосредственно в зоне дуги, металл находится в перегретом состоянии, в хвостовой – температура ванны приближается к температуре плавления основного металла. По мере продвижения дуги расплавленный металл, вследствие отвода тепла в холодный основной металл и окружающее пространство, кристаллизуется с образованием по границам сплавления общих кристаллов (рис. 2.4). После полного затвердевания обеспечивается прочное соединение основного металла со швом.

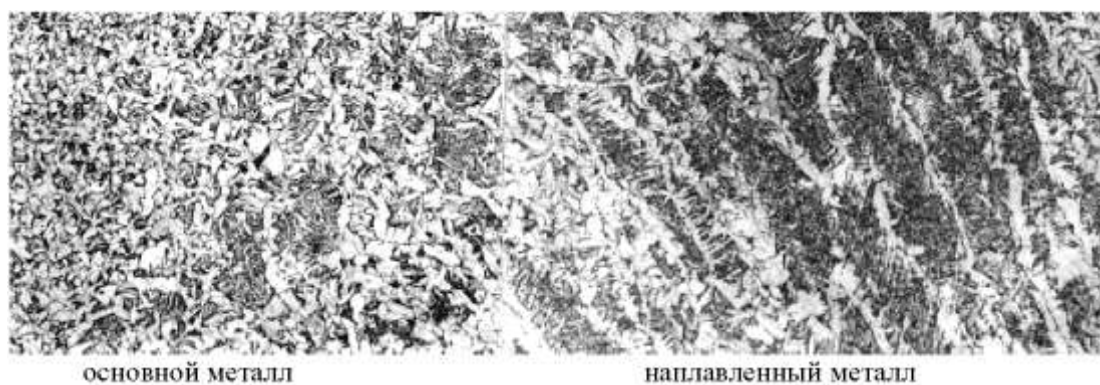


Рис. 2.4 Микроструктура металла шва стали 10ХСНДА.
Кристаллы основного металла явились
центрами кристаллизации расплава $\times 300$

Первичная кристаллизация сварочной ванны начинается от готовых центров кристаллизации, представляющих собой частично оплавленные зерна основного металла на границе расплавления, рис. 2.4. Дендриты растут перпендикулярно к плоскости раздела металла сварочной ванны и основного металла. Некоторые кристаллы, для которых оказались наиболее благоприятные условия кристаллизации, развиваются быстрее и полнее и ограничивают возможность роста соседних. Процесс кристаллизации заканчивается образованием столбчатых кристаллов. Каждый столбчатый кристалл представляет собой один или несколько дендритов. Их размеры определяются условием сварки и изменяются в достаточно широких пределах, достигая при сварке под слоем флюса нескольких мм.

При сварке металлов больших сечений, например, сварке под слоем флюса, формируется ванна жидкого металла достаточно большого объема. В этом случае в центральной части шва образуется зона равновесных кристаллов, возникающих в условиях естественной кристаллизации (рис. 2.5). При многослойной сварке кристаллы каждого предыдущего слоя становятся основой для кристаллизации последующих слоев (рис. 2.5).

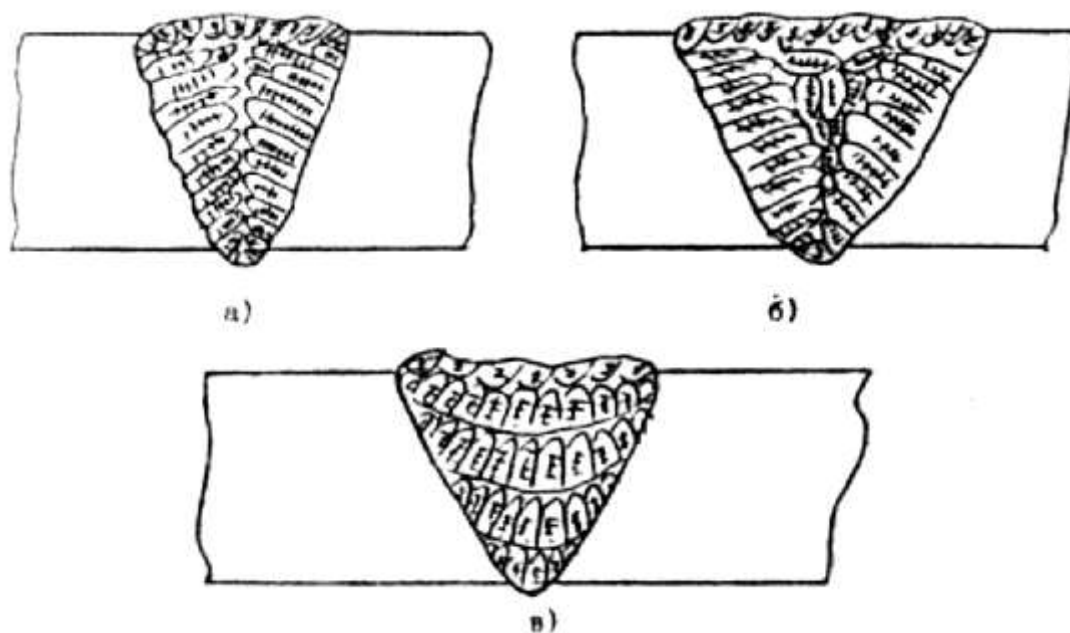


Рис. 2.5. Кристаллическое строение сварных швов в поперечном сечении: а) – при малой ванне жидкого металла и быстрой ее кристаллизации; б) – при большой ванне и медленной ее кристаллизации; в) – при многослойной сварке

На рис. 2.6 – 2.12 представлены микро– и макроструктуры сварных швов, полученных различными способами сварки. Первичная структура литого металла характеризуется столбчатым строением (рис. 2.6). При этом, как показано на рис. 2.7, 2.11, 2.12, столбчатые кристаллы растут от линии сплавления к центру шва. При многослойной сварке (рис. 2.10) кристаллы могут расти от поверхности предыдущего слоя. При любом способе сварки плавлением поверхность сварного шва имеет чешуйчатое строение (рис. 2.9). Размеры чешуек зависят от объема ванны жидкого металла, скорости кристаллизации и других факторов.

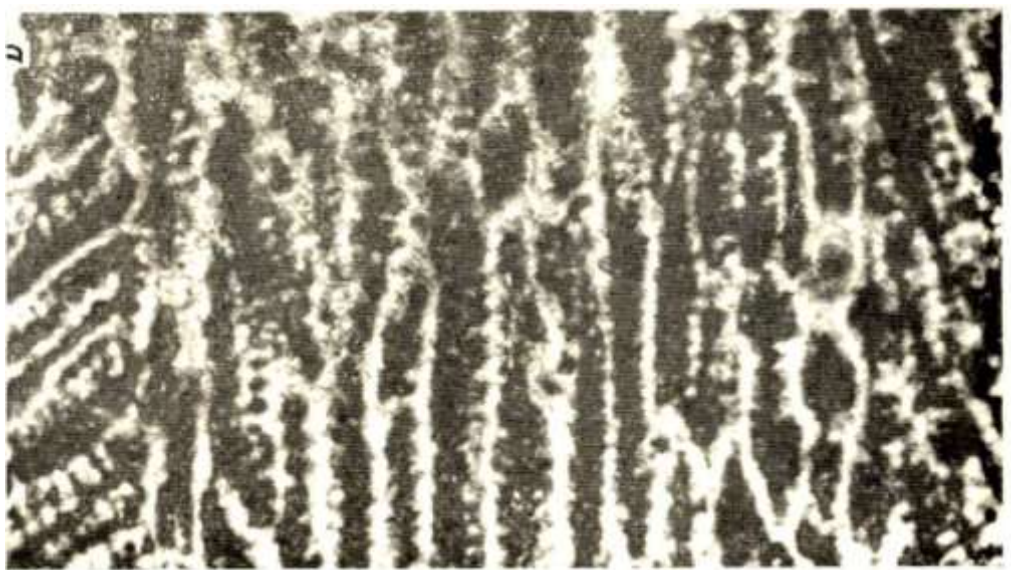


Рис. 2.6. Первичная структура металла шва из низкоуглеродистой стали $\times 250$

Одной из характерных особенностей кристаллизации сварочной ванны является возникновение химической неоднородности по сечению дендрита. Это связано с тем, что первые порции кристаллизующегося металла наиболее чистые по включениям инородных атомов по сравнению с последующими. Поэтому ось дендрита значительно меньше загрязнена, меньше содержит других компонентов, входящих в состав сплава по сравнению с металлом в межосных пространствах. Это различие в содержании примесей в металле осей дендритов и межосных участков называют дендритной ликвацией. В большей степени к ликвации склонны углерод, сера, фосфор, в меньшей – кремний, марганец, хром и др. Поскольку процесс перемещения атомов примеси диффузионный и связан со временем, степень дендритной ликвации зависит от скорости охлаждения, а следовательно, и от скорости кристаллизации.

Наблюдение за процессом кристаллизации металлов и сплавов затруднено в связи с их непрозрачностью и высокими температурами кристаллизации. Поэтому изучение этих процессов обычно осуществляется различными косвенными методами.

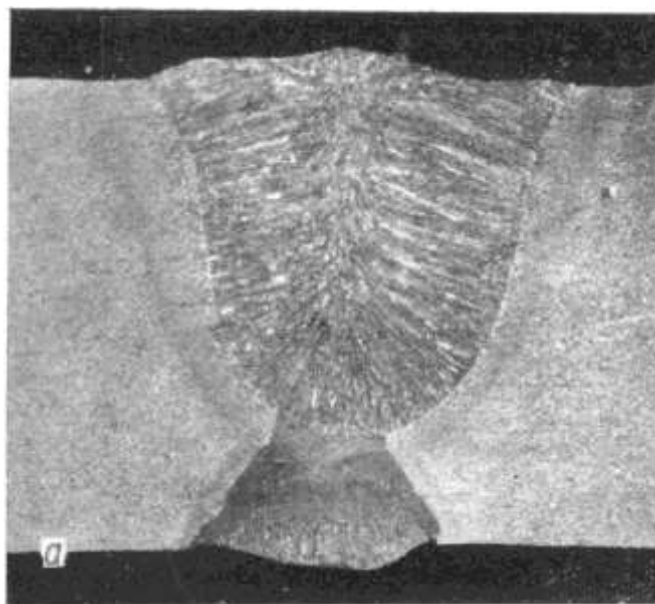


Рис. 2.7. Макроструктура сварного шва,
с подваркой корня шва $\times 5$

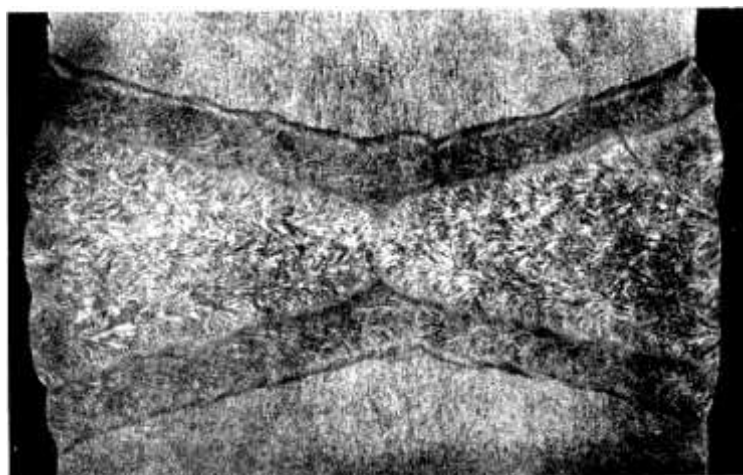


Рис.2.8. Макроструктура сварного шва
при двухсторонней сварке $\times 5$

В настоящей работе предлагается изучение процесса кристаллизации выполнить с помощью растворов различных солей. В результате испарения растворителя под лучами бинокулярного микроскопа или с помощью лупы можно наблюдать процесс кристаллизации солей. При кристаллизации жидкого раствора соли можно наблюдать механизм и кинетику образования дендритов подобно тем, которые образуются при переходе жидкого металла сварочной ванны в твердое состояние.

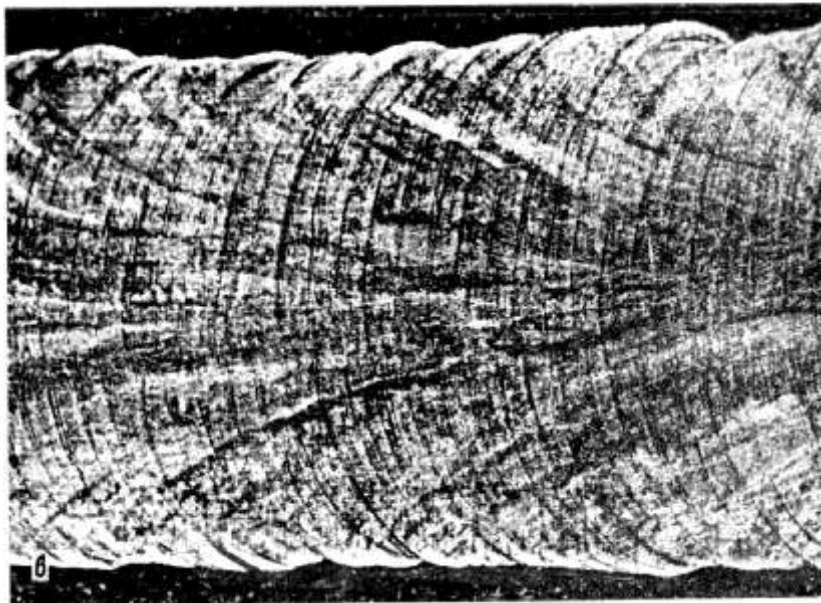


Рис.2.9 – Внешний вид поверхности сварного шва с чешуйчатым строением $\times 5$



Рис.2.10 – Макроструктура многослойного сварного шва $\times 20$

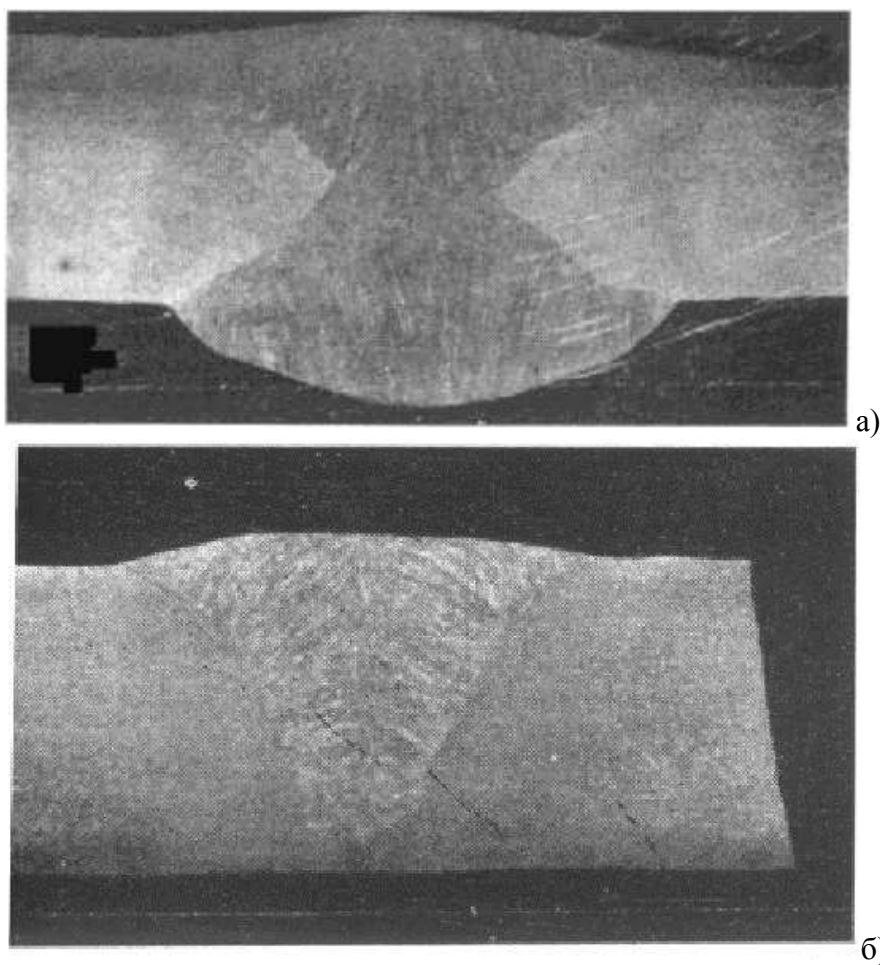


Рис.2.11. Макроструктура сварных швов: а) стыковой шов, односторонняя сварка; б) стыковой шов, двухсторонняя сварка x5

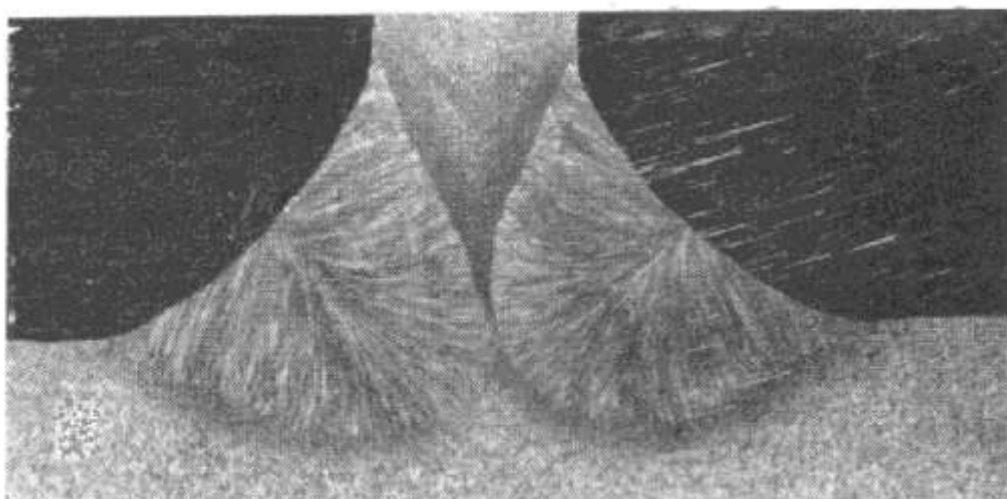


Рис.2.12. Макроструктура. Угловое соединение x10

Оборудование, материалы:

1. Для проведения указанной работы необходимо иметь:
2. Биологический микроскоп или бинокулярную лупу с зер-

калом.

3. Чисто промытые стеклянные пластинки.
4. Растворы солей или соли типа $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, NH_4Cl , NaCl .
5. Пипетки или стеклянные трубочки, пробирки.
6. Спиртовки, спирт, вату, глицерин, фильтровальную бумагу.
7. Микрошлифы сварных швов (поперечные разрезы).

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретический материал и основные положения его изложить в отчете.
2. Для получения пересыщенного раствора одну из солей растворить в воде при температуре 70–80 °С.
3. На чисто промытую сухую стеклянную прозрачную пластинку, слегка смазанную тонким слоем глицерина, нанести пипеткой или стеклянной трубочкой небольшую каплю раствора одной из приготовленных солей. Предварительно слой глицерина промокнуть фильтровальной бумагой, чтобы поверхность стала матовой. Это необходимо для того, чтобы возникшие неровности на поверхности удерживали каплю соли на пластинке. Для ускорения процесса кристаллизации каплю соли следует делать более тонкой и плоской.
4. Стеклянную пластинку поместить на предметный столик микроскопа и вести наблюдение за процессом кристаллизации соли. Процесс кристаллизации во времени зарисовать в отчете. Объяснить строение характерных структурных зон.
5. Изучить строение микрошлифов сварных швов в поперечном сечении, зарисовать микроструктуру. Объяснить образование нескольких зон кристаллизации.

Содержание отчета:

1. Цель лабораторной работы.
2. Основные теоретические положения.
3. Общая методика выполнения лабораторной работы.
4. Результаты выполнения лабораторной работы.
5. Общие выводы по работе.

Лабораторная работа №3

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ. ДЕФЕКТЫ СВАРКИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение основных дефектов, возникающих в сварных соединениях при сварке различных сталей и сплавов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Дефектами сварных соединений называют отклонения размеров, форм, состава, сплошности и свойств металла от требуемых. Дефекты, появляющиеся в сварных соединениях различают по месту расположения (наружные и внутренние) и причинам возникновения.

Дефекты при сварке металлов плавлением образуются вследствие нарушения требований нормативных документов к сварочным материалам, подготовке, сборке и сварке соединяемых элементов, термической и механической обработке сварных соединений и конструкции в целом.

В Российской Федерации с 1 января 2003 г. введен впервые в действие ГОСТ 30242-97 в качестве государственного стандарта, который устанавливает классификацию, определения и условные обозначения дефектов швов, зон термического влияния и основного металла при сварке металлов плавлением.

2.1. Классификация дефектов

Согласно ГОСТ 30242-97 дефекты классифицированы на шесть следующих групп:

- трещины;
- полости, поры;
- твердые включения;
- несплавления и непровары;
- нарушение формы шва;

- прочие дефекты, не включенные в вышеперечисленные группы.

2.2. Наименование, определение и обозначение дефектов

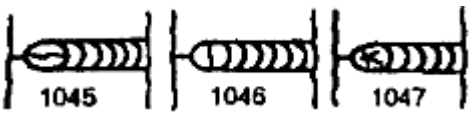
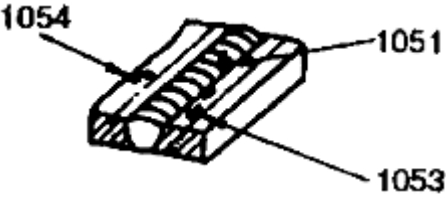

Наименование, определение и обозначение дефектов приведены в табл. 1, где:

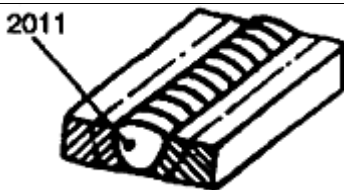

- в графе 1 – трехзначное цифровое обозначение каждого дефекта или четырехзначное цифровое обозначение его разновидностей;
- в графе 2 – буквенное обозначение дефекта, используемое в сборниках справочных радиограмм Международного института сварки (МИС);
- в графе 3 – наименование дефекта на русском, английском и французском языках;
- в графе 4 – определение и/или поясняющий текст;
- в графе 5 – рисунки, дополняющие определение при необходимости.


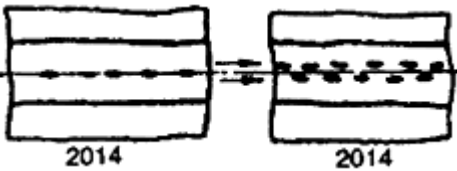

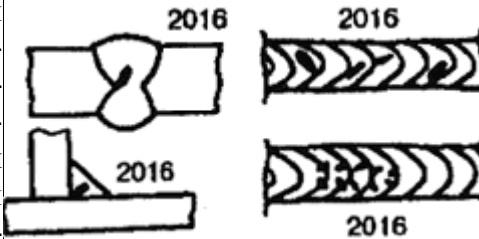
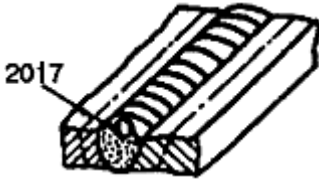
Таблица 1

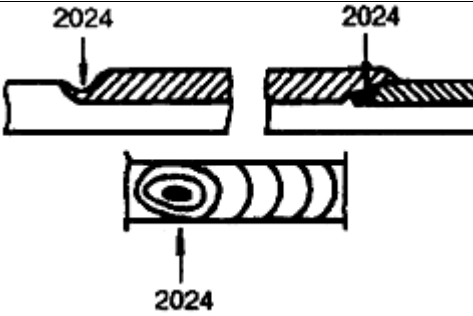
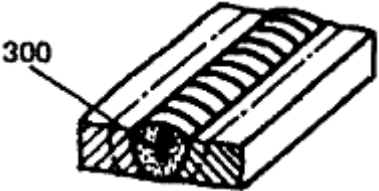
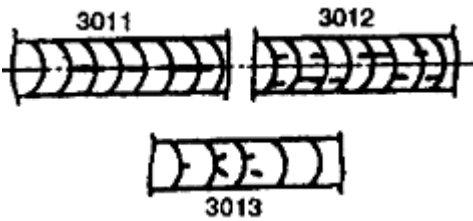
Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
Группа 1. Трещины				
100	Е	Трещины en cracks fr fissures	Несплошность, вызванная местным разрывом шва, который может возникнуть в результате охлаждения или действия нагрузок	
1001		Микротрещина en microfissure (microcrack) fr microfissure	Трещина, имеющая микроскопические размеры, которую обнаруживают физическими методами не менее чем при пятидесятикратном увеличении	




Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
101	Еа	Продольная трещина en longitudinal crack fr fissure longitudinale	Трещина, ориентированная параллельно оси сварного шва. Она может располагаться: в металле сварного шва; на границе сплавления; в зоне термического влияния; в основном металле	<p>Зона термического влияния</p>
1011				
1012				
1013				
1014				
102	Еб	Поперечная трещина en transverse crack fr fissure transversale	Трещина, ориентированная поперек оси сварного шва. Она может располагаться: в металле сварного шва; в зоне термического влияния; в основном металле	
1021				
1023				
1024				
103	Е	Радиальные трещины en radiation cracks fr fissures rayonnantes	Трещины, радиально расходящиеся из одной точки. Они могут быть: в металле сварного	
1031				

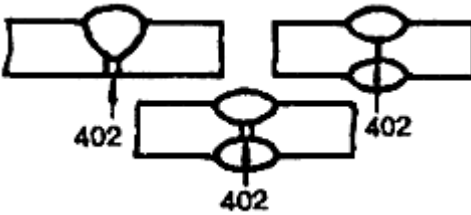
Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
1033 1034			<p>шва; в зоне термического влияния; в основном металле</p> <p>Примечание – Трещины этого типа, расходящиеся в разные стороны, известны как звездоподобные трещины</p>	
104 1045 1046 1047	Ес	<p>Трещина в кратере</p> <p>en crater cracks</p> <p>fr fissure de cratère</p>	<p>Трещина в кратере сварного шва, которая может быть:</p> <p>продольной; поперечной; звездообразной</p>	
105 1051 1053 1054	Е	<p>Раздельные трещины</p> <p>en group of disconnected cracks</p> <p>fr réseau de fissures marbrées</p>	<p>Группа трещин, которые могут располагаться:</p> <p>в металле сварного шва; в зоне термического влияния; в основном металле</p>	
106	Е	<p>Разветвленные трещины</p> <p>en branching cracks</p>	<p>Группа трещин, возникших из одной трещины.</p>	

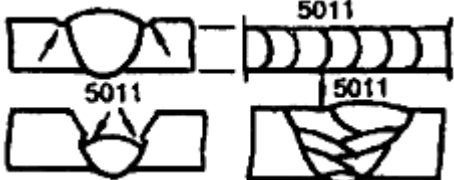
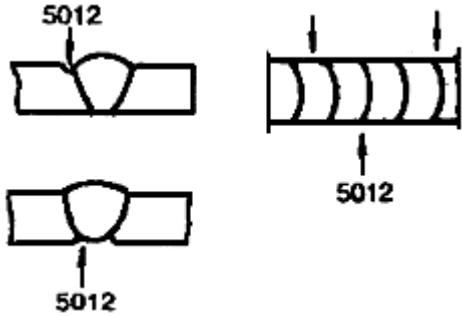
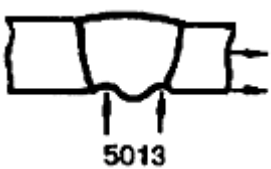
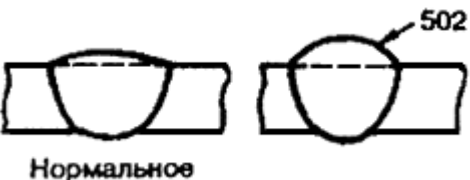

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
1061		fr fissures ramifiées	Они могут располагаться: в металле сварного шва; в зоне термического влияния; в основном металле	
1063				
1064				
Группа 2. Поры				
200	A	Газовая полость en gas cavity fr soufflure	Полость произвольной формы, образованная газами, задержанными в расплавленном металле, которая не имеет углов	
2011	Aa	Газовая пора en gas pore fr soufflure sphéroïdale	Газовая полость обычно сферической формы	
2012		Равномерно распределенная пористость en uniformly distributed porosity fr soufflures sphéroïdales uniformément réparties	Группа газовых пор, распределенных равномерно в металле сварного шва. Следует отличать от цепочки пор (2014)	

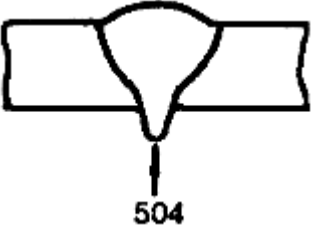
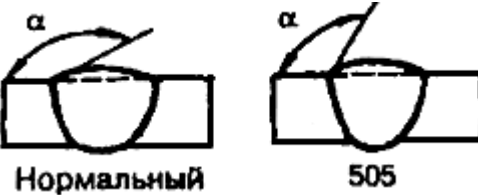
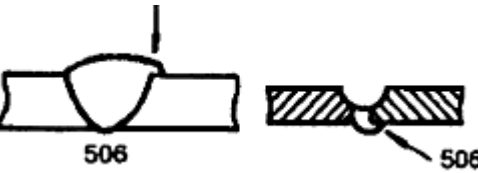

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
2013		Скопление пор en localized (clustered) fr nid de soufflures	Группа газовых полостей (три или более), расположенных кучно с расстоянием между ними менее трех максимальных размеров большей из полостей	
2014		Цепочка пор en linear porosity fr soufflures alignées(ou en chapelet)	Ряд газовых пор, расположенных в линию, обычно параллельно оси сварного шва, с расстоянием между ними менее трех максимальных размеров большей из пор	
2015	Ab	Продолговатая полость en elongated cavity fr soufflure allongee	Несплошность, вытянутая вдоль оси сварного шва. Длина несплошности не менее чем в два раза превышает высоту	
2016	Ab	Свищ en worm-hole fr soufflure vermiculaire	Трубчатая полость в металле сварного шва, вызванная выделением газа. Форма и положение свища определяются режимом затвердевания и источником газа. Обычно свищи группируются в скопления и распределяются елочкой	
2017		Поверхностная пора en surface por fr piqure	Газовая пора, которая нарушает сплошность поверхности сварного шва	





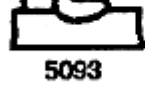
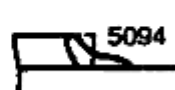
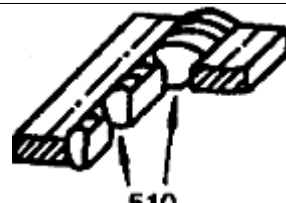

