Глава 30. Контроль качества сварных и паяных соединений

30.1. Дефекты сварных и паяных соединений

При производстве сварных и паяных конструкций могут возникать дефекты, т. е. отдельные несоответствия продукции нормативным требованиям. Влияние дефекта на работоспособность конструкции определяется многими факторами. Оно зависит не только от характера самого дефекта — его размеров, расположения, но и от свойств материала, условий эксплуатации.

Чрезвычайно важно определить допустимое число дефектов при сварке и пайке в конструкции, так как изготовить бездефектную конструкцию практически невозможно.

Дефектность q в контролируемом элементе определяется отношением суммарной площади дефектов $\sum\Delta s$ к расчетной площади контролируемого сечения s_p:

$$q = \frac{\sum \Delta s}{s_p}.$$

Дефекты, встречающиеся при сварке, целесообразно рассмотреть отдельно применительно к термическому и некоторым видам термомеханического класса сварки.

Дефекты сварки термического класса: непровар, который представляет собой частичное отсутствие сплавления свариваемых кромок со стороны корня шва или частичное отсутствие сплавления наплавленного металла с основным; пористость, представляющая собой газовые пузырьки в металле; трещины; шлаковые включения; пережог — окисление по границам зерен; прожог — сквозное проплавление металла; подрез — углубление основного металла в месте его перехода к поверхности шва.

Дефекты сварки термомеханического класса. Дефекты при точечной сварке: непровар — отсутствие или малый диаметр ядра; выплеск металла; прожог; трещины; раковины и пористость; вмятины (более 10—20% Толщины листа).

Дефекты при шовной сварке: негерметичность шва; под-плавление поверхности деталей вследствие плохой очистки деталей и роликов; прожог.

Дефекты при стыковой сварке: смещение свариваемых деталей; непровар; перегрев и пережог; подгар поверхности деталей в зажимах; чрезмерно большое количество выдавленного металла; трещины; остатки шлаков и оксидов в сварном шве.

При пайке возможны следующие дефекты: смещение паяемых элементов; раковины в швах; пористость в паяном шве; флюсовые и шлаковые включения; трещины; непропай; деформации местные и общие.

30.2. Методы контроля качества сварных и паяных соединений

Методы контроля бывают двух типов: разрушающие и неразрушающие.

К разрушающим относятся испытания сварных образцов-свидетелей. Сваривают их при тех же самых режимах, что и изделия, обычно непосредственно перед началом сварки последних. Всесторонние испытания образцов позволяют косвенным образом судить о качестве сварных соединений в изделиях.

Более точно воспроизвести характер нагружения сварных соединений можно на модельных конструкциях или на самих изделиях, которые выборочно подвергают испытаниям вплоть до разрушения. Необходимое число разрушаемых изделий от партии устанавливается конструктором в каждом конкретном случае.

Неразрушающие методы контроля включают в себя контроль параметров режимов сварки, некоторые испытания свойств сварного шва без его разрушения (например, измерение твердости, химический анализ металла шва, не затрагивающий целостности конструкции), наконец, физические методы контроля (дефектоскопия).

Необходимо отметить особое значение контроля основного металла, сварочных материалов,

состояния оборудования и технологии сварки.

Виды контроля сварных и паяных конструкций, применяемые в промышленности, достаточно разнообразны. К ним относятся технический осмотр, контроль радиационный, акустический, магнитный, капиллярный и др. Для проверки герметичности и прочности сварных конструкции применяются гидравлические испытания, испытания сжатым воздухом, различного типа течеискателями. Последние методы контроля представляют вид контроля, называемый течеисканием.

Внешний осмотр. Если внешний осмотр проводится с применением оптических средств (лупы, микроскопа, перископических оптических устройств и т. п.), то такой метод контроля называют визуально-оптическим.

