

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра вагонов

О. В. ХОЛОДИЛОВ

ДЕФЕКТЫ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Гомель 2022

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра вагонов

О. В. ХОЛОДИЛОВ

ДЕФЕКТЫ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности «Подвижной состав железнодорожного транспорта»*

Гомель 2022

УДК 629.4.02:620.1(075.8)
ББК 39.22.-08
Х73

Р е ц е н з е н т ы: заведующий кафедрой материаловедения в машиностроении д-р техн. наук, профессор *В. М. Константинов* (БНТУ); кафедра технологии машиностроения (заведующий кафедрой – канд. техн. наук, доцент *В. М. Шеменков*) (Белорусско-Российский университет)

Холодилов, О. В.

Х73 Дефекты материалов и изделий : учеб. пособие / О. В. Холодилов ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 242 с.
ISBN 978-985-891-046-4

Изложены физические основы строения и свойств конструкционных материалов. Приводятся основные виды дефектов различной природы.

Предназначено для студентов вузов железнодорожного транспорта специальности «Подвижной состав железнодорожного транспорта» всех форм обучения, будет полезно для аспирантов и магистрантов соответствующих специальностей и может быть использовано инженерно-техническими работниками в их практической деятельности.

УДК 629.4.02:620.1(075.8)
ББК 39.22.-08

ISBN 978-985-891-046-4

© Холодилов О. В., 2022
© Оформление. БелГУТ, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Принятые сокращения	4
Введение	5
1 Технические материалы и их классификация	6
2 Атомно-кристаллическая структура металлов	12
3 Общие представления о дефектах. Классификация дефектов	15
3.1 Общие представления.....	15
3.2 Дефекты кристаллического строения.....	17
4 Дефекты металлов	27
4.1 Производственно-технологические дефекты.....	28
4.1.1 Литейные дефекты.....	28
4.1.2 Дефекты прокатанного и кованого металлов.....	42
4.1.3 Дефекты, возникающие при различных видах обработки деталей.....	59
4.2 Дефекты соединения деталей.....	68
4.2.1 Дефекты сварки (сварных соединений).....	68
4.2.2 Дефекты пайки (паяных соединений).....	132
4.2.3 Дефекты клеевых соединений.....	139
5 Эксплуатационные дефекты	143
6 Дефекты рельсов	150
6.1 Общие вопросы. Термины и определения.....	150
6.2 Структура обозначения дефектов рельсов.....	153
6.3 Классификация и каталог дефектов рельсов.....	157
6.4 Маркировка дефектных и остродефектных рельсов.....	202
7 Дефекты неметаллических материалов	203
8 Неразрушающий контроль материалов и изделий	213
Заключение	238
Список использованной и рекомендуемой литературы	239

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

НК – неразрушающий контроль;
ОК – объект контроля;
НТД – нормативно-техническая документация;
МПК – магнитопорошковый контроль;
ВИК – визуальный и измерительный контроль;
ФЗК – феррозондовый контроль;
ВТК – вихретоковый контроль;
ВТП – вихретоковый преобразователь;
УЗ – ультразвук, ультразвуковой;
УЗК – ультразвуковой контроль;
ОНК – оптический неразрушающий контроль;
ТНК – тепловой неразрушающий контроль;
ТУ – технические условия;
КМ – композиционный материал;
ПКМ – полимерный композиционный материал;
ИК – инфракрасный;
УФ – ультрафиолетовый;
МСК – метод свободных колебаний;
РК – радиографический контроль;
ДР – дефектный рельс;
ОДР – острodefектный рельс;
ВПТ – внутренняя продольная трещина (в головке рельса);
ЗПП – замена (рельса) в первоочередном порядке.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ причин отказов, выхода из строя и аварий машин, агрегатов и конструкций показывает, что в большинстве случаев это происходит в результате наличия дефектов в конструкционных элементах, допущенных в процессе их изготовления или возникших в эксплуатации. Дефекты существенно сокращают долговечность конструкционных элементов, а период развития усталостных трещин в зависимости от условий эксплуатации режима циклического нагружения и величины концентрации напряжений может составлять существенную, а в ряде случаев и преобладающую часть общей долговечности конструкционного элемента.

Исследования причин отказов паровых котлов, теплообменников, резервуаров химической и нефтехимической промышленности показывают, что 94 % отказов связано с возникновением трещин. Наиболее характерные места зарождения и нахождения трещин – сварные швы или зоны термического влияния основного металла около сварного шва (89 %). Причины, вызывающие развитие трещин, распределяются следующим образом: усталость – 24 %, коррозия – 14 %, технологические дефекты – 29 %; неустановленные причины и ошибки эксплуатации – 33 %. Для сосудов высокого давления первых контуров атомных энергетических установок причины отказов следующие: механическая или термическая усталость – 41 %, дефекты производства – 18 %, прочие – 12 %. В авиационных двигателях ≈50 % отказов связано с накоплением усталостных повреждений в конструкционных элементах. Приведенные данные показывают значительную роль технологических (особенно в сварных соединениях) дефектов производства.

В процессе изготовления детали материалы подвергаются различным технологическим операциям, а эксплуатация детали происходит при разных условиях (температура, режимы механического нагружения, среды и т. п.). В связи с этим дефекты, возникшие в материалах и конструкционных элементах в процессе их технологических переделов или при эксплуатации, можно соответствующим образом классифицировать.

Цель данного учебного пособия – формирование знаний, умений и профессиональных компетенций в области дефектоскопии материалов и изделий из конструкционных материалов различной природы. Основной задачей является приобретение навыков определения типа и вида дефектов материалов и изделий, возникающих при различных технологических процессах и условиях эксплуатации изделий, умения их классифицировать.

1 ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Классификация материалов – система соподчиненных понятий в области материаловедения, используемая для установления связей между группами материалов. Она отражает объективные закономерности взаимосвязи структуры и свойств материалов, изучаемые материаловедением. Наибольшее значение в технике имеют классификации материалов по их **структурным** и **функциональным** признакам [1].

Главным структурным признаком материалов является агрегатное состояние, в зависимости от которого их подразделяют на следующие типы: твердые материалы, жидкости, газы, плазма.

Классификация твердых материалов наиболее интересна по **структурному признаку** – критерию порядка в расположении частиц (рисунок 1.1).

Кристаллические материалы по типу связи между частицами подразделяют на атомные, ионные, металлические и молекулярные. Из атомно-кристаллических материалов, в структуре которых преобладают ковалентные связи, наибольшее значение в технике имеют полиморфные модификации углерода и полупроводниковые материалы на основе элементов IV группы периодической системы.

Типичными представителями первых являются алмаз – самый твердый минерал (твердость 10 по минералогической шкале) и графит – наиболее распространенная в земной коре и устойчивая модификация углерода со слоистой структурой. Полупроводниковые кристаллические германий и кремний являются основными материалами полупроводниковой электроники.

В обширную совокупность ионно-кристаллических материалов, имеющих кристаллическую структуру с ионным типом связей, входят оксиды металлов (соединения металлов с кислородом), которые являются составляющими важнейших руд, технологических присадок при плавке металлов, полуфабрикатов, формируемых методами порошковой металлургии, и т. д., а также бориды, карбиды, нитриды (химические соединения металлов и некоторых неметаллов соответственно с бором, углеродом, азотом), которые используют как компоненты твердых сплавов.

Свойствами металлических кристаллов обладают более 80 химических элементов и множество сплавов.

Структура молекулярных кристаллов характерна для многих полимерных материалов, молекулы которых состоят из большого числа повторяю-

щихся звеньев. Это биополимеры – высокомолекулярные природные соединения и их производные (в том числе древесина); синтетические полимеры, получаемые из простых органических соединений методами полимеризации и поликонденсации; неорганические полимеры, молекулы которых имеют неорганические главные цепи и не содержат органических боковых групп. К числу неорганических полимеров относят силикаты и вяжущие. Природные силикаты – класс важнейших породообразующих минералов, составляющих около 80 % массы земной коры. К неорганическим вяжущим материалам относятся цемент, гипс, известь и др. Молекулярные кристаллы инертных газов – элементов VIII группы периодической системы – испаряются при низких температурах, не переходя в жидкое состояние. Они находят применение в криоэлектронике, занимающейся созданием электронных приборов на основе явлений, которые имеют место в твердых телах при криогенных температурах.

Некристаллические твердые материалы разделяют по признакам упорядоченности и стабильности структуры на аморфные, стеклообразные и полуразупорядоченные нестеклообразные.

Типичными представителями аморфных материалов являются аморфные полупроводники, аморфные металлы и сплавы.

В группу стеклообразных материалов входят некоторые органические полимеры (полиметилметакрилат при температурах ниже +105 °С, поливинилхлорид – ниже +82 °С и др.), а также многие неорганические материалы: неорганическое стекло на основе оксидов кремния, бора, алюминия, фосфора и т. д.; многие материалы для каменного литья (базальты и диабазы со стеклообразной структурой, металлургические шлаки, природные карбонаты с островной и цепочечной структурой (доломит, мергель, мрамор и др.)).

В полуразупорядоченном нестеклообразном состоянии находятся студни (структурированные системы «полимер – растворитель», образующиеся при затвердевании растворов полимеров или набухании твердых полимеров), многие синтетические полимеры в высокоэластическом состоянии, каучуки и резины, большинство материалов на основе биополимеров, в том числе текстильные и кожевенные материалы, а также органические вяжущие материалы: битумы, дегти, пеки и др.

Несовершенство рассмотренной классификации состоит в том, что технические материалы, как правило, неоднородны по структуре и включают несколько фаз.

Принадлежность материала к той или иной структурной группе зависит от преобладания в нем соответствующей структуры, что в значительной мере обусловлено составом, технологической предысторией и другими индивидуальными признаками материала.

По признаку количества фаз и масштаба неоднородностей структуры твердые материалы можно разделить на простые, композиционные сплавы.

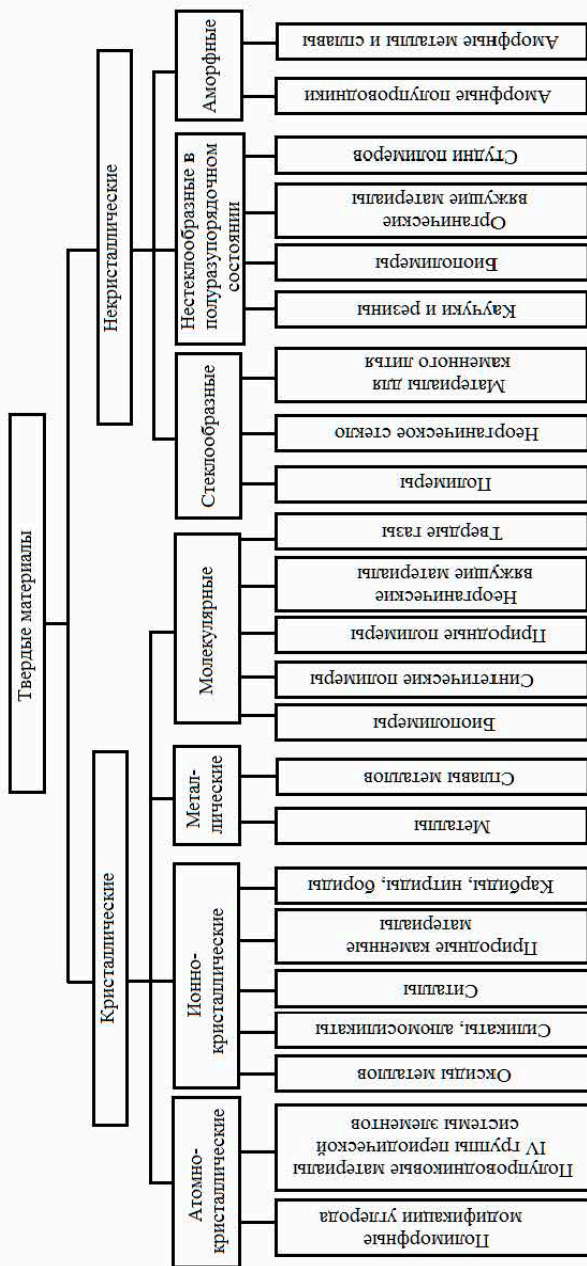


Рисунок 1.1 – Классификация твердых материалов по структурному признаку

Первые состоят из одного химического элемента или соединения и имеют однородную макроструктуру. Границей различимости макроструктуры считают предел разрешения оптического микроскопа $\approx 0,3 \dots 5$ мкм.

Сплав – материал с однородной макроструктурой, образовавшийся в результате затвердевания нагретой до жидкого состояния смеси химически разнородных веществ. Веществами, образующими сплав, могут быть металлы, неметаллы, оксиды, органические соединения и др.

Композиционные материалы (композиты) состоят из нескольких фаз и имеют неоднородную макроструктуру. Характерные типы композитов: 1) материалы из вещества-основы с распределенными в нем упрочнителями из другого вещества (например, бетон); 2) материалы, состоящие из одного химического элемента или соединения, распределенного на макронеоднородные фазовые включения (например, графит с включениями алмаза); 3) сплавы, состоящие из макронеоднородных фаз с направленной кристаллизацией, и другие.

По **назначению** технические материалы подразделяют на следующие группы.

Конструкционные материалы – твердые материалы, предназначенные для изготовления изделий, несущих механическую нагрузку.

Они обладают комплексом механических свойств, обеспечивающих требуемые работоспособность и технический ресурс изделий при воздействии рабочей среды, температуры и других эксплуатационных факторов. Одновременно к ним предъявляют технологические требования, определяющие наименьшую трудоемкость изготовления деталей и конструкций, и экономические, касающиеся стоимости и доступности материала, что очень важно в условиях массового производства. Конструкционные материалы подразделяют на типы, основными из которых являются металлы, силикаты и керамика, пластмассы, резина, древесина, многие композиционные материалы.

Электротехнические материалы характеризуются особыми электрическими и магнитными свойствами. Они предназначены для изготовления изделий, применяемых для передачи, преобразования и потребления электроэнергии. К ним относятся магнитные материалы, проводники, полупроводники, а также диэлектрики в твердой, жидкой и газообразной фазах.

Триботехнические материалы предназначены для применения в узлах трения с целью регулирования параметров трения и изнашивания, обеспечения заданных работоспособности и технического ресурса этих узлов. Основными видами таких материалов являются смазочные, антифрикционные и фрикционные. Номенклатуру первых образуют смазочные материалы в

твердой (графит, тальк, дисульфид молибдена и др.), жидкой (смазочные масла) и газообразной (воздух, пары углеводородов и другие газы) фазах.

В совокупность антифрикционных материалов входят сплавы цветных металлов (баббиты, бронзы и др.), некоторые виды древесины и древесно-слоистых пластиков, резины, многие композиты. Фрикционные материалы имеют большой коэффициент трения и высокое сопротивление изнашиванию. К ним относятся некоторые виды пластмасс, чугунов, металлокерамики и других композиционных материалов.

Инструментальные материалы отличаются высокими показателями твердости, износоустойчивости и прочности, предназначены для изготовления режущего, мерительного, слесарно-монтажного и другого инструмента. В номенклатуру таких материалов входят инструментальная сталь и твердые сплавы, алмаз и некоторые виды керамики, многие композиционные материалы.

Рабочие тела – газообразные или жидкие материалы, с помощью которых энергию преобразуют в механическую работу, холод, теплоту. Примеры рабочих тел: водяной пар в паровых машинах и турбинах; аммиак, углекислота, фреон и другие хладагенты в холодильных установках; газообразные продукты сгорания органического топлива в газовых турбинах, двигателях внутреннего сгорания и т. п. В ракетной технике рабочим телом принято считать ракетное топливо.

Топливо – горючие материалы, основной частью которых является углеводород, применяются с целью получения тепловой энергии при их сжигании. По происхождению топливо подразделяют на природное (нефть, уголь, природный газ, горючие сланцы, торф, древесина) и искусственное (кокс, моторные топлива, генераторные газы и др.); по типу машин, в которых оно сжигается, – на ракетное, моторное, ядерное, турбинное, авиационное и т. д.

Технологические материалы – обширная группа вспомогательных материалов, обеспечивающих нормальное протекание технологических процессов переработки материалов в изделия или нормальную работу машин. В их номенклатуру входят: клеи и герметики; лакокрасочные и вяжущие материалы; применяемые при сварке и пайке флюсы, припой, сварочные электроды и т. д.; смазочно-охлаждающие жидкости; закалочные среды; консервационные материалы (смазки, пленки, ингибиторы коррозии и т. п.), обеспечивающие защиту технических изделий от коррозии при хранении и транспортировании; антиадгезионные материалы, предохраняющие от приклеивания перерабатываемых в изделия материалов к технологической оснастке; моющие материалы; растворители и т. д.