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
202	R	Усадочная раковина en shrinkage cavity fr retassure	Полость, образующаяся вследствие усадки во время затвердевания	
2024	K	Кратер en crater pipe fr retassure de cratere	Усадочная раковина в конце валика сварного шва, не заваренная до или во время выполнения последующих проходов	
Группа 3. Твердые включения				
300		Твердое включение en solid inclusion fr inclusion solide	Твердые инородные вещества металлического или неметаллического происхождения в металле сварного шва. Включения, имеющие хотя бы один острый угол, называются остроугольными включениями	
301 3011 3012 3013	Ва	Шлаковое включение en slag inclusion fr inclusion de laitier	Шлак, попавший в металл сварного шва. В зависимости от условий образования такие включения могут быть:	
302	G	Флюсовое	Флюс, попавший в ме-	См.3011-3013



Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
3021 3022 3023		включение en flux inclusion fr inclusion de flux	талл сварного шва. В зависимости от условий образования такие включения могут быть: линейными; разобщенными; прочими	
303	J	Оксидное включение en oxide inclusion fr inclusion d'oxyde	Оксид металла, попавший в металл сварного шва во время затвердевания	
3041 3042 3043	H	Металлическое включение en metallic inclusion fr inclusion métallique	Частица инородного металла, попавшая в металл сварного шва. Различают частицы из: вольфрама; меди; другого металла	
Группа 4. Несплавление и непровар				
401		Несплавление en lack of fusion (incomplete fusion) fr manque de fusion (collage)	Отсутствие соединения между металлом сварного шва и основным металлом или между отдельными валиками сварного шва	 4011  4012  4013  4013


Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
4011		Примечание. В некоторых странах употребляют термины "collage noir" и "collage blanc" в зависимости от того, имеются или отсутствуют в местах несплавления оксидные включения	Различают несплавления:	
4012			по боковой стороне;	
4013			между валиками; в корне сварного шва	
402	D	Непровар (неполный провар) en lack of penetration (incomplete penetration) fr manque de pénétration	Несплавление основного металла по всей длине шва или на участке, возникающее вследствие неспособности расплавленного металла проникнуть в корень соединения	
Группа 5. Нарушение формы шва				
500		Нарушение формы en imperfect shape fr forme défectueuse	Отклонение формы наружных поверхностей сварного шва или геометрии соединения от установленного значения	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
5011	F	Подрез непрерывный en continious undercut fr caniveau continu	Углубление продольное на наружной поверхности валика сварного шва, образовавшееся при сварке	
5012	F	Подрез прерывистый en intermittent undercut fr morsure: caniveau discontinu		
5013		Усадочная канавка en shrinkage groove fr caniveau a la racine	Подрез со стороны корня одностороннего сварного шва, вызванный усадкой по границе сплавления (см. также 512)	
502		Превышение выпуклости стыкового шва en excess weld metal fr surepaisseur excessive	Избыток наплавленного металла на лицевой стороне стыкового шва сверх установленного значения	
503		Превышение выпуклости углового шва en excessive convexity	Избыток наплавленного металла на лицевой стороне углового шва (на всей длине или на участке) сверх установленного значения	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
		fr convexite excessive		
504		Превышение проплава en excessive penetration fr excès de pénétration	Избыток наплавленного металла на обратной стороне стыкового шва сверх установленного значения	
5041		Местное превышение проплава en local excess penetration fr excès local de pénétration	Местный избыточный проплав сверх установленного значения	
505		Неправильный профиль сварного шва en incorrect weld profile fr défaut de raccordement	Угол α между поверхностью основного металла и плоскостью, касательной к поверхности сварного шва, менее установленного значения	
506		Наплав en overlap fr debordement	Избыток наплавленного металла сварного шва, натекавший на поверхность основного металла, но не сплавленный с ним	
507		Линейное смещение en linear misalignment	Смещение между двумя свариваемыми элементами, при котором их поверхности располагаются параллельно,	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
		fr défaut d'alignement	но не на требуемом уровне	
508		Угловое смещение en angular misalignment fr deformation angulaire	Смещение между двумя свариваемыми элементами, при котором их поверхности располагаются под углом, отличающимся от требуемого	
509		Натек en sagging fr effondrement	Металл сварного шва, осевший вследствие действия силы тяжести и не имеющий сплавления с соединяемой поверхностью. В зависимости от условий это может быть:	
5091			натек при горизонтальном положении сварки;	
5092			натек в нижнем или потолочном положении сварки;	
5093			натек в угловом сварном шве;	
5094			натекание в шве нахлесточного соединения	
510		Прожог en burn through fr trou	Вытекание металла сварочной ванны, в результате которого образуется сквозное отверстие в сварном шве	
511		Неполностью заполненная разделка кромок	Продольная непрерывная или прерывистая канавка на поверхности сварного шва из-за	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
		en incompletely filled groove fr manque d'épaisseur	недостаточности при-сачочного металла при сварке	
512		Чрезмерная асимметрия углового шва en excessive asymmetry of fillet weld fr défaut de symétrie de soudure d'angle	Чрезмерное превышение размеров одного катета над другим	 <p>512</p>
513		Неравномерная ширина шва en irregular width fr largeur irrégulière	Отклонение ширины от установленного значения вдоль сварного шва	
514		Неровная поверхность en irregular surface fr surface irrégulière	Грубая неравномерность формы поверхности усиления шва по длине	
515		Вогнутость корня шва en root concavity fr retassure á la racine	Неглубокая канавка со стороны корня одностороннего сварного шва, образовавшаяся вследствие усадки (см. также 5013)	 <p>515</p>

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
516		Пористость в корне сварного шва en root porosity fr rochage	Наличие пор в корне сварного шва вследствие возникновения пузырьков во время затвердевания металла	
517		Возобновление en poor restart fr mauvaise reprise	Местная неровность поверхности в месте возобновления сварки	 517
Группа 6. Прочие дефекты				
600		Прочие дефекты en miscellaneous imperfections fr défauts divers	Все дефекты, которые не могут быть включены в группы 1-5	
601		Случайная дуга en stray arc fr coup d'arc	Местное повреждение поверхности основного металла, примыкающего к сварному шву, возникшее в результате случайного горения дуги	
602		Брызги металла en spatter fr projection (ou perles)	Капли наплавленного или присадочного металла, образовавшиеся во время сварки и прилипшие к поверхности затвердевшего металла сварного шва или околошовной зоны основного металла	
6021		Вольфрамовые брызги	Частицы вольфрама, выброшенные из рас-	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС			
		en tungsten spatter fr projection de tungstène	плавленной зоны электрода на поверхность основного металла или затвердевшего металла сварного шва	
603		Поверхностные задиры en torn surface fr déchirure locale ou arrachement local	Повреждение поверхности, вызванное удалением временно приваренного приспособления	
606		Утонение металла en underflushing fr moulage excessif	Уменьшение толщины металла до значения менее допустимого при механической обработке	

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, основные дефекты сварных соединений.

На втором этапе студент самостоятельно составляет отчет, в котором описывает характерные признаки определенной группы дефектов сварных соединений.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по практическому занятию оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

1. Название и цель занятия.
2. Изложение характерных признаков, заданных студенту дефектов сварных соединений и вероятных причин их возникновения.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое дефект сварного соединения?
2. Какие могут быть причины образования дефектов в сварных соединениях?
3. На какие группы классифицированы дефекты по ГОСТ 30242-97?
4. Какими методами контроля выявляются микротрещины?
5. На каких участках зоны сварного соединения может располагаться продольная трещина?
6. Какие трещины называют звездоподобными?
7. Какие виды дефектов являются наиболее опасными для эксплуатации?
8. Назовите основные отличия между скоплением пор, цепочками пор и пористостью.
9. Укажите причину образования кратера в сварном шве.
10. В чем причина образования шлаковых включений в сварных соединениях?
11. Что такое подрез? Назовите причины его образования.
12. Назовите причины образования пористости в корне шва.
13. Какой дефект называют брызгами металла?

6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ИСО 6520-82 «Классификация дефектов швов при сварке металлов плавлением (с пояснениями)».
2. ГОСТ 30242-97 «Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначение и определения».
3. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: практ. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высш. шк., 1991. – 283 с.
4. Гурвич, А. К. Ультразвуковой контроль сварных швов / А. К. Гурвич, Н. П. Ермолов. – Киев: Техника, 1972. – 424 с.
5. Технология электрической сварки металлов и сплавов сплавление / под ред. Б. Е. Патона. – Москва: Машиностроение, 1974. – 788 с.
6. Смирнов, А. Н. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов / А. Н. Смирнов, Б. Л. Герике, В. В. Муравьев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 244 с.

Лабораторная работа №4

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение основных методов неразрушающего контроля (НК) качества сварных соединений.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. Классификация методов НК

Одной из основных задач по надежной и безопасной эксплуатации потенциально опасного оборудования является обеспечение достоверного контроля сплошности сварных соединений.

При контроле применяют разные методы испытаний и исследования металла. Обычно их подразделяют на неразрушающие и разрушающие методы.

Принято, что под термином *неразрушающие физические методы контроля* понимают виды контроля, обладающие двумя характерными признаками:

1. Они не должны приводить к разрушению (повреждению) контролируемого объекта.
2. Они основаны на взаимодействии физических полей или веществ с дефектами.

Согласно ГОСТ 18353 в основу классификации методов НК положен физический процесс с момента взаимодействия физического поля или вещества с контролируемым объектом до получения первичной информации [.

Неразрушающий контроль подразделяется:

1. Радиационный.
2. Акустический.
3. Магнитный.
4. Электрический.
5. Вихретоковый.
6. Радиоволновой.

7. Тепловой.
8. Оптический.
9. Проникающими веществами (капиллярная дефектоскопия).
10. Течеисканием.
11. Визуальный и измерительный контроль (ВИК).

При контроле качества сварных соединений наиболее широко применяются следующие виды НК: ВИК; радиационный; акустический; магнитный; проникающими веществами (капиллярная дефектоскопия).

2.2. Визуальный и измерительный контроль

Визуальный и измерительный контроль сварных соединений (наплавов) выполняют до проведения НК другими методами. С 2003 года для технических устройств опасных производственных объектов в России действует Инструкция по визуальному и измерительному контролю (РД 03-606-03). Визуальный и измерительный контроль материала (полуфабрикатов, заготовок, деталей) и сварных соединений проводят на следующих стадиях:

- входного контроля;
- изготовления деталей, сборочных единиц и изделий;
- подготовки деталей и сборочных единиц к сборке;
- подготовки деталей и сборочных единиц к сварке;
- сборки деталей и сборочных единиц под сварку;
- процесса сварки;
- контроля готовых сварных соединений и наплавов;
- исправления дефектных участков в материале и сварных соединениях (наплавках);
- оценки состояния материала и сварных соединений в процессе эксплуатации технических устройств и сооружений, в том числе по истечении установленного срока их эксплуатации.

Визуальный и измерительный контроль качества сварных соединений (наплавов) в процессе сварки (наплавки) и готового сварного соединения (наплавки) выполняют с целью подтверждения их соответствия требованиям конструкторской документации, НТД, а также для выявления деформаций, поверхностных трещин, подрезов, прожогов, наплывов, кратеров, свищей, пор,

раковин и других несплошностей и дефектов формы швов; проверки геометрических размеров сварных швов и допустимости деформаций, поверхностных несплошностей и дефектов формы сварных швов.

При визуальном и измерительном контроле применяют: лупы, в т. ч. измерительные; линейки измерительные металлические; угольники поверочные 90° лекальные; штангенциркули, штангенрейсмусы и штангенглубиномеры; щупы; угломеры с нониусом; стенкомеры и толщиномеры индикаторные; микрометры; нутромеры микрометрические и индикаторные; калибры; эндоскопы; шаблоны, в том числе специальные и универсальные (например, типа УШС), радиусные, резьбовые и др.; поверочные плиты; плоскопараллельные концевые меры длины с набором специальных принадлежностей; штриховые меры длины (стальные измерительные линейки, рулетки).

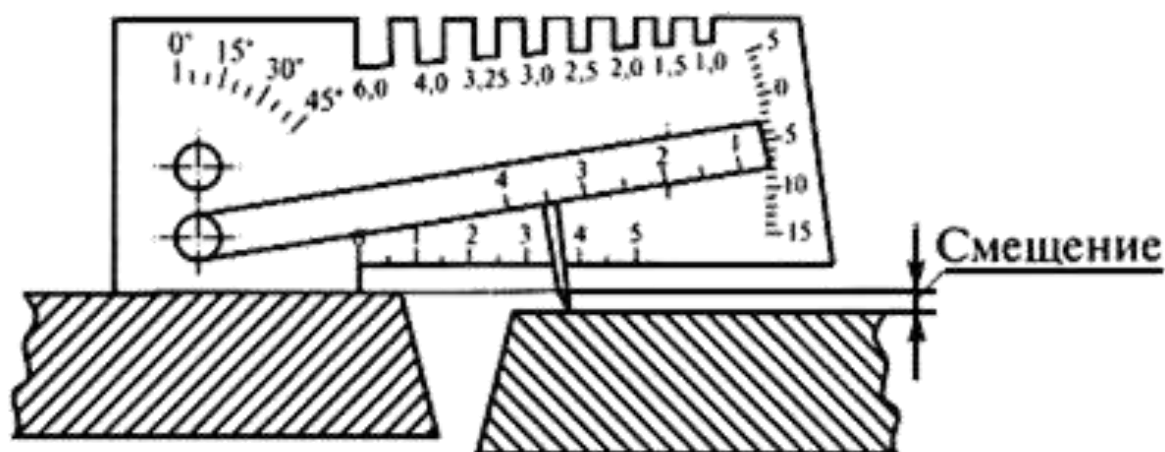


Рис. 1. Пример измерения смещения наружных кромок деталей прибором УШС

Визуальный контроль с применением оптических приборов называют визуально – оптический. Его применяют для выявления различных поверхностных дефектов в труднодоступных местах.

При контроле используют оптические приборы, создающие полное изображение контролируемого участка. В основном применяют оптические приборы с увеличением 10–30 раз. Визуаль-

ный контроль применяется в дополнение к капиллярным методам контроля.

Для контроля внутренних поверхностей относительно полых деталей, например, деталей энергооборудования, корпусов различных машин и механизмов и т. д. применяют перископические дефектоскопы типа ПД-60, ПДК-60. Прибор ПД-60 предназначен для осмотра внутренних поверхностей труб диаметром более 35 мм, глубиной до 900 мм с увеличением 4 раза.

Перископический дефектоскоп ПДК-60 коленчатый, имеет два кольца, которые позволяют изменять ход лучей на угол в девяносто градусов, его применяют тогда, когда из-за сложности конструкции невозможен контроль другими приборами.

Семейство приборов РВП (РВП-497, РВП-469, РВП-479) позволяют контролировать трубы и другие объекты диаметром до 870 мм и длиной до 16,5 м с увеличением до 15 раз.

В последнее время все шире стали применять новое поколение приборов – эндоскопов. Это приборы с гибкими телескопическими оптическими жгутами (ГОВЖ). Жгуты представляют собой пачку гибких стеклянных волокон с высокими показателями преломления и коэффициентом светопропускания. Разработано довольно много моделей и модификаций эндоскопов и жгуты в настоящее время изготавливают не только из стекла, но и из новых материалов.

2.3. Радиационный метод

Область применения радиационного метода в последнее время несколько снижается, но однако он незаменим при контроле крупных литых деталей, толстостенных заготовок и сварных соединений. Одним из главных достоинств метода является наличие реального документа контроля – *рентгеновского снимка*, где четко показано наличие дефекта, либо его отсутствие.

В основу применения радиационных методов контроля положено свойство проникающих излучений (рентгеновского и гамма-излучений) проходить через непрозрачные для видимого света тела. Сущность радиационной дефектоскопии заключается в измерении интенсивности излучения после прохождения его через изделие (рис. 2).

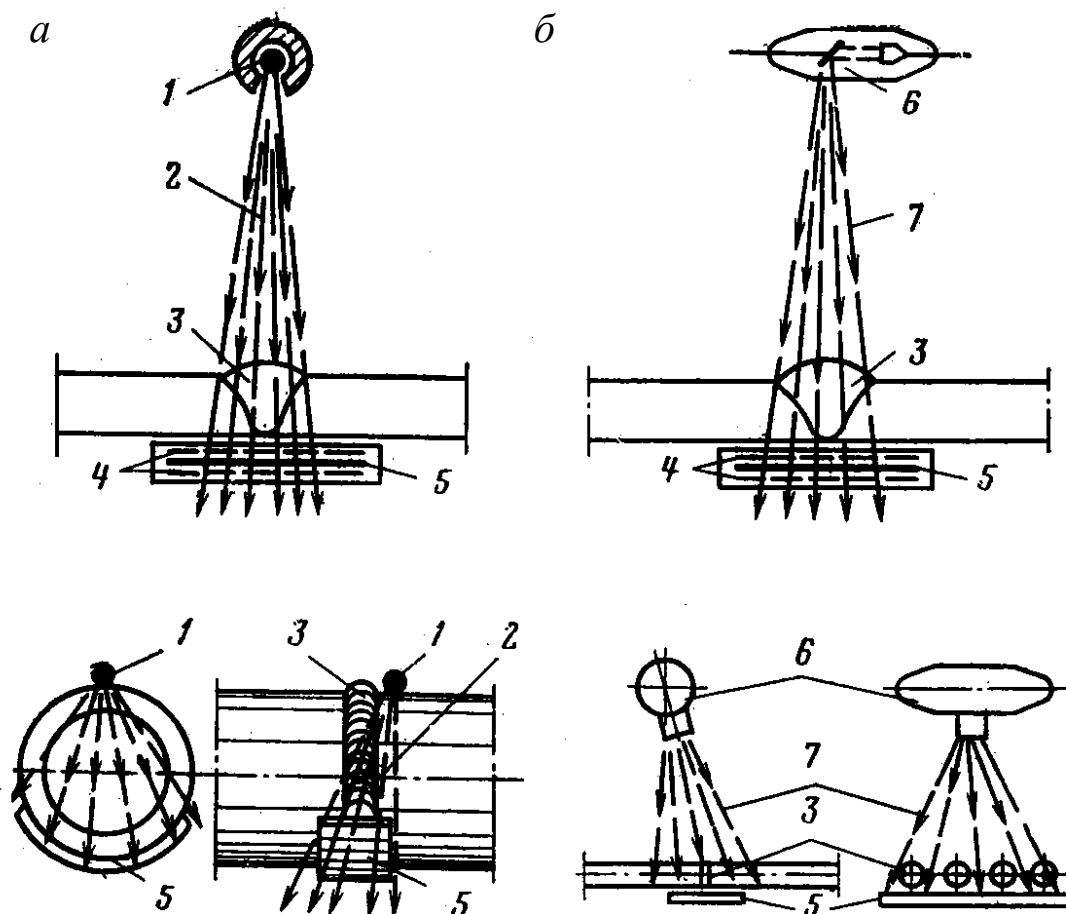


Рис. 2. Схема контроля металла методами радиационной дефектоскопии: *а* – просвечивание гамма-лучами; *б* – просвечивание рентгеновскими лучами; 1 – ампула с изотопом; 2 – гамма-лучи; 3 – сварной шов; 4 – усиливающий экран; 5 – рентгеновская пленка; 6 – рентгеновская трубка; 7 – рентгеновские лучи

Гамма-излучение. Для просвечивания с помощью проникающих веществ служат гамма-дефектоскопы. Они являются автономными и не требуют электропитания от внешних источников, что обеспечивает возможность их применения как в монтажных условиях, так и при ремонтах во время контроля элементов конструкций в труднодоступных местах. Они имеют защитные радиационные головки с источником излучения, органы управления, систему сигнализации о положении источника и транспортного устройства. Органы управления осуществляют перемещение ам-

пулы с радиоактивным изотопом в положение просвечивание и возвращение ее в положение хранения.

При просвечивании с помощью дистанционного управления открывают затвор радиационной головки и либо применяют образовавшийся при этом направленный пучок излучения, либо выводят источник за пределы головки, что обеспечивает просвечивание панорамным методом.

Рентгеновское излучение. Источником его служит вакуумная камера бетатрона или трубка рентгеновского аппарата. С увеличением анодного напряжения излучение становится более жестким. Увеличение или уменьшение анодного тока приводит к увеличению или уменьшению интенсивности излучения соответственно. Максимальная энергия рентгеновского излучения численно равна напряжению на рентгеновской трубке.

Для просвечивания рентгеновскими лучами применяют аппараты которые по режиму работы делятся на две группы: аппараты, работающие в режиме импульсного излучения, и аппараты, работающие в режиме непрерывного излучения.

Источники гамма - или рентгеновского излучения выбирают в зависимости от толщины контролируемого материала с учетом условий и доступа к зоне контроля.

Радиография. Способ контроля заключается в фиксации на рентгеновской пленке изображения контролируемой зоны с темными пятнами в местах расположения дефектов. В радиографии используют свойство рентгеновских пленок чернеть под воздействием излучения после соответствующей фотообработки. Участки снимков с большим потемнением характеризуют большую интенсивность излучения за объектом и свидетельствуют о нарушении сплошности контролируемой зоны, то – есть о наличии определенного дефекта.

Область применения любого источника ограничена задаваемой величиной минимального выявляемого дефекта.

В основном гамма – аппараты применяют при контроле массивных отливок, сварных швов трубопроводов, сосудов, барабанов котлов для выявления крупных дефектов.

Бетатроны применяют в основном для просвечивания толстостенных изделий, особенностью снимков является весьма четкое изображение.

Радиографический метод контроля регламентирован ГОСТ 7512, предусматривающий применение гамма- и тормозного излучения с регистрацией на рентгеновской пленке. Этим методом выявляют в сварных соединениях внутренние дефекты: трещины, поры, непровары, неметаллические включения и т. д., а также недоступные для внешнего осмотра наружные дефекты, такие как утяжины, превышения проплава и др.

Радиографический контроль не обеспечивает выявление дефектов, если их протяженность в направлении излучения меньше удвоенной чувствительности контроля в мм, или, если изображения дефектов совпадают на снимке с другими изображениями, а так же: непроваров и трещин с раскрытием менее 0,1 мм для сварных соединений с толщиной до 40 мм, непроваров и трещин с раскрытием менее 0,25 % для сварных соединений с толщиной более 40 мм, непроваров и трещин, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением излучения и т. д.

Для надежного выявления трещин шириной раскрытия до 0,1 мм необходимо, чтобы лучи совпадали с плоскостью нарушения сплошности или составляли с ней угол не более 10–12 градусов.

Характер и размер дефектов обычно определяют по эталонным снимкам, полученным экспериментальным путем при контроле деталей с аналогичными характерными дефектами.

Глубину залегания дефектов определяют по специальным эталонам, путем сравнения потемнения на снимке с потемнением изображения соответствующей канавки пластинчатого эталона.

2.4. Акустические методы

Любая материальная среда в каком бы состоянии она не находилась, благодаря взаимодействию между частицами обладает упругими свойствами.

Колебания одной из частиц будут передаваться другим частицам, т. е. в среде будет распространяться волновое движение, называемое **акустическими колебаниями**.

Частицы среды совершают колебания около точки равновесия, а волна распространяется с некоторой постоянной скоростью.

В зависимости от упругих свойств среды в ней могут возникать упругие волны различных видов, отличающиеся скоростью распространения, направлением колебания частиц и другими признаками. Их называют *модами*.

Различают продольные волны (расширения-сжатия), сдвиговые, поверхностные, нормальные и др. волны. В жидкостях и газах существует только один тип волн – волны расширения-сжатия. В твердых телах, кроме продольных волн, существуют поперечные волны (сдвига) так как твердое тело обладает не только упругостью объема, но и упругостью формы. Скорость продольной волны примерно в два раза больше скорости поперечной. Комбинации этих волн создают другие типы волн.

На свободной поверхности твердого тела могут распространяться поверхностные волны или волны Рэлея. В тонких плоских телах (листах, пластинах, проволоке) возбуждаются нормальные волны или волны Лэмба. В металлах возбуждаются все типы волн.

Для ультразвуковых колебаний характерны те же явления преломления, отражения, дифракции, интерференции, реверберации, что и для любых волновых явлений.

Ультразвуковая дефектоскопия (УЗК) основана на свойстве УЗ колебаний распространяться в однородном плоском теле и на его плоских или криволинейных поверхностях в виде лучей и отражаться от границ тела или нарушений сплошности, обладающих другими акустическими свойствами.

При неразрушающем контроле акустические волны возбуждают и принимают путем преобразования электрических колебаний в упругие и наоборот. Для этой цели используют специальные устройства – *электроакустические преобразователи (ЭАП)* или просто преобразователи. Если преобразователь используют для излучения волн, то его называют *излучателем*, если для приема то – *приемником*. Если один и тот же преобразователь выполняет обе функции, то его называют *совмещенным*. Если излучатель и приемник разделены, то схему контроля называют *раздельной*. Если раздельные излучатель и приемник объединены в одном блоке, то преобразователь называют *раздельно-совмещенным*.

Ультразвуковые колебания получают за счет пьезоэффекта, который был открыт братьями Кюри в 1880 г. Он заключается в следующем: при сжатии или растяжении специальной пластинки на ее гранях появляется электрический заряд. Пьезоэффект обратим, так как под влиянием электрического поля пластинки деформируются. Пьезопластины обычно изготавливают из монокристалла кварца или из кристаллических соединений, таких как титанат бария, цирконат титаната свинца и др. (ГОСТ 13927).

Акустические методы неразрушающего контроля основаны на анализе параметров упругих колебаний, возбуждаемых в контролируемом объекте (ГОСТ 23829).

Методы акустического контроля подразделяют на две большие группы: *активные*, использующие излучение и прием акустических колебаний и *пассивные*, основанные только на приеме акустических волн.

На рис. 3 приведена схема существующих и применяемых в настоящее время при техническом диагностировании акустических методов контроля.

Активные методы – это методы, в которых применяют бегущие волны, их делят на подгруппы. В практике используют методы прохождения и методы отражения волн. Комбинированные методы применяют как отражение, так и прохождение.

Методы прохождения предполагают наличие при контроле двух преобразователей: излучающего и приемного, расположенных по разные стороны контролируемого объекта.

К методам прохождения относят следующие методы:

- *теневого или амплитудно-теневого* основан на регистрации уменьшения амплитуды прошедшей волны из-за наличия дефекта. Применяют импульсное и непрерывное излучение (рис. 4, а);
- *временный теневой метод* основан на измерении запаздывания импульсов, вызванного огибанием дефектов (рис. 4, б).

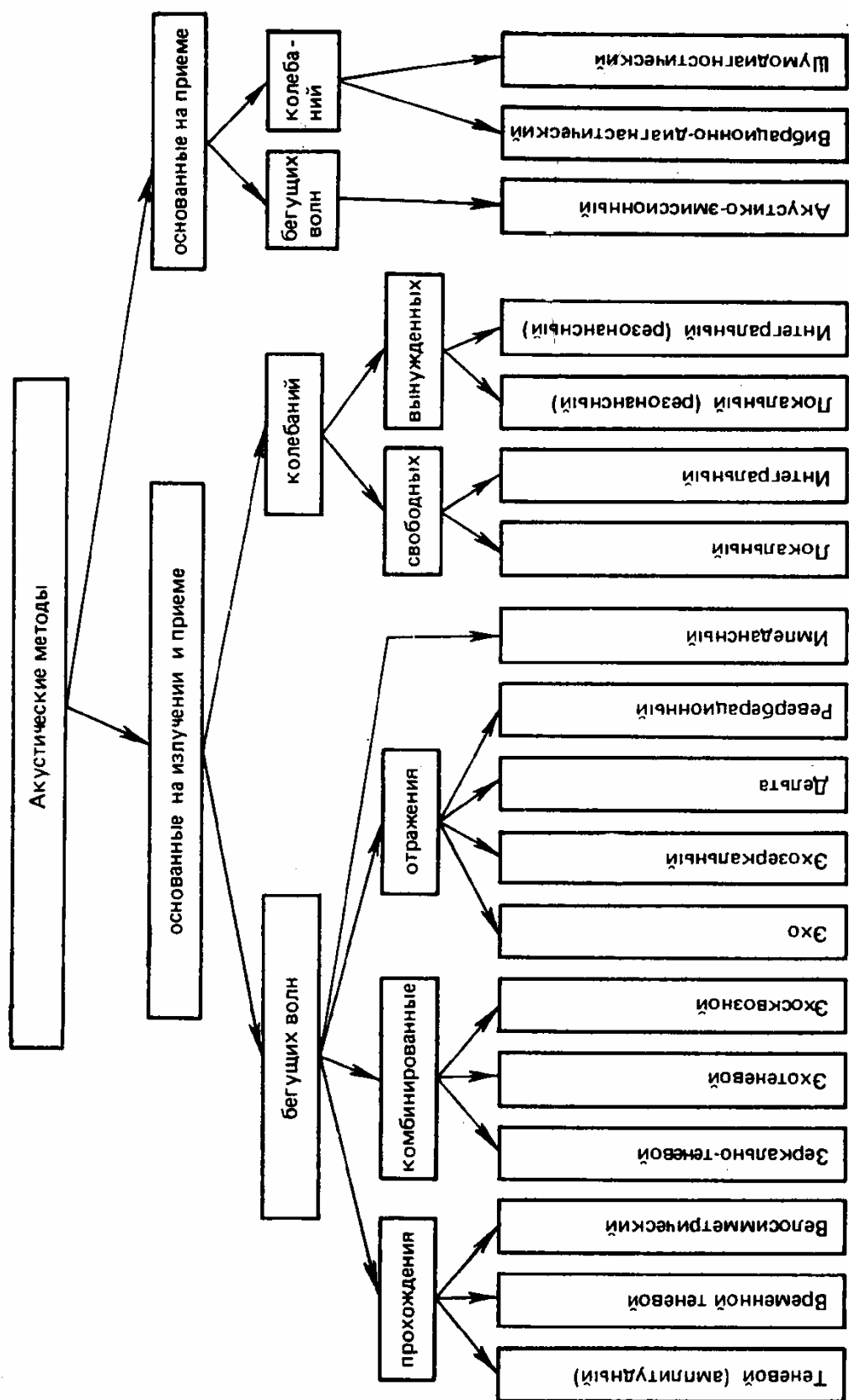


Рис. 3. Классификация акустических методов контроля

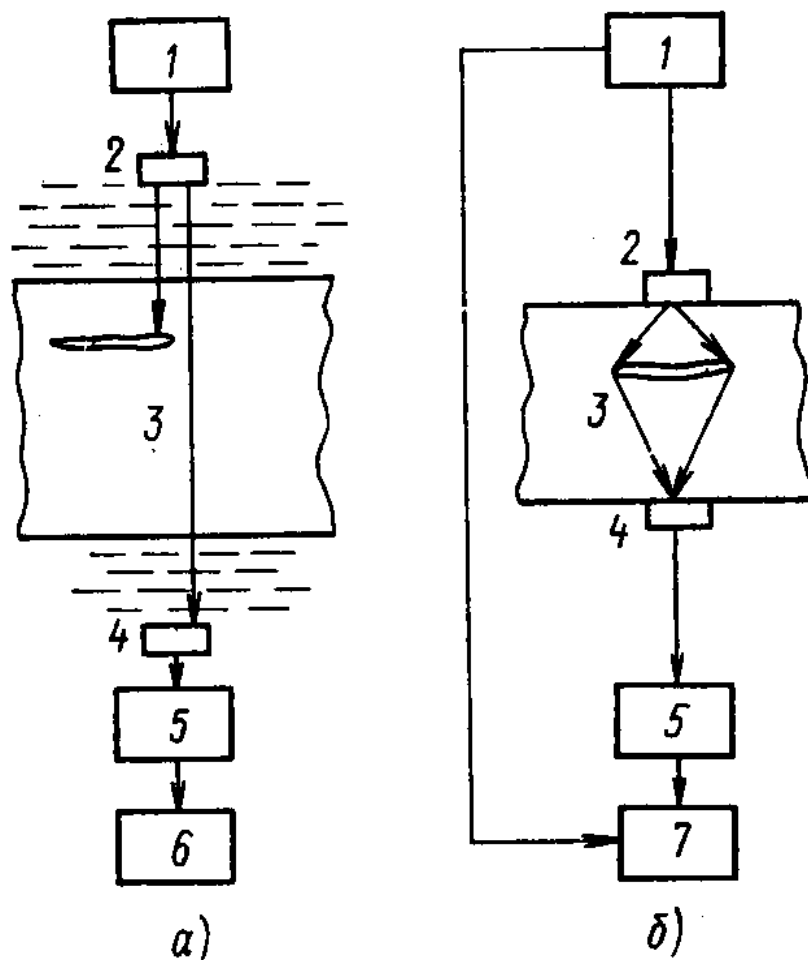


Рис. 4. Методы прохождения: *а* – теневой, *б* – временной теневой; 1 – генератор, 2 – излучатель, 3 – объект контроля, 4 – приемник, 5 – усилитель, 6 – измеритель амплитуды, 7 – измеритель времени пробега

Методы отражения используют как один, так и два преобразователя, зачастую применяют импульсное излучение. К этой подгруппе относят следующие методы:

- *эхометод* основан на регистрации эхосигналов от дефектов (рис. 5, *а*). Здесь на экране электронно-лучевой трубки обычно наблюдают зондирующий (посланный) импульс I, донный импульс III, отраженный от дна контролируемого изделия и сигнал от дефекта II. Время прохождения импульсов II и III пропорционально глубине залегания дефекта и толщине изделия. На рис. 5, *а* приведена совмещенная схема контроля;

- в *эхозеркальном методе* анализируют сигналы, испытавшие зеркальное отражение от дна контролируемой детали и дефекта (рис. 5, б). Вариант этого метода, используемый для выявления вертикальных дефектов (плоскость EF) называют *тандем-методом*;

- при *реверберационном методе* анализируют время объемной реверберации – процесса постепенного затухания звука в некотором объеме, то есть в контролируемой детали (рис. 5, в);

В *комбинированных методах* применяют, как отражение, так и прохождение акустических волн. К этим методам относят:

- *зеркально-теневой метод*, основан на измерении амплитуды донного сигнала. По технике выполнения – это метод отражения, а по своей сущности – он близок к теневому методу, так как в процессе контроля измеряют ослабление сигнала, дважды прошедшего изделие в зоне дефекта (рис. 6, а);

- при *эхотеневом методе* применяют и анализируют прошедшие и отраженные волны (рис. 6, б);

- *импедансный метод* существенно отличается от ранее рассмотренных методов и основан на анализе изменения механического или входного акустического импеданса участка контролируемой поверхности, с которым взаимодействует преобразователь и чем больше импеданс, тем труднее раскачать контролируемый участок (рис. 7).