Внешнему и визуально-оптическому контролю подвергается почти 100% всех швов. Такой довольно простой метод контроля позволяет, однако, обнаружить наружные дефекты довольно широкого спектра: подрезы, поры, трещины, незаваренные кратеры, раковины, свищи, неравномерность шва и несоответствие его геометрии требованиям чертежа.

Радиационный контроль. Выявление дефектов основано на различном поглощении металлом и неметаллическими веществами проникающего излучения. В качестве источника подобных излучений применяют рентгеновские аппараты, позволяющие получить тормозное (рентгеновское) излучение, различного типа ускорители (ускорители электронов, бетатроны).

При проведении радиационного контроля возможны три основных метода выявления дефектов.

1. Радиографический с фиксацией изображения на пленке или бумаге. Его преимущество — возможность сохранения документального свидетельства результатов просвечивания и простота контроля.

2. Радиоскопический (радиационная интроскопия). Дефект в этом случае наблюдается на флюороскопическом экране, экране электронно-оптического преобразователя, рентген-видикона и т. п. Чувствительность радиоскопии несколько ниже, чем радиографии.

3. Радиометрический. Ионизирующее излучение, проникающее сквозь контролируемый участок, преобразуется с помощью сцинтилляционных кристаллов или газоразрядных счетчиков в электрические сигналы, которые позволяют судить о наличии или отсутствии дефекта в соединении. Безынерционность системы дает возможность установить обратную связь между процессом сварки и контролем.

Радиационный контроль служит для обнаружения пор, шлаковых включений, непроваров и трещин.

Акустический контроль. С его помощью выявляются многие внутренние дефекты: трещины, пустоты, поры, непровары, расслоения, непропаи и т. п. Вид контроля основан на изменении характера распространения волн (звуковых и ультразвуковых) в сварных или паяных швах.

По способу выявления дефектов акустические методы делятся на эхо-импульсный, теневой, зеркально-теневой, импедансный, метод свободных колебаний, велосимметричный, резонансный.

Эхо-импульсный (эхо-метод) основан на отражении акустических (ультразвуковой частоты) колебаний от поверхности раздела между дефектом *2* и материалом детали *1*(рис. 30.1, *а)*.

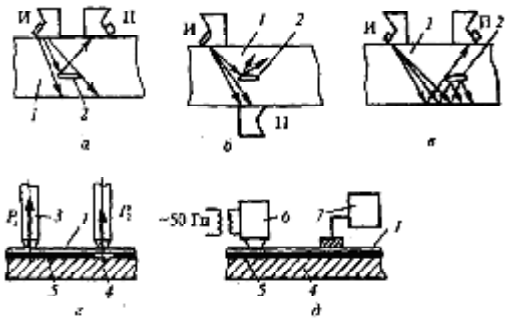

Рис. 30.1. Принципиальная схема акустических методов контроля

Колебания излучаются электроакустическими источниками (И) в виде пластин из пьезоэлектрических материалов. Отраженные от дефекта ультразвуковые колебания улавливаются приемником (П), преобразуются затем в электрический импульс, наблюдаемый на экране осциллографа.

При ***теневом*** методе (рис. 30.1, б) приемник устанавливается с обратной стороны детали. При наличии дефекта на пути ультразвуковых волн излучателя к приемнику произойдет их значительное уменьшение или даже исчезновение.

Зеркально-теневой метод (рис. 30.1, в) является своего рода комбинацией двух предыдущих. Приемником фиксируется уменьшение отраженного импульса от данной (зеркальной) поверхности, которое тем больше, чем больше размеры дефекта.

В ряде случаев (при эхо-методе и зеркально-теневом) излучатель и приемник могут быть объединены в одном устройстве, которое излучает и принимает отраженный сигнал. При теневом методе излучатель и приемник должны быть раздельными.

Суть *импедансного* метода заключается в следующем: колеблющийся стержень *3* (рис. 30.1, *г)* перемещается по верхней детали *1*, соединенной сваркой или пайкой с деталью *4*. Сила реакции при этом на стержень будет P_1. При наличии дефекта (например, отсутствии припоя *5)* верхняя обшивка над ним колеблется с меньшим сопротивлением и реакция на стержень P_2 будет меньше.