В технике сложилась традиция группировать материалы по наиболее важным для определенных условий эксплуатации параметрам или их сово-

купностям: по электропроводности (проводники, полупроводники, диэлектрики), магнитной восприимчивости (диа-, пара-, ферромагнетики). В зависимости от тепловых параметров различают теплоизоляционные материалы, имеющие низкую теплопроводность ($\alpha < 0,02 \text{ Вт/(м·К)}$), и огнеупоры – материалы преимущественно на основе минерального сырья, не плавящиеся при высоких температурах (до $+1580^\circ\text{C}$).

Приведенная классификация не является строгой. Тем не менее ее термины и понятия приняты в технике и используются в практике машиностроения.

Контрольные вопросы

- 1 По каким признакам можно классифицировать материалы?
- 2 Что является главным структурным признаком материалов?
- 3 На какие группы подразделяют технические материалы по структуре?
- 4 На какие группы подразделяют технические материалы по назначению?

2 АТОМНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МЕТАЛЛОВ

Под атомно-кристаллической структурой понимают взаимное расположение атомов, существующее в кристалле. Кристалл состоит из атомов (ионов), расположенных в определенном порядке, который периодически повторяется в трех измерениях [2].

Для описания атомно-кристаллической структуры пользуются понятием пространственной, или кристаллической, решетки. Кристаллическая решетка представляет собой воображаемую пространственную сетку, в узлах которой располагаются атомы (ионы), образующие металл (твердое кристаллическое тело).

Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла во всем объеме, получил название *элементарной кристаллической ячейки*.

Металлы образуют одну из следующих высокосимметричных сложных решеток с плотной упаковкой атомов: **кубическую объемно-центрированную, кубическую гранецентрированную и гексагональную**.

В кубической объемно-центрированной решетке атомы (рисунок 2.1) расположены в узлах ячейки и один атом – в центре объема куба. Кубическую объемно-центрированную решетку имеют следующие металлы: Rb, K, Na, Li, Ti_β, Tl_β, Zr_β, Ta, W, V, Fe_α, Cr, Nb, Ba и др.

В кубической гранецентрированной решетке атомы расположены в углах куба и в центре каждой грани (рисунок 2.2). Этот тип решетки имеют металлы Ca_α, Ce, Sr_α, Th, Pb, Sc, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Rh, Ir, Fe_γ, Cu, Co_α и др.

В гексагональной решетке (рисунок 2.3) атомы расположены в углах и центре шестигранных оснований призмы и три атома в средней плоскости призмы. Эту упаковку атомов имеют металлы Hf_α, Mg, Ti_α, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Co_β, Be, Ca_α, La_α, Ti_α, Zr_α и др.

Наконец, некоторые металлы (Sn_β, In) имеют тетрагональную решетку. Нетрудно видеть, что на одну элементарную ячейку объемно-центрированной решетки

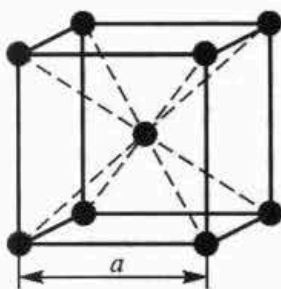


Рисунок 2.1 – Объемно-центрированная кубическая ячейка, ОЦК (Fe_α, W, Mo, Ti)

в целом приходится два атома: один атом в центре куба и один атом по массе суммарно вносят атомы, располагающиеся в вершинах куба (каждый атом в вершине куба одновременно принадлежит восьми сопряженным элементарным ячейкам и на данную ячейку приходится лишь $\frac{1}{8}$ массы этого атома, а на всю ячейку $\frac{1}{8} \cdot 8 = 1$ атом).

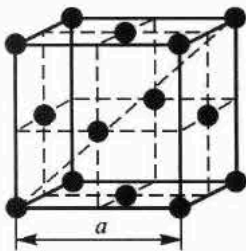


Рисунок 2.2 – Гранецентрированная кубическая ячейка, ГЦК (Fe, Al, Cu)

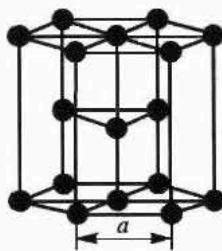


Рисунок 2.3 – Гексагональная плотноупакованная ячейка, ГПУ (Mg, Ti, Zn)

На элементарную ячейку гранецентрированной кубической решетки приходится четыре атома; из них один атом (по такому же расчету, как и для объемно-центрированной решетки) вносят атомы, находящиеся в вершинах куба ($\frac{1}{8} \cdot 8$), и три атома вносят атомы, находящиеся на середине грани, так как каждый из таких атомов принадлежит двум решеткам.

На элементарную ячейку гексагональной плотноупакованной решетки приходится шесть атомов ($3 + \frac{1}{6} \cdot 12 + \frac{1}{2} \cdot 2 = 6$).

Размеры кристаллической решетки характеризуются величинами периодов, под которыми понимают расстояние между ближайшими параллельными атомными плоскостями, образующими элементарную ячейку.

Период решетки измеряется в ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$) и для металлов составляет 1–7 Å.

Анизотропия свойств металлов. Нетрудно видеть, что плотность расположения атомов по различным плоскостям неодинакова. Вследствие неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки многие свойства (химические, физические, механические) каждого кристалла зависят от направления решетки. Подобная неодинаковость свойств монокристалла в разных кристаллографических направлениях называется анизотропией.

Кристалл – тело анизотропное в отличие от аморфных тел (стекло, пластмассы и др.), свойства которых не зависят от направления.

Технические металлы являются поликристаллами, т. е. состоят из большого числа анизотропных кристаллитов. В большинстве случаев, как уже

указывалось выше, кристаллиты статистически неупорядоченно ориентированы один по отношению к другому, поэтому во всех направлениях свойства более или менее одинаковы, т. е. поликристаллическое тело является изотропным. Такая мнимая изотропность металла не будет наблюдаться, если кристаллиты имеют одинаковую преимущественную ориентировку в каких-то направлениях. Эта ориентированность, или текстура, создается в известной степени, но не полностью в результате значительной холодной деформации; в этом случае поликристаллический металл приобретает анизотропию свойств.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение понятию «кристаллическая решетка».
- 2 Дайте определение понятию «элементарная кристаллическая ячейка».
- 3 Какие типы кристаллических решеток свойственны металлам?
- 4 Дайте определение понятию «анизотропия свойств».

3 ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ДЕФЕКТАХ. КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ

3.1 Общие представления

Под **дефектом** (от лат. *defectus* – недостаток) понимают каждое отдельное несоответствие продукции установленным в НТД требованиям ГОСТ 15467–79 [3].

Можно выделить четыре типа дефектов:

1) дефекты, связанные с отклонением геометрических размеров от номинальных значений;

2) дефекты, обусловленные нарушением сплошности (или образованием несплошностей и структурной неоднородности): раковины, трещины, расслоения и т. п.;

3) дефекты, связанные с отклонением физико-механических параметров (магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, диэлектрическая проницаемость, плотность, химический состав, твердость, предел прочности и др.) от номинальных значений;

4) изменение параметров состояния (развитие трещин, изменение напряженно-деформированного состояния, увеличение зазора и т. д.).

Для рационального выбора вида контроля качества продукции важную роль играет классификация дефектов, которую производят по различным признакам.

1 По степени влияния на работоспособность изделия (независимо от типа дефектов):

а) критические, когда при наличии дефекта использовать продукцию по назначению невозможно или недопустимо (небезопасно);

б) значительные, оказывающие существенное влияние на использование продукции и на ее долговечность;

в) малозначительные, практически не влияющие на использование продукции по назначению и на ее долговечность.

Вид дефекта, в отличие от типа, характеризует степень его влияния на эффективность и безопасность использования продукции с учетом ее назначения, т. е. потенциальную опасность рассматриваемого дефекта.

Очевидно, что дефект одного и того же типа, и размера может принадлежать к дефектам различного вида в зависимости от условий и режимов эксплуатации продукции, т. е. в зависимости от ее назначения. Например,

пора диаметром 2 мм в стыковом сварном соединении толщиной 20 мм в сосуде для хранения воды относится к *малозначительному* дефекту, а в таком же соединении в пролетном строении моста – к *критическому*.

Необходимо заметить, что во многих отраслях промышленности ограничиваются разделением дефектов по потенциальной опасности на два вида: *допустимые* и *недопустимые*, относя к последним критические, а иногда и значительные дефекты.

Совокупность дефектов, каждый из которых при отдельном его рассмотрении является *малозначительным*, может быть эквивалентна *значительному* или даже *критическому* (недопустимому) дефекту и должна относиться к соответствующему виду дефектов.

Изделие признается годным, если оно удовлетворяет требованиям нормативной документации.

2 По использованию методики, методов и средств контроля:

а) явные, для выявления которых в нормативной документации, обязательной для данного вида контроля, предусмотрены соответствующие методики, методы и средства и правила (если даже невозможно их визуальное обнаружение);

б) скрытые, выявление которых не предусмотрено нормативной документацией (отсутствуют рекомендации по их обнаружению, включая и визуальный осмотр). Такие дефекты, как правило, выявляются в процессе эксплуатации изделия, или при дополнительных проверках.

3 По природе возникновения (*технологическим признакам*): трещины, поры, включения, непровары и т. д.

4 В зависимости от этапа возникновения:

а) конструктивные, вызванные несовершенством конструкторской документации;

б) производственно-технологические, связанные с отклонениями в технологическом процессе;

в) эксплуатационные, появившиеся в процессе эксплуатации изделия;

г) аварийные.

5 По геометрическим признакам и массовости: внутренние, наружные, сквозные, компактные, протяженные, плоские, объемные, мелкие, средние, крупные, единичные, групповые и распространенные.

Выявленный дефект может быть устранимым, если удаление (исправление) его возможно и экономически целесообразно, в противном случае – неустранимым. В технике бездефектность материалов и изделий является важнейшим фактором. Даже при использовании наилучших материалов, наиболее совершенных конструкций и технологических процессов в получаемых изделиях могут существовать дефекты.

3.2 Дефекты кристаллического строения

Из жидкого расплава можно вырастить монокристалл. Их обычно используют в лабораториях для изучения свойств того или иного вещества.

Металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов, то есть, имеют поликристаллическое строение. Эти кристаллы называются зёрнами. Они имеют неправильную форму и различно ориентированы в пространстве. Каждое зерно имеет свою ориентировку кристаллической решетки, отличную от ориентировки соседних зёрен, вследствие чего свойства реальных металлов усредняются, и явления анизотропии не наблюдается.

В материаловедении существует классификация дефектов, согласно которой **дефекты подразделяют** на субмикродефекты, микродефекты и макродефекты.

В кристаллической решетке реальных металлов имеются различные дефекты (несовершенства), которые нарушают связи между атомами и оказывают влияние на свойства металлов, которые относятся к *субмикродефектам*.

Субмикродефекты в зависимости от геометрических признаков подразделяют на *точечные, линейные, поверхностные и объемные*. Субмикродефекты обнаруживают с использованием электронно-микроскопического, рентгеноструктурного анализа.

К **точечным**, или **нулевым** (имеют малые размеры во всех трех измерениях) дефектам относятся: вакансии, атомы межузельные (дислоцированные) и атомы примесные (замещения, внедрения).

Вакансия – отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки, «дырки», которые образовались в результате различных причин. Вышедший из равновесного положения атом называют дислоцированным, а оставшееся пустое место в узле решетки – вакансией (рисунок 3.1).

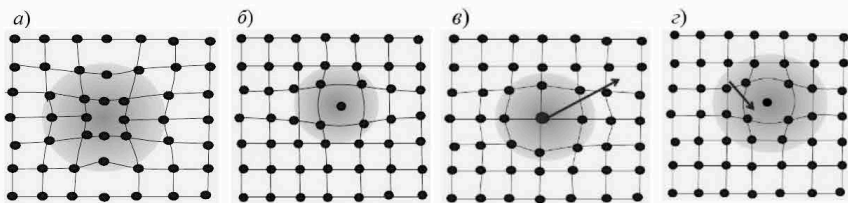


Рисунок 3.1 – Точечные дефекты:

а – вакансия; *б* – атом межузельный; *в* – атом примесный замещения;
г – атом примесный внедрения

Если атом из своего узла выходит на поверхность кристалла (границы зёрен, пустоты, трещины и т. д.) или с поверхности в окружающую среду, то образующийся дефект называется *дефектом по Шоттки* (рисунок 3.2, *а*). Образуется в результате пластической деформации, при бомбардировке тела

атомами или частицами высоких энергий. Концентрация вакансий в значительной степени определяется температурой тела. Скопление многих вакансий может привести к образованию пор и пустот.

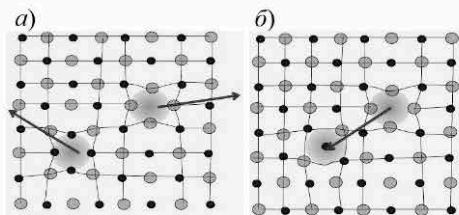


Рисунок 3.2 – Дефекты по Шоттки (а) и Френкелю (б)

Вокруг вакансии образуется поле упругих искажений кристаллической решетки. Атомы смещены на доли межатомного расстояния. Вакансии играют большую роль в диффузионных процессах т. к. диффузия осуществляется за счет обмена местами вакансии с ближайшим атомом.

Атом межузельный (дислоцированный). При переходе атома из равновесного узла в междоузлие возникает пара «вакансия – межузельный атом», которая называется *дефектом по Френкелю* (рисунок 3.2, б).

При значительной пластической деформации или в результате радиационного облучения атом может быть выбит из своего места и располагаться в междоузлии. Концентрация дислоцированных атомов значительно меньше, чем вакансий, т. к. для их образования требуются существенные затраты энергии. При этом на месте переместившегося атома образуется вакансия.

Атомы примесные. Атом кристаллической решетки может быть замещен каким-либо атомом иной природы. Из-за разности атомных размеров в решетке возникнут искажения.

Примеси (чужеродные атомы) всегда присутствуют в металле, т. к. практически невозможно выплавить химически чистый металл. Они могут иметь размеры больше или меньше размеров основных атомов и располагаются в узлах решетки или междоузлиях (т. е. могут быть либо атомами внедрения, либо атомами замещения).

Точечные дефекты вызывают незначительные искажения решетки, что может привести к изменению свойств тела (электропроводность, магнитные свойства), их наличие способствует процессам диффузии и протеканию фазовых превращений в твердом состоянии. При перемещении по материалу дефекты могут взаимодействовать.

Точечные дефекты нарушают лишь ближний порядок в кристаллах, не затрагивая дальнего порядка.

Линейные, или одномерные, дефекты кристаллической решетки могут быть сформированы рядом вакансий или межузельными атомами. Основными линейными дефектами являются краевые и винтовые дислокации. Они имеют малые размеры в двух измерениях и большие в третьем. Линейные дефекты нарушают дальний порядок.

Дислокация – это дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей.

Краевая дислокация представляет собой линию, вдоль которой обрывается внутри кристалла край «лишней» полуплоскости (рисунок 3.3).

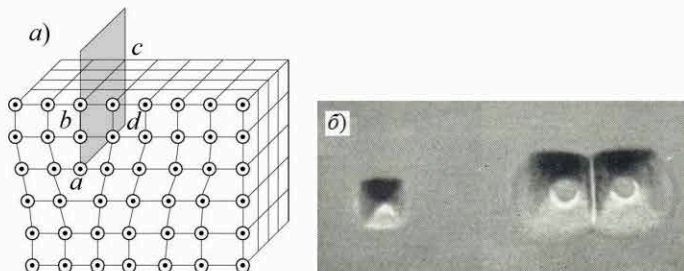


Рисунок 3.3 – Механизм образования краевой дислокации (а) и ее вид (б)

Большинство дислокаций образуются путем сдвигового механизма. Образование краевой дислокации можно описать при помощи следующей операции. Если сдвинуть часть идеального кристалла на одно межатомное расстояние, например, влево, то в верхних рядах кристалла окажется на один атом больше, чем в нижних, и образуется лишняя плоскость *abcd* (экстраплоскость).

Линия, перпендикулярная направлению сдвига кристалла, является краем экстраплоскости. Она называется линейной краевой дислокацией и может достигать многих тысяч межатомных расстояний.