В низкочастотном импедансном методе преобразователем является колеблющийся стержень, прижатый к поверхности детали.

При наличии подповерхностных дефектов в виде расслоений уменьшается механический импеданс, в участке над дефектом легко возбуждаются изгибные колебания. В результате чего изменяется режим колебаний стержня, в том числе уменьшаются механические напряжения на приемном элементе 4, что и является признаком дефекта. В высокочастотном методе преобразователь излучает продольную волну. Условия этого возбуждения зависят от акустического импеданса поверхности, а акустический импеданс в свою очередь зависит от наличия или отсутствия несплошности.

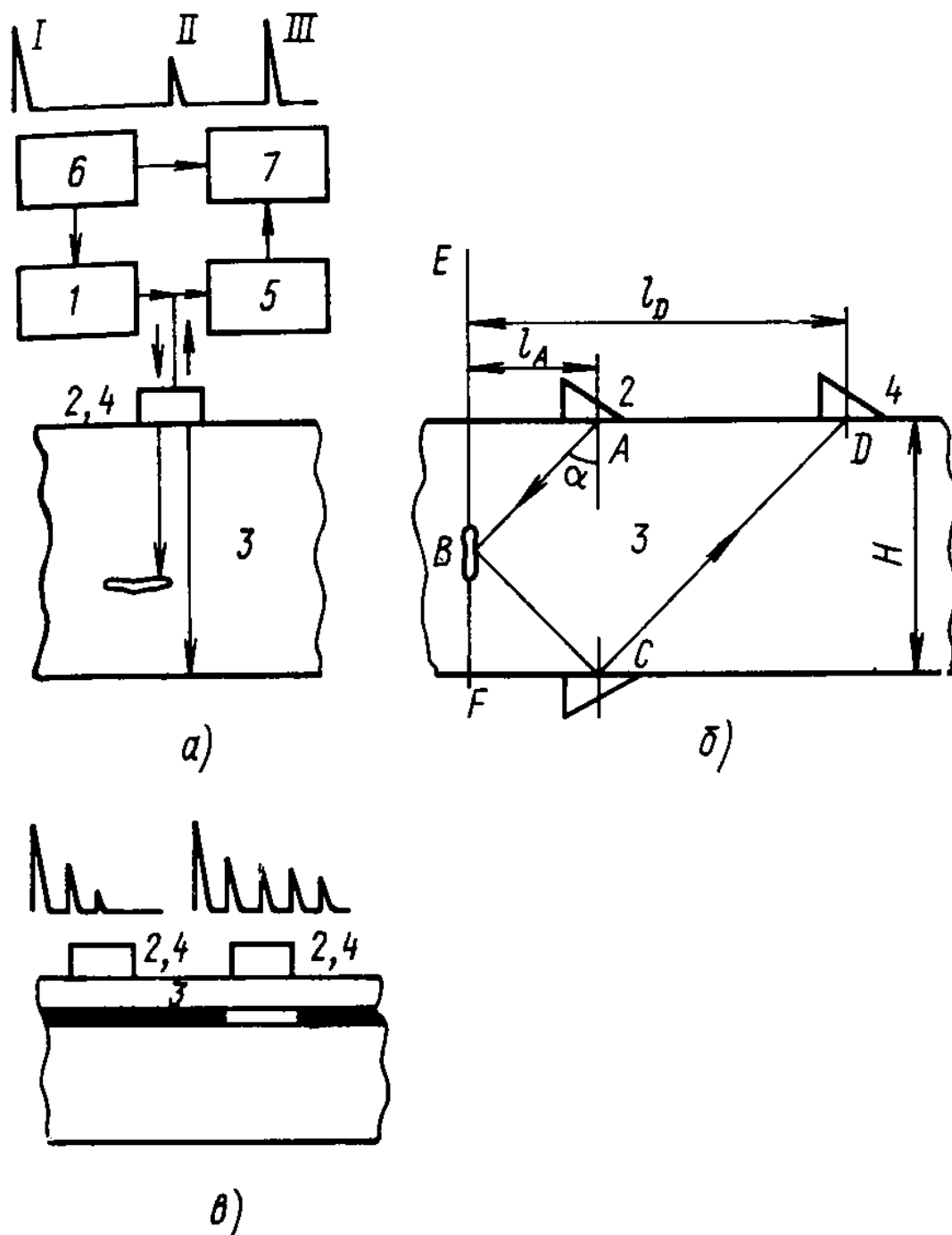


Рис. 5. Методы отражения: а – эхо,
 б – зеркальный эхометод, в – реверберационный:
 1 – генератор, 2 – излучатель, 3 – объект контроля, 4 – приемник,
 5 – усилитель, 6 – синхронизатор, 7 – генератор развертки

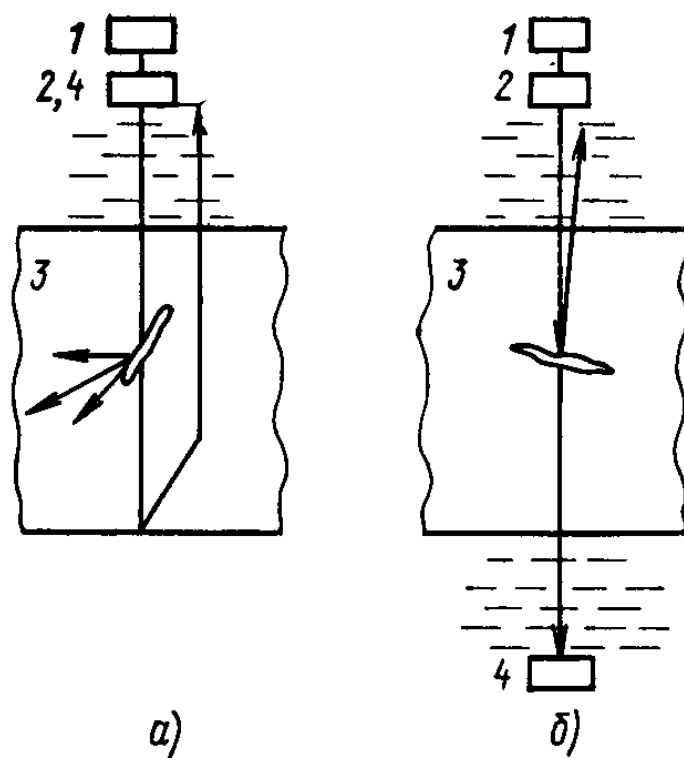


Рис. 6. Комбинированные методы:
а – зеркально-теневой, *б* – эхотеневой;
 1 – генератор, 2 – излучатель, 3 – объект контроля, 4 – приемник

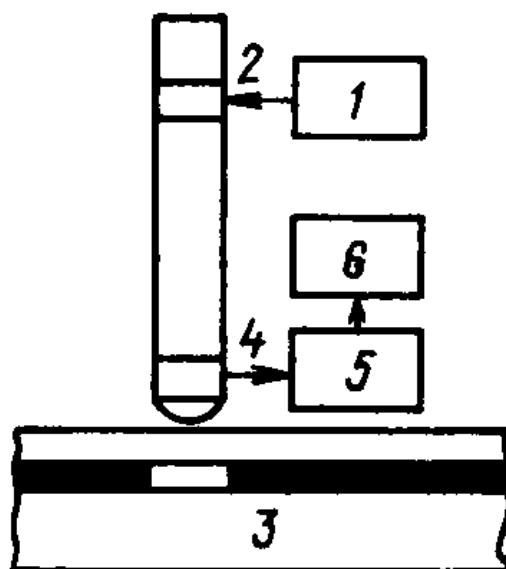


Рис. 7. Импедансный метод: 1 – генератор, 2 – излучатель,
 3 – объект контроля, 4 – приемник, 5 – усилитель, 6 – индикатор

В России в настоящее время разработан и изготавливается целый класс малогабаритных ультразвуковых приборов (дефектоскопов и толщиномеров). Это дефектоскопы УД2-70, А121М, А1220 и др., толщиномеры – А1207С, А1208, ТУЗ-1, ТДМ-1, ТДМ-2 и др.

Пассивные методы. К пассивным методам относят *акустико-эмиссионный метод, вибрационно-диагностический и шумо-диагностический.*

Явление акустической эмиссии состоит в излучении упругих волн материалом в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры (рис. 8). Движение дислокаций, зарождения и развития микротрещин, рост макротрещин, полиморфные превращения и др. сопровождаются акустической эмиссией.

Преобразователи, установленные на поверхности контролируемого изделия принимают упругие колебания и позволяют установить источник эмиссии, а при наличии нескольких преобразователей и при обработке, полученных от них сигналов можно определить расположение источника.

При использовании вибрационно-диагностического метода анализируют параметры вибраций контролируемой детали с помощью приемников контактного типа.

В шумо-диагностическом методе изучают спектр шумов работающего механизма в целом на слух или с помощью микрофонных и других приемников – анализаторов спектра.

По частотам все рассмотренные акустические методы делят на *низкочастотные и высокочастотные*. К первым относят методы с частотами до 100 кГц, ко второму – методы, использующие частотный спектр от нескольких сотен килогерц до 50 МГц, эти методы называют *ультразвуковыми*.

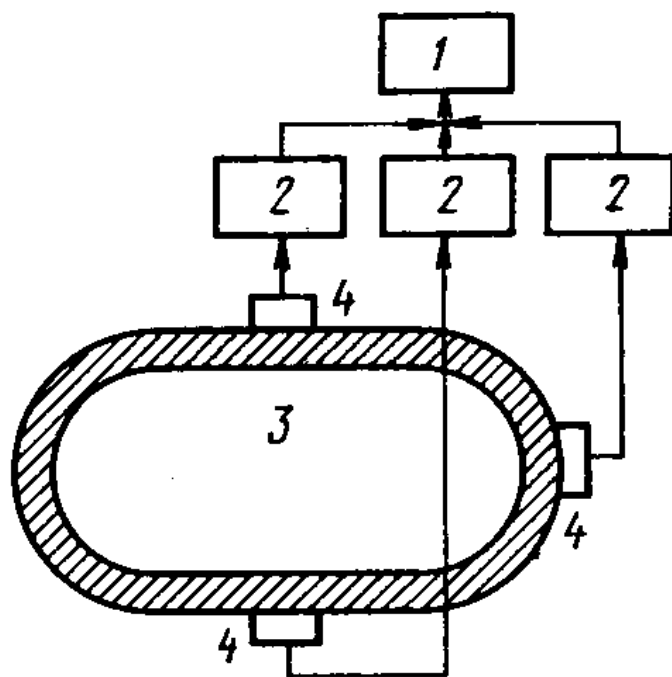


Рис. 8. Метод акустической эмиссии: 1 – блок обработки результатов, 2 – усилитель, 3 – объект контроля, 4 – приемник

Из всех рассмотренных методов наибольшее применение в практической деятельности нашел эхометод. Около 90 % объектов, проверяемых акустическими методами контролируют эхометодом. Его применяют при дефектоскопии сварных соединений, поковок, литья, неметаллических материалов. Этот метод используют при измерении геометрических параметров, времени прихода донного сигнала, и по известной скорости ультразвука определяют толщину металла при одностороннем доступе. Эхометод позволяет также определять физико-механические свойства материала. Другие методы используют в основном в качестве дополнительных к эхометоду для более полного обнаружения и исследования дефектов.

2.5. Магнитные методы контроля

Магнитными методами контролируют детали из ферромагнитных материалов. При этом выявляют поверхностные и подповерхностные дефекты типа трещин с раскрытием до 1 мкм, под-

резы, непровары в сварных соединениях и металлургические дефекты типа волосовин и др.

Магнитные методы дефектоскопии основаны на следующем принципе: магнитный поток, проходя в однородном металле детали, без резких изменений ее сечения не изменяется на границе перехода «деталь-воздух» (рис. 9, а). При наличии в контролируемом изделии несплошности, в зоне дефекта образуется участок с резкоменяющейся магнитной проницаемостью, вследствие чего происходит перераспределение магнитного потока. Часть потока при этом выходит на поверхность, образуя поле дефекта и создавая в месте дефекта на поверхности детали локальные магнитные полюсы.

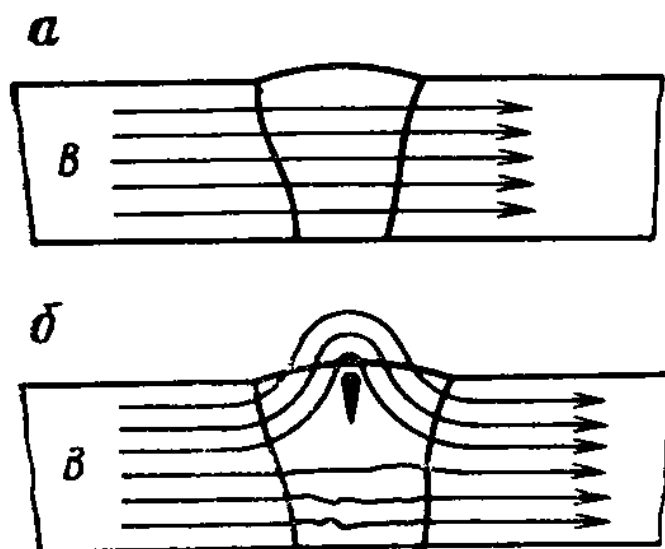


Рис.9. Распределение магнитного потока B по сечению качественного (а) и дефектного (б) сварных швов

При нарушении сплошности, в районе дефектного участка часть магнитного потока перераспределяется, а в бездефектной зоне первоначальный магнитный поток остается неизменным, к нему добавляется часть перераспределенного потока, который направляется по трем путям: через воздушные пути над дефектом, непосредственно через дефект и по металлу под дефектом (рис. 9, б).

Чем меньше дифференциальная магнитная проницаемость материала в рабочей точке на кривой намагниченности и больше

магнитное сопротивление дополнительному потоку под дефектом, тем меньшая часть этого дополнительного потока пройдет через металл в бездефектной части детали под дефектом и, следовательно, тем большая часть его пройдет через воздушные пути над дефектом.

То же самое происходит и с нормальной магнитной проницаемостью; чем меньше магнитная проницаемость материала изделия, тем больше его магнитное сопротивление и тем большая часть выйдет на поверхность изделия над дефектом. Для получения оптимального поля дефекта, контролируемое изделие должно иметь достаточно высокую индукцию.

В магнитопорошковой дефектоскопии для выявления дефектов применяют тонкий ферромагнитный порошок, частицы которого притягиваются полем дефекта, образуя видимый глазом валик порошка. Интенсивность оседания порошка зависит от величины поля дефекта, которая определяется магнитными характеристиками материала изделия и напряженностью намагничивающего поля.

Детали обычно намагничивают с помощью специальных приборов – дефектоскопов. Дефектоскопы, применяемые при МПД согласно ГОСТ 21105 делят на универсальные и специализированные. Как те, так и другие могут быть стационарными, передвижными или переносными.

В соответствии с ГОСТ 21105 в зависимости от магнитных свойств материалов, размеров и формы контролируемого изделия, а также оборудования, применяемого для намагничивания, применяют два способа контроля: способ приложенного магнитного поля и способ остаточной намагниченности.

При способе приложенного магнитного поля намагничивание начинается раньше или одновременно с моментом нанесения порошка или магнитной суспензии. Контроль способом остаточной намагниченности заключается в предварительном намагничивании изделия и последующем нанесении на него порошка либо суспензии. Оседание порошка происходит в зоне дефекта при отсутствии внешнего намагничивающего поля.

На результат МПД в значительной мере влияет состояние контролируемой поверхности. Чем грубее поверхность, тем хуже чувствительность.

2.6. Капиллярные методы

Одним из наиболее распространенных методов контроля качества сварных соединений является капиллярная дефектоскопия (КД).

КД предназначена для определения мест расположения поверхностных дефектов с открытой полостью, их направления, протяженности, характера развития.

Методы КД позволяют выявлять дефекты с раскрытием до одного микрона и с протяженностью, соизмеримой со средним размером зерна металла. КД основана на капиллярном проникновении индикаторных пенетрантов в полости поверхностных дефектов и регистрации индикаторного следа от дефекта тем либо иным способом. Пенетрант – специальное светоцветоконтрастное вещество.

Методы КД подразделяют на:

яркостный (ахроматический) метод проникающих растворов, применяемые материалы – керосин, проявитель, мел;

цветной (хроматический) метод проникающих растворов, материалы – пенетрант, образующий после проявления красный след;

люминесцентный, для выявления дефектов применяют специальные ультрафиолетовые установки и лампы;

люминесцентно-цветной метод, приборы и материалы – совместное применение материалов и оборудования для цветной и люминесцентной дефектоскопии;

капиллярно-электростатический метод, здесь используют электростатическую установку и пенетрант (ионогенная жидкость);

капиллярно-электроиндукционный метод, применяют электроиндукционную установку и электропроводящие жидкости или органические растворители;

капиллярно-магнитопорошковый метод, используют прибор МПД и пенетрант (ферромагнитный порошок);

капиллярно-радиационный метод поглощения, применяют источник радиационного излучения и пенетрант (оптически плотные жидкости);

капиллярно-радиационный метод контроля, приборы и материалы – источник радиационного излучения и радиоактивный пенетрант.

Капиллярная дефектоскопия основана на проникновении индикаторных пенетрантов в полости дефектов, сорбции и диффузии, яркостном и цветном контрастах дефектоскопических материалов.

Размеры дефектов, выявляемые методами КД так малы, что обнаружение их невооруженным взглядом практически невозможно. Дефект замечен только при наличии контраста между дефектом и фоном. Поэтому для обнаружения дефектов следует искусственно повысить контрастность дефектного и неповрежденного участков контролируемой поверхности.

Заполнение полостей дефектов специальными светоцветоконтрастными индикаторными веществами – пенетрантами – основная задача КД. Микроскопическое сечение и протяженность дефектов уподобляет их капиллярным сосудам, обладающим способностью всасывать смачивающие их жидкости под действием капиллярных сил.

Явления, обусловленные втягиванием смачивающихся жидкостей в капилляры или выталкиванием несмачивающихся жидкостей из капилляров, называются капиллярными явлениями.

На границе соприкосновения твердых тел с жидкостью наблюдаются явления смачивания, проявляющиеся в искривлении свободной поверхности жидкости около стенки дефекта (сосуда).

Сорбционные явления. Для отыскания дефекта необходимо возможно большее количество индикаторного пенетранта, находящегося в его микрополостях извлечь на поверхность подвергнутому контролю.

Извлечение и локализация пенетранта достигается вследствие *сорбционных* свойств проявителей пенетранта.

При использовании в качестве проявителя сухих порошков или суспензий на поверхности каждой частицы проявителя адсорбируются молекулы индикаторного пенетранта. При физической адсорбции молекулы индикаторного пенетранта сохраняют свое первоначальное строение, а при химической они образуют на поверхности частиц химическое соединение с веществом про-

явителя пенетранта. Схематическое изображение процесса КД представлено на рис. 10.

Чувствительность методов КД условно определяется наименьшими значениями ширины раскрытия, глубины длины надежно выявляемого дефекта по его индикаторному следу и зависит от свойств применяемых дефектоскопических материалов, качества и состояния поверхности.

Согласно ГОСТ 18442 в зависимости от минимальных размеров выявляемых дефектов, метода контроля, используемых дефектоскопических материалов и технологии контроля устанавливаются следующие условные классы чувствительности: I-IV и технологический.

Для каждого класса чувствительности установлены минимальные размеры дефектов в мкм: I – менее 1; II – от 1 до 10; III – от 10 до 100; IV – от 100 до 500; технологический не нормируется. Определяющим параметром при выборе класса чувствительности метода является ширина раскрытия дефекта. Глубина зародышевых трещин деформационного происхождения обычно оценивается в 10^{-3} мм.

Размер пор диффузионного происхождения такого же порядка. При слиянии микродефектов формируется макродефект, который и выявляется методом КД. Приведенные выше минимальные размеры дефектов и определяют границу необходимой чувствительности методов КД.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, методы, приборы и оборудование неразрушающего контроля качества сварных соединений.

На втором этапе студент самостоятельно составляет отчет, в котором освещает требования определенного раздела настоящих методических указаний.

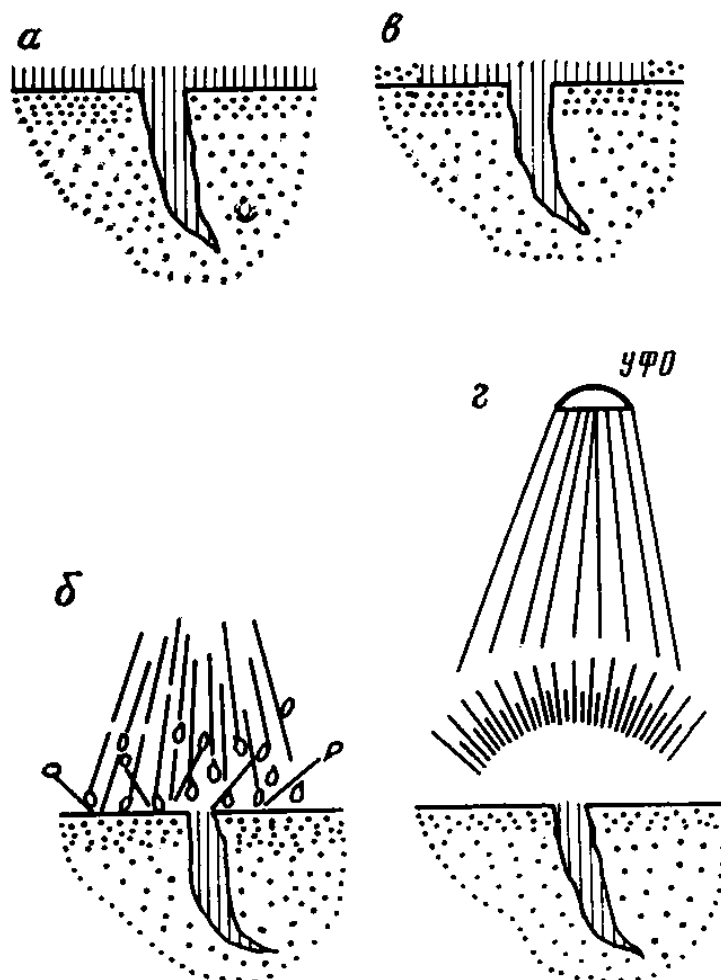


Рис. 10. Схематическое изображение процесса капиллярной дефектоскопии: *а* – нанесение и проникновение пенетрата в несплошности; *б* – удаление излишков пенетрата; *в* – нанесение проявляющей жидкости и проявление несплошностей при цветной дефектоскопии; *г* – проявление несплошностей ультрафиолетовым облучением (УФО) при люминесцентной дефектоскопии

4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по практическому занятию оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

1. Название и цель занятия.
2. Изложение заданного студенту раздела данных методических указаний.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем неразрушающий контроль отличается от разрушающего.
2. Какие существуют виды неразрушающего контроля.
3. Какие виды неразрушающего контроля наиболее широко применяются при контроле качества сварных соединений
- 4.. Какие приборы и оборудование применяются при проведении ВИК.
5. На каких стадиях работы с металлоизделиями проводится ВИК.
6. С какой целью выполняется ВИК при контроле качества сварных соединений.
7. Какой контроль называется визуально-оптическим.
8. Что такое эндоскоп.
9. Укажите главное достоинство радиационного метода контроля.
10. В чем заключается сущность радиационной дефектоскопии.
11. Опишите схему контроля сварных соединений методами радиационной дефектоскопии.
12. Какие приборы называются гамма-дефектоскопами.
13. Назовите источники рентгеновского излучения.
14. Что такое радиография.
15. Какие дефекты не выявляются радиографическим контролем.
16. Какие колебания называются акустическими.
17. Что такое мода.
18. Какие типы волн распространяются в твердых телах.
19. Что такое пьзоэффект.
20. В чем заключается разница между активными и пассивными методами акустического контроля.
21. В чем разница между акустическими методами прохождения и отражения.
22. Что такое импедансный метод НК.
23. В чем заключается сущность акустико-эмиссионного метода контроля.

24. На каких принципах основаны магнитные методы контроля.

25. Каким образом происходит распределение магнитного потока в дефектной зоне сварного соединения.

26. Какие дефекты можно выявить методом КД.

27. На какие методы подразделяется КД.

28. Что такое сорбционные явления.

6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практик. пособие/ И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; Под. ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высш. шк., 1991. – 283 с.

2. Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. – Москва: Металлургия, 1974. – 321 с.

3. Гурвич А. К; Ермолов Н. П. Ультразвуковой контроль сварных швов. – Киев: Техника, 1972. – 424 с.

4. Неразрушающие методы контроля сварных соединений / С. В. Румянцев, В. А. Добромислов, О. И. Борисов, Н. Т. Азаров. – Москва: Машиностроение, 1976. – 327 с.

5. Должанский П. Р. Контроль надежности металла объектов котлонадзора: Справочное пособие. – Москва: Недра, 1985. – 263 с.

6. Смирнов А. Н. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов. / А. Н. Смирнов, Б. Л. Герике, В. В. Муравьев – Новосибирск : Наука, 2003. – 244 с.

Лабораторная работа №5

ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение основ визуального и измерительного контроля, освоение методов выявления и измерения дефектов в сварных соединениях.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Визуальный и измерительный контроль (ВИК) сварных соединений (наплавов) выполняют до проведения неразрушающего контроля (НК) другими методами. С 2003 года для технических устройств опасных производственных объектов в России действует Инструкция по визуальному и измерительному контролю (РД 03-606-03). Визуальный и измерительный контроль материала (полуфабрикатов, заготовок, деталей) и сварных соединений проводят на следующих стадиях:

- входного контроля;
- изготовления деталей, сборочных единиц и изделий;
- подготовки деталей и сборочных единиц к сборке;
- подготовки деталей и сборочных единиц к сварке;
- сборки деталей и сборочных единиц под сварку;
- процесса сварки;
- контроля готовых сварных соединений и наплавов;
- исправления дефектных участков в материале и сварных соединениях (наплавках);
- оценки состояния материала и сварных соединений в процессе эксплуатации технических устройств и сооружений, в том числе по истечении установленного срока их эксплуатации.

2.1. Общие требования к проведению ВИК

Визуальный и измерительный контроль качества сварных соединений (наплавов) в процессе сварки (наплавки) и готового

сварного соединения (наплавки) выполняют с целью подтверждения их соответствия требованиям конструкторской документации, НТД, а также для выявления деформаций, поверхностных трещин, подрезов, прожогов, наплывов, кратеров, свищей, пор, раковин и других несплошностей и дефектов формы швов; проверки геометрических размеров сварных швов и допустимости деформаций, поверхностных несплошностей и дефектов формы сварных швов.

Визуальный и измерительный контроль проводят невооруженным глазом и (или) с применением визуально-оптических приборов до 20-кратного увеличения (луп, микроскопов, эндоскопов, зеркал и др.). При контроле материала и сварных соединений (наплавки) при изготовлении (строительстве, монтаже, ремонте и реконструкции) технических устройств и сооружений используют лупы с 2–7-кратным увеличением, а при оценке состояния технических устройств и сооружений в процессе их эксплуатации – лупы до 20-кратного увеличения.

Измерения проводят после визуального контроля или одновременно с ним. Измерения деталей, подготовленных под сварку, проводятся до их сборки.

Визуальный и измерительный контроль материалов и сварных соединений, подлежащих механической обработке, в том числе с удалением валика усиления шва, или деформированию, проводят до и после указанных операций.