Метод свободных колебаний (рис. 30.1, *д)* состоите фиксировании индикатором 7 с последующим усилением изменения частоты свободных колебаний, возбуждаемых в исследуемой детали электромагнитом *б* с бойком. Частота изменится, если между деталями будет нарушена сплошность (например, из-за непропая или непровара).

Велосимметричный метод основан на разнице скорости распространения акустических волн в соединении с дефектами или без них, а *резонансный* — на изменении резонансной частоты ультразвуковых колебаний.

Для контроля дефектов при сварке и пайке применяются чаще всего эхо-метод, теневой и зеркально-теневой. Можно использовать импедансный метод свободных колебаний.

Велосимметричный и резонансный методы применяют реже, хотя с их помощью также обнаруживаются несплошности. Обычно резонансный метод используют для измерения отклонений толщины покрытия или толщины детали.

При ультразвуковом методе контроля обнаружение дефекта осуществляется посредством продольно-поперечного сканирования искателем исследуемого участка. Надежность такой дефектоскопии во многом определяется квалификацией оператора, поэтому создаются установки с автоматическим сканированием искателя. Важно также иметь чистую и гладкую поверхность, чтобы уменьшить отражение от ее неровностей. С этой целью перед началом контроля поверхность, где будет осуществляться сканирование, покрывается тонким слоем минерального масла, солидола, технического глицерина или спирта.

Ультразвуковая дефектоскопия получила распространение при контроле качества сварных соединений, выполненных всеми методами сварки и пайки. Этим методом можно обнаруживать дефекты в деталях большой толщины: стальных — до 700 мм.

Ультразвуковой метод контроля позволяет установить наличие большинства дефектов, в том числе даже оксидных пленок, расслоений металла. Однако он трудоемок, его надежность зависит в значительной степени от квалификации оператора. Сложнее решить вопрос о документальном оформлении результатов контроля. Нельзя считать универсальным метод ультразвуковой дефектоскопии и с точки зрения возможности обнаружения дефектов любого типа. Как показывает практика, ультразвуковой дефектоскопией не удается надежно отличить при точечном, термодиффузионном и некоторых других методах сварки участки, действительно сваренные, от тех, где произошло только слипание металла двух деталей. При ультразвуковом контроле помехи могут вызываться определенным строением структуры металла, например у аустенитных сталей.

Магнитный контроль. Распределение магнитных силовых линий в случае намагничивания каким-либо образом сварных или паяных деталей изменяется в месте дефекта и может быть зафиксировано одним из следующих методов: магнитопорошковым, магнитографическим, индукционным.

При *магнитопорошковом* методе на деталь наносится ферромагнитный порошок, предварительно смешанный с керосином, маслом.

Более технологичен *магнитографический* метод, заключающийся в намагничивании предварительно размагниченной магнитной пленки, которая накладывается на контролируемый участок. На пленке фиксируется локальное нарушение магнитных силовых линий в месте дефекта, если такой имеется в шве. Записанная магнитограмма воспроизводится с помощью специального считывающего устройства на экране осциллографа.

Индукционный метод заключается в регистрации неоднородности магнитного поля индукционной катушкой. При наличии дефектов распределение магнитного потока изменяется, что фиксируется катушкой, и затем преобразуется в световой или звуковой сигнал.

Магнитный контроль широко применяется для выявления поверхностных и подповерхностных (на глубине 2...3 мм) дефектов типа трещин, не-проваров, рыхлот и т. п. в сварных соединениях из ферромагнитных материалов.