Другой тип дислокаций был описан Бюргерсом, и получил название *винтовая дислокация*. Если разрезать кристалл плоскостью *G* и часть его сдвинуть вверх на одно межатомное расстояние (рисунок 3.4, а), то горизонтальные атомные плоскости изогнутся, и край каждой плоскости сомкнется с краем ближайшей соседней плоскости. Расположение атомов в сдвинутой (*ab*) и несдвинутой части (*cd*) даст винтовую линию (рисунок 3.4, б).

На рисунке 3.4, б белыми кружками обозначены атомы сдвинутой части, черными – несдвинутой. Линия *EF* представляет собой винтовую дислокацию, при наличии которой кристалл состоит из закрученных по винту кристаллографических плоскостей.

Вблизи линии дислокации атомы смещены со своих мест и кристаллическая решетка искажена, что вызывает образование поля напряжений: выше линии дислокации решетка сжата, а ниже – растянута.

Дислокации образуются уже при кристаллизации металлов, а также в ходе пластической деформации и фазовых превращений.

Дислокационная структура материала характеризуется плотностью дислокаций.

Плотность дислокаций изменяется в широких пределах и зависит от состояния материала.

Наиболее важным изменением внутреннего строения кристаллов при деформировании металла является увеличение плотности дислокаций ρ (отношение суммарной длины дислокаций к объему металла).

У отожженного поликристаллического металла плотность дислокаций ρ составляет $\sim 10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$, а при сильной деформации ρ возрастает до $\sim 10^6 \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$, т. е. увеличивается на пять-шесть порядков.

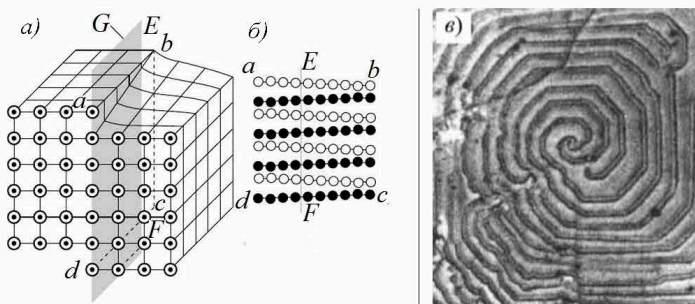


Рисунок 3.4 – Механизм образования винтовой дислокации (а, б) и ее вид (в)

Теоретически рассчитанная прочность идеального кристалла в 10^3 раз выше экспериментально определенных значений для реального кристалла (теоретическая прочность железа составляет ≈ 13 ГПа, а фактическая – всего 250 МПа). После тщательного отжига $\rho = 10^5 \dots 10^7 \text{ м}^{-2}$, в кристаллах с сильно деформированной кристаллической решеткой ρ достигает $10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$. Плотность дислокации в значительной мере определяет пластичность и прочность материала.

Расхождение теоретической и фактической прочности можно объяснить тем, что деформация происходит не путем одновременного смещения целых атомных плоскостей, а при постепенном перемещении дислокаций.

Пластический сдвиг является следствием постепенного перемещения дислокаций в плоскости сдвига. Распространение скольжения по плоскости скольжения происходит последовательно. Каждый элементарный акт перемещения дислокации из одного положения в другое совершается путем разрыва лишь одной вертикальной атомной плоскости.

Для перемещения дислокаций требуется значительно меньшее усилие, чем для жесткого смещения одной части кристалла относительно другой в плоскости сдвига. При движении дислокации вдоль направления сдвига через весь кристалл происходит смещение верхней и нижней его частей лишь на одно межатомное расстояние. В результате перемещения дислокация вы-

ходит на поверхность кристалла и исчезает. На поверхности остается ступенька скольжения.

Дислокации легко перемещаются в направлении, перпендикулярном экстраплоскости. Чем легче перемещаются дислокации, тем ниже прочность металла, тем легче идет пластическая деформация.

Пластическая деформация кристаллических тел связана с количеством дислокаций, их шириной, подвижностью, степенью взаимодействия с дефектами решетки и т. д.

Характер связи между атомами влияет на пластичность кристаллов. Так, в неметаллах с их жесткими направленными связями дислокации очень узкие, они требуют больших напряжений (в 10^3 раз больших, чем для металлов). В результате хрупкое разрушение в неметаллах наступает раньше, чем сдвиг. Следовательно, причиной низкой прочности реальных металлов является наличие в структуре материала дислокаций и других несовершенств кристаллического строения.

Минимальная прочность определяется критической плотностью дислокаций $\alpha_{кр}$. Если плотность меньше этого значения, то сопротивление деформированию резко возрастает, а прочность приближается к теоретической. Повышение прочности достигается созданием металла с бездефектной структурой, а также повышением плотности дислокаций, затрудняющим их движение. Прочность практически бездефектных кристаллов (нитевидные кристаллы, или «усы») приближается к теоретической (рисунок 3.5).

Наименьшими значениями прочности обладают отожженные металлы, при увеличении плотности дислокаций и уменьшении их подвижности путем различных видов обработки (давление, термообработка и т. д.) прочность увеличивается в несколько раз.

Левая ветвь кривой соответствует созданию практически бездислокационных нитевидных кристаллов (т. н. «усов»), прочность которых близка к теоретической.

При дальнейшем увеличении плотности дислокаций и других дефектов кристаллической решетки прочность материала уменьшается. Деформация, термическая обработка и другие виды воздействия на материал приводят к увеличению количества дислокаций в материале.

С повышением плотности дислокаций их движение становится всё

более затрудненным, что требует увеличения прилагаемой нагрузки для



Рисунок 3.5 – Зависимость предела текучести σ_t от плотности дислокаций ρ

продолжения деформации. В результате металл упрочняется, что соответствует правой ветви кривой.

Упрочнению способствуют и другие несовершенства кристаллического строения, тормозящие движение дислокаций. К ним относятся атомы растворенных в металле примесей и легирующих элементов, частицы выделений второй фазы, границы зёрен или блоков и т. д.

На практике препятствие движению дислокаций, т. е. упрочнение, создается введением легирующих элементов, термической или термомеханической обработкой. Снижение температуры также препятствует свободному перемещению дислокаций. При низких температурах прочность растёт, а пластичность падает. Металл становится более прочным, но хрупким.

Таким образом, повышение прочности металлов и сплавов может быть достигнуто двумя путями: получением металлов со строением кристаллической решетки, близким к идеальному, т. е. металлов, в которых отсутствуют дефекты кристаллического строения, или же их число крайне мало; увеличением числа структурных несовершенств, препятствующих движению дислокаций.

Дислокации влияют не только на прочность и пластичность, но и на другие свойства кристаллов. С увеличением плотности дислокаций возрастает внутреннее сопротивление, повышается электросопротивление металла, изменяются оптические свойства.

Дислокации увеличивают среднюю скорость диффузии в кристалле, ускоряют старение и другие процессы, уменьшают химическую стойкость, поэтому в результате обработки поверхности кристалла специальными веществами в местах выхода дислокаций образуются ямки.

Поверхностные, или двумерные (малые в одном измерении), дефекты кристаллической решетки. К ним в первую очередь относятся *границы зёрен* и *субзёрен*, *дефекты упаковки*. Поверхность кристалла также является двумерным дефектом, поскольку на поверхности нарушается регулярное трехмерное строение кристаллической решетки.

Реальное твердое тело имеет поликристаллическое строение, т. е. состоит из множества сильно разориентированных друг относительно друга кристаллов, соприкасающихся между собой. Отдельные кристаллы, образованные из множества элементарных кристаллов, получили название «зерно». Размеры зёрен достигают 10^3 мкм. Границы между зёрнами называются *большеугольными*, т. к. соответственные кристаллографические направления в соседних зёрнах образуют углы в десятки градусов (рисунок 3.6).

Каждое зерно, в свою очередь, состоит из *субзёрен* и *блоков*. Границы субзёрен представляют собой стенки дислокаций, которые разделяют зерно на отдельные субзёрна и блоки. Угол взаимной разориентации между со-

седними субзёрнами невелик ($\leq 5^\circ$), поэтому такие границы называются *малоугловыми* (на рисунке 3.7 штриховыми линиями показаны краевые дислокации, перпендикулярные вектору Бюргера b и плоскости чертежа; θ – угол разориентировки; D – расстояние между дислокациями). На малоугловых границах также скапливаются примеси.

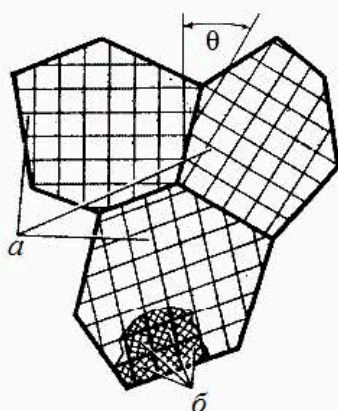


Рисунок 3.6 – Разориентация зёрен (а) и блоков (б) в металле

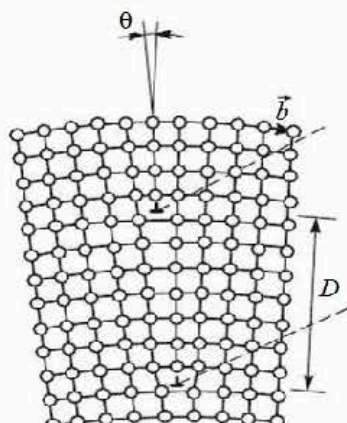


Рисунок 3.7 – Малоугловая граница субзёрнами

На границах соседних зёрен образуются поверхностные дефекты (примесные атомы, дислокации, инородные включения и выделения различного характера), представляющие собой переходную область шириной 3–4 межатомных расстояний.

В этой области решетка одного кристалла переходит в решетку другого, имеющего иную кристаллографическую ориентацию (рисунок 3.8). Строение границ зёрен оказывает большое влияние на свойства металла.

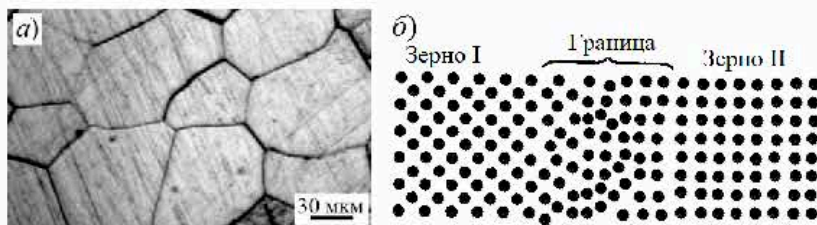


Рисунок 3.8 – Поверхностные дефекты кристаллической решетки:
а – межзёренные границы кристаллической решетки;
б – схема расположения атомов в области границ

Границы зёрен могут совпадать (когерентные), совпадать частично (полукogerентные) и не совпадать (некогерентные) (рисунок 3.9).

Поверхностные дефекты влияют на свойства металлов. Так, предел текучести σ_T связан с размером зёрен d зависимостью:

$$\sigma_T = \sigma_0 + kd^{0.5},$$

где σ_0 , k – постоянные для данного материала.

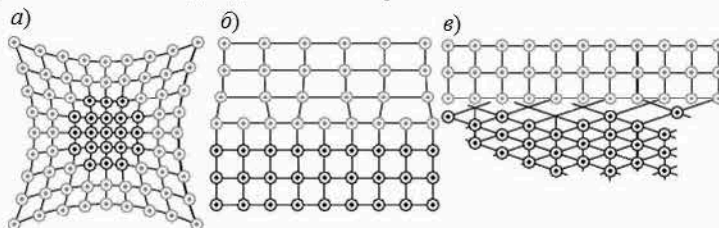


Рисунок 3.9. – Схема межфазных границ:

а – когерентные, б – полукogerентные, в – некогерентные

Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Под влиянием внешних факторов (механические нагрузки, тепловое воздействие) меняется количество и плотность дефектов, что отражается на свойствах металлов и имеет большое практическое значение.

Объемные, или трехмерные, дефекты имеют макроскопические размеры (т. е. значительно превышающие параметры решетки) во всех трех измерениях. Объемными дефектами в кристаллах являются поры, газовые пузырьки, трещины, крупные скопления точечных дефектов и т. д. (рисунок 3.10). Объемные дефекты снижают прочностные, физические и другие свойства материалов.

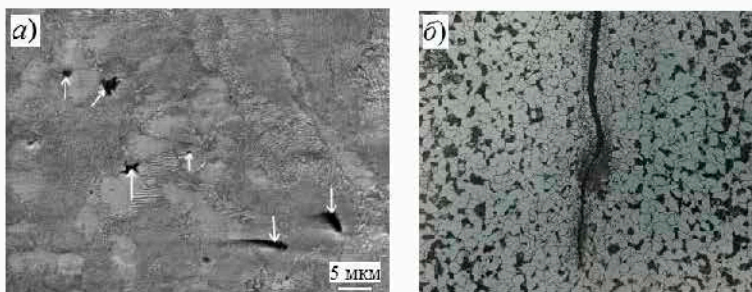


Рисунок 3.10 – Объемные дефекты:

а – поры, б – трещины

М и к р о д е ф е к т ы – это, например, микротрещины, микропоры и т. п., различимые при увеличении более $\times 6$, а также критичный (очень крупные и мелкие) размер зёрен и их ориентация, градиент химического состава и т. п.

Макродефекты обычно подразделяют на несплошности, структурные неоднородности, отклонения размеров и физико-механических свойств материала от значений, нормированных в НТД.

Преобладающий тип макродефектов – несплошности. В практике НК под дефектом в металлоконструкции обычно понимают несплошность, если тип дефекта не уточнен дополнительно.

Макродефекты могут быть мелкими и крупными. Мелкими называют дефекты, например, поры, трещины, включения, различимые при увеличении менее $\times 6$; крупными (поры, включения и т. п.) – такие, которые при нормальном зрении различимы на стандартном расстоянии 25 см.

Микродефекты, вызванные изменением свойств материала, гораздо труднее выявлять и интерпретировать, чем макродефекты; для этого необходима более тонкая методика измерений. Однако во время выполнения элементом конструкции заданных функций такие местные микронеоднородности могут играть более важную роль, чем крупные дефекты. Например, как было указано ранее, для достижения требуемых механических свойств часто прибегают к термической обработке. Если при этом не будет получен определенный размер зерна, то даже удовлетворительно сконструированный элемент конструкции не сможет выполнять свое назначение.

Обычно для классификации и идентификации дефектов также используют их морфологические и генетические признаки.

Морфологические признаки:

- ориентация по отношению к оси изделия;
- расположение и распределение по длине или периметру изделия;
- изменение поперечных размеров изделия в районе дефекта;
- единичное или групповое расположение дефекта;
- периодичность его повторения;
- характер геометрических параметров дефекта и т. п.

Генетические признаки:

- механические, термические, коррозионные и т. п.;
- наличие неметаллических оксидных включений, окалины и смазочного материала в полости дефекта или в районе его расположения;
- изменение микроструктуры в районе залегания дефекта;
- наличие структурной и ликвационной неоднородностей;
- характер расположения зёрен в районе дефекта.

Во многих случаях причина образования дефектов и методы их устранения одинаковы и не зависят от типа изделия.

В технике бездефектность материалов и изделий всегда была важнейшим фактором. Даже при использовании наилучших материалов, наиболее совершенных конструкций и технологических процессов в получаемых изделиях могут существовать дефекты.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение дефекта.
- 2 Назовите типы дефектов.
- 3 Перечислите признаки, по которым классифицируют дефекты кристаллического строения. Приведите примеры.
- 4 Приведите характерные особенности точечных дефектов.
- 5 Приведите характерные особенности линейных дефектов.
- 6 Приведите характерные особенности поверхностных дефектов.
- 7 Приведите характерные особенности объемных дефектов.
- 8 Как влияют плотность дислокаций и величина зерна на прочность материалов?

4.1 Производственно-технологические дефекты

4.1.1 Литейные дефекты

Литье – это технологический процесс изготовления заготовок и изделий путем заполнения жидким металлом изложницы или формы с последующим затвердеванием металла.

Изложница – форма простых геометрических очертаний (обычно с малой конусностью) заполняемая расплавленным металлом для получения слитка. Отлитый в изложницу металл (слиток) является заготовкой для дальнейшей обработки давлением.

Литейная форма (mold) – устройство для получения изделий различной конфигурации из металлов и других материалов под действием давления, создаваемого на литейных машинах.

Литейная форма имеет конфигурацию, приблизительно или даже точно (точное литье) повторяющую конфигурацию изделия. В ней получают заготовки, называемые *отливками*. Для получения пустотелых отливок в форму вставляют стержни, воспроизводящие конфигурацию внутренних полостей.

Изложницы и формы делают разъемными для удобства извлечения слитка или отливки. Их снабжают *литниковой системой*, через которую заливают расплавленный металл, обеспечивают возможность выхода образующихся газов.