При визуальном и измерительном контроле сварных соединений контролируемая зона должна включать в себя поверхность металла шва, а также примыкающие к нему участки материала в обе стороны от шва шириной:

не менее 5 мм – для стыковых соединений, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой, электроконтактной сваркой оплавлением, сваркой встык нагретым элементом при номинальной толщине сваренных деталей до 5 мм включительно;

не менее номинальной толщины стенки детали – для стыковых соединений, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой, электроконтактной сваркой оплавлением, сваркой встык нагретым элементом при номинальной толщине сваренных деталей свыше 5 до 20 мм;

не менее 20 мм – для стыковых соединений, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой, электроконтактной сваркой оплавлением, сваркой встык нагретым элементом при номинальной толщине сваренных деталей свыше 20 мм, а также для стыковых и угловых соединений, выполненных газовой сваркой, независимо от номинальной толщины стенки сваренных деталей и при ремонте дефектных участков в сварных соединениях;

не менее 5 мм (независимо от номинальной толщины сваренных деталей) – для угловых, тавровых, торцовых и нахлесточных сварных соединений и соединений вварки труб в трубные доски, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой;

не менее 50 мм (независимо от номинальной толщины сваренных деталей) – для сварных соединений, выполненных электрошлаковой сваркой.

Дефекты, выявленные при визуальном и измерительном контроле, должны быть устранены до выполнения последующей технологической операции или до приемки объекта контроля. Устранение выявленных дефектов должно выполняться в соответствии с требованиями НТД. Если дефекты, выявленные при визуальном и измерительном контроле, не препятствуют дальнейшему применению других видов (методов) неразрушающего контроля, эти дефекты могут быть устранены после завершения контроля другими видами (методами) контроля.

2.2. Квалификация персонала

Специалисты, осуществляющие визуальный и измерительный контроль, должны быть аттестованы в соответствии с Правилами аттестации персонала в области неразрушающего контроля (ПБ 03-440-02), утвержденными постановлением Госгортехнадзора России от 23.01.2002 № 3, зарегистрированным Минюстом России 17.04.2002, регистрационный № 3378.

2.3. Требования к средствам визуального и измерительного контроля

При визуальном и измерительном контроле применяют: лупы, в т. ч. измерительные; линейки измерительные металличе-

ские; угольники поверочные 90° лекальные; штангенциркули, штангенрейсмусы и штангенглубиномеры; щупы; угломеры с нониусом; стенкомеры и толщиномеры индикаторные; микрометры; нутромеры микрометрические и индикаторные; калибры; эндоскопы; шаблоны, в том числе специальные и универсальные (например, типа УШС), радиусные, резьбовые и др.; поверочные плиты; плоскопараллельные концевые меры длины с набором специальных принадлежностей; штриховые меры длины (стальные измерительные линейки, рулетки).

Допускается применение других средств визуального и измерительного контроля при условии наличия соответствующих инструкций, методик их применения.

Погрешность измерений при измерительном контроле не должна превышать величин, указанных в табл.1, если в рабочих чертежах не предусмотрены другие требования.

Таблица 1

Допустимая погрешность измерения
при измерительном контроле

Диапазон измеряемой величины, мм	Погрешность измерений, мм
До 0,5 вкл.	0,1
Свыше 0,5 до 1,0 вкл.	0,2
>> 1,0 >> 1,5 >>	0,3
>> 1,5 >> 2,5 >>	0,4
>> 2,5 >> 4,0 >>	0,5
>> 4,0 >> 6,0 >>	0,6
>> 6,0 >> 10,0 >>	0,8
>> 10,0	1,0

Для определения шероховатости и волнистости поверхности следует применять профилографы-профилометры, аттестованные образцы шероховатости (сравнения), а также другие средства измерения.

2.4. Подготовка мест производства работ

Участки контроля, особенно стационарные, рекомендуется располагать в наиболее освещенных местах цеха, имеющих естественное освещение. Для создания оптимального контраста дефекта с фоном в зоне контроля необходимо применять дополнительный переносной источник света, то есть использовать комбинированное освещение. Освещенность контролируемых поверхностей должна быть достаточной для надежного выявления дефектов, но не менее 500 Лк.

Для выполнения контроля должен быть обеспечен достаточный обзор для глаз специалиста. Подлежащая контролю поверхность должна рассматриваться под углом более 30° к плоскости объекта контроля и с расстояния до 600 мм (рис. 1).

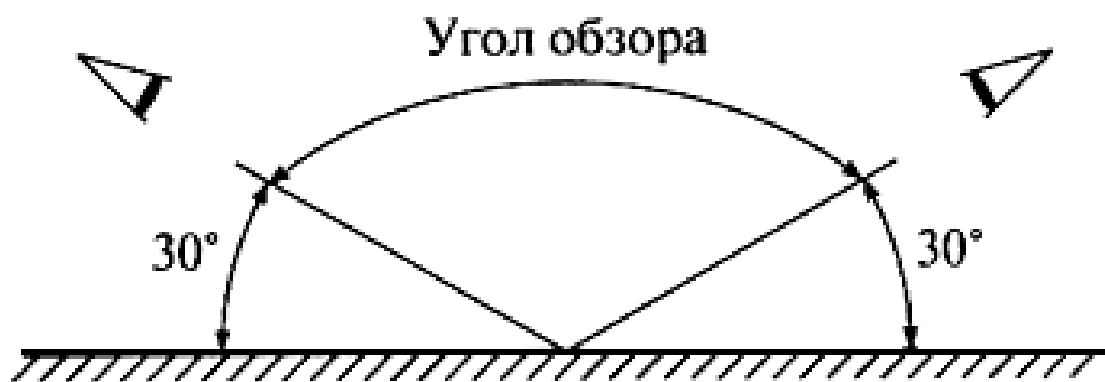


Рис. 1. Условия визуального контроля

2.5. Подготовка к контролю

Подготовка контролируемых поверхностей проводится подразделениями организации, выполняющей работы по визуальному и измерительному контролю, а в процессе эксплуатации технических устройств и сооружений – службами организации, которой принадлежит контролируемый объект.

Подготовка контролируемых поверхностей в обязанности специалиста по контролю не входит.

Перед проведением визуального и измерительного контроля поверхность объекта в зоне контроля подлежит зачистке до чи-

стого металла от ржавчины, окалины, грязи, краски, масла, влаги, шлака, брызг расплавленного металла, продуктов коррозии и других загрязнений, препятствующих проведению контроля (на контролируемых поверхностях допускается наличие цветов побежалости, в случаях, когда это оговорено в производственно-технической документации (ПТД). Зона зачистки должна определяться НД на вид работ или на изготовление изделия. Шероховатость зачищенных под контроль поверхностей деталей, сварных соединений, а также поверхность разделки кромок деталей (сборочных единиц, изделий), подготовленных под сварку, должна быть не более Ra 12,5 (Rz 80).

Шероховатость поверхностей изделий и сварных соединений для проведения последующих методов неразрушающего контроля зависит от метода контроля и должна быть не более:

Ra 3,2 (Rz 20) – при капиллярном контроле;

Ra 10 (Rz 63) – при магнитопорошковом контроле;

Ra 6,3 (Rz 40) – при ультразвуковом контроле.

2.6. Порядок визуального и измерительного контроля на стадии входного контроля

При входном визуальном контроле сварных труб с прямолинейным или спиральным швом, контролю подлежит не менее 10 % длины каждого шва. Контроль рекомендуется выполнять на участках, равномерно распределенных по длине шва трубы. Задачей контроля является выявление поверхностных трещин, пор, шлаковых и металлических включений, прожогов, свищей, наплывов металла, усадочных раковин, подрезов, грубой чешуйчатости шва, брызг расплавленного металла, непроваров, оплавление металла в результате зажигания сварочной дуги и прочих дефектов.

Измерительный контроль сварных швов выполняется на участках, проконтролированных визуально. Измерение размеров сварного шва выполняется на каждом участке, проконтролированном визуально, но не менее чем в трех сечениях по длине шва. Измерение размеров поверхностных дефектов выполняется в местах, отмеченных при визуальном контроле.

При входном контроле изделий, в том числе сварных и литых, визуально необходимо контролировать:

поверхности изделий снаружи и изнутри (при наличии доступа); кромки элементов, подлежащие сварке; сварные соединения.

Кромки литых деталей, поковок и штамповок, подлежащие сварке, визуально следует контролировать на участке шириной не менее 100 мм по всей длине.

Кромки элементов изделий (деталей), имеющих наплавку, должны подвергаться визуальному контролю по всему периметру. Ширина зоны контроля должна составлять $l+20$ мм, где l – ширина наплавки в мм. Контролю подлежит каждая кромка с наплавкой.

Визуальному контролю подлежит не менее 10 % длины сварных соединений, если другие требования не указаны в НД, ПТД или ПКД.

Визуальный контроль материала, кромок свариваемых элементов и сварных швов проводится с целью выявления коррозии на поверхности и поверхностных дефектов (трещин, расслоений, забоин, вмятин, раковин, пор, подрезов, грубой чешуйчатости, западаний между валиками шва, раковин, свищей, шлаковых включений и других несплошностей), вызванных технологией изготовления (условиями хранения) или транспортировкой, подтверждения наличия и правильности клеймения, а также соответствия формы (типа) разделки кромок, подлежащих сварке, требованиям рабочих чертежей и ТУ на изготовление.

Измерительный контроль проводится с целью измерения размеров сварных швов и поверхностных дефектов, выявленных при визуальном контроле, а также подтверждения соответствия основных размеров изделий (деталей, сборочных единиц) требованиям стандартов, ТУ и паспортов изделий. Измерительный контроль сварных швов выполняют через один метр по длине каждого контролируемого шва, но не менее чем в трех сечениях сварного шва.

2.7. Порядок выполнения визуального и измерительного контроля сварных соединений (наплавки)

Визуальный и измерительный контроль сварных соединений (наплавки) выполняется при производстве сварочных (наплавочных) работ и на стадии приемосдаточного контроля готовых сварных соединений. В случае если контролируется многослойное сварное соединение, визуальный контроль и регистрация его результатов могут проводиться после выполнения каждого слоя (послойный визуальный контроль в процессе сварки).

Послойный визуальный контроль в процессе сварки выполняется с целью выявления недопустимых поверхностных дефектов (трещин, пор, включений, прожогов, свищей, усадочных раковин, несплавлений, грубой чешуйчатости, западаний между валиками, наплывов) в каждом слое (валике) шва. Выявленные при контроле дефекты подлежат исправлению перед началом сварки последующего слоя (валика) шва. По требованию Заказчика или в соответствии с ПТД сварные соединения, выполненные с послойным визуальным контролем, подлежат дополнительно контролю капиллярной или магнитопорошковой дефектоскопией на доступных участках.

В выполненном сварном соединении визуально следует контролировать:

- отсутствие (наличие) поверхностных трещин всех видов и направлений;

- отсутствие (наличие) на поверхности сварных соединений дефектов (пор, включений, скоплений пор и включений, отслоений, прожогов, свищей, наплывов, усадочных раковин, подрезов, непроваров, брызг расплавленного металла, западаний между валиками, грубой чешуйчатости, а также мест касания сварочной дугой поверхности основного материала);

- качество зачистки металла в местах приварки временных технологических креплений, гребенок индуктора и бобышек крепления термоэлектрических преобразователей (термопар), а также отсутствие поверхностных дефектов в местах зачистки;

- качество зачистки поверхности сварного соединения изделия (сварного шва и прилегающих участков основного металла)

под последующий контроль неразрушающими методами (в случае, если такой контроль предусмотрен ПТД);

наличие маркировки (клеймения) шва и правильность ее выполнения.

В выполненном сварном соединении измерениями необходимо контролировать:

размеры поверхностных дефектов (поры, включения и др.), выявленных при визуальном контроле;

высоту и ширину шва, а также вогнутость и выпуклость обратной стороны шва в случае доступности обратной стороны шва для контроля;

высоту (глубину) углублений между валиками (западания межваликовые) и чешуйчатости поверхности шва;

подрезы (глубину и длину) основного металла;

отсутствие непроваров (за исключением конструктивных непроваров) с наружной и внутренней стороны шва;

размеры катета углового шва;

отсутствие переломов осей сваренных цилиндрических элементов.

Измеряемые параметры и требования к выполнению измерительного контроля сварных швов приведены на рис. 2 и в табл. 2.

Измерительный контроль геометрических размеров сварного соединения (конструктивных элементов сварных швов, геометрического положения осей или поверхностей сваренных деталей, углублений между валиками и чешуйчатости поверхности шва, выпуклости и вогнутости корня односторонних швов и т. д.) следует проводить в местах, указанных в рабочих чертежах, НД, ПТД или ПДК, а также в местах, где допустимость указанных показателей вызывает сомнения по результатам визуального контроля.

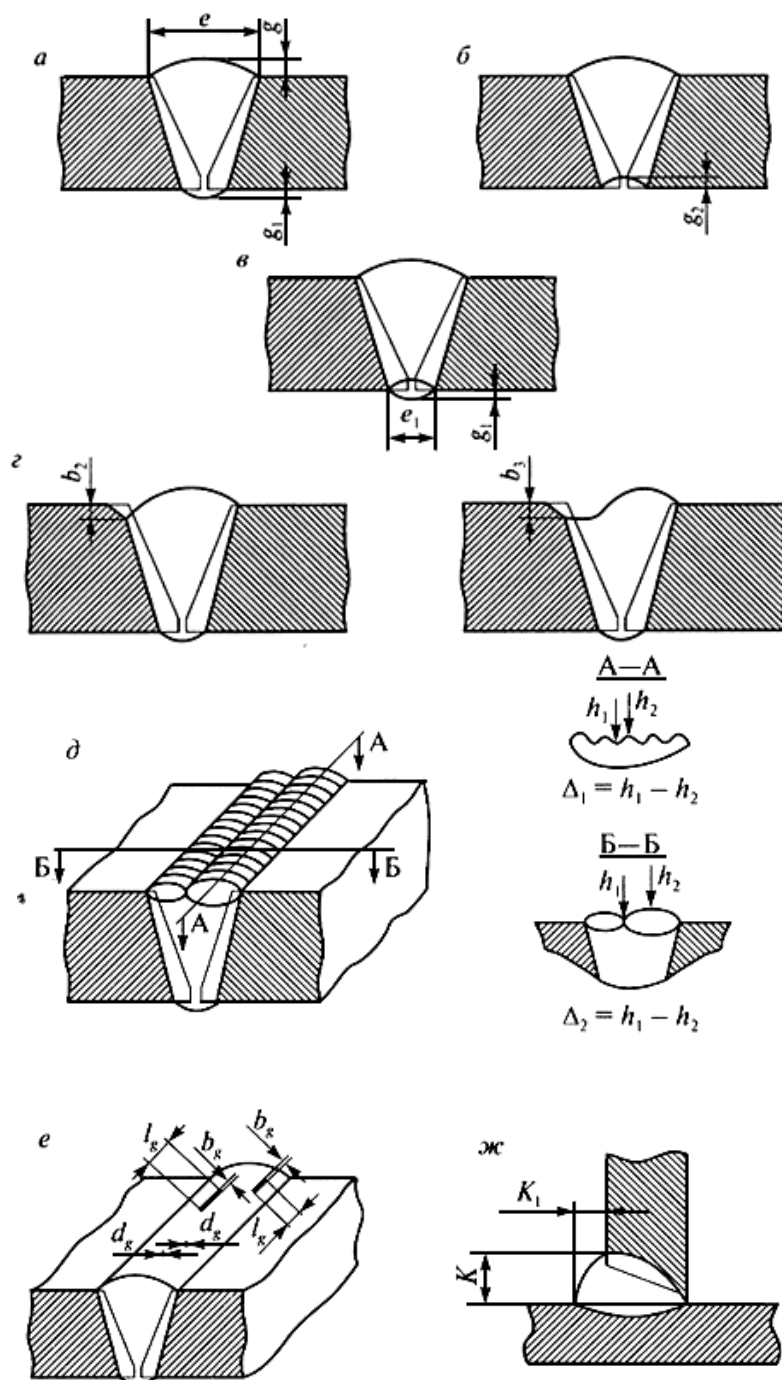


Рис. 2. Конструктивные элементы и дефекты сварного шва, подлежащие измерительному контролю (начало): а, б – размеры (ширина, высота) стыкового одностороннего шва с наружной и внутренней стороны; в – то же двухстороннего сварного шва; г – подрез и неполное заполнение разделки кромок; д – чешуйчатость (Δ_1) шва и западание между валиками шва (Δ_2); е – размеры поверхностных включений (диаметр – d_g ; длина – l_g ; ширина – b_g включения); ж – размеры катета шва углового (таврового, нахлесточного) соединения

Таблица 2

Требования к измерениям сварных швов

Контролируемый параметр	Условное обозначение (рис. 2)	Номер рисунка	Средства измерений. Требования к измерениям
1. Ширина шва	e, e_1	2, а, в	Штангенциркуль или шаблон универсальный
2. Высота шва	q, q_1	2, а, в	То же
3. Выпуклость обратной стороны шва	q_1	2, а, в	Штангенциркуль.
4. Вогнутость обратной стороны шва	q_2	2, б	Штангенциркуль, в том числе модернизированный. Измерения в 2-3 местах в зоне максимальной величины
5. Глубина подреза (неполного заполнения разделки)	b_2, b_3	2, г	Штангенциркуль, в том числе модернизированный. Приспособление для измерения глубины подрезов
6. Катет углового шва	K, K_1	2, ж	Штангенциркуль или шаблон.
7. Чешуйчатость шва	Δ_1	2, д	Штангенциркуль, в том числе модернизированный. Измерения не менее чем в 4 точках по длине шва
8. Глубина западин между валиками	Δ_2	2, д	То же
9. Размеры (диаметр, длина, ширина) одиночных несплошностей	d_g, l_g, b_g	2, е	Лупа измерительная. Измерению подлежит каждая несплошность

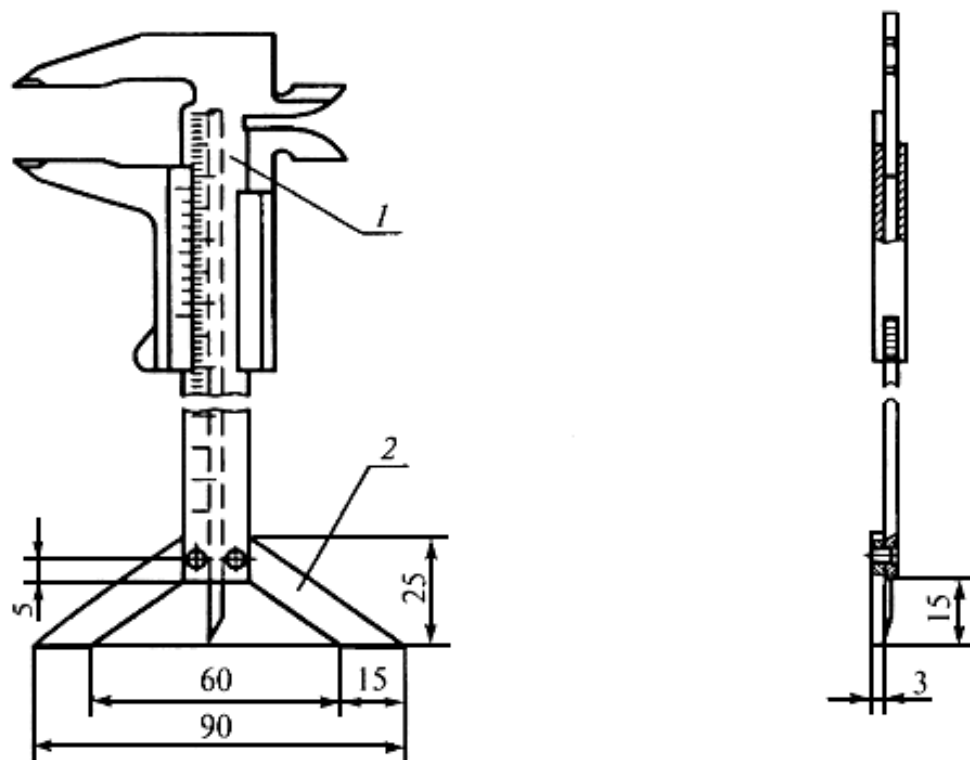


Рис. 3. Штангенциркуль типа ШЦ-1 с опорой
1 – штангенциркуль; 2 – опора

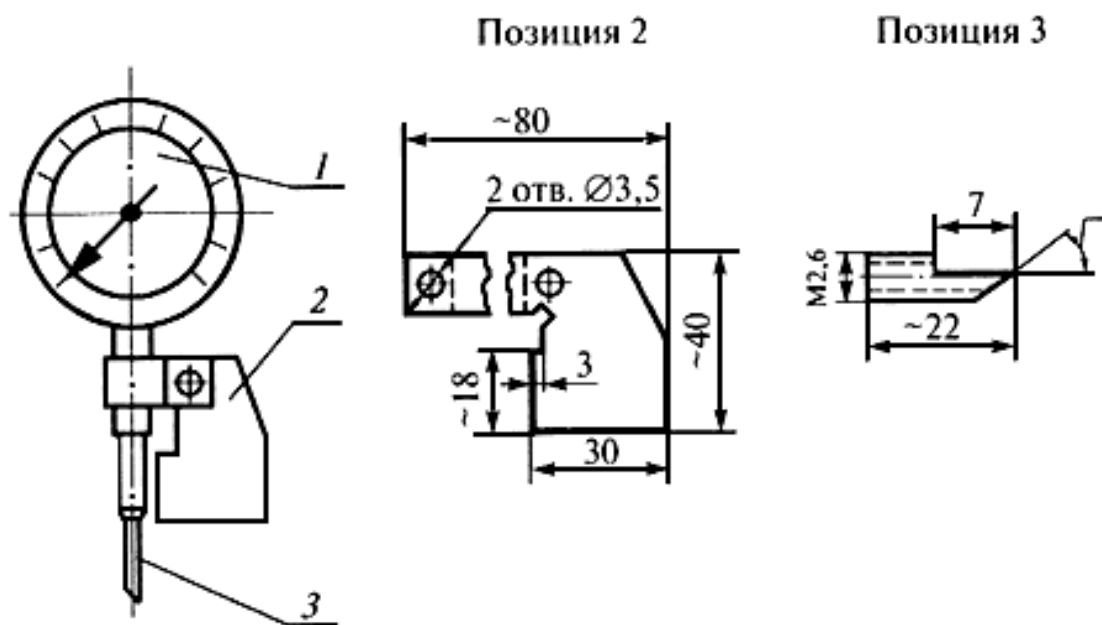


Рис. 4. Приспособление для измерения глубины подрезов:
1 – индикатор «0–10» с поворотной шкалой;
2 – опорный кронштейн; 3 – измерительная игла

При контроле стыковых сварных соединений труб наружным диаметром до 89 мм включительно с числом однотипных соединений более 50 на одном изделии допускается определение размеров шва выполнять на 10–20 % соединений в одном-двух сечениях, при условии, что при визуальном контроле, которому подвергают все соединения, нет сомнений в части отклонения размеров (ширина, высота) шва от допуска.

При контроле угловых швов сварных соединений катеты сварного шва измеряют с помощью специальных шаблонов. Определение размеров высоты, выпуклости и вогнутости углового шва выполняется расчетным путем и только в тех случаях, когда это требование предусмотрено конструкторской документацией. Измерение выпуклости, вогнутости и высоты углового шва проводится с помощью шаблонов, например шаблоном В. Э. Ушера-Маршака.

Измерение глубины западаний между валиками при условии, что высоты валиков отличаются друг от друга, выполняют относительно валика, имеющего меньшую высоту. Аналогично определяют и глубину чешуйчатости валика (по меньшей высоте двух соседних чешуек).

Выпуклость (вогнутость) стыкового шва оценивается по максимальной высоте (глубине) расположения поверхности шва от уровня расположения наружной поверхности деталей. В том случае, когда уровни поверхностей деталей одного типоразмера (диаметр, толщина) отличаются друг от друга, измерения следует проводить относительно уровня поверхности детали, расположенной выше уровня поверхности другой детали (рис. 5).

В том случае, когда выполняется сварка деталей с различной толщиной стенки и уровень поверхности одной детали превышает уровень поверхности второй детали, оценку выпуклости (вогнутости) поверхности шва выполняют относительно линии, соединяющей края поверхности шва в одном сечении (рис. 6).

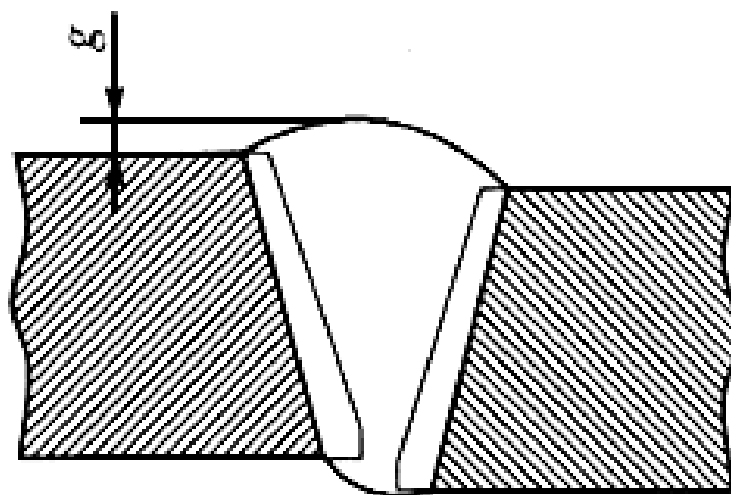


Рис. 5. Измерение выпуклости (вогнутости) стыкового шва (g) при различном уровне наружных поверхностей деталей, вызванном смещением при сборке соединения под сварку

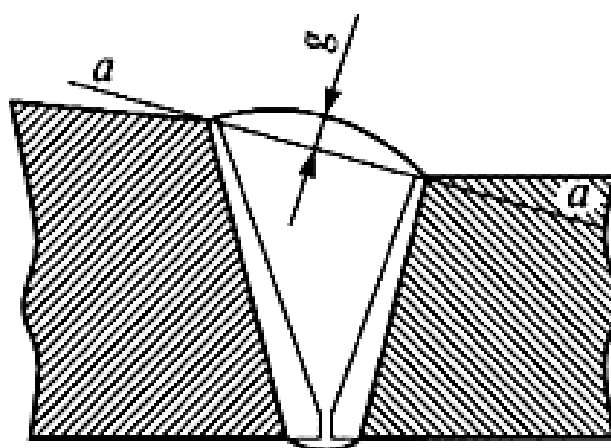


Рис. 6. Измерение выпуклости (вогнутости) стыкового шва (g) при различном уровне наружных поверхностей деталей, вызванном разницей в толщинах стенок

Выпуклость (вогнутость) углового шва оценивается по максимальной высоте (глубине) расположения поверхности шва от линии, соединяющей края поверхности шва в одном поперечном сечении (рис. 7).

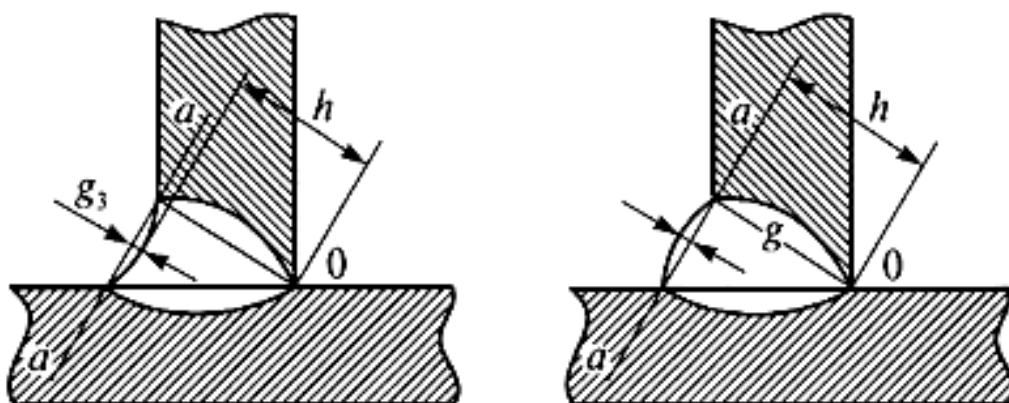


Рис.7. Измерение выпуклости (g) и вогнутости (g_3) наружной поверхности и высоты (h) углового шва

Размеры выпуклости (вогнутости) стыкового (рис. 6) и углового (рис. 7) швов определяются шаблонами, например, конструкции В. Э. Ушера-Маршака или специально для этой цели предназначенными специализированными шаблонами.

В том случае, когда уровни внутренних поверхностей разные, измерения выпуклости (вогнутости) корня шва следует проводить согласно рис. 8.