Капиллярный контроль. Капиллярный контроль применяется для выявления наружных дефектов сварных и паяных соединений: трещин, свищей, расслоений и т. п. Один из вариантов такого контроля — люминесцентный. Сущность его заключается в том, что деталь на 20—30 мин погружают в индикаторную жидкость (например, смесь 85% керосина и 15% трансформаторного масла). Трещины, поры и другие дефекты подобно капиллярам втягивают в себя индикаторную жидкость и хорошо ее удерживают. Деталь вытирают насухо и на ее поверхность наносят сорбент — тальк или порошок магнезии. Сорбент через определенное время вытягивает на поверхность часть индикаторной жидкости, оставшейся в дефектах и не удаленной при вытирании детали. Если теперь поверхность детали облучить ультрафиолетовыми лучами, то индикаторная жидкость, поглощенная сорбентом, будет ярко люминесцировать, свидетельствуя о наличии дефекта.

Вместо люминесцентного метода можно применять цветной метод (метод красок). Он чрезвычайно прост и заключается в нанесении на контролируемую поверхность жидкого красителя — красной проникающей жидкости.

Происходит капиллярное втягивание окрашенной жидкости в наружные дефекты. После очистки и просушки поверхности на нее наносят сорбент — белую проявляющую жидкость. При ее высыхании красная краска из дефектных мест диффундирует в белую, окрашивая ее и выявляя тем самым дефект.

Чувствительность цветного метода очень высока. С его помощью выявляются не только трещины, но и участки, пораженные межкристаллитной коррозией.

Контроль течеисканием. Назначение метода — определить герметичность сварного или паяного соединения. Обнаружение дефекта каким-либо из рассмотренных ранее методов неразрушающего контроля не позволяет, за некоторым исключением (например, определенные визуально сквозные свищи или трещины), сделать вывод о плотности соединения. Поэтому необходимо проводить испытания на герметичность, которые назначаются, как правило, наряду с другим каким-либо контролем.

В зависимости от условий эксплуатации, характера испытуемой конструкции для контроля течеисканием используются жидкость и газ. С учетом разновидностей газов и жидкостей можно выделить несколько методов, наиболее широко применяемых при контроле герметичности сварных и паяных изделий: а) водой; б) керосином; в) красками; г) люминофором; д) сжатым воздухом; е) аммиаком; ж) гелием; з) галогенами.

Испытания водой (гидравлические) необходимы для сосудов и аппаратуры, работающих под давлением. Таким образом проверяют не только прочность, но и плотность соединений. Давление воды в изделии при испытаниях выбирается в зависимости от характера и требований к конструкции (давление при испытании в 1,5—2 раза больше рабочего). Случайное разрушение конструкции при гидравлических испытаниях менее опасно, чем при испытании воздухом, так

как давление из-за малой сжимаемости жидкости моментально падает, едва начинается разрушение.

Испытание керосином применяется для сосудов, рассчитанных на работу без давления. Оно заключается в том, что одну сторону соединения, доступную для осмотра, забеливают меловой эмульсией и затем высушивают, а противоположную смачивают керосином. Обладая большой проникающей способностью, керосин, если в соединении нарушена герметичность, может проникнуть в мел, на котором появляется характерное маслянистое пятно.

Испытание красками основано на уже изложенном принципе капиллярности, однако технология самого контроля несколько другая, так как для выявления негерметичности жидкость с добавленной в нее краской наносится со стороны, противоположной той, на которую нанесен сорбент. Аналогично проводятся испытания люминофорами.

Испытание сжатым воздухом проводится после гидравлического. Неплотности обнаруживаются промазыванием швов мыльной пеной,

погружением испытываемого изделия в воду или по падению давления кон-трольного манометра, установленного на изделия. Так как испытания сжатым воздухом представляют большую опасность, их проводят в специально оборудованных помещениях при самом строгом соблюдении правил техники безопасности. С этой же целью до пневматических испытаний проводят гидравлические, а также снижают давление при испытании сжатым воздухом до 0,8—1,2 от величины рабочего давления.