При рассмотрении дефектов литья к слитку и отливке подходят по-разному. Слиток подлежит дальнейшей обработке давлением, а отливка является почти готовым изделием. Такие дефекты отливки, как наросты, вмятины, корка, окалина, поверхностные включения, несоответствие размеров и конфигурации чертежу (вызывается сдвигом частей литейной формы, сдвигом стержней в форме, неполным заполнением формы металлом), коробление (изгиб под влиянием внутренних напряжений), обнаруживают при визуальном осмотре и обмерах. Для слитка все названные выше дефекты несущественны, т. к. поверхность слитка обычно механически обрабатывают, а точная форма слитка не имеет значения для дальнейшей обработки его давлением.

В зависимости от степени пораженности дефектами все отливки подразделяют на четыре группы:

а) *годные*, полностью отвечающие всем установленным требованиям технической документации и стандартов;

б) *условно годные*, имеющие небольшие отклонения от установленных требований (малозначительные дефекты), не оказывающие существенного влияния на эксплуатационные показатели отливки или изделия в целом; отливки допускаются к дальнейшей обработке и используются по своему назначению после тщательной оценки дефектов;

в) *исправимый брак* – отливки, имеющие один или несколько устранимых дефектов, после исправления которых они могут быть допущены к дальнейшей обработке и использованию по назначению;

г) *неисправимый* или *окончательный брак* – отливки, имеющие такие дефекты, исправление которых технически невозможно или экономически нецелесообразно, либо качество исправления которых невозможно проконтролировать. Забракованию подлежат отливки, имеющие хотя бы один неустраняемый дефект.

Устранимость или неустраняемость дефекта определяют применительно к конкретным условиям производства и ремонта.

Согласно ГОСТ 19200–80 [5] дефекты отливок из чугуна и стали подразделяют на пять основных групп.

Необходимо отметить, что принятая терминология широко используется также для отливок из сплавов на основе алюминия, магния, титана и др., поэтому может рассматриваться как универсальная.

1 *Несоответствие по геометрии*. Первая группа дефектов отливок из стали и чугуна включает в себя 14 видов: недолив, незалив, неслитина, обжим, подутость, перекося, стержневой перекося, разностенность, стержневой залив, коробление, вылом, зарез, прорыв металла, уход металла.

2 *Дефекты поверхности*: пригар, спай, ужимина, нарост, залив, засор, плена, просечка, окисление, поверхностное повреждение, складчатость, грубая поверхность, газовая шероховатость.

Вторая группа дефектов отливок из стали и чугуна, включает в себя 13 видов. Большинство этих дефектов возникает вследствие сложных физико-химических процессов, проходящих на границе раздела «металл – форма».

3 *Несплошности в теле отливки*: горячая трещина, холодная трещина, усадочная раковина, газовая раковина, ситовидная раковина, песчаная раковина, шлаковая раковина, усадочная пористость, газовая пористость, графитовая пористость, рыхлота, залитый шлак, непровар жеребеек, вскип, утяжина.

Эта группа внутренних дефектов различного вида и происхождения наиболее многочисленна и наиболее опасна из-за последствий, возникающих при эксплуатации отливок.

4 *Включения*: металлическое и неметаллическое включения, королек. В эту группу входят дефекты в виде инородных металлических или неметаллических частиц, попавших в металл механическим путем.

5 *Несоответствие по структуре*: отбел, половинчатость, ликвация, флокены. Дефекты этой группы специфичны для отливок с тонкими стенками и массивными узлами.

Рассмотрим характерные особенности упомянутых дефектов, причины появления, методы обнаружения и способы устранения.

Методы дефектоскопии, обеспечивающие обнаружение поверхностных и подповерхностных дефектов – визуальные, капиллярные, магнитные,

электромагнитные – объединены термином поверхностные методы. В качестве УЗ-метода (если нет пояснения) используют методы отражения и прохождения, чаще всего это эхо- и амплитудно-теневой методы.

Внутренние дефекты объемного типа (раковины, шлак, поры и др.) являются приблизительно одинаково независимо от направления радиационного или УЗ-излучения. Слабораскрытые дефекты плоскостного типа (трещины, закаты и др.) лучше обнаруживаются при радиационном контроле, когда излучение направлено вдоль плоскости дефекта, а при УЗ-контроле – когда излучение направлено перпендикулярно плоскости дефекта.

В отношении исправления дефектов следует иметь в виду, что многие дефекты при малых размерах допускаются в изделии и не требуют исправления (поры, шлаки, расслоения и т. д.). Решающее значение при этом имеют условия эксплуатации ОК.

Дефекты чугунного литья, связанные с несоответствием по геометрии

Недолив – дефект в виде неполного образования отливки вследствие незаполнения полости формы металлом (рисунок 4.2).

Одной из основных причин недолива является недостаточное количество жидкого металла

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Способ устранения.

Дефект является неисправимым браком.

Незалив – несоответствие конфигурации отливки чертежу вследствие износа модельной оснастки или дефектов формы (рисунок 4.3).

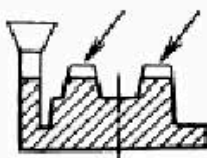


Рисунок 4.2 – Недолив

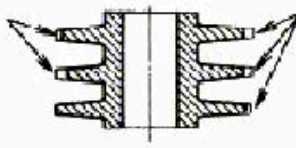


Рисунок 4.3 – Незалив

Причиной незалива может быть нарушение технологических режимов заливки.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Способ устранения.

Дефект является неисправимым браком.

Неслитина – сквозная щель или отверстие в стенке отливки (рисунок 4.4). Характерна для сплавов с широким интервалом кристаллизации и наблюдается обычно в тонких стенках отливок.



Рисунок 4.4 – Неслитина

Неслитина образуется вследствие:

- 1) неслияния встречных потоков металла;
- 2) низкой температуры заливаемого металла;
- 3) низкой скорости заполнения формы металлом.

Методы контроля: поверхностные, радиационный, ультразвуковой.

Способы устранения: вырубка, зачистка поверхности.

Обжим – это местное нарушение конфигурации отливки (рисунок 4.5).

Обжим обычно образуется вблизи плоскости разъема в виде прилива или утолщения произвольной формы вследствие деформации формы из-за механических воздействий при ее сборке или заливке.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Стержневой залив – дефект в виде залитого металлом отверстия или полости в отливке (рисунок 4.6).

Стержневой залив возникает из-за непроставленного в литейной форме стержня или его обрушения.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Подутость – местное утолщение отливки, возникшее вследствие расширения недостаточно уплотненной формы заливаемым металлом (рисунок 4.7).

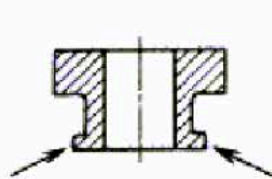


Рисунок 4.5 – Обжим

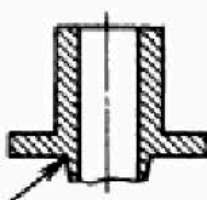


Рисунок 4.6 – Стержневой залив

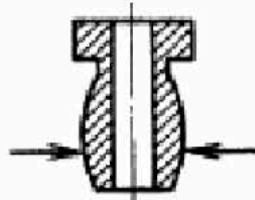


Рисунок 4.7 – Подутость

Подутость образуется вследствие:

- 1) низкой прочности формовочных и стержневых смесей;
- 2) слабого уплотнения форм стержней;
- 3) высокого металлостатического давления.

Методы контроля.

Дефект выявляется визуально или с помощью измерительных средств.

Переко́с – дефекты в виде смещения одной части отливки относительно осей или поверхностей другой части по разьему формы, модели в следствие их неточной установки (рисунок 4.8).

Переко́с возникает:

- 1) из-за дефектов оснастки (коробление и т. п.);
- 2) неудовлетворительного состояния опочной оснастки и подмодельных плит;
- 3) некачественной сборки формы.

Методы контроля.

Дефект выявляется визуально или с помощью измерительных средств.

Стержневой переко́с – дефект в виде смещения отверстия, полости или части отливки, выполняемых с помощью стержня, вследствие его переко́са (рисунок 4.9).

Стержневой переко́с возникает:

- 1) из-за дефектов оснастки (коробление и т. д.);
- 2) неудовлетворительного состояния опочной оснастки и подмодельных плит;
- 3) некачественной сборки формы.

Методы контроля.

Дефект выявляется визуально или с помощью измерительных средств.

Разностенность – увеличение или уменьшение толщины стенок отливки (рисунок 4.10).

Разностенность возникает:

- 1) из-за дефектов оснастки (коробление и т. д.);
- 2) неудовлетворительного состояния опочной оснастки и подмодельных плит;
- 3) некачественной сборки формы.

Методы контроля.

Дефект выявляется визуально или с помощью измерительных средств.

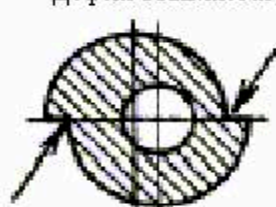


Рисунок 4.8 – Переко́с

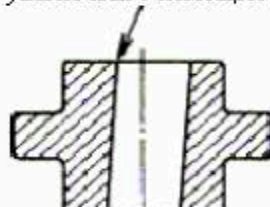


Рисунок 4.9 – Стержневой переко́с

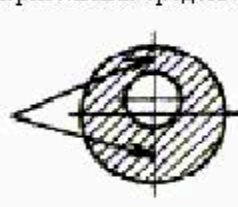


Рисунок 4.10 – Разностенность

Коробление – искажение геометрии и конфигурации отливки в виде вогнутости или выпуклости на плоских поверхностях отливок (рисунок 4.11).

Возникает под влиянием напряжений, возникающих при охлаждении отливки или в следствие деформации модельной оснастки.

Коробление обнаруживается после остывания отливки в форме, выбивки и заварки.

Методы контроля.

Дефект выявляется визуально или с помощью измерительных средств.

Вылом – дефект в виде нарушений конфигурации отливки при выбивке стержней, обрубке литников, зачистке отливок или их транспортировании (рисунок 4.12).

Возникает из-за неправильного подвода металла к отливке или воздействия на неё больших механических нагрузок.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Прорыв металла – дефект в виде неполного образования или искажения формы отливки, возникающий при заливке (рисунок 4.13).

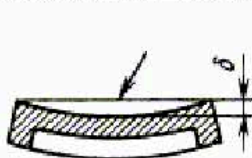


Рисунок 4.11 –
Коробление

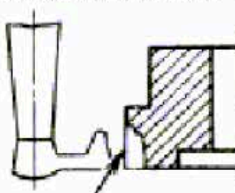


Рисунок 4.12 – Вылом

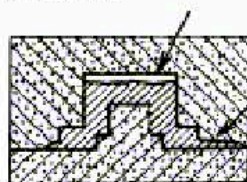


Рисунок 4.13 – Прорыв
металла

Возникает из-за недостаточной прочности формы.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Зарез – дефект в виде искажения контура отливки при отрезке литников, обрубке и зачистке. Возникает из-за неправильного подвода металла к отливке и воздействия на неё больших механических нагрузок.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Уход металла – дефект в виде пустоты в теле отливки, ограниченный тонкой коркой затвердевшего металла.

Образуется вследствие вытекания металла из формы и слабого крепления формы.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Дефекты поверхности чугунного литья

Пригар – специфический трудно отделяемый слой на поверхности отливки, возникший при взаимодействии расплавленного металла с материалом формы (рисунок 4.14).

Пригар образуется преимущественно на отливках из сплавов с высокой температурой плавления при заливке в песчаные формы.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Спай – дефект в виде углубления с закругленными краями на поверхности отливки, сквозные или поверхностные с закругленными краями щели или углубления в теле отливки (рисунок 4.15).

Причина появления – неполностью слившиеся потоки металла с недостаточной температурой или в результате прерванной заливки. При прерывистой заливке и неравномерном поступлении металла в форму иногда возникают внутренние спай (неслитины), одной из причин которых могут быть окисные пленки, создающие значительное сопротивление движению расплава.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.



Рисунок 4.14 – Пригар

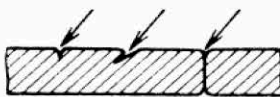


Рисунок 4.15 – Спай

Складчатость – дефект в виде сморщенной поверхности – незначительных сглаженных возвышений и углублений (рисунок 4.16).

Складчатость образуется вследствие тепловых деформаций поверхностного слоя формы или затвердевающего металла, а также вследствие пониженной текучести металла.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Вскип – дефект в виде скопления раковин и наростов (рисунок 4.17). Подобные дефекты могут не только располагаться в теле отливки, но и выходить на поверхность.

Вскип образуется вследствие интенсивного парообразования в местах переувлажнения формы или стержня, а также вследствие переуплотнения формы.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

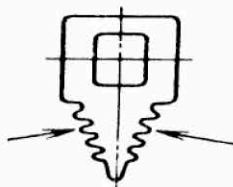


Рисунок 4.16 – Складчатость

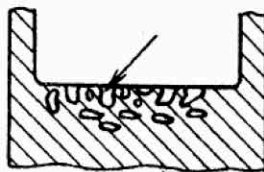


Рисунок 4.17 – Вскип

Ужимина (утяжина) – углубление с пологими краями массивной части отливки (рисунок 4.18), образовавшееся вследствие усадки металла при затвердевании, заполненное формовочной смесью и прикрытое слоем металла.

Ужмина образуется вследствие окисления формовочной смеси при тепловом расширении поверхностного слоя формы.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Нарост – выступ произвольной формы на поверхности отливки (рисунок 4.19).

Образуется при заполнении металлом разрушенного участка формы.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Способ устранения – механическая обработка.

Засор – внедрившиеся в поверхность металла комочки материала формы (рисунок 4.20).

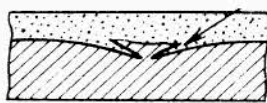


Рисунок 4.18 – Ужмина (утяжина)



Рисунок 4.19 – Нарост



Рисунок 4.20 – Засор

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Залив – тонкие металлические приливы (рисунок 4.21).

Проникновение металла в зазоры по разъему формы.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Просечка – невысокие, часто плоские прожилки металла (рисунок 4.22).

Возникает при затекании расплава в трещины формы.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Газовая шероховатость – дефект в виде сферообразных углублений на поверхности отливки (рисунок 4.23).

Возникает вследствие роста газовых раковин на поверхности раздела «металл – форма».

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

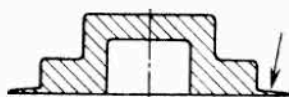


Рисунок 4.21 – Залив

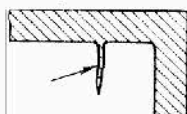


Рисунок 4.22 – Просечка



Рисунок 4.23 – Газовая шероховатость

Грубая поверхность – дефект в виде шероховатости поверхности с параметрами, превышающими допустимые значения.

Образуется вследствие выделения газовых пузырьков на поверхности раздела «металл – форма».

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Окисление – окисленный слой металла на поверхности отливки.

Образуется в результате достаточно длительной и высокотемпературной термической обработки.

Методы контроля.

Дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Способ устранения – вырубка.

Плена – самостоятельный металлический или оксидный слой на поверхности отливки, пленки на поверхности или внутри отливки, состоящие из окислов, часто с включениями.

К образованию плен склонны высоколегированные сплавы формовочного материала. Плены возникают в результате того, что при заполнении формы составляющие расплава вступают в химическую реакцию с атмосферой и материалом формы, а из продуктов реакции (окислов хрома, алюминия, титана и нитридов, не растворяющихся в сплаве) на поверхности расплава образуется тугоплавкая и плотная пленка. При механическом разрушении этой пленки в процессе заливки формы отдельные куски ее оседают в различных местах формы.

Методы контроля: визуальный, ультразвуковой.

Способ устранения – удаление металла.

Термические трещины – хорошо видимые глубокие разрывы поверхности отливки.

Поверхность излома раскрытой трещины мелкозернистая, окисленная или с цветами побежалости.

Эти трещины обнаруживаются в отливках после термической обработки. Причина возникновения – высокие температурные растягивающие напряжения, совпадающие по знаку с остаточными напряжениями.

Методы контроля: дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Литейные подрезы – дефекты литья в виде углублений в местах концентривных концентраторов напряжений.

Образование литейных подрезов связано с недостаточной жидкотекучестью металла в процессе отливки детали из-за понижения температуры.

Методы контроля: дефект обнаруживается при визуальном осмотре.

Внутренние дефекты чугунного литья типа несплошностей

Горячая трещина – дефект в виде разрыва или надрыва тела отливки по границам кристаллов (рисунок 4.24).