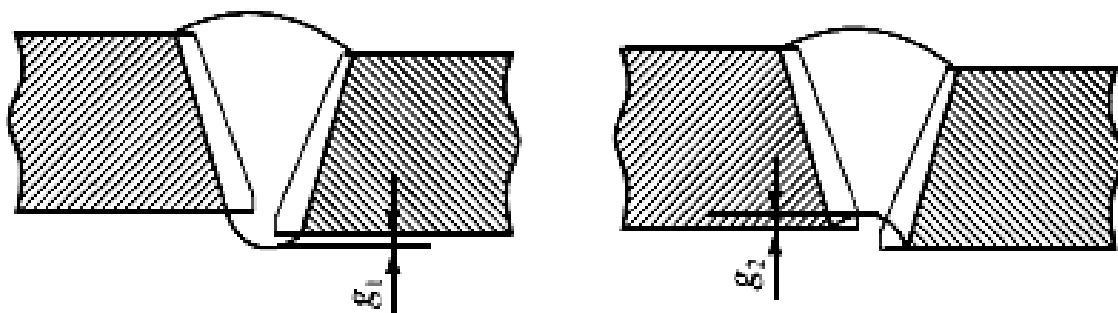
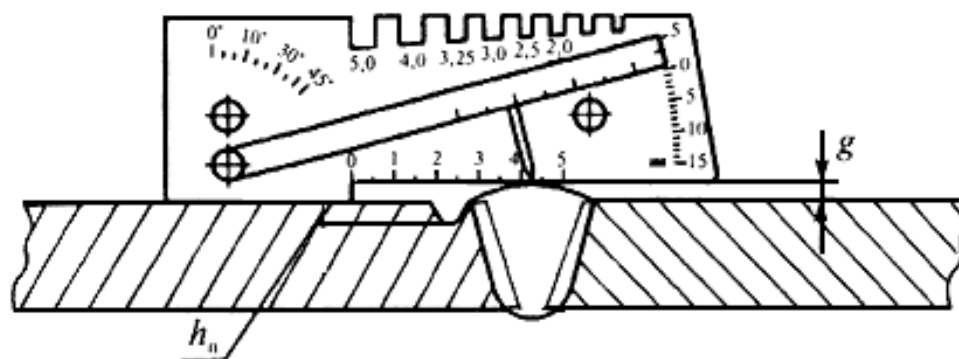
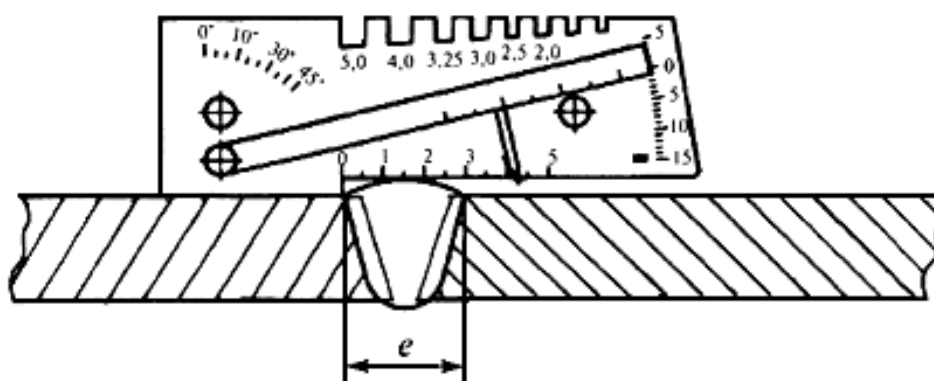


Рис. 8. Измерение выпуклости (g_1) и вогнутости (g_2) корня шва стыкового одностороннего шва

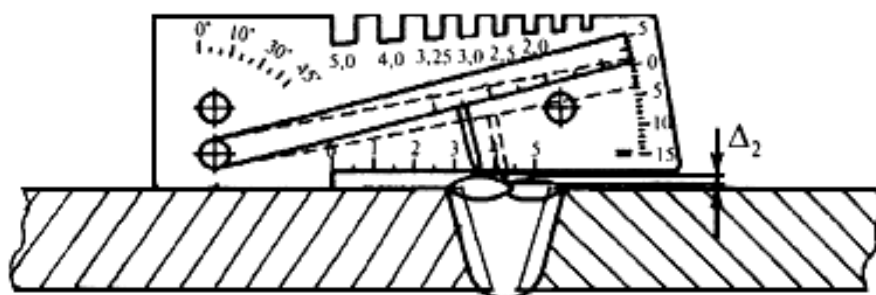
Измерения отдельных размеров сварного соединения с помощью универсального шаблона типа УШС приведены на рис. 9.



a



б



в

Рис.9. Измерения с помощью шаблона
УШС размеров сварного шва: *a* – измерение высоты шва (g)
и глубины подреза (h_{Π}); *б* – измерение ширины шва (e);
в – измерение западаний между валиками (Δ_2)

Измерения чешуйчатости и западаний между валиками шва,
глубины и высоты углублений (выпуклостей) в сварном шве

и металле разрешается определять по слепку, снятому с контролируемого участка. Для этого применяют пластилин, воск, гипс и другие материалы. Измерения проводят с помощью измерительной лупы или на микроскопе после разрезки слепка механическим путем.

2.8. Порядок выполнения визуального и измерительного контроля при устранении дефектов в материале и сварных соединениях (наплавках)

При ремонте дефектных участков визуально необходимо контролировать:

- полноту удаления дефекта, выявленного при визуальном контроле и контроле другими методами неразрушающего контроля;

- форму выборки дефектного участка; форму обработки кромок выборки; чистоту (отсутствие визуально наблюдаемых загрязнений, пыли, продуктов коррозии, масла и т. п.) поверхности выборки и прилегающих к ней поверхностей;

- ширину зоны зачистки механическим путем поверхностей материала, прилегающих к кромкам выборки;

- отсутствие (наличие) дефектов (трещин, пор, включений, скоплений пор и включений, свищей, прожогов, наплывов, усадочных раковин, подрезов, непроваров, брызг расплавленного металла, западаний между валиками, грубой чешуйчатости и т. п.) на поверхности шва заварки выборки и на прилегающих к выборке участках материала.

При ремонте дефектных участков в материале и сварных соединениях измерением необходимо контролировать:

- размеры выборки дефектного участка;

- размеры разделки кромок выборки (угол скоса, радиусы начала и окончания выборки, толщину перемычки металла при исправлении трещин и т. п.);

- ширину зоны зачистки механическим путем участков материала, прилегающих к кромкам выборки;

- размеры дефектов на поверхности шва заварки выборки и прилегающих к нему участках материала, выявленные при визуальном контроле;

шероховатость поверхностей выборки и прилегающих участков материала в зоне их зачистки (перед заваркой выборки), а также поверхностей материала перед проведением последующих методов неразрушающего контроля.

2.9. Оценка результатов контроля

Оценку качества материала изготовленных деталей, подготовки кромок деталей, сборки деталей под сварку, выполненного сварного соединения (наплавки) и конструкций в целом, швов заварки дефектных участков по результатам визуального и измерительного контроля проводят по нормам, согласованным с Госгортехнадзором России.

2.10. Регистрация результатов контроля

Результаты визуального и измерительного контроля на стадиях входного контроля материала и производства работ по изготовлению, монтажу, ремонту (подготовка деталей, сборка деталей под сварку, сварные соединения (наплавки), исправление дефектов) технических устройств и сооружений, а также в процессе эксплуатации технических устройств и сооружений фиксируются в учетной (журнал учета работ по визуальному и измерительному контролю) и отчетной (акты, заключения, протоколы) документации.

В случаях, предусмотренных технологической документацией, на поверхности проконтролированных материалов (полуфабрикатов, заготовок, деталей) и готовых сварных соединений (наплавки) контролером по завершении каждого этапа работ по визуальному и измерительному контролю ставится клеймо, подтверждающее положительные результаты контроля.

2.11. Требования безопасности

Перед допуском к проведению контроля все лица, участвующие в его выполнении, должны пройти соответствующий инструктаж по технике безопасности с регистрацией в специальном журнале.

Инструктаж следует проводить периодически в сроки, установленные приказом по организации.

2.12. Требования к содержанию Технологической карты визуального и измерительного контроля

Технологическая карта визуального и измерительного контроля должна содержать следующие сведения:

1. Наименование организации и службы, выполняющей визуальный и измерительный контроль.
2. Шифр карты.
3. Наименование контролируемого изделия (группы однотипных изделий) с указанием стандарта или ТУ на изготовление (монтаж, ремонт).
4. Наименование стадии контроля: входной контроль полуфабрикатов, контроль подготовки деталей под сборку, контроль сборки деталей под сварку, контроль готовых сварных соединений (наплавки), контроль устранения дефектов, контроль при эксплуатации.
5. Требования к установке объекта контроля в требуемое положение (если это возможно) и к введению объекта в режим контроля (освещенность объекта).
6. Порядок подготовки объекта контроля к проведению контроля.
7. Последовательность операций контроля.
8. Перечень контролируемых параметров с указанием нормативных значений при измерительном контроле.

Примечание. При разработке карты следует руководствоваться указаниями Инструкции по ВИК, а также требованиями НД, регламентирующей требования к визуальному и измерительному контролю, в том числе нормами оценки качества и конструкторской документации на изделие (сварное соединение или наплавку).

2.13. Размерные показатели для норм оценки качества по результатам визуального и измерительного контроля

2.13.1. Нормы оценки качества принимают по следующим размерным показателям:

номинальной толщине сваренных деталей – для стыковых соединений деталей одинаковой толщины (при предварительной обработке концов деталей путем расточки, раздачи, калибровки – по номинальной толщине деталей в зоне обработки);

номинальной толщине более тонкой детали (из двух сваренных) – для стыковых сварных соединений деталей различной номинальной толщины (при предварительной обработке конца более тонкой детали – по ее номинальной толщине в зоне обработки);

расчетной высоте углового шва – для угловых, тавровых и нахлесточных сварных соединений (для угловых и тавровых сварных соединений с полным проплавлением за размерный показатель допускается принимать номинальную толщину более тонкой детали);

удвоенной номинальной толщине более тонкой детали (из двух сваренных) – для торцевых сварных соединений (кроме соединений вварки труб в трубные доски).

2.13.2. Протяженность (длина, периметр) сварных соединений определяется по наружной поверхности сваренных деталей у краев шва (для соединений штуцеров, а также угловых и тавровых соединений по наружной поверхности привариваемой детали у края углового шва).

2.13.3. Число одиночных включений, выявляемых при визуальном контроле, не должно превышать значений, указанных в НД на любом участке сварного соединения, длина которого регламентируется в НД. Для сварных соединений меньшей протяженности допустимое число одиночных включений уменьшают пропорционально уменьшению протяженности контролируемого соединения. Если при этом получается дробная величина, то она округляется до ближайшего целого числа.

2.13.4. Требования к числу одиночных включений для наплавленных поверхностей определяются согласно требованиям НД.

2.13.5. В сварных соединениях при визуальном и измерительном контроле не допускаются дефекты, превышающие установленные размеры.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, методы, приборы и оборудование для проведения Визуального и измерительного контроля качества сварных соединений.

На втором этапе студент составляет отчет, в котором освещает требования определенного раздела настоящих методических указаний и самостоятельно проводит визуальный и измерительный контроль реального сварного соединения с применением шаблонов.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по практическому занятию оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

1. Название и цель занятия.
2. Изложение заданного студенту раздела данных методических указаний и результаты визуального и измерительного контроля реального сварного соединения.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. С какой целью выполняется ВИК при контроле качества сварных соединений.
2. Какие приборы и оборудование применяются при проведении ВИК
3. На каких стадиях работы с металлоизделиями проводится ВИК.
4. Какой контроль называется визуально-оптическим.
5. Что такое эндоскоп.
6. Какими приборами определяют шероховатость поверхности металла.

7. Какая принята максимальная допустимая погрешность измерения при измерительном контроле.

8. Какие существуют требования к подготовке мест производства работ по ВИК.

9. Какие существуют требования к поверхности металлоизделия перед проведением ВИК.

10. Назовите задачи ВИК при входном контроле.

11. С какой целью проводится ВИК кромок стыкуемых элементов под сварку.

12. Что требуется визуально контролировать в сварном соединении.

13. Какие измерения необходимо проводить при контроле сварного соединения.

14. Каким прибором измеряют чешуйчатость сварного соединения.

15. Каким прибором измеряют выпуклость, вогнутость и высоту углового шва.

16. Какие виды дефектов разрешается определять по слепку.

17. Какие работы необходимо выполнять при визуальном контроле ремонтируемых участков сварных соединений.

18. Какие измерения необходимо проводить при ремонте дефектных участков в материале и сварных соединениях измерениями.

19. Каким образом проводится оценка результатов ВИК.

20. Назовите требования техники безопасности при проведении ВИК.

21. По каким показателям принимаются нормы оценки качества ВИК.

6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

11. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практическое пособие/ И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высш. шк., 1991. – 283 с.

2. РД 03–606–03 «Инструкция по визуальному и измерительному контролю» – Москва: НТЦ «Промышленная безопасность», 2003. – 68 с.

3. Гурвич А. К. Ультразвуковой контроль сварных швов. / А. К. Гурвич, Н. П. Ермолов. – Киев: Техника, 1998. – 424 с.

4. Неразрушающие методы контроля сварных соединений / С. В. Румянцев, В. А. Добромыслов, О. И. Борисов, Н. Т. Азаров. – Москва: Машиностроение, 1976. – 327 с.

5. Должанский П. Р. Контроль надежности металла объектов котлонадзора: Справочное пособие. – Москва: Недра, 1985. – 263 с.

6. Смирнов А. Н. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов. / А. Н. Смирнов, Б. Л. Герике, В. В. Муравьев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 244 с.

АКТ N ____ от _____
визуального и измерительного контроля

1. В соответствии с наряд-заказом (заяв-
кой) _____

(номер)

выполнен _____

(указать вид контроля (визуальный, измерительный)

контроль _____

(наименование и размеры контролируемого объекта,

шифр документации, ТУ, чертежа, плавка (партия), номер объекта контроля)

Контроль выполнен согласно _____

наименование и (или) шифр

технической документации

2. При контроле выявлены следующие дефек-
ты _____

характеристика

дефектов (форма, размеры, расположение и (или) ориентация

для конкретных объектов)

3. Заключение по результатам визуального и измерительного кон-
троля _____

Контроль выполнил _____

(уровень квалификации, N квалификационного удостоверения)

(фамилия, инициалы, подпись)

Руководитель работ по визуальному
и измерительному контролю _____

(фамилия, инициалы, подпись)

АКТ N _____ от _____
визуального и (или) измерительного контроля качества
сварных швов в процессе сварки соединения

(наименование изделия и номер соединения)

1. Настоящим актом удостоверяется факт выполнения сварщиком

(Ф.И.О., клеймо)

_____ соединения _____ (см. сварочный формуляр),
(тип (типы) соединений)

выполненного _____

(указать способ сварки и положение)

в соответствии с требованиями технологии сварки _____

(указать шифр технологии)

и недоступного для контроля _____

(указать способ контроля, предписанный

конструкторской документацией)

2. При послойном визуальном и измерительном контроле с оценкой качества по нормам _____ для категории _____

(шифр или наименование НД)

установлено, что сварное соединение признано годным и соответствует требованиям _____

(указать НД или конструкторскую документацию)

Контроль выполнен:

(уровень квалификации, N квалификационного удостоверения)

(фамилия, инициалы, подпись)

Руководитель работ
по визуальному и измерительному
контролю _____

(фамилия, инициалы, подпись)

Примечание. Акт составляется на каждую сварную конструкцию (соединение или группу соединений), подвергнутую контролю в процессе сварки.

Лабораторная работа №6

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение основ метода акустической эмиссии (АЭ) для оценки надежности сварных соединений

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В последнее время в технической диагностике все более широко используют АЭ технику и приборы. Это связано с весьма существенными преимуществами метода АЭ перед другими методами при анализе состояния материалов сварных конструкций. К таким преимуществам относится, прежде всего, возможность стопроцентного контроля всего объема материала конструкции, диагностирования конструкций без остановки производства, исключения громоздких гидроиспытаний с заменой их пневмоиспытаниями. Большое значение приобретает возможность использования диагностической аппаратуры на основе АЭ для управления процессом производства в предаварийной и аварийной ситуациях, что позволяет своевременно принимать меры по предупреждению аварий, обеспечивая эксплуатацию конструкций по фактическому состоянию.

Технология обеспечения безопасной эксплуатации конструкций на основе АЭ. Проблема обеспечения безопасности эксплуатации конструкций в настоящее время успешно решается учеными и специалистами в разных странах. Основными направлениями этих работ можно считать следующие:

теоретические и экспериментальные исследования разрушения материалов конструкций и сопутствующих ему явлений – носителей информации о процессах, протекающих в материалах при разрушении;

теория и технология контроля, распознающие критические этапы разрушения материалов на основе расчета или дискриминации характерных ситуаций процесса разрушения;

программное обеспечение и аппаратура, реализующие технологию контроля и включающие рабочие программы организации

движения, обработки и сжатия поступающей информации, алгоритмы распознавания протекающих в материале при его разрушении процессов на основе математической статистики, теории вероятности, теории прогнозирования и принятия решений;

сертификация создаваемых методик и контрольного оборудования, обучение персонала, выполняющего работы по контролю состояния материалов конструкций;

разработка и выпуск стандартов, методик, инструкций и других нормативных и методических материалов, необходимых для технологии и аппаратуры на промышленных объектах.

На рис. 1 представлена схема технологии обеспечения безопасности эксплуатации конструкций на основе вектора состояния материала (BSM),



Рис. 1. Блок-схема технологии контроля на основе BSM

указанного в качестве основного блока данной схемы. В состав схемы технологии входит не только измерительная аппаратура с необходимым программным обеспечением, но и блоки метрологии метода и аппаратуры, блок нормативной документации, необходимой для работы контрольного оборудования на производстве, блок подготовки персонала и блок сервисного обслуживания и консультаций по применению.

Работы по каждому из представленных пяти направлений должны быть увязаны друг с другом. Это достаточно очевидно, так как следует предлагать теорию и алгоритмы прогноза разрушения,

которые могут быть реализованы современной измерительной и вычислительной техникой. Хорошо известны их возможности, можно примерно представить их развитие в ближайшем будущем. Зная это, следует увязывать взаимные возможности теории и аппаратуры, с тем, чтобы теоретики не требовали невозможного от аппаратуры и вычислительной математики, а конструкторы аппаратуры не требовали того же от теоретиков. Таким образом, требуется гибкая система работы в указанных направлениях. Остановимся на проблемах АЭ диагностики более подробно.

Проблемы и подходы к обеспечению эффективности АЭ диагностики. Одним из основных вопросов АЭ диагностики является вопрос анализа упругих волн, возникающих при деформировании материалов конструкций. Эта задача решалась многими специалистами в течение длительного периода времени.

Прежде всего следует отметить Yih-Hsing Pao и Ralph R. Gajewski, которые предложили так называемую обобщенную лучевую теорию расчета распространения упругой волны в твердых телах. Согласно этой теории упругие волны, распространяющиеся по различным траекториям вследствие многократных отражений и преломлений, представляются в виде интегралов по лучу, каждый из которых может быть точно вычислен методом Канъярда, разработанным в 1939 г. Авторы анализируют основные уравнения и применяют их для решения конкретных задач. Решение не удалось получить в замкнутой аналитической форме, поэтому оно представлено в виде численного алгоритма, описывающего распространение выбранного луча при действии точечного источника.

Как отмечают Yih-Hsing Pao и Ralph R. Gajewski, предложенная теория ранее применялась для геофизических задач, и приспособлена ими для металлических пластин. В частности, они отмечали, что акустические сигналы, возникающие в процессе **роста** дефектов в твердых телах, незначительно отличаются от сейсмических волн или волн, распространяющихся под водой в результате взрыва. Проследивая траектории отраженных и преломленных лучей, теория обобщенного луча дает возможность анализа сигналов, возникших в пластине от действия точечного источника излучения.

В качестве существенного недостатка следует отметить сложность теории и громоздкость алгоритма решения. При выполнении расчетов необходимо выбирать необходимый путь распространения волны и путем суммирования отдельных составляющих движе-

ния волны с учетом отражений и переотражений от стенок пластины получить окончательное решение. Движение по лучу осуществляется путем интегрирования дифференциальных уравнений с использованием интегральных преобразований. Не будем останавливаться на этой теории. Трудностью реализации решения во многом объясняется тот факт, что количество решенных задач исчисляется единицами. В то время не существовало необходимых для решения таких задач вычислительных средств и многое приходилось выполнять практически вручную. Однако работы развивались и далее. Так, в 1979 г. выходит следующая работа тех же авторов с присоединившимся к ним Ahmet N. Ceranoglu. Тем не менее, существенных изменений теория не претерпела, появились только несколько новых решений. Интересные работы по изучению распространения акустических волн применительно к методологии АЭ были проделаны группой специалистов Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины во главе с проф. А. Е. Андрейкивым. Аналитические исследования, выполненные А. Е. Андрейкивым и Н. В. Лысаком, касались образования трещины. Авторы, в частности, показали, что в этот момент излучение АЭ колебаний осуществляется направленно.

Появление современной мощной вычислительной техники позволило по-новому рассмотреть проблему анализа процессов, возникающих при излучении источника в любой локальной области пластины. Оказалось возможным привязать точечный источник излучения упругих колебаний не только к процессам разрушения, когда двигаются и сосредотачиваются в определенной микроне скопления дислокаций, но и к процессам распространения трещины, привязав точечный источник излучения к вершине движущейся трещины. Полученные результаты позволили достаточно простым способом проанализировать волновые процессы, протекающие на поверхности пластин при действии точечного возбудителя, расположенного на различной глубине по толщине пластины. Результаты расчета дали возможность проследить амплитудно-частотные спектры, зарегистрированные контролирующим оборудованием после прохождения акустического сигнала через приемник, имеющий определенный пропускающий спектр. *Другими словами, благодаря расчетам, проделанным на основании разработанной теории, появилась возможность обратного перехода к исходному сигналу, а значит и возможность энергетической оценки происходящего из-*

менения в структуре материала в местах возникновения этого сигнала.

На рис. 2 представлены спектры АЭ сигналов, полученные аналитическим путем в трубе большого диаметра с толщиной стенки 1 см. Видно, что в зависимости от спектральной характеристики преобразователя на поверхности пластины в прибор поступают сигналы (правый график), существенно отличающиеся от тех, которые были генерированы источником излучения (левый график). На рисунке показаны дополнительные источники информации (температура, деформации, внутреннее давление в трубе), необходимые для прогнозирования разрушающей нагрузки и остаточного ресурса трубы на основе ВСМ технологии.

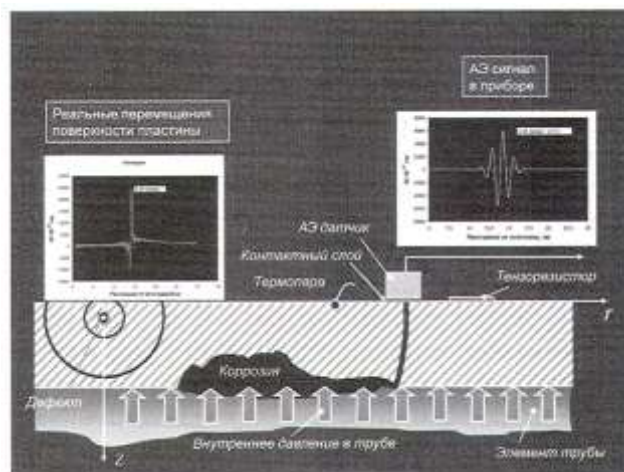


Рис. 2. Распространение упругой волны в трубе большого диаметра от источника на глубине 0,2 см от поверхности



Рис. 4. Система АЭ диагностики ЕМА-ЗУ

Данную работу выполняли с использованием АЭ диагностической системы ЕМА-3У, прогнозирующей разрушающую нагрузку и остаточный ресурс эксплуатирующего материала (рис. 4). На рисунке показан основной 32-канальный блок (16 акустических каналов и 16 низкочастотных для измерения дополнительных параметров анализа), ноутбук и персональный компьютер с разной мощностью обработки всей поступающей информации, АЭ датчики и промежуточные усилители. Кабельное хозяйство размещается в специальных катушках. Отличительной особенностью данной АЭ системы является удаление измерительных АЭ датчиков от промежуточных усилителей на расстояние до 100 м. Разработан и реализован в промышленности стационарный вариант системы технической диагностики ЕМА-3С (рис. 5). Так же, как и ЕМА-3У стационарная система прогнозирует разрушающую нагрузку и остаточный ресурс. С целью реализации разработанной на основе проведенных исследований технологии оценки состояния материалов конструкций, прогнозирования их остаточного ресурса разработаны необходимые нормативные документы, последний из которых регламентирует применение технологии к трубопроводам и оборудованию химических и нефтехимических производств.

Отметим, что, начиная с середины 1990-х годов, все большее внимание уделяется непрерывному мониторингу ответственных объектов, разрушение которых может привести к серьезным экологическим потерям. Так, для резервуаров нефтехранилищ со степенью ответственности по I классу стандарт ВБН В.2.2-58.2-94 рекомендует непрерывный мониторинг. При этом рекомендуемый ВБН мониторинг предполагает прогнозирование надежности резервуара с определением остаточного ресурса его работы в текущий период эксплуатации (краткосрочный) и вероятность безотказной работы в течение заданного периода его последующей эксплуатации (долгосрочный прогноз).

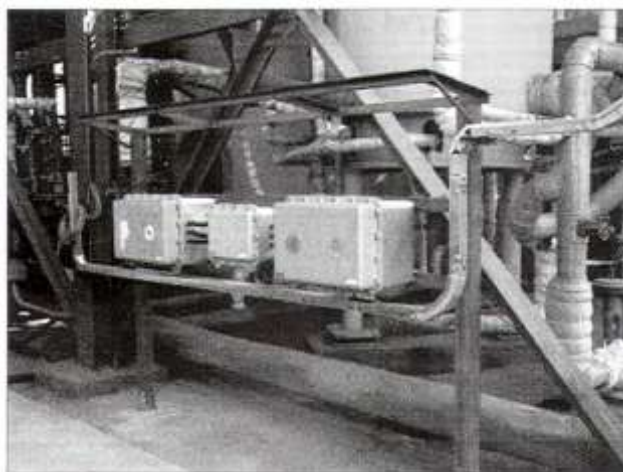


Рис. 5. Стационарный вариант системы непрерывного мониторинга ЕМА-ЗС

Построение таких систем представляет собой сложную научно-техническую и инженерную задачу, требующую сочетания последних достижений в области технической диагностики, измерительной техники, компьютерных технологий и науки о прочности материалов с требованиями к технологии оценки состояния конструкций и его прогнозирования на заданный расчетный промежуток времени.

Необходимо отметить, что, используя исследования, создана система непрерывного мониторинга материалов конструкций на основе АЭ ЕМА-ЗМ¹. Первая часть этой системы ЕМА-ЗС (стационарная система непрерывного мониторинга) изготовлена по заказу Одесского припортового завода и введена в штатную эксплуатацию в марте 2003 г. для непрерывного контроля хранилищ жидкого аммиака объемом 34 тыс. м (диаметр хранилища 52 м, высота 21 м). Сейчас на заводе постоянно функционируют 6 таких систем. Контроль состояния материала из трудоемкой и кропотливой процедуры постепенно превращается в автоматизированный процесс, когда из единого центра нажатием кнопки можно в любой момент времени узнать, в каком состоянии находится та или иная конструкция. Близким представляется будущее, когда такие непрерывно действующие системы будут работать на всех опасных объектах, обеспечивая безопасность и надежность их эксплуатации.

¹Акустико-эмиссионные системы семейства ЕМА разработаны в разрезе проблемы «АЭ диагностика сварных конструкций» совместной программы СЭВ усилиями ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ и венгеркой фирмы «Видеотон» по заданию руководителя проблемы академика Б. Е. Патона. Работы были начаты в 1982 г.

Необходимо отметить, что применение АЭ при контроле конструкций может быть также эффективным, если использовать только одну составляющую метода – определять только координаты АЭ активности материала в процессе его нагружения. Это позволит сократить объемы контроля за счет сосредоточения дополнительной контрольной аппаратуры лишь в тех местах, которые указаны АЭ измерениями. Конечно, здесь будут показаны и участки, где дефектов нет, но все равно использование АЭ аппаратуры в таком режиме целесообразно в связи с сокращением объема контрольных работ. Поэтому необходимо подчеркнуть, что *метод АЭ может применяться в двух режимах*:

в режиме целеуказания мест активных дефектов. Эта процедура существенно уменьшает объем работы дефектоскопистов, указывая места необходимого контроля. При этом оставшаяся часть объекта рассматривается как бездефектная;

в режиме диагностирования состояния материала конструкции. В этом случае объединяются две функции оборудования – целеуказание мест, в которых дефекты начинают себя проявлять, и анализ активности дефектов в этих местах, определение степени их опасности, прогнозирование разрушающей нагрузки и остаточного ресурса материала. При этом используется как АЭ информация, так и другая информация, полученная при контроле и необходимая для принятия решения.

Как видно, задача оценки состояния конструкций и прогнозирование этого состояния на необходимый для принятия решения период времени – многоплановая. Наилучшим способом ее решения будет тот, который применяет многопараметрический подход, воплощением которого является диагностическая аппаратура семейства ЕМА, работающая с ВСМ. Методика и аппаратура, основанные на многопараметрической оценке состояния конструкций, должны включать контроль и анализ акустической активности материалов, сопровождающей и характеризующей различные этапы его деформирования вплоть до разрушения.

Повышение точности оценки состояния материала. Следует отметить некоторые особенности применения расчетных методов при оценке состояния конструкций. Недостаточная точность расчетных методов при проектировании конструкций компенсируется в последующем теми запасами прочности, которые расчетчики

выбирают для компенсации различных особенностей эксплуатации конструкций. Конструкция, проработавшая значительный отрезок времени, может быть на пределе своих возможностей по многим причинам: отклонение режимов эксплуатации от нормативных, накопление значительного количества повреждений, активное влияние окружающей среды и естественное старение материалов.

Кроме того, больших неприятностей можно ожидать и от неточных значений физических и механических констант материалов, входящих в расчетные формулы. Например, критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} стали 15Х2МФА для одних и тех же условий испытаний разными авторами получено в пределах от 91,5 до 215 МПа/м^{1/2}. Следует отметить еще одну причину, по которой необходимо достаточно осторожно относиться к критическим значениям коэффициентов интенсивности напряжений, полученным на образцах и применяемым при оценке состояния конструкций. Это недостаточное количество данных испытаний на трещиностойкость материалов крупногабаритных образцов и конструкций при различных видах нагрузок и условиях эксплуатации. Поэтому значения K_{Ic} , полученные при испытаниях единичных образцов в нормальных условиях и примененных затем к материалам конструкций, находящихся в сложных условиях эксплуатации, могут быть не всегда достаточно корректны.

Выполняя расчеты по оценке состояния материалов конструкций, необходимо также иметь в виду, что расчет среднего значения и доверительного интервала измеренных физических постоянных, входящих в расчетные формулы, и тех измерений, которые выполняются при контроле состояния конструкций, означает лишь то, что существуют некие средние величины этих постоянных, являющиеся математическим ожиданием рассматриваемого нами процесса разрушения и характеризующие его. Но это ни в коем случае не означает, что, ориентируясь на них, можно избавиться от разброса измеряемых величин. Он будет большим или меньшим в зависимости от погрешностей измерительной техники, применяемых для измерений датчиков, качества подготовки объектов для проведения измерительных работ. Это замечание накладывает существенные ограничения на алгоритмы обработки информации в системах технической диагностики, особенно при построении части алгоритмов, связанной с прогнозированием тенденций процессов, развивающихся в материалах.

Приведенные выше соображения приводят к необходимости дальнейшего поиска методов решения задач оценки состояния эксплуатирующего материала, или испытываемых конструкций. Как правило, расчетным путем трудно оценить, как и при каких значениях влияющих параметров начнется разрушение. Объем знаний по зависимости принимаемых в расчете критериев разрушения от указанных многочисленных параметров является, как правило, недостаточным. Если учесть, что еще имеются и такие параметры эксплуатации, влияющие на истощение несущих свойств материалов, о которых просто ничего неизвестно, то в таком случае реальную точность анализа определить невозможно. Погрешность может быть минимальной, может быть очень существенной или просто неизвестной.

В связи с наличием таких трудностей предлагается к решению проблемы подойти несколько с другой стороны. Естественно, началу разрушения соответствует вполне определенное неблагоприятное сочетание факторов, влияющих на разрушение. И если обращать внимание не на каждый фактор конкретно, а только на их неблагоприятное сочетание, тогда задача резко упрощается и необходимо обнаружить лишь момент начала разрушения. Этот момент легко определить с помощью АЭ, *так как каждому этапу разрушения материала будет соответствовать вполне конкретный всплеск акустического излучения — единичный квант излучения, который может быть достаточно просто зафиксирован соответствующей аппаратурой и расшифрован при наличии соответствующей технологии. Такой подход позволяет совершенно по-новому взглянуть на проблему обеспечения безопасности эксплуатации конструкций. Созданная на его основе технология контроля дает возможность получить более высокую точность оценок, определяемую лишь точностью приборов и методик их применения в каждом конкретном случае. Так, в среднем, точность оценок при вероятности 95 % может достигать ± 15 %.*

Обеспечение безопасности конструкций. Вторым важным вопросом в технологии АЭ диагностики является методика оценки и прогнозирования состояния материалов конструкций на основе поступившей информации. Прежде, чем приступить к анализу этой проблемы, рассмотрим общие вопросы обеспечения безопасности эксплуатации конструкций.