Испытания аммиаком, углекислым газом, их смесями с воздухом основаны на химической индексации проникающих через несплошности под небольшим избыточным давлением указанных газов, вступающих в реакцию с индикатором. Индикатором смачивается бумажная лента или полоска марли и накладывается на контролируемый участок. В качестве индикатора при использовании аммиака применяется 5%-ный раствор азотнокислой ртути или раствор фенолфталеина. В результате химической реакции между аммиаком и воздухом на индикаторе появляются темные пятна.

Испытание гелием (масс-спектрометрическое) позволяет определять наличие несплошностей с очень высокой чувствительностью. Гелий обладает хорошей проникающей способностью. Если в изделии создать вакуум 133 МПа и снаружи все соединения последовательно обдувать гелием из специального пистолета, соединенного с баллоном, то гелий при наличии несплошностей проникает внутрь изделия. Изделие соединено с масс-спектрометром, где поддерживается более высокий (порядка 0,65 МПа) вакуум. Поэтому гелий попадает в масс-спектрометр, в котором его присутствие фиксируется, в результате стрелка индикатора отклоняется или раздается звуковой сигнал. Положение дефекта определяется координатами пистолета в момент срабатывания сигнализации.

Возможен и другой вариант контроля с помощью гелия. В этом случае гелий из баллона накачивается под некоторым давлением в изделие, а масс-спектрометр соединяется со специальным щупом, который перемещают вдоль шва. Если имеется течь, то гелий будет проникать наружу и попадет через щуп в масс-спектрометр течеискателя, а система сигнализации известит оператора о наличии дефекта.

В галогенных течеискателях используется воздух в смеси с фреоном, тетрахлоридом углерода и некоторыми другими газами. Смесью заполняется испытуемый сосуд под избыточным давлением $2 \cdot 10^4$—$6 \cdot 10^6$ Па и его соединения проверяются с помощью щупа. В щупе имеется два электрода, из которых анод нагрет до 800—900 °С. Если в соединении имеется сквозной дефект, то галогенный газ, просачиваясь через несплошность, засасывается в щуп. Для этого в нем имеется специальный вентилятор, приводимый в движение миниатюрным электродвигателем. Молекулы галогенного газа, попадая в межэлектродное пространство, ионизируются. Ионы, обладая высоким отрицательным потенциалом, усиливают выход положительных ионов с анода. Изменение анодного тока служит сигналом для отклонения стрелки миллиамперметра или подачи импульса тока на телефон.

Выбор конкретного метода контроля течеисканием во многом определяется его чувствительностью. В табл. 30.1 для сравнения приведена чувствительность

рассмотренных методов.

В промышленности применяют статистические методы контроля. Их цель — улучшить управление технологическим процессом сварки или пайки на основе методов математической статистики, повысить его стабильность, а также обеспечить математико-статистический выборочный контроль.

Статистические методы управления качеством и выборочный контроль не исключают применения разрушающих методов контроля, а, наоборот, базируются на статистическом материале, полученном этими методами.

Таблица 30.1. Чувствительность методов течеискания (в л·Па/с)

Основной метод	Рабочее тело	Чувствительность
Масс-спектрометрический	Гелий	$1{,}3\cdot10^{-3}$
Галогенный	Фреоно-воздушные смеси	13
Пневматический	Воздух, азот (вакуум)	$6{,}5\cdot10^{3}$
Химический	Аммиачно-воздушные смеси, углекислый газ	65
Гидравлический	Вода	$6{,}5\cdot10^{3}$
Керосиновый	Керосин	$6{,}5\cdot10^{2}$
Люминесцентно-	Вода + индикатор	6,5

Контрольные вопросы

1. Какие дефекты могут возникать при различных методах сварки и каковы причины их образования?
2. Что такое разрушающие и неразрушающие методы контроля и в чем особенности их применения?
3. Как можно проверить герметичность сварных конструкций?
4. На каких физических принципах основаны радиационный, акустический и магнитный методы контроля?