Горячая трещина имеет извилистую или ломаную форму и неровную, сильно окисленную поверхность, хорошо видимые разрывы поверхности отливки, распространяющиеся по границам кристаллов и имеющие неровную окисленную поверхность, на которой при увеличении видны дендри-

ты. Характерными признаками горячих трещин являются их неровные (рваные) края и значительная ширина.

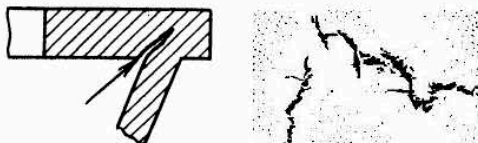


Рисунок 4.24 – Горячая трещина

Горячие трещины образуются вследствие затрудненной усадки в интервале температур затвердевания сплавов и располагаются чаще всего во внутренних углах сходящихся стенок или других подобных узлах отливки.

Причиной появления горячих трещин также может быть разрушение закристаллизовавшегося скелета сплава под действием термических и усадочных напряжений.

Методы контроля – ультразвуковой, радиационный.

Способы устранения: вырубка и подварка.

Холодная трещина – дефект в виде разрыва тела затвердевшей отливки (рисунок 4.25).

Холодная трещина отличается сравнительно гладкой светлой поверхностью и, как правило, имеет прямолинейную форму, поверхность не оксидирована. Наблюдается в виде очень тонких разрывов на поверхности отливки, имеющих обычно чистую, светлую с цветами побежалости зернистую поверхность.



Рисунок 4.25 – Холодная трещина

В отличие от горячих трещин холодные распространяются по зернам, а не по их границам, располагаются они преимущественно в острых углах и других местах концентрации напряжений.

Дефект образуется в твердом металле в местах наибольшего воздействия внутренних напряжений, т. е. в зонах перехода от толстых сечений к тонким из-за разных скоростей охлаждения тонких и толстых частей отливки.



Рисунок 4.26 – Межкристаллическая трещина

Трещины образуются из-за внутренних напряжений или механического воздействия при температуре ниже температуры свечения отливки.

Методы обнаружения: ультразвуковой, радиационный.

Способ устранения – завариваются при обработке давлением.

Межкристаллическая трещина – дефект в виде разрыва тела отливки, нарушения сплошности (рисунок 4.26), образующиеся по границам кристаллов при низкой прочности этих границ.

Пониженная прочность границ может быть связана с присутствием на них прослоек неметаллической фазы и ликватов.

Дефект возникает при охлаждении отливки в форме на границах первичных зёрен аустенита в температурном интервале распада.

Методы обнаружения: ультразвуковой, радиационный.

Способ устранения – отрезка части слитка или отливки.

Усадочная раковина – дефект в виде открытой или закрытой полости, образующейся в тепловых узлах отливки¹⁾ (рисунок 4.27).

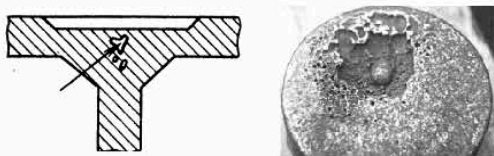


Рисунок 4.27 – Усадочная раковина

Поверхность усадочной раковины обычно грубая, иногда окисленная.

Дефект образуется вследствие неравномерной усадки металла при застывании в верхней части слитка или в утолщенных частях отливки, где металл затвердевает в последнюю очередь.

Методы обнаружения: визуальный, радиографический, ультразвуковой.

Способ устранения – отрезка части слитка или отливки.

Газовая раковина – дефект в виде полости (рисунок 4.28). Газовая раковина в отличие от усадочной имеет сферическую форму и гладкую чистую поверхность.

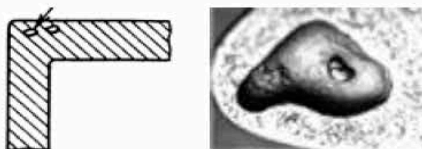


Рисунок 4.28 – Газовая раковина

Дефект образуется газами, попавшими в отливку при взаимодействии жидкого металла с материалом формы или выделившимися из металла при его застывании.

Газовые пузыри в литом металле образуются вследствие выделения газов в период кристаллизации, поскольку их растворимость в твердом металле значительно меньше, чем в жидком.

¹⁾ *Тепловой узел отливки* – участок отливки (поверхность или объем), который после заливки металла охлаждается медленнее, чем другие участки отливки. Тепловыми узлами отливки являются утолщения стенок отливок и участки отливок, на которых возникает сходящийся тепловой поток

Методы обнаружения: визуальный, радиографический.

Способы устранения – самозакалка при обработке давлением (если поверхность не окислена), вырубка.

Песчаная раковина – полость, частично или полностью заполненная формовочным материалом (рисунок 4.29).

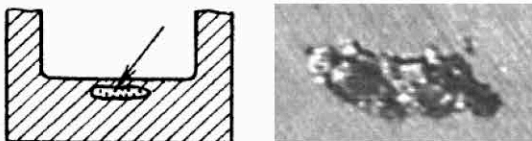


Рисунок 4.29 – Песчаная раковина

Ситовидная раковина (ситовидная пористость) – скопление удлиненных тонких раковин, расположенных в подповерхностном слое отливки и ориентированных перпендикулярно к ее поверхности (рисунок 4.30).

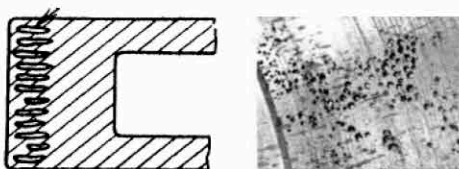


Рисунок 4.30 – Ситовидная раковина

Обычно их появление вызвано повышенным содержанием водорода в кристаллизующемся слое металла.

Метод обнаружения – радиографический.

Газовая пористость – дефект в виде мелких пор (рисунок 4.31).

Образуется в результате выделения газа из металла при его затвердевании (выделение газа, растворенного в жидком металле).

Методы обнаружения: визуальный, радиографический.

Способ устранения – самозакалка при обработке давлением (если поверхность не окислена), вырубка.

Усадочная пористость – скопление мелких пор в тепловых узлах (рисунок 4.32).

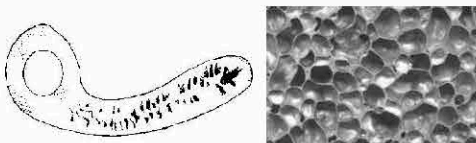


Рисунок 4.31 – Газовая пористость

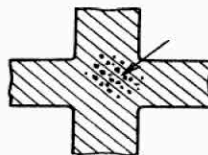


Рисунок 4.32 – Усадочная пористость

Образуется из-за недостаточного питания отливки при усадке металла во время его затвердевания.

Методы обнаружения: визуальный, радиографический.

Графитовая пористость в чугунах отливках может образовываться в виде сосредоточенных крупных выделений графита, которые нарушают герметичность отливки при работе под давлением газа или жидкости.

Рыхлота – скопление мелких усадочных раковин. Местное скопление мелких усадочных раковин при крупнозернистой структуре металла. Часто встречается рыхлота, расположенная над усадочной раковиной.

Утяжина – дефект в виде углубления с закругленными краями на поверхности (рисунок 4.33).

Причина возникновения – недостаток питания отливки, образуются обычно в массивных частях отливки вследствие усадки металла.

Метод обнаружения – визуальный.

Шлаковая раковина¹⁾ – полость, частично или полностью заполненная шлаком (рисунок 4.34).

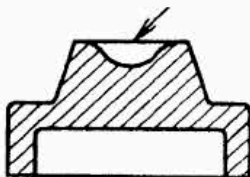


Рисунок 4.33 – Утяжина



Рисунок 4.34 – Шлаковая раковина

Залитый шлак – дефект в виде частичного заполнения литейной формы шлаком.

Вскип – дефект в виде раковин и наростов.

Образуется вследствие парообразования в местах переувлажнения литейной формы или проникновения газов из стержней в полость литейной формы.

Непровар жеребеек²⁾ – дефект в виде несплошности соединения металла отливки с поверхностью жеребеек (холодильников).

Образуется вследствие загрязнения жеребеек, несоответствия масс, понижении температуры заливаемого металла.

Внутренние дефекты чугунного литья типа включений

Королек – преждевременно затвердевший небольшой шарик металла (рисунок 4.35). Затвердевшие брызги металла при неправильной заливке и несплавившийся с отливкой.

¹⁾ Шлак (от нем. *schlacke*) – после застывания камне- или стеклоподобное вещество.

²⁾ Жеребейка (*chaplet*) – металлическая опора, поддерживающая стержень внутри литейной формы.

Металлические включения – инородные металлические тела в основном металле отливки (рисунок 4.36).

Таковыми телами могут быть нерасплавленный легирующий компонент, модификатор, внутренний холодильник и т. д.

Неметаллические включения образуются в результате химического взаимодействия компонентов при расплавлении и заливке металла (рисунок 4.37), а также могут замещиваться в расплав механическим путем.

Причиной возникновения являются недостаточная очистка поверхности расплава, попадание частиц огнеупорного формовочного материала.

Методы обнаружения: радиационный, ультразвуковой.

Способ устранения – вырубка.



Рисунок 4.35 – Корольек



Рисунок 4.36 – Металлические включения



Рисунок 4.37 – Неметаллические включения

Дефекты чугунного литья, связанные с несоответствием по структуре

Отбел – твердые трудно поддающиеся механической обработке участки отливки из серого чугуна, вызванные скоплением структурно свободного цементита. Отбел характерен для тонких сечений отливок (стенок, ребер и т. п.). Такие дефекты возникают при ускоренном охлаждении, но могут быть связаны с отклонениями химического состава. По существу, это появление структуры белого чугуна в сером чугуне.

Половинчатость – появление структуры серого чугуна (графита) в отливках из белого чугуна. Половинчатость характерна для массивных участков отливок. Дефект возникает при пониженных скоростях охлаждения.

Ликвация (от лат. *liquation* – разжижение, плавление) – местное обогащение участков отливки одним или несколькими компонентами сплава или примесями, неравномерность химического состава металла в теле отливки.

Различают *ликвацию по плотности*, связанную с различием плотности жидких фаз или твердой и жидкой фаз сплава, *внутрикристаллическую (дендритную) ликвацию*, проявляющуюся в обогащении границ зёрен ликвирующими элементами и образовании неравновесных структурных состав-

ляющих; *зональную ликвацию* – неоднородность химического состава в макрообъёмах отливки (рисунок 4.38).

При травлении макрошлифов слитков дефект выявляется в виде темно-травящихся полосок или пятен.

На микрошлифах из зоны дефекта наблюдается скопление сульфидов и оксидов. Ликвация возникает в результате избирательной кристаллизации при затвердевании. Причиной ликвации является различная температура затвердевания чистого металла и содержащихся в расплаве примесей.

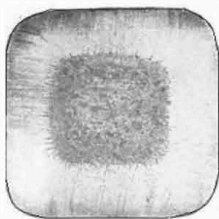


Рисунок 4.38 – Зональная ликвация

Методы обнаружения: металлография, химический анализ, радиационный.

Способ устранения.

Дендритная ликвация устраняется диффузионным отжигом отливок при высоких температурах и длительных выдержках.

Зональную ликвацию в уже затвердевшем слитке можно устранить лишь путем отжига (повторного расплавления).

Флокен (от нем. *flocken* – хлопья) – дефект в виде разрыва тела отливки. В изломе отливки флокен имеет вид пятна матового цвета с гладкой поверхностью.

Дефект возникает в результате избыточного содержания водорода в стали и под действием внутренних напряжений.

4.1.2 Дефекты прокатанного и ковкого металлов

Обработку давлением металлов осуществляют прокаткой (обжатием между вращающимися валками), свободной ковкой (ударным воздействием), прессованием (неударным воздействием), штамповкой (ковкой или прессованием в форму-штамп), волочением (протаскиванием металла через отверстие-оправку для получения прутка, проволоки) и др. Обработка давлением позволяет получить металл требуемой формы, уплотняет его, измельчает структуру, улучшает механические свойства.

Прокатка – самый массовый способ обработки металлов давлением, осуществляемый путем пропуска металла в зазор между вращающимися в разных направлениях валками, вследствие чего уменьшается площадь поперечного сечения исходной заготовки, а в ряде случаев изменяется ее профиль.

Прокаткой получают не только готовые изделия (рельсы, балки), но и сортовой прокат круглого, квадратного, шестигранного профилей, трубы и т. п. Прокатка производится на блюмингах, слябингах, сортовых, листовых, трубопрокатных и других станах, на гладких и калиброванных валках с ручьями (калибрами) определенной формы.

Прокатку слитка производят, как правило, в два этапа: сначала получают заготовку квадратного (блуме) или прямоугольного (сляб) сечения, а потом из этой заготовки прокатывают листы, трубы, рельсы и другие профили.

Сортовые станы используют для прокатки из блумсов сортовых и фасонных профилей, листовые станы – для листовой прокатки из слябов в горячем и холодном состояниях, а трубопрокатные станы – для прокатки бесшовных (цельнотянутых) труб. Бандажи, дисковые колеса, шарики для подшипников, зубчатых колес и т. п. прокатывают на станах специального назначения.

Прогрессивной технологией является прокатка заготовки непосредственно из застывающего металла (непрерывная разливка).

Прессование осуществляется продавливанием металла через отверстие матрицы. Профиль прессованного металла соответствует конфигурации отверстия матрицы, оставаясь постоянным по всей длине. Прессованием изготавливают прутки, трубы и различные сложные профили из таких цветных металлов, как олово, свинец, алюминий, медь и т. д. Прессуют обычно на гидравлических прессах усилием до 15 тыс. т.

Ковка – операция, при которой металлу ударами инструментов придают требуемую внешнюю форму. Ковку, осуществляемую под плоскими бойками, называют свободной, так как изменение формы металла при этом виде обработки не ограничивается стенками особых форм (штампов) и металл «течет» свободно.

Свободной ковкой можно изготавливать самые тяжелые поковки – вплоть до 250 т. Свободная ковка разделяется на ручную и машинную. Ручную ковку в основном применяют при изготовлении мелких изделий или при ремонтных работах.

Машинная ковка – это основной вид свободнойковки. Она выполняется на ковочных пневматических или паровоздушных молотах, реже – на ковочных гидравлических прессах.

При ручной ковке инструментом являются наковальня, кувалда, зубило, пробойники, клещи и т. д. При машинной ковке рабочим инструментом служат бойки ковочных молотов и прессов, вспомогательным – раскатки, прошивки и клещи. Кроме вспомогательного инструмента, применяют машины, называемые манипуляторами, предназначенные для удержания, перемещения и кантовки тяжелых заготовок в процессековки.

Основными операциями технологического процесса свободнойковки являются: осадка (уменьшение высоты заготовки), вытяжка (удлинение заготовки), прошивка (получение отверстий), рубка, сварка и т. п.

Штамповка – способ изготовления изделий давлением при помощи штампов, т. е. металлических форм, очертания и форма которых соответствует очертанию и форме изделий.

Различают штамповки:

- объемную *холодную* (холодное выдавливание, холодная высадка и штамповка в открытых штампах) и *горячую*;
- листовую *холодную*.

Такая обработка осуществляется в несколько операций, что обеспечивает постепенное и последовательное изменение формы: от изначальной формы заготовки до требуемой формы изделия. В процессе металлообработки происходит упрочнение материала и снижение его пластичности.

При объемной штамповке поковки штампуют на штамповочных и ковочных прессах. Штампы состоят из двух частей, каждая из которых имеет полости (ручьи). Очертания ручьев соответствуют форме изготавливаемой поковки. Поковки можно штамповать и на паровоздушных молотах одинарного и двойного действия падающей частью (бабой) массой до 20–30 т и кривошипных прессах с усилием до 10 тыс. т. При штамповке нагретая заготовка под действием удара молота деформируется и заполняет полость штампа, излишек металла (облой) поступает в специальную канавку и затем обрезается на прессе. Мелкие поковки штампуют из прутка длиной до 1200 мм, а крупные – из шпунтовых заготовок.

Листовой штамповкой изготавливают тонкостенные детали из листов и лент различных металлов и сплавов (шайбы, сепараторы подшипников, кабины, кузова, крылья и другие детали автомобилей и приборов). Листовой металл толщиной до 10 мм штампуют без нагрева, более 10 мм – с нагревом до ковочных температур.

Листовую штамповку обычно производят на кривошипных и листоштамповочных прессах простого и двойного действия.

В условиях массового производства подшипников, болтов, гаек и других деталей широкое применение находят специализированные кузнечные машины. Наибольшее распространение получила горизонтально-ковочная машина.