Известно, что обеспечение безопасности конструкции начинается задолго до пуска ее в эксплуатацию. На первой стадии проводят расчеты, предварительные испытания, проектно-конструкторские и другие работы, связанные с созданием конструкции. И лишь на второй стадии – стадии эксплуатации – начинают проводить мероприятия по контролю ее состояния, оценке ее ресурса и определения реального остаточного ресурса. Не будем останавливаться на первой стадии, это задача специалистов в области прочности, конструкторов и проектировщиков конструкций. *На второй стадии*, которая наступает после введения конструкции в эксплуатацию, случайные просчеты в некоторых конструктивных решениях, нарушения технологии изготовления и эксплуатации, внешняя среда и время приводят к необратимым процессам накопления повреждений в материалах. При этом в отдельных локальных областях суммарный объем повреждений может достигнуть критической величины и может начаться разрушение, эксплуатирующая конструкция может пройти «точку невозврата».

В то же время прочность объектов, как правило, хорошо обеспечена еще на стадии их проектирования. Произведены расчеты, выбран материал, даны соответствующие запасы, просчитан ресурс конструкции или, что точнее, обеспечен заданный сроком службы ресурс. Однако, как сказано выше, длительная эксплуатация изделия, нарушение технологии производства и ремонтных работ приводят к необратимым процессам, прежде всего в материале, особенно в зонах технологического воздействия, где прочностные свойства нарушаются еще на стадии изготовления. Именно отклонения свойств и структуры материалов конструкции от принятых при расчетах несут основную ответственность за дальнейшую судьбу конструкции в эксплуатации, причем скорость нарастания таких негативных изменений в материале является решающим фактором. Поэтому при разработке мер безопасности основное внимание следует уделять организации мероприятий по приведению условий эксплуатации конструкций в соответствие с техническими требованиями, разработке систем, оборудования и нормативных материалов, обеспечивающих поддержание заданных документацией норм и режимов, поиску методов и средств, которые бы анализировали несущую способность материалов и своевременно предупреждали об ее исчерпании. Должна быть разработана система организационно-технических мероприятий по ремонту и восстанов-

лению полностью или частично утративших несущую способность элементов конструкций.

Все стороны этой большой проблемы включают в себя как научно-исследовательские, так и практические работы, связанные с реализацией полученных результатов на производстве.

Можно отметить, что в настоящее время наука о прочности материалов располагает следующими тремя группами методов, способными решить проблему обеспечения безопасности конструкций.

Первая – это методы, основанные на привлечении общих теорий прочности материалов. Они могут быть использованы лишь в случаях, когда предполагаемая авария может произойти в результате не появления трещин, а ослабления несущего сечения конструкции за счет, например, утонения стенки или изменения механических свойств материалов. Такая методика должна применяться после того, как проверка тем или иным способом показала, что трещин в материале нет.

Вторая группа методов – это методы, основанные на общих законах механики разрушения для материалов с появившимися и прогрессирующими трещинами. Этот метод наиболее общий, однако, труден в применении, так как требует обнаружения места и параметров трещины, анализа напряженного состояния в ее окрестности, анализа изменившихся за многолетнюю эксплуатацию механических свойств материала в районе образовавшегося дефекта.

Группа методов третьего типа может быть условно охарактеризована как группа интегральных методов, которые реагируют лишь на активизацию того или иного дефекта по сопутствующим ему процессам, например, по излучению упругих волн, вызванных перемещением дислокаций, появлением их опасной концентрации в каком-либо месте конструкции, появлением и развитием трещины. Эта группа наиболее перспективна. К ней, прежде всего, следует отнести метод АЭ.

Представленное выделение трех групп методов оценки состояния материалов при диагностическом контроле позволяет полностью определить процедуру диагностики и необходимое для этих целей оборудование. При этом на первое место выходит процесс выявления в материалах трещин и им подобных дефектов, их идентификация и оценка. Эта часть диагностических работ является основным вопросом процедуры оценки состояния конструкций и со-

оружий, особенно тех, которые длительное время находились в эксплуатации, она оказывает решающее влияние на всю дальнейшую процедуру контроля.

Следует, однако, отметить две весьма важные особенности в применении метода АЭ. Первая связана с тем, что хотя и есть определенные представления о механизме явлений, связанных с образованием и излучением упругих волн при возникновении и развитии локальных дефектных мест в материалах при их деформировании, далеко не всякая ныне существующая аппаратура может быть использована для целей диагностики. Необходима строгая оценка технических характеристик такой аппаратуры, возможностей ее применения для решения тех или иных задач. Второй особенностью применения АЭ метода, в том случае, если возможность использования имеющейся аппаратуры обоснована, является необходимость точного и неукоснительного соблюдения всех методических материалов и инструкций. Уже незначительные отклонения могут привести к невоспроизводимым результатам, которые, в связи с тем, что все еще отсутствует метрология метода, не смогут быть пересчитаны. Обе особенности весьма важны при выборе и применении АЭ аппаратуры.

Мы специально остановились более подробно на возможностях метода АЭ, поскольку в настоящее время просто не существует другого неразрушающего метода, позволяющего прямо, минуя трудоемкие и недостаточно точные расчеты, решать задачу оценки и прогнозирования состояния материалов изделий, находящихся в реальных условиях эксплуатации. Учитывая сложность метода, его новизну для многих исследователей и специалистов контрольных служб предприятий и управлений, а также относительную дороговизну аппаратуры, метод рекомендуется применять только после соответствующей подготовки специалистов, освоения ими навыков работы. *Следовательно, учеба, повышение квалификации специалистов на этом этапе приобретают исключительно важное значение.*

Все ли существующие методы оценки состояния материалов разработаны таким образом, чтобы их можно было использовать сразу и непосредственно на конкретных узлах и конструкциях? Известно, что существующие прочностные теории – общие и разработаны применительно к любым конструкциям и материалам. В то же время конкретная привязка этих разработок к конструкци-

ям требует в большинстве своем проведения работ, связанных с особенностями эксплуатации этих конструкций. Поэтому существующие конкретные методы и разработки должны быть постепенно приспособлены (адаптированы) к конкретным физическим объектам. В некоторых случаях (механика разрушения) это может быть связано с разработкой новых методик и аппаратуры для получения недостающей для принятия решения информации. Структура и состав методов и оборудования будут определяться задачами, поставленными заказчиком перед исполнителем и в идеальном случае должны включать все необходимое оборудование и методики, позволяющие получить информацию обо всех параметрах, характеризующих его поведение в каждый момент функционирования конструкции, как под нагрузкой, так и без нее.

На рис. 5 в качестве примера представлены различные методы контроля состояния трубопроводов в процессе эксплуатации. Первый метод основан на предварительном расчете недопустимых к эксплуатации конструкции дефектов. Далее в процессе контроля выявленные дефекты сравниваются с предварительно рассчитанными, затем принимается решение. Недостатком метода является необходимость проведения огромного объема контрольных работ для отыскания всех дефектов. Для трубопроводов, находящихся под землей, используют внутритрубную диагностику специальными,двигающимися внутри трубы снарядами. Это резко уменьшает объем контрольных работ за счет снижения их качества, так как системы внутритрубной диагностики выявляют не все дефекты. Вторым методом также основан на анализе обнаруженных в процессе контрольных работ дефектов. Однако в этом случае существенно усовершенствована методика – создано оборудование для визуализации размеров и расположения трещин, что существенно увеличивает точность расчетов, а прямые измерения напряженного состояния материала в месте обнаруженной трещины и его изменившихся за время эксплуатации физических и механических свойств также способствуют получению более надежных результатов.

И все же рассмотренные методы не лишены недостатков. С одной стороны недостатком является большое количество громоздкой контролирующей аппаратуры и необходимость нахождения и детального исследования каждого найденного дефекта. Это затрудняет использование этих методов в производственных условиях и практически исключает их применение при непрерывном

контроле изделий, когда аппаратура должна постоянно в автоматическом режиме давать информацию о состоянии контролируемого объекта. С другой – все еще большие ошибки измерений и расчетов, связанные с неточностью методов пересчета одних физических параметров в другие и широким диапазоном изменения физических констант, входящих в расчетные формулы.



Рис.6. Методы оценки состояния конструкций на примере трубопроводов

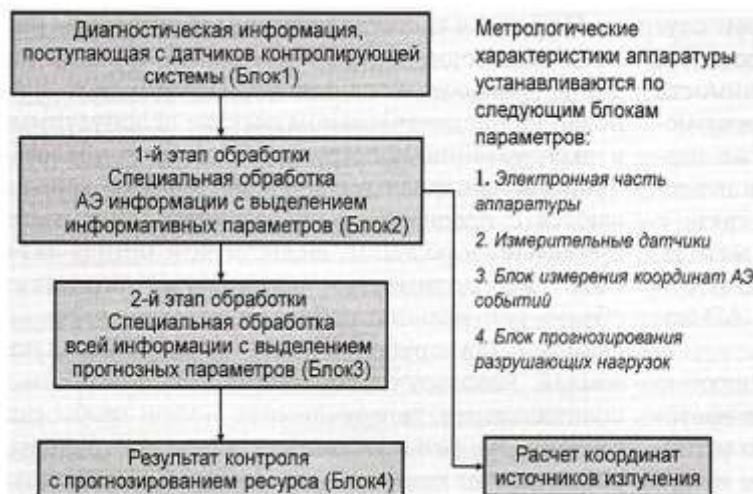


Рис. 7. Схема обработки информации в диагностических системах

От большинства этих недостатков свободен третий из представленных на схеме методов – метод, основанный на явлении АЭ, позволяющий контролировать большие поверхности изделий малым количеством датчиков. Например, для третьего метода кон-

троля аппаратура в заштрихованной области не используется (см. рис. 6). Наличие же технологии контроля, основанной на возможности непрерывного анализа ВСМ конструкции, позволяет не только минимальным количеством измерительных средств, аппаратуры и этапов контроля получить достаточно достоверные результаты, но и с успехом использовать этот метод при непрерывном мониторинге конструкций в процессе эксплуатации. Из сказанного понятно, что современная диагностическая аппаратура строится на основе высоких технологий. Так, например, аппаратура ЕМА включает блоки обработки информации, представленные на рис. 7, где показана последовательность обработки диагностической информации, поступающей с контролируемого объекта. Наибольшие трудности представляет блок 1, который передает исходную для обработки информацию в блок 2. Блок 1 связан с измерительными приборами и датчиками, установленными на объекте. От надежности и точности поступающей в блок 2 и далее в 3 и 4 информации, всецело зависит точность прогноза. И если блоки 2—4 достаточно хорошо отработаны мировой практикой применения, то блок 1 связан с громадными трудностями извлечения информации с заданной вероятностью и точностью и представления ее в блок 2. Этот блок является проблемой и в настоящее время для всех способов и методик контроля. Изложенное предъявляет свои требования к построению и аттестации диагностического оборудования. Так, для аппаратуры семейства ЕМА аттестация проводится по четырем, приведенным на рис. 6, блокам параметров. Заключительными этапами аттестации являются этапы измерения координат и разрушающей нагрузки.

Значительное количество работ и внимание, которое уделяется этой проблеме, свидетельствует об их актуальности. Учитывая важность и большие перспективы метода, мировое сообщество объединило усилия ученых для развития метода АЭ. Работы в этом направлении координируют Acoustic Emission Working Group (США), Japanese Committee on Acoustic Emission (Япония), European Working Group on Acoustic Emission (Европа). Появилась новая рабочая группа – The Latin American Working Group on Acoustic Emission (Латинская Америка). С января 2007 г. приступил к работе подкомитет № 9 «Acoustic emission testing» в составе 135 комитета по неразрушающему контролю ISO.

В то же время промышленного использования результатов исследований в области АЭ диагностики добились пока немногие из исследователей и разработчиков. Трудности промышленной реализации идей и лабораторных исследований, чему была посвящена подавляющая часть работ, оказались слишком большими. Для прогноза состояния конструкций обычно использовали параметры, которые в промышленных условиях получить либо невозможно, либо их измерение сопровождалось такими большими погрешностями, которые, сводили «на нет» все затраченные усилия. Необходимы были другие подходы, одним из которых и стала ВСМ технология. В основу технологии положено моделирование АЭ как результата накопления мелких рассеянных повреждений, другими словами, пор. Выполненные экспериментальные исследования показали, что в процессе деформирования и разрушения металлов происходит возникновение, рост, слияние и локализация в зоне формирования разрушения, множественных рассеянных повреждений типа пор. Этот процесс является наиболее представительным среди других, протекающих в процессе деформирования, и, несомненно, приводит к образованию макротрещины. В связи с этим *предложена экспериментально и теоретически обоснованная гипотеза* о том, что источником АЭ на стадиях деформирования, предшествующих возникновению трещин, являются процессы динамического образования новых пустот в материале, т. е. возникновения, роста и слияния пор.

Физическую модель АЭ можно построить в предположении, что амплитуда АЭ сигналов пропорциональна объему возникающих в материале пор на определенных стадиях разрушения. Программный интерфейс, созданный для реализации модели, позволяет имитировать возникновение АЭ от любого из трех факторов – возникновения пор, роста и слияния или произвольной их комбинации. Сопоставление модельных данных с экспериментальными позволило определить, что наибольшее соответствие моделируемой АЭ эксперименту достигается тогда, когда присутствуют только два из названных факторов – возникновение пор и их слияние. Это позволяет говорить о том, что, вероятно, рост пор происходит достаточно плавно и не является источником АЭ в том диапазоне амплитуд сигналов, который регистрирует АЭ аппаратура. Уточнение амплитудных характеристик, закладываемых в модель, проводят на основе решения аналитических задач о волновых процессах.

В результате в уравнения для вычисления амплитуд сигналов АЭ, возникающих вследствие образования новых пустот в материале, закладывают адекватные коэффициенты.

Модель позволяет задавать конкретные координаты и размеры для каждой поры, или же программно размещать их равномерно, случайным образом, или в соответствии с нормальным законом распределения. Компьютерная программа (рис. 6), реализующая модель, построена на основе объектного подхода. Основным объектом, получившим функциональность, является пора, геометрически представленная как трехмерная полая сфера. В описание объекта данного типа входят рост поры в соответствии с заданным законом деформирования материала, уравнения, описывающие ее взаимодействие с другими порами. В частности, локальное напряженное состояние, возникающее при сближении двух соседних пор, описано на основе формулы, аналогичной формуле Бриджмена.

На рис. 8 представлен этап моделирования роста пор в малом объеме при случайном размещении. Левое подокно показывает ход моделирования, среднее позволяет вводить настроечные параметры, правое отражает числовые характеристики процесса накопления повреждений. При моделировании в реальном времени можно наблюдать рост пор в двух проекциях. На графиках, расположенных в нижней левой части, приведены: верхний график – временная развертка роста поврежденности² (П) и суммарное количество накопленных событий АЭ. Нижний график – рост непрерывной (НЭ) и дискретной АЭ (столбики) эмиссии, возникающие вследствие процесса накопления повреждений. Программа показывает, что уже на восьмой итерации зарегистрированы четыре новые поры и произошло слияние двух пар пор, следствием чего стало возникновение шести событий АЭ и изменение непрерывной АЭ. Сравнение модельных данных с многочисленными результатами испытаний образцов на статическое растяжение показало их хорошую корреляцию.

²Поврежденность материала описывается в процентах объемом пустот, отнесенных к условному объему деформируемого материала.

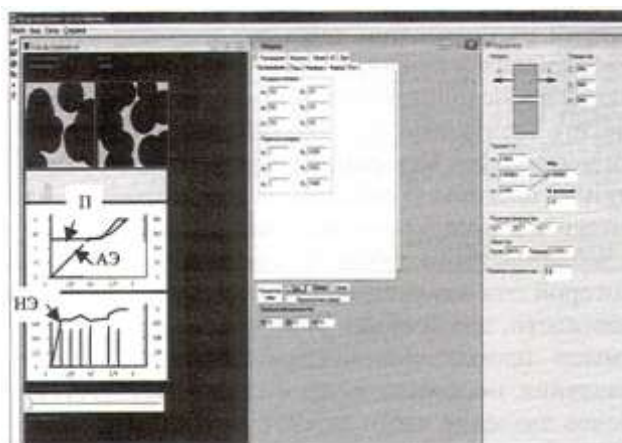


Рис. 8. Окно программы для моделирования роста пор и АЭ

Разработанная модель позволила получить эталоны АЭ, которые являются достаточно абстрактными, не привязанными к конкретному материалу или виду нагружения. Работа в данном направлении показала, что эталоны достаточно пригодны для различных классов металлических материалов и лишь в отдельных случаях требуют незначительной коррекции при помощи экспериментально определяемых коэффициентов.

Используя принятую гипотезу, построили методику прогноза состояния материала на основе теории распознавания образа с применением так называемых учителя и самообучения. Распознавание происходит в реальном времени. Важно отметить следующее: прогноз разрушающей нагрузки невозможен без знания текущего значения нагрузки, поскольку эталоны повреждаемости, используемые для распознавания, имеют привязку к деформации (и соответственно к нагрузке), при которой эта повреждаемость сформировалась. В частности, для сосудов, труб и резервуаров имеет смысл прогнозировать разрушающее значение давления, поскольку в условиях производства рабочее давление часто является единственным известным параметром, а другие, как правило, не измеряют.

Распознаванию подлежит массив данных, представляющих собой ВСМ с координатами $\{T, A, E\}_{\text{пр}}$, где T – время протекания процесса; A – обобщенная характеристика сигналов АЭ; E – приращение деформации.

Распознавание начинается с момента получения в процессе испытаний минимального достаточного количества обобщенных характеристик реальных сигналов АЭ. Получив с заданной степенью вероятности совпадение с некоторым эталоном по выбранным признакам, предполагают, что в данный момент его локальная деформация в области возникновения АЭ (определяющая состояние материала) соответствует тому проценту, от разрушающей деформации $E_{\%}$ при котором сформирован эталон. Таким образом, для получения прогнозной нагрузки следует выполнить простую операцию:

$$P_{\text{прогн}} = P(E_{\text{тек}}) / C_{\%} = f(P_{\text{тек}}) / C_{\%},$$

где $P_{\text{прогн}}$ – прогнозируемая разрушающая нагрузка; $P(E_{\text{тек}})$ – текущая локальная нагрузка, связанная с текущей локальной деформацией через диаграмму деформирования; $f(P_{\text{тек}})$ – текущая локальная нагрузка, определенная по измеренной нагрузке, пересчитанной в локальную деформацию через диаграмму деформирования.

Следует отметить, что при работе металла в упругой области приведенное выше выражение упрощается и становится обычной линейной зависимостью.

Работа алгоритма распознавания усложняется, если следующий, наиболее подходящий эталон не относится к тому же типу разрушения, что и предыдущий. В этом случае в ход вступает система самообучения и на базе существующих эталонов строятся новые. Распознавание представляет собой достаточно трудоемкий процесс с большим количеством итераций. Следует также отметить, что в настоящее время метод прогноза разрушающей нагрузки прошел необходимое тестирование только в составе системы АЭ диагностики ЕМА-ЗУ. Для его адаптации к другим существующим АЭ системам требуется проведение дополнительных исследований, и, возможно, определенная коррекция.

На рис. 9 представлена блок-схема работы диагностической системы на заключительном этапе прогноза разрушающей нагрузки и остаточного ресурса. На основе минимизации риска происходит выбор основных показателей. Как видно, текущее значение ВСМ, скорректированное ковариацией в виде вектора среднего подается в блок вычисления риска и далее в блок принятия решения. После

выполнения операций минимизации риска выдается значение разрушающей нагрузки как «нормированный интеллектуальный совет (НИС)» с вероятностью 0,95 и погрешностью $\pm 15\%$ (таких результатов удалось достичь за счет применения специальных подходов в решении проблемы блока 1 (рис. 7).

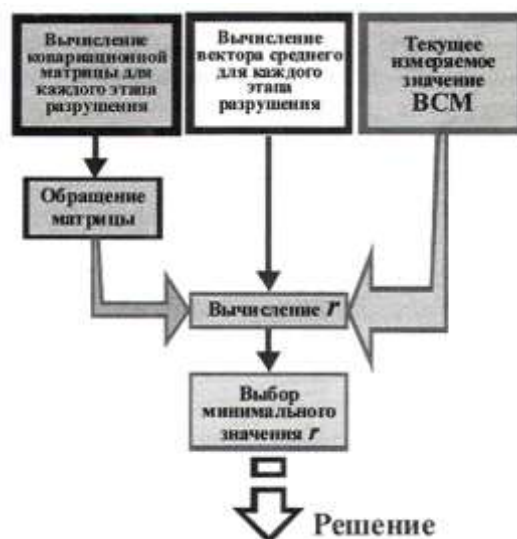


Рис. 9. Работа блока прогнозирования разрушающей нагрузки и остаточного ресурса на основе минимизации риска (r — коэффициент риска)

На рис. 10 представлен экран монитора системы ЕМА-ЗУ. Все окна экрана дают полное представление о состоянии непрерывно контролируемой конструкции. Верхнее левое окно дает информацию об опасности эксплуатации конструкции. Зеленый цвет квадрата информирует о нормальной штатной эксплуатации конструкции, смена цветов — желтый, оранжевый и красный — об изменении степени опасности эксплуатации в порядке изменения цветов. Ниже квадрата помещены сведения о разрушающей материал нагрузке, которая прогнозируется системой непрерывно в процессе контроля. Правое крайнее окно показывает несущественные для прочности материала конструкции процессы разрушения, протекающие в материале. Окно необходимо для первичной оценки мест, где в течение времени могут возникнуть более опасные процессы разрушения. Левое нижнее окно показывает интенсивность и степень развития трещины. Опасность процесса контролируется аппаратурой и представляется, как было сказано выше, в левом верхнем окне в виде цвета квадрата и прогнозируемой разрушающей

нагрузки. В этом же окне при необходимости высвечивается остаточный ресурс материала. Правое нижнее окно дает информацию о месте, где протекают те процессы, которые отслеживаются остальными окнами. Таким образом, экран монитора дает оператору в автоматическом и ручном режимах в реальном времени полную информацию о настоящем и будущем состоянии конструкции, степени опасности этого состояния и координат места, где происходят эти процессы.

На рис. 11 представлена труба нефтепровода «Дружба» перед гидроиспытаниями и текущие в процессе испытаний результаты на экране монитора системы ЕМА-ЗУ. Система указала место предполагаемого разрушения на начальной стадии нагружения и давление, при котором произойдет разрушение. На нижнем рисунке видна область формирования и развития разрушения в средней части трубы. Показания снимали с шести датчиков АЭ, равномерно распределенных по длине трубы. Все параметры прогноза укладываются в допуски, предусмотренные паспортом на оборудование ЕМА-ЗУ. На среднем рис. 11 показана труба после проведения гидроиспытаний. Зеленым кольцом отмечено место начала разрушения. Оно инициировано небольшой зоной охрупченного металла – в этом месте наблюдается хрупкое разрушение под углом 90° к поверхности трубы. По обе стороны от инициатора разрушение протекало пластично, разрушенная поверхность ориентирована под углом 45° к поверхности трубы.

Стоимость, сроки и организация работ. Применение общих теорий прочности не требует специальных научно-исследовательских работ. В этой области разработаны теория, методы и средства оценки состояния конструкций. В типичном случае для такой оценки необходимо:

- провести анализ геометрии конструкции для определения коэффициента концентрации напряжений (деформаций);

- оценить напряженное (деформированное) состояние опасной области конструкции;

- учесть изменение состояния материала на момент обследования;

- иметь в наличии таблицу допускаемых напряжений для сравнения с действующими;

- сравнить действующие напряжения с допускаемыми и принять решение.

В этом перечне наиболее проблематичным является третий пункт, где требуется разработка специальной методики и оборудования или строгое обоснование косвенных приемов оценки материала с указанием предполагаемого запаса такой оценки. Метод может быть использован на доступных участках, так как требует прямого контакта измерительной аппаратуры с объектом.

Одной из групп методов прогнозирования ресурса конструкций и сооружений является группа, основанная на постулатах механики разрушения. Однако, как было сказано выше, применение этих методов требует знания координат расположения дефекта, его формы и размеров; напряженного состояния в области дефекта; механических свойств материала в области расположения дефекта на момент проведения анализа. Поэтому использовать методы механики разрушения наиболее целесообразно совместно с другими методами, в первую очередь, с методом АЭ.

Приведенный анализ указывает на то, что основные трудности при применении методов и средств технической диагностики к конкретным объектам возникают в основном при привязке (адаптации) этих средств к конкретным промышленным конструкциям, особенно там, где конструкции работают в сложных условиях. И все же сейчас можно сделать вывод, что техническая диагностика имеет достаточно разработанный арсенал средств, необходимых для решения задач обеспечения нормального функционирования конструкций и агрегатов.

Выполнение всего огромного комплекса работ по обеспечению безопасности эксплуатации конструкций, вплоть до полной автоматизации принятия решения, должно выполняться поэтапно. В тоже время на каждом этапе работы должны постепенно вводиться в действие (практически ежегодно) все новые оборудование, аппаратура и методики, обеспечивающие безопасность эксплуатации сначала отдельных, наиболее опасных, участков конструкций, с постепенным наращиванием мощности до необходимой для контроля всего объекта. Сроки выполнения того или иного этапа прежде всего будут зависеть от количества вводимых в действие диагностических объектов и сложности самих систем диагностики. Каждый новый этап должен иметь преемственный характер.

Необходимо дать ответ и на вопрос об объеме затрат, связанных с применением средств диагностики на конкретных объектах. Как правило, при формулировке программы работ, на начальном

этапе представления, эти вопросы находятся в тени. Но, по-видимому, отвечать на них необходимо сразу, так как создание систем диагностики промышленных объектов, обеспечение безопасности их эксплуатации является сложнейшей научно-технической задачей, решение которой требует не меньшего количества усилий и средств, чем те, которые были израсходованы на создание самого объекта. Можно предполагать, что стоимость полного объема работ по технической диагностике может составить значительную величину от стоимости затрат на его строительство, в зависимости от состава и сложности выполняемых системой поручений. Однако, по-видимому, эти затраты оправданы, так как своевременное обнаружение и ликвидация аварийных и предаварийных ситуаций позволят избежать тяжелых материальных и людских потерь, а также существенно повысить срок службы контролируемых изделий. Диагностические системы могут вводиться в эксплуатацию поэтапно, что, естественно, приведет к снижению удельных затрат, распределив всю сумму на годы введения их в действие.

Системы оценки состояния конструкций и сооружений, выполненные в полном объеме, должны обеспечить следующие основные функции:

- измерение, обработку и представление с заданной степенью вероятности исходных данных для оценки состояния конструкции;
- оценку состояния конструкции и возможных последствий аварии с отработкой вариантов последствий по степени опасности;
- выбор оптимального варианта и принятие решения;
- экстраполяцию полученного решения в направлении принятой прогнозной координаты;
- в соответствии с принятым решением выдать команду об:
 - изменении режима работы конструкции с целью выхода из аварийного состояния;
 - необходимости частичного или полного прекращения функциональной деятельности узла или конструкции в целом;
 - возможности и выделяемом времени для выполнения ремонтно-восстановительных работ;
- передачу информации о состоянии конструкции в центральный диагностический пост для принятия решения по всему объекту.

К настоящему времени можно отметить, что системы, выполняющие основные задачи из перечисленных, разработаны и успеш-

но работают при контроле промышленных конструкций уже несколько лет.

При внедрении и освоении диагностической техники на промышленных предприятиях достаточно четко выделяются три этапа.

Первый этап включает в себя работы по созданию и освоению аппаратуры, первичной подготовке и сертификации специалистов. На этом этапе должны быть созданы и введены в действие рабочие места испытателей-диагностов, проведен анализ и, при необходимости, сертификация методов и средств, применяемых предприятием для оценки состояния материалов, конструкций, машин и сооружений. Здесь работы идут достаточно успешно (НТЦ «Промышленная безопасность»).

Второй этап должен предусматривать опытную эксплуатацию оборудования на созданных рабочих местах, совершенствование методических материалов по применению аппаратуры, создание нормативных материалов. На этом же этапе должна быть углублена и расширена подготовка специалистов. Начинаются работы по автоматизации процессов измерения диагностических параметров. Для многих объектов контроля уже созданы и применяются в практике контроля необходимые нормативные документы.

Третий этап должен быть посвящен автоматизации контроля и принятия решения. На этом этапе вводятся в действие автоматизированные системы сбора и передачи информации. Создается центральный пульт управления работами в предаварийной и профилактической ситуациях. В этом направлении можно отметить также существенные успехи. Созданы и эксплуатируются в промышленности диагностические системы непрерывного мониторинга, прогнозируя разрушающую нагрузку контролируемых объектов и их остаточный ресурс при любом удалении оператора от места контроля.

В заключение следует отметить, что могут возникнуть сомнения – возможно ли в обычных производственных условиях использование сложных алгоритмов оценки состояния конструкций, а также измерительной и счетно-решающей аппаратуры на основе этих алгоритмов? Если же такая аппаратура и будет поставлена на предприятие, то возможно ли ее квалифицированное обслуживание силами персонала предприятия? Рассматриваемая теория достаточно сложна. Но только глубокое представление физических процессов разрушения материалов и связанная с ним теория прогнозиро-

вания негативных процессов, протекающих в материалах при потере ими несущей способности, теория принятия решения, позволяют, как показал опыт, решить поставленную задачу в современных условиях. По-видимому, в дальнейшем процессы процедуры расчетов и принятия решения будут только усложняться. На повестке дня – использование квантовой механики разрушения для более глубокого анализа состояния материалов конструкций в процессе эксплуатации. Это усложнение уже сейчас частично обеспечивается возможностями вычислительной техники и идет параллельно ее развитию. Представленные выше результаты были получены с учетом изложенного, а основы механизма постепенной потери способности материалов нести полезную нагрузку использованы с учетом последних достижений в области механики и математики. Наличие достаточно мощной и все время развивающейся вычислительной техники позволяет передать сложную технологию распознавания и прогнозирования состояния материала машине и тем самым обеспечить возможность практического использования этой технологии специалистами средней квалификации.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, уясняются основные положения акустико-эмиссионного контроля различных конструкций.

На втором этапе студент самостоятельно составляет отчет, в котором освещает по заданию преподавателя требования определенного раздела МУ.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

1. Название и цель занятия.
2. Изложение требований заданного студенту раздела МУ

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое непрерывный мониторинг?

2. Достоинства прибора ЕМА-3С
3. Назовите режимы применения метода АЭ.
4. Назовите методы повышения точности оценки состояния материала.
5. Назовите точность оценок трещин методом АЭ.
6. Что включает в себя система организационно-технических мероприятий по ремонту и восстановлению полностью или частично утративших несущую способность элементов конструкций?
7. Назовите три группы методов науки о прочности материалов, способными решить проблему обеспечения безопасности конструкций.
8. Назовите недостатки существующих методов НК
9. Назовите преимущества метода АЭ
10. Назовите недостатки метода АЭ
11. Опишите структуру АЭ-аппаратуры, принцип работы.
12. В чем заключается гипотеза об образовании сигналов АЭ?
13. Что такое эталоны АЭ?
14. Опишите методику прогнозирования работоспособности методом АЭ.
15. Опишите блок-схему работы диагностической системы на заключительном этапе прогноза разрушающей нагрузки и остаточного ресурса.
16. Какова стоимость, сроки и порядок организация работ по АЭ.
17. Какие основные функции должны обеспечить система оценки состояния конструкций и сооружений.
18. Какие этапы выделяются при внедрении и освоении диагностической техники на промышленных предприятиях?
19. Основные направления работ по повышению промышленной безопасности.

6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова Л. Н. Акустико-эмиссионный контроль железно-дорожных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2011. – 270с.
2. Смирнов А. Н. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов / А. Н. Смирнов, Б. Л. Герике, В. В. Муравьев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 244с.

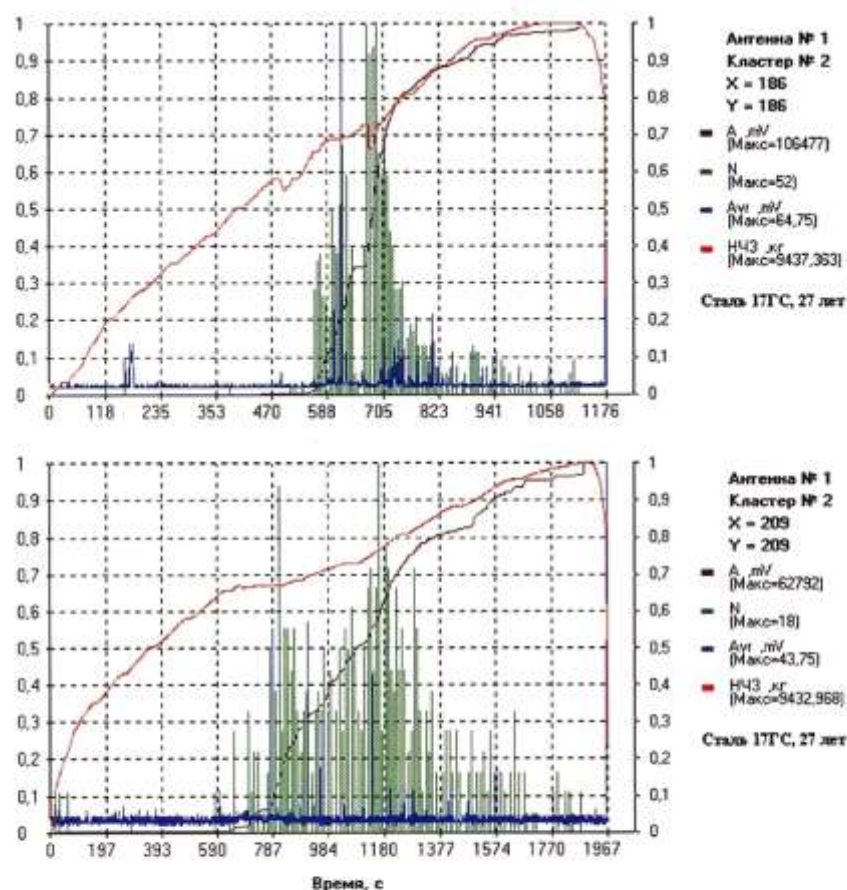


Рис. 3. Результаты АЭ испытаний двух образцов из стали 17ГС после 27 лет эксплуатации (радиус кластера 110 мм)

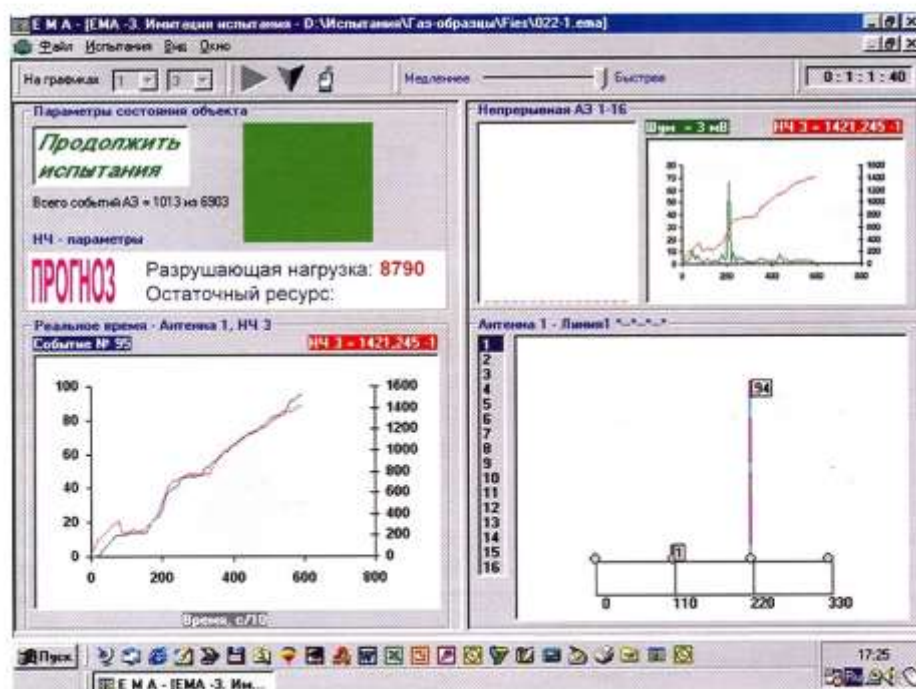


Рис. 10. Экран контролирующего монитора системы ЕМА-3С

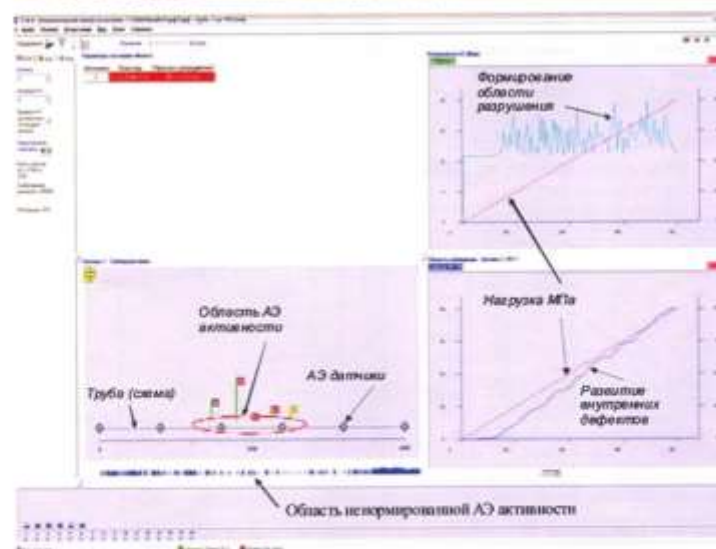


Рис. 11. Гидроиспытания трубы нефтепровода «Дружба» (верхний и средний рисунки — расположение АЭ датчиков на трубе и вид разрушения, нижний — экран монитора прибора ЕМА-3У, красным цветом выделена зона интенсивных деформаций, возникших при разрушении трубы)

Лабораторная работа №7

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение показателей качества неразрушающего контроля сварных соединений.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сложность проблемы количественной оценки результатов контроля обусловили использование различных показателей и критериев качества неразрушающего контроля (НК).

Наиболее часто употребляют термины, с помощью которых характеризуют качество работы как *оператора НК*, так и *системы НК* в целом: «точность», «достоверность», «надежность», «информативность», «эффективность».

Часто эти термины употребляются весьма вольно, поэтому представляется актуальным проанализировать области корректного применения показателей и критериев качества.

3.1. Точность

Этот термин часто используется при анализе информации о погрешностях **дефектоскопии**. **Точность** – это свойство, характеризующее близость результатов испытаний к действительным значениям характеристик объектов (ГОСТ 16504-81), а **погрешность** – отклонение действительного значения параметра от его номинального значения (ГОСТ 14895-77).

Основные ошибки контроля:

- пропуск (необнаружение) недопустимых дефектов;
- неправильная идентификация типа дефекта;
- неточная оценка параметров и соответственно степени допустимости дефектов;
- неправильное определение координат залегания дефекта.

Сравнительный анализ **систем НК** по показателю «точность» корректен лишь для идентичных условий контроля, так как на по-

грешности НК влияет большое число факторов это: конструкционно-технологические особенности изделия, особенности несплошности, аппаратурные факторы, технология контроля, среда, оператор.

2.2. Достоверность

Этот показатель постоянно применяется при обсуждении результатов контроля и имеет довольно субъективную интерпретацию. О достоверности часто говорят с качественных позиций (выше, ниже, лучше, хуже) на основе сравнения таких данных, как *вероятность* обнаружения дефектов, *погрешности* дефектоскопии, *ошибки* дефектоскописта.

Под достоверностью понимают способность методики НК обнаруживать и оценивать опасность дефектов в соответствии с действительным состоянием объекта. За критерий **достоверности** принимают оперативную характеристику выявляемости дефектов

(вероятность правильности обнаружения дефектов с минимальным недопустимым характеристическим размером).

По своему физическому смыслу показатель «достоверность» должен характеризовать неточности выполнения функций системы НК. Поэтому его корректней трактовать не как возможность методики НК, а как показатель конкретного результата контроля, так как результаты дефектоскопии одного и того же объекта одной и той же системой могут существенно отличаться.

Если рассматривать достоверность (D), как показатель, характеризующий суммарные относительные ошибки Δ_i оценивания реальной дефектности объекта контроля, то можно записать

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n \Delta_i,$$

т. е. чем меньше ошибка оценивания реальной дефектной ситуации объекта контроля, тем выше достоверность системы НК.

Если рассматривать качество контроля только с позиций «обнаружения – необнаружения» недопустимых дефектов, то количественная оценка достоверности может быть произведена по следующей формуле

$$D = 1 - P_{нев},$$

где $P_{нев}$ – вероятность невыявления недопустимых дефектов.

При данной трактовке достоверность может иметь в ряде случаев практическое использование. Однако здесь не учитываются факты **выявления – невыявления** допустимых дефектов, которые несут дополнительную информацию о возможностях сравниваемых систем НК, не принимаются во внимание факты и последствия перебраковки и **недобраковки**, а так же **погрешности измерения координат дефектов**.

2.3. Информативность

Это термин, как показатель качества, наиболее вольно трактуется, часто наблюдается подмена понятий. В ГОСТе по контролю качества – информативность, как показатель отсутствует и в практике используется чаще с качественных позиций при оценке точности полученной информации по принципу: точнее результаты дефектоскопии – выше информативность.

Хотя об информативности контроля реального изделия некорректно говорить, если нет **конкретной информации о его истинной дефектности**.

Критерий «информативность» иногда предлагается использовать на основе энтропийного анализа по Шеннону. Информация с инженерных позиций – сведения о реальной дефектности объекта контроля. Погрешность ее измерения характеризуется достоверностью контроля.

А в энтропийном подходе при количественных оценках исходят не из реальной дефектности объектов контроля, а из энтропии объекта, т. е. вероятности наличия дефекта в нем. Для реального НК применение данного термина нецелесообразно (вероятностные отношения нельзя считать информацией), информация – физическая величина, т. е. допускает измерения.

2.4. Надежность

Показатель «надежность» широко применяется на практике для оценки любых систем, рассматривается как комплексное свой-

ство, состоящее в общем случае из безотказности, долговечности, ремонтнопригодности и сохраняемости.

По ГОСТ 27.002-89 надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения. Для четкого понимания и невозможности субъективного трактования данного показателя, под **надежностью** объектов контроля в процессе эксплуатации следует понимать вероятность невозникновения аварийных ситуаций в проконтролируемых объектах при регламентированных условиях эксплуатации в заданный период времени.

В качестве *показателя надежности системы* НК принимают вероятность осуществления возложенных на систему функций контроля в заданных условиях.

Надежность оператора НК определяется вероятностью точного, безошибочного и своевременного выполнения в течении установленного времени контроля всех порученных ему функций контроля объекта в заданной производственной среде.

Для практических целей существенное значение имеет возможность количественной оценки показателя «надежность». Некорректно сравнивать надежность работы разных операторов, не оговаривая особенности проведения контроля, так как надежность оператора **НК зависит от объективных и субъективных факторов**. К **первым относят** аппаратурные (методика контроля, чувствительность) и внешние. Внешние факторы характеризуют различные условия работы (физические – температура, влажность, радиоактивность, помехи), а так же эргономические, организационные и эмоциогенные факторы деятельности оператора (режим отдыха и труда, степень ответственности и аварийные ситуации). **Ко вторым** (субъективным) факторам относят человеческий фактор, степень влияния которых зависит от характеристик внимания, восприятия, памяти, возраста, квалификации и т. д.

Проблеме снижения негативного влияния человеческого фактора на качество НК в последнее время уделяется повышенное влияние. Количественная оценка качества работы оператора по показателю «надежность» связана со значительными трудностями, которые зависят от большого числа факторов, характеризующих надежность.

Сложно учесть весовую значимость допущенных различных ошибок при сравнительном анализе, трудно учесть разницу во времени контроля одного и того же объекта и т. д. О количественной оценке *надежности*, как о показателе качества можно вести речь только при анализе результатов контроля объектов, содержащих *искусственные* отражатели известных форм. Размеров и местоположения.

При контроле реальных объектов некорректно использовать термин «надежность» до тех пор, пока не получена полная информация о *реальной дефектности*. Для сравнительной оценки результатов контроля можно пользоваться **критерием**, учитывающим количество выявленных дефектов и их относительную выявляемость:

$$K = \sum_{j=1}^j \frac{n_j}{p_j},$$

где n_j – количество выявленных дефектов типа j ; p_j – вероятность выявления дефектов для данной технологии контроля.

2.5. Эффективность

Этот показатель оценки качества работы как системы, так и оператора НК позволяет учесть кроме вероятности обнаружения, также вероятность перебраковки, так и недобраковки.

По мнению А.К. Гурвича – одного из основателей российской дефектоскопии, основным фундаментальным комплексным показателем качества любой системы НК является ***интегральный критерий эффективности***, представляющий собой отношение технической эффективности системы (приращение надежности объекта контроля вследствие устранения обнаруженных дефектов) к суммарным затратам, благодаря которым достигаются поставленные цели. Таким образом, данный показатель характеризует **как степень соответствия системы ее целевому назначению так и экономические показатели**.

Несмотря на многочисленные исследования, посвященные деятельности оператора, целостной концепции эффективности его деятельности не существует.

Нерешенным является вопрос о выборе критерия эффективности, так как существующие критерии не обеспечивают ее количественной оценки.

Фактическая эффективность работы оператора \mathcal{E}_{on} , как любой системы НК, представляется возможным в общем случае представить в виде отношения надежности H_{on} (или другого интегрального критерия) и суммарной экономической эффективности $\sum Z$ его работы:

$$\mathcal{E}_{on} = H_{on} / \sum Z,$$

где $\sum Z = Z_1 + Z_2 + Z_3$ – основные составляющие суммарных затрат:
 Z_1 – стоимость (средства, время) непосредственно контроля;
 Z_2 – затраты связанные с перебраковкой объекта контроля;
 Z_3 – убытки (разрушения, аварийные ситуации), связанные с пропуском, ошибочной оценкой размеров недопустимых дефектов.

Этот показатель расширяет возможности сравнительного анализа результатов контроля. Так как реальные затраты, в частности последствия недобраковки подсчитать очень сложно, то количественную оценку эффективности систем НК можно определять через значения вероятностей перебраковки и недобраковки по результатам контроля тест-образцов.

Данные показатели могут быть использованы как самостоятельные критерии качества конкретной системы, а также учитываться при определении **интегрального показателя качества системы НК**:

$$\Pi_{\text{кач}} = K_{\text{отн}}^u - P_{\text{пер}} - P_{\text{нед}},$$

где $K_{\text{отн}}^u$ – интегральный коэффициент относительной выявляемости дефектов; $P_{\text{пер}}$ – вероятность перебраковки; $P_{\text{нед}}$ – вероятность недобраковки.

Для практического использования при сравнительном анализе показателя «эффективности» как наиболее комплексного критерия качества НК необходимо изготовление специальных тест-образцов, содержащих искусственные отражатели определенных унифицированных типоразмеров.

Заключение

1. Некорректно использование терминов «надежность», «точность», «достоверность», «информативность» как количественных показателей качества НК реальных объектов, пока не получена объективная информация о дефектах (например, путем послойной разрезки).

При сравнительном анализе различных систем НК и аттестации операторов данные показатели качества работы правомерно использовать только по результатам контроля испытательных образцов, содержащих искусственные отражатели нормированных размеров, формы и месторасположения.

2. Для сравнительной оценки качества контроля реальных объектов следует использовать ***показатель относительной выявляемости дефектов***, который учитывает количество обнаруженных дефектов и вероятность выявления каждого типоразмера дефектов данной системой НК.

3. Наиболее комплексным показателем качества системы НК является ***«эффективность»***. Данный показатель учитывает как результативность обнаружения дефектов, так и суммарные экономические затраты, связанные с ошибочной браковкой годного изделия и пропуском или ошибочной оценкой недопустимых дефектов. Так как реальные затраты (последствия недобраковки) подсчитать сложно, количественную оценку эффективности систем НК можно определять через значения вероятностей перебраковки и недобраковки по результатам контроля тест-образцов. Последние могут быть использованы как самостоятельные критерии качества конкретной системы.

4. Размеры и другие характеристики искусственных отражателей должны определяться ***функциональным назначением тест-образцов*** (для обучения или аттестации). При аттестации систем НК или их сравнительном анализе **для количественного определения показателей качества** испытательные образцы должны содержать три основные группы типоразмеров искусственных отражателей, равные минимальному характеристическому размеру недопустимого дефекта, незначительно отличающимися от него, из числа допустимых, и немногочисленная группа отражателей произвольных размеров из диапазона размера реальных дефектов.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, уясняются основные положения и показатели качества НК

На втором этапе студент самостоятельно составляет отчет, в котором освещает по заданию преподавателя требования определенного раздела МУ.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

1. Название и цель занятия.
2. Изложение требований заданного студенту раздела МУ.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите наиболее часто употребляются термины, с помощью которых характеризуют качество работы, как оператора НК, так и системы.

2. Что такое точность НК?
3. Назовите основные ошибки при НК.
4. Что такое достоверность контроля?
5. Назовите физический смысл достоверности контроля.
6. Что такое информативность контроля?
7. Что такое надежность контроля?
8. Назовите показатель надежности оператора НК.
9. Назовите показатель надежности системы НК.
10. Что такое реальный критерий дефектности?
11. Что такое интегральный критерий эффективности контроля?
12. Что такое показатель относительной выявляемости дефектов?

6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова Л. Н. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2011. – 270с.
2. Смирнов А. Н. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов / А. Н. Смирнов, Б. Л. Герике, В. В. Муравьев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 244 с.
3. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / ред. совет: В. С. Авдуевский и др. – Москва: Машиностроение, 1987. – (В пер.). Т. 9. Техническая диагностика / под общ. ред. В. В. Ключева, П. П. Пархоменко. – 352 с.
4. Технические средства диагностирования: Справочник / В. В. Ключев, П. П. Пархоменко и др.; под общей ред. В. В. Ключева. – Москва: Машиностроение, 2011. – 672 с.

Лабораторная работа №8

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение методов измерения деформаций и остаточных напряжений в сварных соединениях.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сварочные процессы – эффективный метод создания неразъемных соединений в судостроении. Они позволяют существенно ускорить сборочные операции при постройке судна. Однако, одним из наиболее важных факторов, влияющих на эффективность его применения, является формирование при сварке остаточных напряжений и деформаций, существенно влияющих на технологичность этих процессов.

Расширение или сокращение металла от неравномерного нагрева или охлаждения, а также от структурных превращений образуют так называемые собственные, или внутренние деформации и напряжения при сварке. Они существуют в теле без приложения внешних нагрузок.

Как правило, остаточные напряжения рассматривают как компоненты тензора, и выделяют следующие величины, характеризующие напряженное и деформированное состояние металла:

- Нормальные напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$
- Касательные напряжения $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$
- Линейные деформации $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$
- Сдвиговые деформации $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$
- Перемещения точек тела по осям u – по оси Ox , v – по оси Oy , w – по оси Oz .

На рис. 3.1 показано расположение осей при рассмотрении остаточных напряжений.

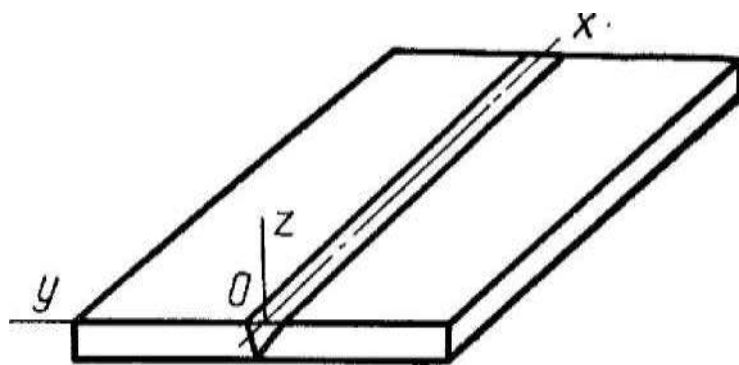


Рис. 3.1. Расположение координатных осей при рассмотрении остаточных напряжений

Если температурные напряжения в процессе нагрева будут выше предела текучести материала, то после снятия нагрева в теле останутся остаточные напряжения. Этот механизм их образования характерен для всех процессов сварки, связанных с плавлением металла.

Интерес к исследованию остаточных напряжений в сварных конструкциях обуславливается тем, что они существенно влияют на прочность и долговечность сварного соединения. Как известно, для пластичных материалов остаточные напряжения практически не влияют на величину остаточных напряжений, однако в условиях хрупкого разрушения их влияние может быть значительным. В частности, хрупкому разрушению способствует объемное напряженное состояние металла.

Растягивающие остаточные напряжения снижают вибрационную прочность сварных конструкций. Если они действуют в зонах, где есть концентрация напряжений и неоднородность механических свойств, то там в первую очередь возникают разрушения от усталости.

На рис. 3.2 показаны зоны, остаточные напряжения в которых оказывают существенное влияние на временную и длительную прочность сварного соединения толстостенных конструкций.

Различают одноосное, двухосное и трехосное напряженные состояния. На практике реализуется трехосное состояние, но в отдельных случаях, в частности, при рассмотрении поверхностных слоев, задачу часто упрощают. Так как один или два компонента остаточных напряжений могут оказаться намного меньше остальных, то такое упрощение позволяет, незначительно снизив точ-

ность, существенно упростить определение остаточных напряжений.

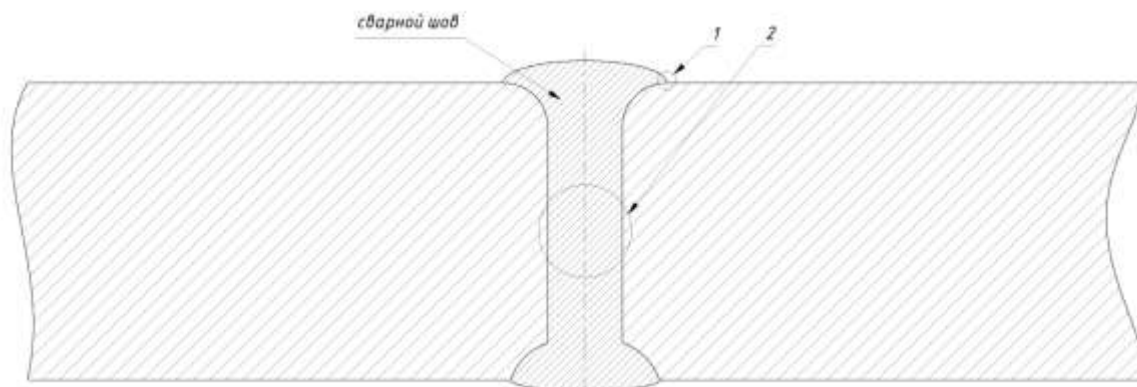


Рис. 3.2. Сварной шов в толстостенной конструкции. Двухосные напряжения в зоне 1 влияют на долговечность сварного соединения; трехосные напряжения в зоне 2 – на временную прочность

На сегодняшний день напряженное состояние можно определить как экспериментальными, так и теоретическими (расчетными) методами.

Существуют теоретические подходы, позволяющие оценивать напряженное состояние в различных конструкциях и методики расчетного определения напряжений в зависимости от параметров теплового процесса. Таким образом, можно без проведения экспериментов оценить величину остаточных напряжений в сварных конструкциях различной конфигурации.

Однако, главным недостатком расчетных методов является невозможность учета влияния всех параметров технологического процесса, свойств металла и его состояния. Также сложно учесть влияние фазовых превращений, введения присадочного материала и других важных факторов, существенно изменяющих характер распределения остаточных напряжений и деформаций.

В силу указанных причин, широкое распространение получили экспериментальные методы определения остаточных напряжений. Все эти методы можно разделить на две большие группы: механические и физические.

Механические методы – наиболее старые и глубоко изученные. Отдельные методики уже стандартизированы (пример: стандарт ASTM E837-08e1 «Стандартный метод тензометрического

определения остаточных напряжений с использованием высверливаемого отверстия») и широко применяются во многих странах.

Механическими методами можно добиться высокой точности, определять на различной глубине напряжение вдоль всех осей. Кроме того, они позволяют получить абсолютное значение остаточных напряжений.

Общий принцип заключается в освобождении отдельных участков механическим путем, определении изменения показателей тензометров и по известным формулам определения остаточных деформаций и напряжений.

Главным недостатком методов является необходимость нарушения целостности контролируемого объекта разрезанием, высверливанием отверстий, нанесением меток и т. д. Это приводит к невозможности применения их к реальной конструкции, необходимости опосредованного исследования путем привлечения образцов-свидетелей.

Основными механическими методами являются разрезание (на полосы, квадраты и т. д. в зависимости от измеряемых компонентов напряжения) и высверливание отверстий.

Пример приведен на рис. 3.3.

Поскольку механические методы не могут быть применены для контроля состояния работающих конструкций, трудоемки и применяются, в основном, в лабораторных условиях, был разработан ряд методов, позволяющих использовать изменение какого-либо измеримого физического параметра при изменении напряженного состояния для его оценки.

Физические методы измерения деформаций и остаточных напряжений в сварных соединениях

Основными физическими методами, применяемыми для измерения остаточных напряжений в металлах, являются:

- Рентгеновские
- Ультразвуковые
- Электромагнитные
- Метод твердости
- Метод хрупких покрытий

Рассмотрим кратко каждый из этих методов с позиции его преимуществ и недостатков при измерении остаточных напряже-

ний при сварке толстостенных конструкций из закаливающихся судостроительных сталей.

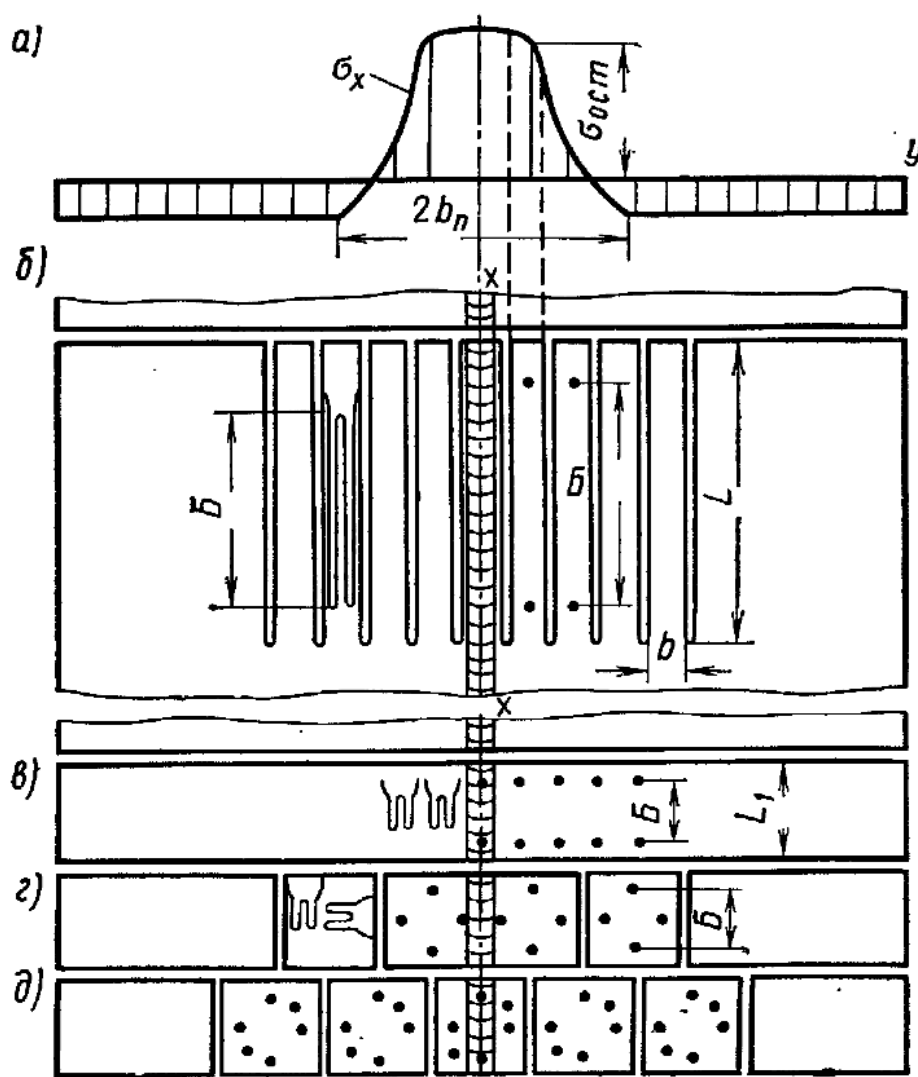


Рис. 3.3. Расположение мерительных баз и тензодатчиков при определении остаточных сварочных напряжений:
 а – одноосные напряжений σ_x в пластине; б – разрезка на полосы;
 в – вырезка поперечной полосы; г – разрезка на квадраты с измерением в двух направлениях; д – разрезка на квадраты с измерением в трех направлениях вблизи шва

Для таких сталей, ввиду протекания при охлаждении фазовых превращений, в общем случае формируется многофазная структура, в зависимости от зоны шва изменяются размеры зерна и схема кристаллизации. Это говорит о существенной неоднородности материала в сварном шве и околошовной зоне.

Рентгеновские методы основаны на прецизионном измерении изменений межплоскостных расстояний, определяемых по смещению дифракционной линии. Этот метод обеспечивает достаточно большую точность и позволяет измерять остаточные напряжения в изделиях сложной конфигурации, обладает высокой локальностью на глубине до 0,1 мм. С его помощью можно определять также градиенты напряжений.