Волочение состоит в протягивании металла в холодном состоянии через отверстие (фильер) в матрице, поперечное сечение которого меньше, чем у обрабатываемой заготовки. При волочении площадь поперечного сечения уменьшается, благодаря чему длина заготовки увеличивается. Волочению подвергают черные и цветные металлы и сплавы в прутках, проволоке и трубах. Волочение позволяет получать материалы точных размеров и с высоким качеством поверхности.

Волочением получают сегментные шпонки, стальную проволоку диаметром 0,1 мм, иглы для медицинских шприцев и т. д.

Волочение производят на волочильных станах. В качестве инструмента применяют волочильные доски и матрицы, изготавливаемые из инструментальной стали и твердых сплавов.

Основные дефекты проката и поковок

В процессе обработки давлением металл слитка испытывает сильные деформации, в нем возникают большие внутренние напряжения, как сжимающие, так и растягивающие. Первые могут вызвать заваривание некоторых дефектов слитка, а вторые привести к появлению разрывов в металле, тем более вероятных, если металл слитка в этом месте был ослаблен собственными дефектами. При контроле продуктов прокатки и волочения необходимо обеспечить высокую производительность, в этом случае применяют вихретоковый, магнитный (феррозондовый) и УЗ виды НК.

Рассмотрим основные виды дефектов прокатанного и кованого металла согласно ГОСТ 21014–88 [6].

Настоящий стандарт устанавливает термины и определения дефектов поверхности проката из нелегированных и легированных сталей и сплавов: горячекатаных и кованых, прутков круглого, квадратного и шестигранного сечения, горячекатаных профилей, листов и полос, холоднокатаных листов и лент, холоднокатаных и холоднотянутых прутков и профилей, а также дефекты формы листов, лент и рулонов.

Дефекты продукции после обработки давлением подразделяют на две группы: 1) связанные с дефектами слитка; 2) вызываемые самой обработкой.

Дефекты поверхности, обусловленные качеством слитка и литой заготовки

Раскатанное (раскованное) загрязнение (Rolled slag patch, sand mark) – дефект поверхности (рисунок 4.39), представляющий собой вытянутое в направлении деформации раскатанное (раскованное) поверхностное загрязнение слитка или литой заготовки шлаком, огнеупором, теплоизоляционной смесью.



Рисунок 4.39 – Раскатанное загрязнение

Раскатанная (раскованная) корочка (Shelf, Rolled crust) – дефект поверхности (рисунок 4.40), представляющий собой частичное отслоение или разрыв металла, образовавшееся в результате раскатки (расковки) завернувшихся корочек, имевшихся на поверхности слитка или литой заготовки и представляющих собой окисленный металл, сопровождающийся скоплениями неметаллических включений сложного состава.



Рисунок 4.40 – Раскатанная (раскованная) крошка

Волосовина (Hairline, Spill) – дефект поверхности в виде нитевидных несплошностей в металле (рисунок 4.41), образовавшихся при деформировании имеющихся в нем неметаллических включений.

Методы контроля: ультразвуковой, магнитный, вихрековый.

Способ устранения – удаление металла.



Рисунок 4.41 – Волосовина

Раскатанный (раскованный) пузырь – дефект поверхности в виде прямолинейной продольной различной протяженности и глубины тонкой трещины (рисунок 4.42), образовавшейся при раскатке (расковке) наружного или подповерхностного газового пузыря слитка или литой заготовки.



Рисунок 4.42 – Раскатанный (раскованный) пузырь

Примечания

1 Дефект часто располагается группами. Иногда встречаются единичные дефекты.

2 На микрошлифе полость дефекта имеет форму мешка, обычно заполнена окислой и располагается перпендикулярно или под различными углами к поверхности заготовки. К дефекту прилегает обезуглероживенная зона с четкими границами, насыщенная мелкими частицами оксидов.

Методы контроля: ультразвуковой, магнитный, вихрековый.

Способ устранения – удаление металла.

Пузырь-воздух – дефект поверхности в виде локализованного вспучивания металла (рисунок 4.43), образующегося на поверхности листа и ленты из-за повышенного местного загрязнения металла газами или неметаллическими включениями.

Примечание – Образованию пузыря-вздутия способствует травление металла с насыщением его водородом или нагрев.

Расслоение (Delamination) – дефект поверхности в виде трещин на кромках и торцах листов и других видов проката (рисунок 4.44), образовавшихся при наличии в металле усадочных дефектов, внутренних разрывов, повышенной загрязненности неметаллическими включениями и при пережоге.



Рисунок 4.43 – Пузырь-вздутие

Примечания

- 1 Расслоение может сопровождаться вздутием поверхности листа.
- 2 Расслоение может быть обнаружено при резке металла.

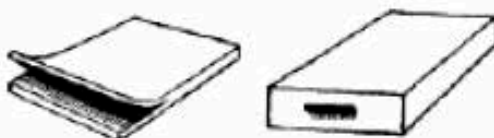


Рисунок 4.44 – Расслоение

Метод контроля – ультразвуковой.

Способ устранения – удаление металла.

Слиточная рванина (Ingot hot tear) – дефект поверхности в виде разрыва (рисунок 4.45), образовавшегося в начале прокатки (ковки) по участкам слитка, пораженным дефектами.



Рисунок 4.45 – Слиточная рванина

Примечание – Дефект обусловлен нарушением технологии выплавки и разливки металла.

Методы контроля: поверхностные, ультразвуковой.

Способ устранения – удаление металла.

Слиточная пленка (Sliver, Rolled scab) – дефект поверхности в виде отслоения языкообразной формы, частично соединенного с основным металлом (рисунок 4.46), образовавшегося от раската окисленных брызг, заплесков и грубых неровностей поверхности слитка, обусловленных дефектами внутренней поверхности изложницы.

Примечание – На микрошпиге нижняя поверхность слиточной плены и находящийся под ней металл загрязнены оксидами или нитридами или частицами углеродистой смеси и обычно обезуглерожены.

Методы контроля: визуальный, ультразвуковой.

Способ устранения – удаление металла.

Раскатанный притар (Rolled burn-on) – дефект поверхности в виде темного пятна неправильной формы (рисунок 4.47), образовавшегося от раската куска металла, приварившегося к слитку из-за нарушения технологии разливки или из-за неисправности изложницы.

Примечание – При выпораньи или выпадении раскатанного притара на поверхности листа остаются углубления с разрывами по краям.



Рисунок 4.46 – Слиточная плена



Рисунок 4.47 – Раскатанный притар

Раскатанная (раскованная) трещина (Rolled crack) – дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла (рисунок 4.48), образовавшийся при раскатке (расковке) продольной или поперечной трещины слитка или литой заготовки.



Рисунок 4.48 – Раскатанная (раскованная) трещина

Примечание – На микрошпиге трещина располагается под прямым или острым углом к поверхности, у поверхности более широкая с постепенным сужением вглубь, из металла имеет разветвленный конец. Стенки дефекта покрыты окисной, прилегающие к нему участки обезуглерожены и насыщены диффузионными оксидами.

Гармошка (Pile) – дефект поверхности листа в виде чередующихся вздутый, идущих поперек прокатки от торца по плоскости листа (рису-

нок 4.49), образовавшихся при наличии полостей и рыхлости в осевой зоне слитка.

Примечания

- 1 Между волнами гармошки могут возникать разрывы металла.
- 2 На микрошлифе в осевой зоне под гармошкой обнаруживается нарушение сплошности металла, частицы включений и зоны ликвации.

Деформационная рванина (Hot tears) – дефект поверхности в виде раскрытого разрыва, расположенного поперек или под углом к направлению наибольшей вытяжки металла при прокатке или ковке (рисунок 4.50), образовавшийся вследствие пониженной пластичности металла.



Рисунок 4.49 – Гармошка



Рисунок 4.50 – Деформационная рванина

Примечания

- 1 Причина пониженной пластичности обусловлена технологией выплавки металла или нарушением режимов нагрева или деформации.
- 2 На микрошлифе в зоне дефекта наблюдаются разветвленные разрывы металла.

Методы контроля: поверхностные, ультразвуковой.

Способ устранения – удаление металла.

Рванина на кромках (Cracked edge) – дефект поверхности листа и ленты в виде разрыва металла по кромкам листа и ленты (рисунок 4.51), образовавшегося из-за нарушения технологии прокатки, а также при прокатке металла с пониженной пластичностью, обусловленной технологией выплавки.

Затянутая кромка (Folded edge) – дефект поверхности в виде раскатанной складки на кромке листа, напоминающей по форме зигзагообразную трещину (рисунок 4.52), образующуюся при прокатке без кантовки или путем закатки напылов, появляющихся при деформации слитков с непрогретой сердцевинкой.

Примечания – На поперечном микрошлифе около затянутой кромки наблюдается обезуглероживание металла и закат окислы.

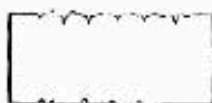


Рисунок 4.51 – Рванина на кромках



Рисунок 4.52 – Затянутая кромка

Прокатная пленка (Sliver, Rolling skin) – отслоение металла языкообразной формы, соединенное с основным металлом одной стороной (рисунок 4.53),

образовавшееся вследствие раскатки или расковки рванины, подрезов, следов глубокой зачистки дефектов или сильной выработки валков, а также грубые механические повреждения.



Рисунок 4.53 – Прокляная плена

Примечание – На микрошлифе в зоне дефекта может наблюдаться овалит, металл обезуглерожен.

Методы контроля: визуальный, ультразвуковой,

Способ устранения – удаление металла.

Трещина напряжения (Stress crack) – дефект поверхности, представляет собой разрыв металла, идущий вглубь под прямым углом к поверхности (рисунок 4.54), образовавшийся вследствие напряжений, которые связаны со структурными превращениями или неравномерным нагревом и охлаждением.



Рисунок 4.54 – Трещина напряжения

Примечание – На микрошлифе трещина напряжения имеет разветвленный конец и проходит по границам зерен. Окисление и обезуглероживание в зоне дефекта происходит только при последующем нагреве.



Рисунок 4.55 – Скворечник

Скворечник (Pigeon hole) – дефект поверхности в виде выходящей на поверхность полости со сплавленными и окисленными стенками (рисунок 4.55), образовавшейся при ковке или прокатке в результате раскрытия внутренней трещины, которая возникла под действием напряжений при нагреве холодного металла.

Методы контроля: ультразвуковой, магнитный (ферроскопический), искретоковый, радиационный.

Способ устранения – удаление металла.

Ус (Ridge) – дефект поверхности, представляющий собой продольный выступ с одной или двух диаметрально противоположных сторон прутка (рисунок 4.56), образовавшийся вследствие неправильной подачи металла в

калибр, переполнения калибров или неправильной настройки валков и привалковой арматуры.

Подрез – дефект поверхности в виде продольного углубления, расположенного по всей длине или на отдельных участках поверхности проката (рисунок 4.57), образовавшегося вследствие неправильной настройки привалковой арматуры или одностороннего перекрытия калибра.

Порез – дефект поверхности тонкого листа в виде частично закатанной складки, расположенной вдоль или под углом к направлению прокатки (рисунок 4.58), образовавшейся из-за деформации различной степени по ширине листа и иногда сопровождаемой сквозным разрывом металла.



Рисунок 4.56 – Ус

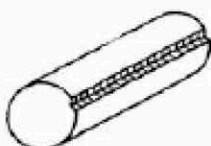


Рисунок 4.57 – Подрез

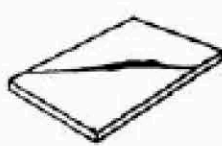


Рисунок 4.58 – Порез

Закат (Lap) – дефект поверхности, представляющий собой прикатанный продольный выступ (рисунок 4.59), образовавшийся в результате закатывания уса, подреза, грубых следов зачистки и глубоких рисок.

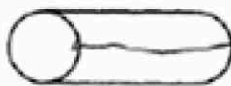


Рисунок 4.59 – Закат

Примечания

1 Дефект часто расположен с двух диаметрально противоположных сторон и может иметь зазубренный край.

2 На поперечном микрошлифе дефект располагается под острым углом к поверхности без разветвления, заполнен окалиной и сопровождается искажением структуры. Металл вокруг дефекта обезуглерожен.

Методы контроля: ультразвуковой, магнитный, вихретоковый.

Способы устранения: вырубка, шлифовка.

Заков (Forging fold) – дефект поверхности, представляющий собой придавленный выступ (рисунок 4.60), образовавшийся при ковке в результате неравномерного обжатия.

Примечание – На микрошлифе конец закова заполнен окалиной и сопровождается искажением структуры. Металл в зоне дефекта обезуглерожен.

Методы обнаружения: ультразвуковой, магнитный, вихретоковый.

Способы устранения: вырубка, шлифовка.

Морщины (Wrinkles) – дефекты поверхности в виде группы чередующихся продольных углублений и выступов (рисунок 4.61), располагающихся, в основном, по всей длине раската, преимущественно в зоне, соответствующей разему валков, и образовавшихся при повышенных обжатиях боковых граней.

Примечания

1 На листах дефект располагается, в основном, на кромках из-за неравномерной деформации по высоте заготовки.

2 Дефект может иметь вид прикатанных складок.

3 На микрошлифе дефект имеет вид полости с закругленными концами, частично заполненной окалинной. В зоне дефекта иногда наблюдается местное увеличение обезуглероженного слоя.



Рисунок 4.60 – Завод



Рисунок 4.61 – Морщины



Сквозные разрывы (Through tears) – дефект поверхности в виде сквозных несплошностей листа и ленты, образующихся при деформации полосы неравномерной толщины или с вкатанными инородными телами.

Примечание – Причиной неравномерной толщины полосы может быть зачистка дефектов на глубину, превышающую допуск, наличие рыхлости и поперечная разнотолщинность.

Риска (Groove, Guide mark) – дефект поверхности в виде канавки без выступа кромок с закругленным или плоским дном (рисунок 4.62), образовавшийся от царапания поверхности металла изношенной прокатной арматурой.

Примечание – Дефект не сопровождается изменением структуры и неметаллическими включениями. На последующих операциях края риски могут прикатываться.

Методы контроля: поверхностные, ультразвуковой.

Способы устранения: вырубка, вышпифовка.

Надрывы (Surface tears) – дефект поверхности в виде поперечных несквозных разрывов на тонких листах (рисунок 4.63), образующихся при прокатке в местах забоин, углублений от зачистки, раскатанных загрязнений и окапины.



Рисунок 4.62 – Риска



Рисунок 4.63 – Надрывы

Продир (Guide scratch) – дефект поверхности в виде широких продольных углублений, образующихся от резкого трения проката о детали прокатного и подъемно-транспортного оборудования (рисунок 4.64).

Наколы-проколы (Pricks) – дефекты поверхности в виде периодически повторяющихся точечных углублений или сквозных отверстий (рисунок 4.65), образовавшихся от соприкосновения ленты с остроугольными наварками на роликах термических печей, травильных агрегатов и вспомогательного оборудования.

Отпечатки (Indentations and roll marks) – дефект поверхности в виде углублений или выступов, расположенных по всей поверхности или на отдельных ее участках, образовавшихся от выступов и углублений на прокатных валках, роликах или ковочном инструменте (рисунок 4.66).

Примечание – На катаном металле дефект периодически повторяется по длине раската.



Рисунок 4.64 – Продир



Рисунок 4.65 – Наколы-проколы



Рисунок 4.66 – Отпечатки

Перегрев поверхности (Surface overheating) – дефект в виде шероховатости поверхности с крупным зерном, рыхлой окалиной и сеткой трещин по границам крупных кристаллов, образующейся при превышении температуры и времени нагрева.

Чешуйчатость (Rippled surface) – дефект поверхности, представляющий собой отслоения и разрывы в виде сетки, образовавшиеся вследствие перегрева или пониженной пластичности металла периферийной зоны (рисунок 4.67).

Примечания

1 Снижение пластичности может быть вызвано выделением по границам зёрен легкоплавких составляющих или насыщением поверхности металла серой при нагреве его в среде сернистых газов.

2 На микрошлифе разрывы совпадают с границами зёрен и сопровождаются оксидами и эвтектическими фазами.

Раскатанные отпечатки (Rolled indentation) – дефект поверхности в виде светлых пятен или матовых полосок, образующихся при холодной прокатке подката, имеющего отпечатки, а также раковины-вдавы, забоины, продиреры или следы глубокой зачистки (рисунок 4.68).

Примечание – На микрошлифе наблюдается местное, в виде пленочек, отслоение металла.