К недостаткам рентгеновского метода следует отнести существенное влияние структуры и размеров зерна, что особенно критично для рассматриваемого случая. Для исследования подповерхностных слоев требуется удаление слоя металла, что делает его неприемлемым для неразрушающего контроля толстостенных конструкций. Измерения занимают много времени (до 10 минут на точку), предъявляются высокие требования к чистоте поверхности. Непосредственно измеряемой в дифрактометре величиной является смещение дифракционного профиля, которое есть следствие напряженно-деформированного состояния исследуемого материала. Эта величина составляет доли градуса, и должна измеряться с погрешностью, не превышающей сотые доли градуса. Это возможно либо в лабораторных условиях, либо с применением высокоточных механических систем для перемещения измерительного прибора, что усложняет применение для крупногабаритных конструкций. Кроме того, их использование связано с возникновением рентгеновского излучения, а оборудование достаточно дорого.

Ультразвуковые методы основаны на применении эффекта изменения скорости распространения звуковых волн в металле, в котором имеются остаточные напряжения. Связь скорости распространения ультразвука с параметрами напряженно-деформационного состояния можно установить как экспериментально (при тарировке), так и расчетными методами. Вид зависимости скорости звука от напряжений – нелинейный, поэтому для расчета применяется уравнения пятиконстантной теории упругости с использованием модулей нелинейной упругости Мурнагана. Эти методы позволяют оценивать компоненты двухосного напряженного состояния в поверхностном слое и средние по глубине до 150 мм. Они не предъявляют жестких требований к чистоте материала, оборудование устроено относительно просто и может быть мобильным.

Существенным недостатком ультразвуковых методов является невозможность прямого независимого определения напряжений

вдоль нескольких осей, а так же существенное влияние неоднородностей и дефектов в исследуемом металле.

Повысить локальность и точность ультразвуковых методов поверхностного контроля можно с применением лазерно-ультразвукового метода, основанным на применении оптоакустического преобразования. Этот метод также позволяет определить усредненные по толщине остаточные напряжения с применением мощных широкополосных акустических сигналов наносекундной длительности.

Электромагнитные методы позволяют определить одноосное напряженное состояние. Они основаны на изменении намагниченности под действием остаточных напряжений. Могут измеряться магнитная проницаемость, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила, величина магнитострикции и другие магнитные параметры.

Их преимуществами являются простота и оперативность проведения измерений, невысокие требования к подготовке поверхности. Недостатки – высокие погрешности при работе с твердыми материалами и при небольших величинах деформации, применимость только к исследованию ферромагнетиков, чувствительность к величине немагнитного зазора между образцом и измерительным инструментом. Кроме того, глубина, на которой проводятся измерения, для отдельных методик достигает лишь 20...25 мм, а диаметр точки – около 3 мм, что говорит о малой степени локальности. Достаточно локально можно определять напряжения лишь на глубине 0,1... 3 мм.

Метод твердости – достаточно прост в применении и основан на изменении твердости материала при действии в нем остаточных напряжений. Метод, несмотря на его простоту, практически не применяется, так как ввиду низкой точности позволяет лишь качественно определить характер распределения остаточных напряжений.

Метод хрупких покрытий применяют для определения наиболее нагруженных областей в металлическом изделии. Он состоит в нанесении на металл керамического покрытия и приложения нагрузки к образцу до появления в нем трещин. При этом нанесенные заряженные частицы порошка скапливаются в трещинах, обеспечивая их видимость. Позволяет визуализировать поле напряжений, но не дает точных количественных оценок их величины.

Существуют также другие методы, менее широко распространенные в силу определенных причин (недостаточная проработка, малая точность), связывающие остаточные напряжения с удельной электропроводностью, с применением покрытий из прозрачных сред и использованием оптических методов и другие. Но на сегодняшний день эти методы либо не удовлетворяют предъявленным требованиям по точности, быстродействию и другим, либо находятся на стадии разработки.

Общим же недостатком всех физических методов является их относительность. Это вызывает необходимость проведения тарировки на образцах, идентичных рассматриваемым, что не только снижает быстродействие, но вносит неточности, связанные с различием структуры основного металла, обычно используемого для тарировки, с металлом сварного шва.

На основе изложенных фактов, можно сделать вывод о том, что ни один метод в отдельности при нынешнем уровне развития методик не позволяет оперативно определять остаточные напряжения в зоне 2 (см. рис. 3.1) с достаточной точностью и без разрушения конструкции. Это приводит к необходимости применения для решения конкретной задачи, а именно контроля снижения остаточных напряжений по результатам операции их удаления, применять несколько методов. Наиболее перспективным видится произведение тарирования физических методов (например, ультразвукового) по результатам разрушающего контроля механическими. Таким образом, можно получать с определенной точностью оценку значений остаточных напряжений неразрушающими методами и использовать ее, например, для определения эффективности методов снижения остаточных напряжений в реальных сварных конструкциях.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа выполняется в два этапа.

На первом изучаются теоретические положения, уясняются методы измерения деформаций и остаточных напряжений в сварных соединениях.

На втором этапе студент самостоятельно составляет отчет, в котором освещает требования определенного раздела методических указаний.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА РАБОТЫ

Результаты выполнения лабораторной работы должны быть оформлены в соответствии с требованиями к текстовым документам по ГОСТ 2.105-96 на лабораторной работе должны быть приведены: цель работы, краткое изложение теоретического материала, ответы на задания к практической части лабораторной работы.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сварочные процессы?
2. Какие выделяют величины, характеризующие напряженное и деформированное состояние металла?
3. В каком случае остаются остаточные напряжения?
4. Что снижают растягивающие остаточные напряжения?
5. Какие напряженные состояния различают?
6. Что является главным недостатком расчетных методов определения остаточных напряжений?
7. Сущность механических методов определения остаточных напряжений.
8. Перечислите основные физические методы определения остаточных напряжений.
9. На каком принципе основаны рентгеновские методы? Недостатки метода.
10. На каком принципе основаны ультразвуковые методы? Недостатки метода.
11. Какое напряженное состояние позволяют определить электромагнитные методы? Преимущества и недостатки метода.
12. Сущность метода твердости.
13. Особенности метода хрупких покрытий.

6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций – Ленинград: Судостроение, 1974 г.
2. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – Москва: Высшая школа, 1982. – 272 с.
3. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – Москва: Машгиз,

1963. – 233 с.

4. Гатовский, К. М. Теория сварочных напряжений и деформаций. – Ленинград: изд. Ленинградского Ордена Ленина кораблестроительного института, 1980. – 331 с.

5. Винокуров, В. А. Сварочные деформации и напряжения. Методы их устранения. – Москва: Машиностроение, 1968. – 236 с.

6. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / под ред. В. В. Фролова. – Москва: Высшая школа, 1988. – 559 с.

7. Экспериментальная механика / под ред. А. Кобаяси; пер. с англ. под ред. Б. Н. Ушакова. – Москва: Мир, 1990. – 552 с.

8. Трофимов, В. В. Неразрушающий метод рентгеновской тензометрии для контроля напряжений в поверхностных слоях деталей и изделий / В. В. Трофимов, А. Я. Башкарев, Иво Краус // Опубликовано на сайте механико-машиностроительного факультета СпГПУ: www.mmf.spbstu.ru/konf_2011/38.pdf

9. Никитина, Н. Е., Казачек С. В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин / Н. Е. Никитина, С. В. Казачек // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 4(32). – с. 18-28.

10. Интернет-сайт <http://www.encotes.ru> компании ООО «ИН-КОТЕС».

11. В. А. Быченко. Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений в тонкостенных элементах изделий ракетно-космической техники // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – №7.

12. Васильков, С. Д. Разработка и исследование метода неразрушающего контроля остаточных напряжений в металлах и сплавах и его метрологическое обеспечение / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики. – Санкт-Петербург: Университетские телекоммуникации, 2010 г. – 24 с.

13. Пересторонин, А. В. Анализ методов определения остаточных напряжений в сварных конструкциях // Материалы ВНТК «Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии». – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. – С. 1-6.

Лабораторная работа №9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Познакомится с теоретическими положениями и методиками оценки плотности, пористости, газопроницаемости покрытий. Изучить алгоритмы расчета плотности, пористости, газопроницаемости и понять взаимосвязь этих характеристик. Познакомиться с методами оценки толщины диффузионных покрытий.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ, ПОРИСТОСТИ И ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ ПОКРЫТИЙ

Покрытия, напыленные любыми методами из порошка, прутка или проволоки, являются пористыми. Плотность и пористость – основные характеристики покрытия, по которым можно косвенно судить о качестве напыленного материала покрытия.

Наличие пор в покрытии может дать положительный эффект и повысить износостойкость, когда покрытие наносят на трущиеся участки, так как в порах может сохраняться смазка. Однако в случаях, когда покрытие используют как антикоррозионное, или в других аналогичных случаях агрессивные газы или жидкости могут проникнуть по порам покрытия к поверхности основы и снизить работоспособность детали. Пористость покрытия существенно влияет на служебные свойства и, в первую очередь, на коррозионные свойства в газах и жидкости, на электроизоляционные свойства и т. д.

Плотность напыляемого материала является основной исходной величиной при определении пористости методом гидростатического взвешивания и прямым взвешиванием в расчетах. Однако следует учитывать, что при напылении могут образовываться окислы и другие соединения, содержащиеся в покрытии, плотность которых отличается от плотности напыляемого материала. Следует учитывать также структурные превращения, происходящие при напылении и сопровождающиеся изменением плотности материала.

Кажущаяся плотность ρ материала напыленного покрытия, содержащего поры, всегда меньше истинной плотности напыляемого материала и может быть найдена из следующей зависимости:

$$\Pi = (1 - \rho / \rho_{ист})100, \quad (4.1)$$

где $\rho_{ист}$ – истинная плотность напыляемого материала; Π – относительная пористость, %.

Иногда под пористостью понимают простое отношение плотности покрытия к истинной плотности напыляемого материала.

Измерение пористости методом гидростатического взвешивания

Общепринятый способ определения плотности и пористости покрытий – гидростатическое взвешивание.

Напыленное покрытие отделяют от основы, хорошо просушивают, покрывают тонким слоем вазелина и, подвесив на тонкой металлической проволоке, взвешивают в воздухе и в чистой воде.

Пористость покрытия Π (%) определяют по следующей формуле [1]:

$$\Pi = \left(\frac{\frac{W_{обр}}{\rho_{обр}}}{W_{\Sigma} - W'_{обр.ваз} - \frac{W_{пров}}{\rho_{пров}} \rho_{воды} - \frac{W_{ваз}}{\rho_{ваз}} \rho_{воды}} \right) \cdot 100, \quad (4.2)$$

где $\rho_{обр}$ – плотность материала покрытия; $\rho_{воды}$ – плотность дистиллированной воды; $\rho_{пров}$ – плотность металлической проволоки, поддерживающей образец; $\rho_{ваз}$ – плотность вазелина; $W_{обр}$ – масса образца на воздухе; $W_{пров}$ – масса части металлической проволоки, погруженной в воду; $W_{ваз}$ – масса вазелина, нанесенного на поверхность покрытия; W_{Σ} – суммарная масса образца, металлической проволоки и вазелина на воздухе; $W'_{обр.ваз}$ – масса образца, смазанного вазелином и подвешенного на проволоке в воде.

Однако из-за особенностей структуры покрытия, его малой толщины и т. д. ошибка при гидростатическом взвешивании образцов может достигать 100 % и более. Для получения точных результатов в общепринятую методику внесены изменения [2]. С целью более полного насыщения жидкостью открытых пор пропитку проводят в вакууме. Для уменьшения ошибки, связанной с явлением, аналогичным капиллярному гистерезису, образцы взвешивают в жидкости на проволоке, максимальный диаметр которой находят из соотношения:

$$D_{\max} = k \Delta P W_{\text{жид}}, \quad (4.3)$$

где ΔP – максимально допустимая ошибка эксперимента; $W_{\text{жид}}$ – масса образца в жидкости, г; k – коэффициент пропорциональности для воды, $k = 5\text{--}10$ см/г.

Для уменьшения ошибки, связанной с испарением жидкости с поверхности образца, последний взвешивают через контролируемые интервалы времени (15–30 с) несколько раз.

Истинную массу мокрого образца рассчитывают по формуле

$$W = W_1 + (W_1 - W_2)(\tau / \Delta \tau), \quad (4.4)$$

где W_1 и W_2 – массы образца, насыщенного жидкостью, при первом и втором взвешивании; τ – время до первого взвешивания с момента сушки образца; $\Delta \tau$ – интервал между первым и вторым взвешиванием.

Измерение пористости на пропитанных образцах

Из отделенного от основы покрытия изготавливают образец и определяют его массу. Затем производят пропитку образца, например, толуолом, которая заключается в кипячении образца в толуоле в течение 1 ч, и определяют его массу в толуоле. При пропитке толуол по соединенным между собой порам проникает в напыленный материал, и взвешивание позволяет определить его закрытую пористость. После испытаний образец нагревают в вакууме, испаряют толуол и сравнивают его массу с первоначальной.

Определение пористости на подложках

Чтобы определить пористость покрытия без отделения его от подложки, необходимо знать массу и плотность подложки. Для расчета плотности ρ и пористости покрытий открытой $\Pi_{откр}$ и общей $\Pi_{общ}$ можно использовать формулы

$$\rho_{покр} = \frac{(W_{покр+подл} - W_{подл})\rho_{жид}}{W_{покр+подл}^{жид} + W_{подл} \left(\frac{\rho_{подл} - \rho_{жид}}{\rho_{подл}} \right) - \rho_{покр+подл}^{жид} - \rho_{подл}}, \quad (4.5)$$

$$\Pi_{общ} = 1 - \frac{\rho_{покр}}{\rho_{ист}}, \quad (4.6)$$

$$\Pi_{откр} = W_{покр+подл}^{жид} - W_{покр+подл} \times \left[W_{покр+подл}^{жид} + W_{подл} \left(\frac{\rho_{подл} - \rho_{жид}}{\rho_{подл}} \right) - W_{покр+подл}^{жид} - W_{подл} \right], \quad (4.7)$$

где индексы обозначают: подл – подложка; покр+подл – покрытие с подложкой.

Измерение пористости прямым взвешиванием

Измерение пористости можно провести на цилиндрическом образце, который показан на рис. 4.1. На образце делают углубление, в которое напыляют исследуемый материал. После напыления покрытие шлифуют таким образом, чтобы образец с покрытием имел строго цилиндрическую форму.

Зная размеры основы, можно определить объем покрытия. После шлифования образец взвешивают и определяют массу покрытия. Зная массу и объем покрытия, вычисляют его пористость, если известна плотность напыляемого материала [1].

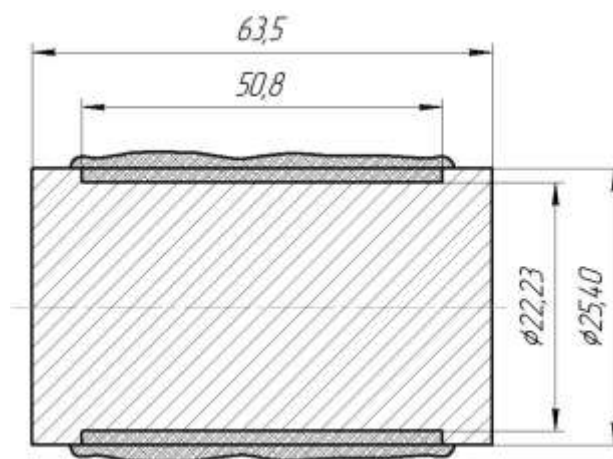


Рис. 4.1. Образец для определения пористости методом прямого взвешивания

Плотность покрытия ниже плотности исходного материала, пористость составляет 5–15 %. В табл. 4.1 приведены плотности покрытий из различных материалов, полученные усреднением большого количества экспериментальных данных.

Таблица 4.1.

Плотность и пористость покрытий
из различных материалов

Характеристика	Al ₂ O ₃		MgAl ₂ O ₄	30 % Al ₂ O ₃ в MgAl ₂ O ₄	3CaO·Al ₂ O ₃	ZrO ₂ стабилизированная	
	T≈100 °C	T≈1000 °C				T≈100 °C	T≈1000 °C
Плотность, г/см ³	3,3–3,5	3,7–3,8	3,32	3,21	–	–	–
Пористость, %	8,8	5–6	6,2	4,6	2,5	15–19	9–16

Оценка пористости по газопроницаемости

Газопроницаемость напыленного материала характеризуется способностью газов проходить через покрытие. Поэтому она тесно связана с наличием пор в покрытии, но не обязательно соответствует величине пористости. Для оценки пористости используют метод косвенного сравнения, основанный на измерении газопроницаемости покрытия. На газопроницаемость покрытий оказывают влияние как пористость, так и анизотропия покрытия. Она является важной характеристикой для коррозионно- и жаростойких покрытий.

Существуют различные способы измерения газопроницаемости покрытий. Газопроницаемость покрытий определяют на специальных образцах. Покрытие отделяют от подложки, обрабатывают в виде мембраны, зажимают в специальное приспособление (рис. 4.2).

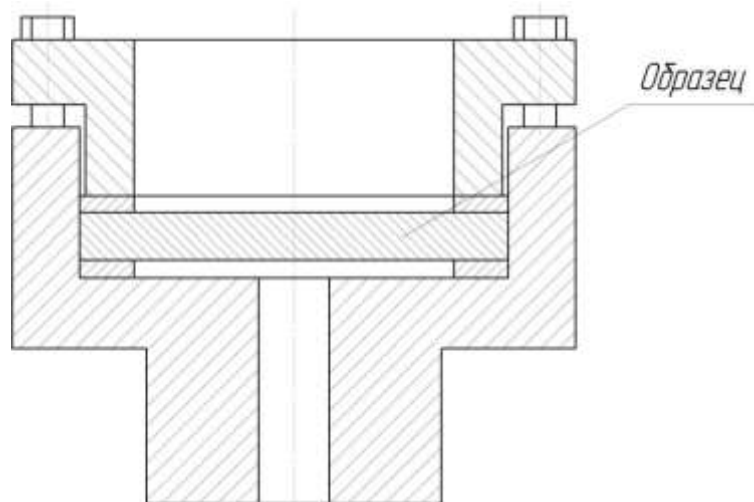


Рис. 4.2. Принципиальная схема приспособления для определения газопроницаемости покрытий

О газопроницаемости покрытий судят по количеству газа (воздуха), проходящего через 1 см^2 покрытия в единицу времени.

Для измерения количества пропущенного через образец газа в основном используют устройства, подобные представленному на рис. 4.3. Образец покрытия 2, отделенный от основы, устанавливают в державке 1 (см. рис. 4.2) на парафине, чтобы избежать нежелательных утечек. При установке образца необходимо обеспечить соответствующую эффективную площадь (см^2), через которую будет проходить газ. Открывают вентиль 4 и через трубу 5 емкость 6 заполняют водой до установленного уровня а. Затем закрывают вентили 4 и 5 и открывают краны 3 и 7. Вода из емкости 6 вытекает в мензурку 8, при этом давление в емкости падает ниже атмосферного, что приводит к образованию перепада давления на образце. Под действием этого перепада через поры образца проходит атмосферный воздух. Затем краны устанавливают таким образом, чтобы на манометре 9 сохранялся постоянный перепад ΔH (см), т. е. течение воздуха носило стационарный характер. С помощью измерительной мензурки определяют объем воды (см^3), которая вытекла

из емкости за определенный промежуток времени τ . Следовательно, за этот промежуток времени τ (с) объем воздуха, поступившего в емкость, будет также равен V .

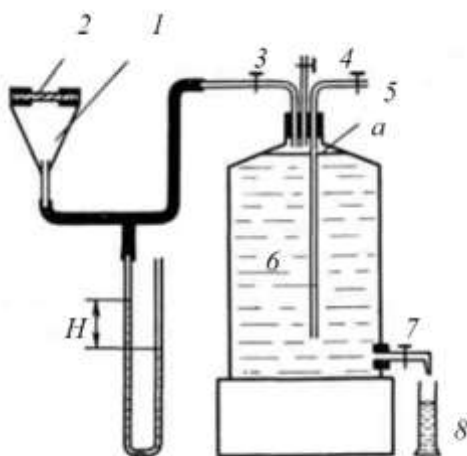


Рис. 4.3. Приспособление для определения газопроницаемости напыленных покрытий

Если обозначить толщину образца через h (см), то газопроницаемость можно представить в следующем виде:

$$\Gamma = hV / S_{\text{обр}} \cdot \Delta H \tau. \quad (4.8)$$

При проведении испытаний необходимо обращать внимание на то, что наличие влаги в покрытии снижает его газопроницаемость. Кроме того, в емкости необходимо поддерживать постоянное количество воды. При изучении газопроницаемости покрытия с другими жидкостями и газами используют аналогичный принцип измерения.

Определение толщины диффузионных и окисных слоев

Надежность и процент выхода годных изделий во многом зависят от качества проведения диффузионных и окислительных процессов. Поэтому в производственных условиях контролируют такие основные параметры диффузионных слоев, как толщину и поверхностное сопротивление. В большинстве случаев контроль этих параметров осуществляют на пластинах-«спутниках», поскольку метод контроля глубины диффузионных слоев является разрушающим.

Измерение толщины диффузионного слоя заключается в определении глубины залегания p - n -перехода, образовавшегося в результате диффузии примеси в подложку. Для определения глубины залегания p - n -перехода используют косые, цилиндрические или сферические шлифы. С помощью шлифов расширяют наблюдаемые диффузионные слои, толщина которых весьма мала (единицы микрометров и менее). Чтобы изготовить косой шлиф, пластину с p - n -переходом необходимо сошлифовать под углом. $1-5^\circ$. Для этого используют специальные приспособления, основной частью которых является оправка. Одна из сторон оправки скошена под заданным углом. Полупроводниковую пластину прикрепляют к справке с помощью клеящих веществ. Затем оправку вставляют в гнездо держателя и производят шлифовку. Выявляют p - n -переходы с помощью различных методов селективного окрашивания или осаждения металлов. Измерив значение h (рис. 4.4., a), можно определить глубину залегания p - n -перехода:

$$x_i = h \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.9)$$

где α – угол шлифа.

Более точное измерение данного параметра дает метод сферического шлифа. Шлифовку в этом случае производят вращающимся стальным шаром, на который нанесена эмульсия алмазного микропорошка. После окрашивания производят измерение хорды L с помощью микроскопа (рис. 4.4, b). Глубину залегания p - n -перехода вычисляют по формуле

$$x_i = L^2 / 4D, \quad (4.10)$$

где D – диаметр шара.

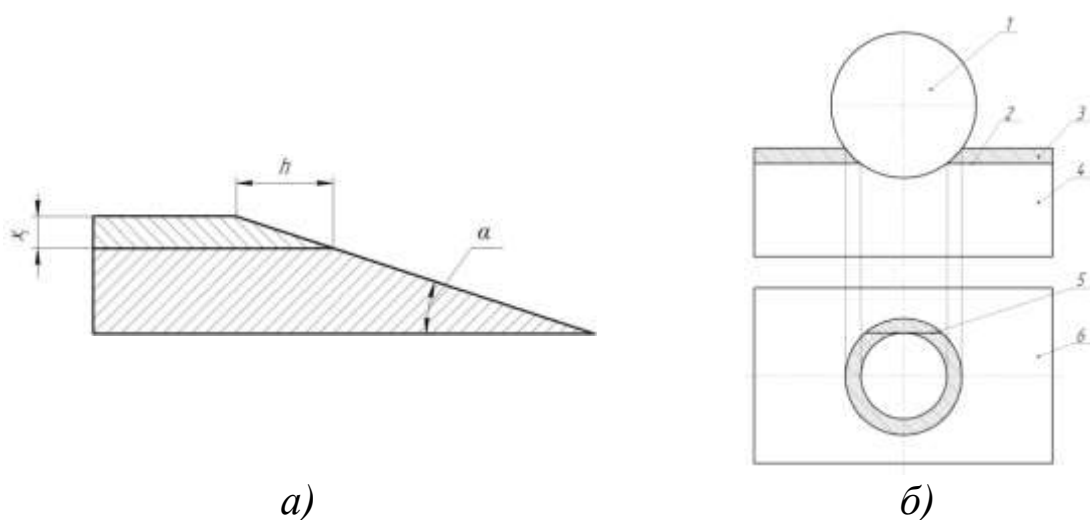


Рис. 4.4. Виды шлифов для определения толщины покрытий:
a – косой шлиф; *б* – сферический шлиф; 1 – стальной шарик;
 2 – *p-n*-переход; 3 – диффузионный слой; 4 – пластина кремния;
 5 – хорда *L*; 6 – вид окрашенного шлифа в плане

Форма и пример записи результатов при определении открытой пористости

Пример расчета пористости и плотности образцов при гидростатическом взвешивании (ГОСТ 26450.1-85) приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2.

Результаты гидростатического взвешивания образцов

Лабораторный номер образца	Масса сухого образца M_1	Гидростатическое взвешивание				Масса жидкости в порах образца ($M_3 - M_1$), г	Масса вытесненной жидкости ($M_3 - M_2$), г	Открытая пористость, %	Плотность рабочей жидкости г/см ³	Объемная плотность, г/см ³	Кажущаяся плотность г/см ³
		Масса насыщенного образца с подвесом в жидкости ($M_2 + a$), г	Масса погвеса в жидкости a , г	Масса насыщенного образца в жидкости M_2 , г	Масса насыщенного жидкостью образца в воздухе M_3 , г						
212	34,94	21,161	0,005	21,156	35,907	0,963	14,751	6,5	1,06	2,51	2,69
216	48,13	29,107	0,005	29,102	50,592	2,458	21,49	11,4	1,06	2,37	2,68
702	609,13	361,23	0,05	351,18	671,74	42,61	230,55	14,7	1,08	2,26	2,65
705	551,53	326,42	0,05	323,37	578,92	27,39	252,55	10,8	1,08	2,35	2,63

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Положительную или отрицательную роль играет пористость покрытий при их эксплуатации?
2. Что такое кажущаяся и истинная плотность материала? В каких соотношениях находятся эти величины?
3. Какими методами можно определить плотность и пористость покрытий?
4. Как измерить пористость методом гидростатического взвешивания?
5. Каковы особенности метода гидростатического взвешивания при определении пористости покрытий, по сравнению с пористостью основного материала?
6. Как соотносятся пористость и газопроницаемость покрытий?
7. Как измерить газопроницаемость?
8. Как измерить толщину покрытий с использованием косого и сферического шлифа?

Многовариантные задания:

Задание 4.1. Рассчитать глубину залегания *p-n*-перехода по данным, полученным методом сферического шлифа.

Номер варианта	Диаметр шара, мм	Длина хорды, мкм	Номер варианта	Диаметр шара, мм	Длина хорды, мкм
1	10	673	9	20	370
2	15	562	10	10	330
3	20	754	11	15	647
4	10	141	12	20	304
5	15	664	13	10	570
6	20	714	14	15	486
7	10	232	15	20	523
8	15	695	16	10	386

Задание 4.2. По данным гидростатического взвешивания образцов рассчитайте: открытую пористость, %; объемную плотность, г/см³; кажущуюся плотность, г/см³.

Номер варианта	Масса сухого образца, г	Масса насыщенного образца с подвесом в жидкости, г	Масса подвеса в жидкости, г	Масса насыщенного жидкостью образца в воздухе, г
1	105,24	82,087	0,005	114,712
2	70,756	63,68	0,004	82,785
3	52,658	39,494	0,008	68,45
4	85,299	71,651	0,005	103,212
5	197,724	154,225	0,005	211,565
6	26,258	24,157	0,004	29,146
7	114,591	106,57	0,007	132,926
8	82,678	60,355	0,006	95,08
9	177,484	161,51	0,003	228,954
10	26,972	20,229	0,004	33,445
11	148,755	124,954	0,007	162,143
12	152,061	136,855	0,006	164,226
13	109,143	80,766	0,006	128,789
14	164,829	145,05	0,008	184,608
15	195,427	162,204	0,008	209,107

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасуй, А. Техника напыления [Текст] / А. Хасуй. – Москва: Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. Соколова, Т. В. Комплексное исследование напыленной окиси алюминия с некоторыми заданными физико-химическими характеристиками [Текст] / Т. В. Соколова, С. С. Барьенев, А. В. Кийко // В Н. Неорганические и органосиликатные покрытия. – Ленинград: Наука, 1975. – 128 – 135 с.
3. Кудинов, В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий [Текст]/ В. В. Кудинов, В. М. Иванов – Москва: Машиностроение, 1981. – 192 с. (стр. 124-125).
4. Бочкин, О. И. Механическая обработка полупроводниковых материалов [Текст] / О. И. Бочкин, В. А. Брук, С. Н. Никифорова-Денисова. – Москва: Высшая школа, 1977. – 146 с. (стр. 13-31, 130-134).
5. Бобров, Г. В. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование) [Текст]: учеб. пособие для студентов вузов. / Г. В. Бобров, А. А. Ильин. – Москва: Интермет Инжиниринг, 2004. – 624 с. (стр. 72-99).
6. Полякова, К. К. Технология и оборудование для нанесения порошковых покрытий [Текст]/ К. К. Полякова, В. И. Пайма. – Москва: Москва, 1972. – 136 с. (стр. 94-126).

7. Теория и технология напыленных покрытий [Текст]: лабораторный практикум / сост.: В. И. Костиков, С. И. Педос, И. В. Нарамовский, Г. А. Либенсон. – Москва: МИСИС, 1986. – 159 с. (стр. 130-154).

8. ГОСТ 2409-95. Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. Москва: Госстандарт, 1997, 24 с.

9. ГОСТ 9.304-87. Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля. Москва: Госстандарт, 1989, 32 с.

10. 26450.1-85. Породы горные. Методы определения коллекторских свойств. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением. – Москва: Госстандарт. 1987, 50 с.

11. Технология нанесения и свойства покрытий [Текст]: лабораторный практикум / сост.: Ю. Е. Спектор, Е. Д. Кравцова. – Красноярск: ФГБОУ ВПО «СФУ», 2008. – 99 с. (стр. 6-15).

Содержание

Содержание лабораторных работ.....	3
Лабораторная работа №1. Процессы кристаллизации металла при сварке	3
Лабораторная работа №2. Изучение процесса первичной кристаллизации и формирования структуры наплавленного металла шва.....	14
Лабораторная работа №3. Контроль качества сварных соединений. Дефекты сварки	24
Лабораторная работа №4. Основные методы неразрушающего контроля качества сварных соединений	45
Лабораторная работа №5. Визуальный и измерительный контроль качества сварных соединений.....	69
Лабораторная работа №6. Акустико-эмиссионный метод контроля сварных соединений	94
Лабораторная работа №7. Показатели качества методов испытания сварных соединений.....	124
Лабораторная работа №8. Методы измерения деформаций и остаточных напряжений в сварных соединениях	132
Лабораторная работа №9. Определение основных технологических характеристик покрытий	142