Рисунок 4.67 – Чешуйчатость



Рисунок 4.68 – Раскатынные отпечатки

Сетка отпечатков (Net shaped roll marks) – дефект поверхности в виде периодически повторяющихся, имеющих форму сетки выступов (рисунок 4.69), образующихся от вдавливания прокатываемого листа или ленты в трещины изношенных валков.

Примечание – Сетка отпечатков обычно встречается на одной стороне листа.

Вкатанная окалина, Rolled-in scale – дефект поверхности в виде вкрапленных остатков окалины, вдавленной в поверхность металла при деформации (рисунок 4.70).

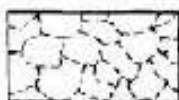
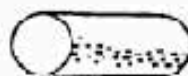


Рисунок 4.69 – Сетка отпечатков



Рисунок 4.70 – Вкатанная окалина



Рябизна (Pitted surface) – дефект поверхности в виде мелких углублений, образующих полосы или сетку (рисунок 4.71), наблюдаемых после удаления вкатанной окалины.

Раковины от окалины (Pitting, Scale pits) – дефект поверхности в виде отдельных углублений, частично вытянутых вдоль направления прокатки, образующихся при вытравливании и выпадении вкатанной окалины (рисунок 4.72).

Примечание – Раковины от окалины отличаются от рябизны большими размерами и меньшим количеством.



Рисунок 4.71 – Рябизна



Рисунок 4.72 – Раковины от окалины

Вкатанные металлические частицы, дефект поверхности листа в виде приварившихся и частично закатанных кусочков металла (рисунок 4.73).

Примечание – К вкатанным металлическим частицам относятся: стружка, отслоившаяся от режущих кромок листа.

Раковина-вдав – дефект поверхности листа и ленты в виде одиночного углубления (рисунок 4.74), образовавшегося при выпадении или вытравливании вкатанной инородной частицы.

Примечание – Дефект повторяет форму вкатанного предмета.



Рисунок 4.73 – Вкатанные металлические частицы



Рисунок 4.74 – Раковина-вдав

Вкатанные инородные частицы (Rolled-in foreign particles) – остатки подметочной бумаги, кусочки дерева или гуммировки роликов на поверхности холоднокатаного листа или ленты.

Отстающая окалина (Exfoliating scale) – дефект поверхности в виде отдельных участков с отслоившейся или рыхлой окалиной (рисунок 4.75), образующихся при нарушении технологии нагрева перед прокаткой или при дальнейшей термической обработке.

Примечание – Отстающая окалина является дефектом листа, на котором тонкий слой окалины является защитным покрытием.

Заплески – дефект поверхности в виде полосок от натеков оплавленного металла (рисунок 4.76), образующихся при нарушении технологии огневой зачистки дефектов.

Примечание – В местах заплесков наблюдаются углубления и изменение микроструктуры основного металла.

Следы абразивной зачистки (Grinding traces) – дефект поверхности ленты в виде участков с повышенной шероховатостью (рисунок 4.77), образовавшихся после зачистки полосы абразивным инструментом с грубым зерном.



Рисунок 4.75 – Отстающая окалина

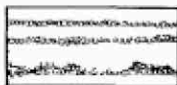


Рисунок 4.76 – Заплески

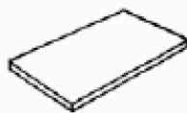


Рисунок 4.77 – Следы абразивной зачистки

Серые пятна (Gray spots) – дефект поверхности ленты в виде светло- или темно-серых пятен, расположенных в строчку или группами (рисунок 4.78), образующихся от раската вкатанной окалины или незначительных углублений.

Пятнистое науглероживание (Spot carburization) – дефект поверхности в виде черных пятен или полос (рисунок 4.79), выявившихся после травления, образовавшихся при длительном нагреве стальных изделий в науглероживающей среде.

Примечание – На катаных изделиях темные пятна науглероживания могут быть от слитков, разлитых под графитосодержащими смесями.

Пятна загрязнения (Dirt spots) – дефект поверхности в виде пятен, полос, натеков, разводов (рисунок 4.80), образующихся вследствие прилипания жидкости к изделию и дальнейшего неравномерного окисления при нагреве и травлении металла.

Примечание – К жидкостям, способствующим появлению пятен загрязнения, относятся мазут, технологическая смазка, загрязненное масло и эмульсия.



Рисунок 4.78 – Следы абразивной зачистки



Рисунок 4.79 – Пятнистое науглероживание



Рисунок 4.80 – Пятна загрязнения

Пятна слипания сварки (Sticker patches) – дефект поверхности в виде темно-серых участков налипания или отрыва металла (рисунок 4.81), образовавшихся при разматывании слипшихся или сварившихся участков полос рулона, горячекатаных или отожженных холоднокатаных листов в пакетах.

Примечание – На участках пятен слипания сварки изменения микроструктуры не наблюдается.

Заусенец (Burr) – дефект поверхности, представляющий собой острый, в виде гребня, выступ (рисунок 4.82), образовавшийся при резке металла.

Зазубрины (Hacks) – дефект поверхности в виде выступов и углублений на кромках листа и ленты (рисунок 4.83), образовавшихся при нарушении технологии резки или неисправности оборудования.



Рисунок 4.81 – Пятна слипания сварки



Рисунок 4.82 – Заусенец

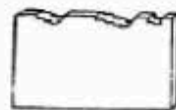


Рисунок 4.83 – Зазубрины

Торцевая трещина (End crack) – дефект поверхности в виде разрывов на торцах и (или) на боковых кромках листа и других видов проката (рисунок 4.84), образовавшихся при резке металла тупым или плохо настроенным инструментом, а также в интервале температур синеломкости.



Рисунок 4.84 – Торцевая трещина

Полосы-линии скольжения (Slip bands) – дефекты поверхности в виде темных полосок и разветвленных линий на поверхности холоднокатаного листа и ленты (рисунок 4.85), образовавшихся вследствие местных напряжений, превышающих предел текучести металла, вызванных нарушением технологии обработки давлением.

Примечание – Линии скольжения обычно расположены под углом 45° к направлению прокатки и дроссировки.



Рисунок 4.85 – Полосы-линии скольжения

Полосы нагартовки – дефекты поверхности в виде параллельных светлых полос, расположенных поперек направления прокатки, образовавшихся при повышенной неравномерной деформации, обусловленной автоколебаниями валков (рисунок 4.86).

Перегибы (Cross breaks, Coil breaks) – дефект поверхности листов и лент в виде шероховатых светлых поперечных полос, образовавшихся в результате резких перегибов при сматывании или разматывании рулонов или при изменении формы прогиба пакета листов при подъемно-транспортных операциях (рисунок 4.87).

Примечание – Дефект образуется при неправильной настройке S-образных натяжных устройств, петлеования полос при травлении, из-за наличия серповидности, коробоватости, а также от внутренних напряжений, возникающих в металле при структурных превращениях.

Цвета побежалости (Heat tints, Oxidation tints) – дефект поверхности в виде пятнистой, от желтого до синевато-серого цвета окисной пленки (рисунок 4.88), образовавшейся на поверхности металла при нарушениях технологии охлаждения после прокатки или при термической обработке, а также при травлении и зачистке дефектов абразивным инструментом.

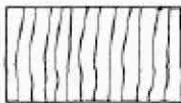


Рисунок 4.86 – Полосы нагартовки



Рисунок 4.87 – Перегибы



Рисунок 4.88 – Цвета побежалости

Дефекты поверхности, образовавшиеся при отделочных операциях

Травильные трещины (Pickling cracks) – разрывы (рисунок 4.89), которые образовались при травлении металла, имевшего напряжения от структурных превращений или деформации.

Недотрав (Underpickling) – дефект поверхности в виде пятен или полос (рисунок 4.90), образовавшихся при неполном или неравномерном травлении окалины.



Рисунок 4.89 – Травильные трещины

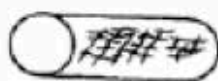


Рисунок 4.90 – Недотрав

Перетрав (Overpickling) – дефект поверхности в виде язв (рисунок 4.91), образовавшихся вследствие длительного травления на отдельных участках или всей поверхности металла.

Остатки окалины (Scale residue) – дефект поверхности, представляющий собой отдельные участки поверхности, покрытые окалиной (рисунок 4.92), остающиеся после механической обработки.

Пятна ржавчины (Rust spots) – дефект поверхности в виде пятен или полос с рыхлой структурой окисной пленки (рисунок 4.93), образовавшихся в результате попадания влаги и недостаточной промывки металла от травильных растворов.

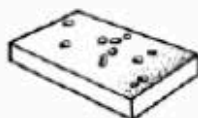


Рисунок 4.91 – Перетрав



Рисунок 4.92 – Остатки окалины



Рисунок 4.93 – Пятна ржавчины

Налет шлама (Slime deposit) – дефект в виде осадка, образовавшегося на поверхности металла при нарушении технологии травления, чистки и промывки изделия.

Примечание – Шлам состоит из солей оксидов металлов, спеченного талка, а также полимеризованного масла и т. д.

Оттенки травления (Pickling tints) – дефект поверхности в виде чередующихся темных и светлых, матовых и блестящих участков на поверхности, образовавшихся из-за неравномерного травления высоколегированного или неравномерно наклепанного металла.

Примечание – На поверхности металла окисление и растрав отсутствуют.

Шлифовочные трещины (Grinding cracks) – дефект поверхности в виде сетки паутинообразных или отдельных произвольно направленных поверхностных разрывов (рисунок 4.94), образовавшихся при шлифовании и абразивной зачистке металла, обладающего высокой твердостью, хрупкостью и малой теплопроводностью.

Царапина (Scratch) – дефект поверхности, представляющий собой углубление неправильной формы и произвольного направления (рисунок 4.95), образующегося в результате механических повреждений, в том числе, при складировании и транспортировании металла.

Примечание – На микрошпифе в зоне дефекта трещины обычно располагаются по границам зёрен.



Рисунок 4.94 – Шлифовочные трещины

Рисунок 4.95 – Царапина

Вмятины, Compression marks (Handling marks) – дефект поверхности в виде произвольно расположенных углублений различной формы, образовавшихся вследствие повреждения и ударов поверхности при транспортировке, правке, складировании и других операциях.

Матовая поверхность (Dull surface) – дефект поверхности, характеризующийся отсутствием глянца на поверхности холоднокатаных и полированных листов и лент, образующийся при нарушении условий нагрева в печах с защитной атмосферой при полировании мягкого металла, загрязненного твердыми частицами включений и неравномерной выработки поверхности валков.

Примечание – Отсутствие глянца и шероховатость поверхности в случае специальной обработки ее на заданную «окисленность» не являются дефектами.

4.1.3 Дефекты, возникающие при различных видах обработки деталей

Термическая обработка

Термической (или тепловой) обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счёт изменения внутреннего строения и структуры. Тепловая обработка используется либо в качестве промежуточной операции для улучшения обрабатываемости давлением, резанием, либо как окончательная операция технологического процесса, обеспечивающая заданный уровень свойств изделия.

При нагреве и охлаждении стали происходят фазовые превращения, которые характеризуются температурными критическими точками. Критические точки стали принято обозначать буквой *A*.

Критические точки A_1 лежат на линии *PSK* ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) диаграммы (рисунок 4.1) железо – углерод и соответствуют превращению перлита в аустенит. Критические точки A_2 находятся на линии *MO* ($768\text{ }^{\circ}\text{C}$), характеризующей магнитное превращение феррита. Точка A_3 соответствует линиям *GS* и

SE , на которых соответственно завершается превращение феррита и цемента в аустенит при нагреве.

Для обозначения критических точек при нагреве и охлаждении вводят дополнительные индексы: букву «с» в случае нагрева и «г» в случае охлаждения, например, A_{c1} , A_{c3} , A_{r1} , A_{r3} .

Дефекты термообработки:

- пятна на закаленной поверхности;
- обезуглероживание или чрезмерное науглероживание поверхностных слоев;
- отклонение структуры и свойств сплавов от заданных;
- макро- и микротрещины и т. д.

Характерной причиной дефектов при термообработке является несоблюдение режимов нагрева и охлаждения, в результате чего структура и свойства сплава не соответствуют заданным.

Наиболее опасными дефектами термообработки являются трещины. Они возникают в результате резкого нагрева или охлаждения (микро- и макротрещины), насыщения поверхностного слоя водородом (водородные трещины).

Основными видами термической обработки стали, чугуна и цветных сплавов являются *отжиг*, *нормализация*, *отпуск* и *закалка*.

Отпуском называют первичную операцию термической обработки, при которой сталь нагревают до температуры ниже линии PSK (см. рисунок 4.1), выдерживают при этой температуре и затем медленно охлаждают вместе с печью.

Цель и назначение отжига так же разнообразны, как и выполнение. Отжиг применяют для снятия внутренних напряжений, повышения механических свойств металла, улучшения обрабатываемости режущим инструментом, снижения твердости и для подготовки структуры к дальнейшей термической обработке.

Нормализацией называют термическую операцию, при которой сталь нагревают до температуры на 30–50 °С выше верхних критических точек A_{c3} и A_{c1} (выше линии GSE), выдерживают при этой температуре и затем охлаждают на воздухе (см. рисунок 4.1).

Нормализацией устраняют внутренние напряжения и наклеп, повышают механические свойства и готовят структуру стали для окончательной термической обработки.

В процессе отжига и нормализации могут возникнуть следующие дефекты: *окисление*, *обезуглероживание*, *перегрев* и *пережог металла*.

При нагреве в пламенных печах поверхность стальных деталей взаимодействует с печными газами. В результате металл *окисляется* и на деталях образуется окалина – химическое соединение металла с кислородом. С повышением температуры и увеличением времени выдержки окисление резко возрастает. Образование окалины не только вызывает угар (потерю) металла

на окалину, но и повреждает поверхность деталей. Поверхность стали под окалиной получается разъеденной и неровной, что затрудняет обработку металла режущим инструментом. Окалину с поверхности деталей удаляют травлением в растворе серной кислоты в воде, очисткой в дробеструйных установках или галтовкой в барабанах.

Обезуглероживание, т. е. выгорание углерода с поверхности деталей, происходит при окислении стали. Обезуглероживание резко снижает прочностные свойства конструкционной стали. Кроме того, обезуглероживание поверхности может вызвать образование закалочных трещин и коробление (поводку детали).

Для предохранения деталей от окисления и, следовательно, от обезуглероживания при отжиге, нормализации и закалке применяют безокислительные (защитные) газы, которые вводят в рабочее пространство печи.

Обезуглероживание является неисправимым дефектом.

Методы контроля: магнитный, вихретоковый, измерение твердости.

При нагреве стали выше определенных температур и длительных выдержках в ней происходит быстрый рост зёрен, ведущий к возникновению крупнокристаллической структуры. Это явление называют *перегревом*. Перегрев ведет к понижению пластических свойств стали. В перегретой стали при закалке образуются трещины. Перегрев металла может быть исправлен повторной термической обработкой – отжигом или нормализацией.

Методы контроля: ультразвуковой, вихретоковый, электрические.

Пережог получается в результате длительного пребывания металла в печи при высокой температуре, близкой к температуре плавления. Физическая сущность пережога состоит в том, что кислород из окружающей атмосферы при высокой температуре проникает в глубь нагреваемого металла и окисляет границы зёрен. В результате окисления границ зёрен механическая связь между зёрнами ослабевает, металл теряет пластичность и становится хрупким. Пережог является неисправимым дефектом.

Методы контроля: ультразвуковой, вихретоковый, электрические.

Закалкой стали называют такую операцию термической обработки, при которой стальные детали нагревают до температуры несколько выше критической, выдерживают при этой температуре и затем быстро охлаждают в воде или масле.

Основное назначение закалки – получение стали с высокими твердостью, прочностью, износостойкостью и другими свойствами. Качество закалки зависит от температуры и скорости нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения.

В процессе нагрева под закалку и при закалке могут появляться следующие дефекты: трещины, деформация и коробление, обезуглероживание, мягкие пятна и низкая твердость.

Закалочные трещины – разрывы металла, возникающие при охлаждении деталей преимущественно сложной формы в процессе закалки из-за высоких внутренних напряжений (рисунок 4.96). Они могут появиться и после закалки на деталях, которые длительное время не подвергались отпуску, уменьшающему внутренние напряжения. Закалочные трещины – это неисправимый брак.

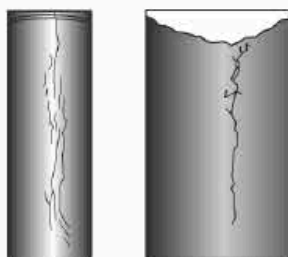


Рисунок 4.96 – Вид закалочных трещин

Трещины возникают при неправильном нагреве (перегреве) и большой скорости охлаждения в деталях, конструкция которых имеет резкие переходы поверхностей, грубые риски, оставшиеся после механической обработки, острые углы, тонкие стенки и т. д.

Внутренние напряжения в закаленной детали складываются из термических напряжений, появляющихся вследствие термических объемных изменений при быстром и неравномерном охлаждении детали, и напряжений, возникающих вследствие объемных изменений при структурных превращениях. Внутренние напряжения в значительной мере зависят от исходной структуры детали, в частности от наличия карбидов в стали, от степени неоднородности состава (наличия зональной и дендритной ликвации) и неодинаковой величины зерна стали в различных местах детали.

Высокие и неравномерные внутренние напряжения при недостаточной жесткости детали вызывают ее коробление. Если же детали имеют ослабленные сечения, то могут возникнуть и трещины. Наиболее вероятные места зарождения закалочных трещин – места с резким изменением сечения, острые углы и подрезы.

Закалочные трещины, обычно расположенные в углах деталей или инструмента, имеют дугообразный или извилистый вид.

Однако трещины при закалке нередко могут появляться и на деталях простой формы. В этом случае причиной образования трещин могут быть дефекты материала: *волосовины, шлаковые включения, флокены, ковочные трещины* – или несоблюдение режимов термической обработки деталей.

Отличительным признаком закалочных трещин является неопределенность их направления и извилистая форма. Закалочные трещины встречаются группами, но, как правило, число их на детали невелико.

Деформация и коробление деталей происходят в результате неравномерных структурных и связанных с ними объемных превращений, обуславливающих возникновение внутренних напряжений в металле при нагреве и охлаждении.

При закалке стали коробление деталей может происходить и без значительных объемных изменений в результате неравномерного нагрева и охлаждения. Если, например, деталь небольшого сечения и большой длины нагревать только с одной стороны, то она изгибается. При этом нагреваемая сторона детали удлиняется и становится выпуклой, а ее противоположная сторона – вогнутой. Нагревать и охлаждать детали при закалке следует равномерно.

При погружении деталей и инструмента в закалочную среду надо учитывать их форму и размеры. Детали, имеющие толстые и тонкие части, погружают в закалочную среду сначала толстой частью, длинные детали (штки, протяжки, сверла, метчики и пр.) опускают в строго вертикальном положении, а тонкие плоские (диски, отрезные фрезы, пластинки и пр.) – ребром.

Окисление и обезуглероживание происходит в основном при нагреве под закалку от взаимодействия печных газов или расплавленных солей с поверхностными слоями детали.

Этот дефект особенно опасен на режущем инструменте, т. к. он в несколько раз снижает его стойкость.

Окисление и обезуглероживание поверхности изделия предупреждается строгим соблюдением установленного режима термической обработки, а также нагревом в среде нейтральных газов (азоте, аргоне).

Мягкие пятна – это участки на поверхности детали или инструмента с пониженной твердостью. Такие дефекты образуются при закалке в процессе охлаждения в закалочной среде, когда на поверхности детали имелась окалина, следы загрязнений и участки с обезуглероженной поверхностью, а также в случае недостаточно быстрого движения детали в закалочной среде и образования на поверхности детали паровой рубашки.

Методы контроля: магнитный, вихретоковый, измерение твердости.

Способы устранения: вырубка, вышлифовка.

Низкая твердость чаще всего наблюдается при закалке инструмента. Причиной низкой твердости являются недостаточно быстрое охлаждение в закалочной среде, низкая температура закалки, а также недостаточная выдержка при нагреве под закалку. Для исправления этого дефекта деталь следует подвергнуть высокому отпуску и снова закалить.

Перегрев деталей под закалку увеличивает зернистость металла и, следовательно, ухудшает его механические свойства. Металл приобретает повышенную хрупкость. Для повторной закалки деталей их следует подвергнуть отжигу для измельчения зерна.

Недогрев происходит если температура закалки была ниже линии GS (ниже критической точки A_{c3}) для доэвтектоидных сталей и ниже линии PSK (критическая точка A_{c1}) для заэвтектоидных сталей (см. рисунок 4.1). Недогрев исправляют отжигом, после которого деталь снова закаляют.

Отпуском называют такую операцию термической обработки, при которой закаленную сталь нагревают до температуры ниже критической точки $A_{с1}$, после чего ее охлаждают.

В любой закаленной на мартенсит стали появляются не только высокая твердость и прочность, но и большие внутренние напряжения. Поэтому закаленная сталь очень хрупка и легко разрушается от ударных и изгибающих нагрузок. Для снятия внутренних напряжений и повышения вязкости закаленную сталь подвергают отпуску.

Специфическими видами термообработки являются *поверхностная* и *химико-термическая* обработка.

Сущность химико-термической обработки стали состоит в искусственном изменении структуры и химического состава ее поверхностных слоев. Цель такой обработки – получение высокой поверхностной твердости и износостойкости стальных деталей. Химический состав поверхностных слоев стали изменяется благодаря проникновению в них различных элементов. Изменение химического состава вызывает изменение структуры и свойств поверхностного слоя.

Механическая обработка

Большинство деталей машин изготавливается путем обработки резанием. Заготовками таких деталей служат прокат, отливки, поковки, штамповки и др.

Процесс обработки деталей резанием основан на образовании новых поверхностей путем деформирования и последующего отделения поверхностных слоев материала с образованием стружки. Та часть металла, которая снимается при обработке, называется *припуском*. Говоря иначе, припуск это избыточный (сверх чертежного размера) слой заготовки, оставляемый для снятия режущим инструментом при операциях обработки резанием.

После снятия припуска на металлорежущих станках обрабатываемая деталь приобретает форму и размеры, соответствующие рабочему чертежу детали. Для уменьшения трудоемкости и себестоимости изготовления детали, а также ради экономии металла, размер припуска должен быть минимальным, но в то же время достаточным для получения хорошего качества детали и с необходимой шероховатостью поверхности.

В современном машиностроении имеется тенденция снижать объем обработки металлов резанием за счет повышения точности исходных заготовок.

Основные методы обработки металлов резанием. В зависимости от характера выполняемых работ и вида режущего инструмента различают следующие методы обработки металлов резанием: *точение, фрезерование, сверление, зенкерование, долбление, протягивание, развертывание* и др. (рисунки 4.97).

Точение – операция обработки тел вращения, винтовых и спиральных поверхностей резанием при помощи резцов на станках токарной группы. При точении (см. рисунок 4.97, 1) заготовке сообщается вращательное движение (главное), а режущему инструменту (резцу) – медленное поступательное перемещение в продольном или поперечном направлении (движение подачи).

Фрезерование – высокопроизводительный и распространенный процесс обработки материалов резанием, выполняемый на фрезерных станках. Главное (вращательное) движение получает фреза, а движение подачи в продольном направлении – заготовка (см. рисунок 4.97, 2).

Сверление – операция обработки материала резанием для получения отверстия. Режущим инструментом служит сверло, совершающее вращательное движение (главное движение) резания и осевое перемещение подачи. Сверление производится на сверлильных станках (см. рисунок 4.97, 3).

Строгание – способ обработки резанием плоскостей или линейчатых поверхностей. Главное движение (прямолинейное возвратно-поступательное) совершает изогнутый строгальный резец, а движение подачи (прямолинейное, перпендикулярное главному движению, прерывистое) – заготовка. Стругание производится на строгательных станках (см. рисунок 4.97, 4).

Долбление – способ обработки резцом плоскостей или фасонных поверхностей. Главное движение (прямолинейное возвратно-поступательное) совершает резец, а движение подачи (прямолинейное, перпендикулярное главному движению, прерывистое) – заготовка. Долбление производят на долбежных станках (см. рисунок 4.97, 5).

Шлифование – процесс чистовой и отделочной обработки деталей машин и инструментов посредством снятия с их поверхности тонкого слоя металла шлифовальными кругами, на поверхности которого расположены абразивные зерна.

Главное движение вращательное, которое осуществляется шлифовальным кругом. При круглом шлифовании (см. рисунок 4.97, 6) вращается одновременно и заготовка. При плоском шлифовании продольная подача осуществляется обычно заготовкой, а поперечная подача – шлифовальным кругом или заготовкой (см. рисунок 4.97, 7).

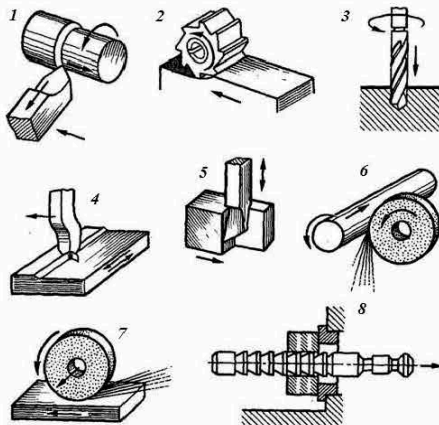


Рисунок 4.97 – Виды механической обработки

Протягивание – процесс, производительность при котором в несколько раз больше, чем при строгании и даже фрезеровании. Главное движение прямолинейное и режущее вращательное (см. рисунок 4.97, 8).

Дефекты, возникающие при механической обработке:

- микротрещины при обработке резанием;
- прижоги и мелкие трещины при шлифовке;
- трещины при правке, рихтовке, монтаже и т. д.

Дефекты типа несплошностей в процессе механической обработки возникают редко. Например, при обработке резанием металла, в котором имеются большие поверхностные напряжения, могут возникнуть трещины. При шлифовании возможен резкий нагрев поверхностного слоя металла, что может привести к появлению сетки мелких трещин и прижогов – локальных перезакаленных участков.

При правке, рихтовке, монтаже оборудования также могут появляться рихтовочные и монтажные трещины, ориентированные в направлении, перпендикулярном направлению максимальных растягивающих напряжений.

Шлифовочные трещины – группа мелких и тонких разрывов, как правило, в виде сетки на шлифованной поверхности металла (рисунок 4.98). Возникают при шлифовании сталей некоторых марок, склонных к образованию трещин, – закаленных высокоуглеродистых и легированных.

При шлифовке трещины возникают по двум причинам:

– из-за неправильного режима термообработки деталей, например, очень резкого охлаждения, приводящего к значительным внутренним напряжениям; в этом случае достаточно даже небольших дополнительных напряжений термического и механического происхождения, получающихся в поверхностном слое при шлифовании абразивными крутами, чтобы появились поверхностные шлифовочные трещины;

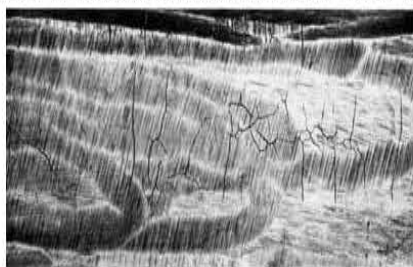


Рисунок 4.98 – Шлифовочные трещины

– вследствие местного перегрева металла при нарушении режимов шлифования;

– применении неподходящего для данного материала или «засаленного» крута, чрезмерном повышении подачи (давления), скорости шлифования (продолжительной задержке камня на одном месте) или недостаточном охлаждении.

Чрезмерные местные перегревы поверхностного слоя закаленных сталей, обладающих пониженным коэффициентом теплопроводности, вызывают в нем высокие внутренние напряжения вследствие неравномерных объемных изменений при чередующемся нагреве

и охлаждения. Эти напряжения приводят к образованию сетки шлифовочных трещин.

У малоуглеродистых сталей, обладающих более высоким коэффициентом теплопроводности и повышенными пластическими свойствами, образование трещин при шлифовке маловероятно.

Шлифовочные трещины являются неисправимым дефектом.

Методы контроля: поверхностные, ультразвуковой

Надрывы – неглубокие трещины, возникающие в деталях в результате холодной деформации металла, например, при сверлении или разверстке отверстий тупым сверлом или разверткой, холодной штамповке, особенно когда металл имеет недостаточно высокие пластические свойства из-за дефектов структуры. Кроме того, надрывы могут образоваться при горячей деформации (ковке, штамповке, протяжке с большой степенью деформации).

Электрические методы обработки металлов. К ним относятся электроискровой и УЗ-методы. Электроискровой метод обработки металлов применяют для изготовления (прошивки) отверстий различной формы, извлечения из отверстий деталей сломанных метчиков, сверл, шпилек и т. п., а также для заточки твердосплавных инструментов. Обработке подвергаются твердые сплавы, закаленные стали и другие твердые материалы, которые не могут быть обработаны обычными способами [7].

Этот метод основан на явлении электрической эрозии, т. е. на разрушении металла под действием электроискровых разрядов.

Сущность электроискрового метода обработки металлов состоит в том, что к инструменту и изделию, служащим электродами, подводится электрический ток определенной силы и напряжения. При сближении электродов на определенном расстоянии между ними под действием электрического тока происходит пробой этого промежутка (зазора). В месте пробоя возникает высокая температура, расплавляющая металл и выбрасывающая его в виде жидких частиц. Если к заготовке подвести положительное напряжение (анод), а к инструменту – отрицательное (катод), то при искровом разряде происходит вырыв металла из заготовки. Чтобы раскаленные частицы, вырванные разрядом из электрода-изделия, не перескакивали на электрод-инструмент и не искажали его, искровой промежуток заполняют керосином или маслом.

Инструмент-электрод выполняют из латуни, меднографитовой массы и других материалов. При изготовлении отверстий электроискровым методом можно получать любой контур в зависимости от формы инструмента-катода.

В настоящее время стандартом ГОСТ 25331–82 [4] регламентированы следующие виды электроэрозионной обработки:

– электроэрозионное объемное копирование – на поверхности электрода-заготовки отображается форма поверхности электрода-инструмента.

- электроэрозионное прошивание – электрод-инструмент, углубляясь в электрод-заготовку, образует отверстие постоянного сечения;
- электроэрозионное маркирование;
- электроэрозионное вырезание – электрод-инструмент (в виде непрерывно перематывающейся проволоки) осуществляет обход заготовки по заданной траектории, образуя поверхность заданного контура;
- электроэрозионное отрезание;
- электроэрозионное шлифование;

Кроме электроискрового метода обработки металлов, в промышленности применяют УЗ-метод, основанный на использовании упругих колебаний среды с частотой >20 кГц. При помощи УЗ-установок можно обрабатывать твердые сплавы, драгоценные камни, закаленную сталь и т. д. [8].

4.2 Дефекты соединения деталей

Соединения деталей бывают подвижные и неподвижные (мы рассматриваем только некоторые типы последних). Неподвижные соединения делят на разъемные (разборные) и неразъемные. Способы получения неразъемных соединений: сварка, пайка, клейка, клепка.

Практически все разъемные соединения основаны на использовании сил трения (резьбовые соединения и пресовые посадки). В газо- и гидроплотных конструкциях к соединениям предъявляют требования герметичности. В этих случаях в дополнение к традиционным методам контроля или вместо них соединения проверяют методами течеискания.

4.2.1 Дефекты сварки (сварных соединений)

Схема и структура сварного соединения

Большую группу технологических дефектов составляют дефекты сварки, которые имеют различные механизмы возникновения в различных зонах по отношению к центру сварного шва.

Схема зон сварного соединения (качественная) приведена на рисунке 4.99, а схема изменения температуры в зоне термического влияния, позволяющая анализировать фазовые и структурные изменения, которые происходят в этих зонах, – на рисунке 4.100.

В процессе сварки жидкий металл нагревается до высоких температур ($T \approx 1373...1793$ К), которые обуславливают его интенсивное взаимодействие с присутствующими в зоне сварки шлаками и активными газами (O_2 , N_2 , H_2), что может способствовать ухудшению свойств металла шва и появлению в нем дефектов в виде пор и свищей.

В околошовной зоне металл, расположенный на границе шва, нагревается до температуры плавления: ширина зоны сплавления l (см. рисунок 4.100) обычно ≤ 1 мм.

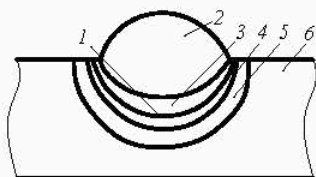


Рисунок 4.99 – Схема зон сварного соединения:
 1 – граница раздела между швом и основным металлом; 2 – смешанная зона расплавления основного и присадочного металла; 3 – зона полного расплавления основного металла; 4 – зона частичного расплавления основного металла; 5 – зона термического влияния; 6 – основной металл, не подверженный термическому влиянию

Зона сплавления часто является слабым местом всего сварного соединения, т. к. в ней возможны хрупкие разрушения, разрушения при циклических нагрузках, ножевая коррозия и др.

На участке 2 перегрева (до 1373–1773 К) наблюдается быстрый рост зёрен, вызывающий понижение пластичности и особенно ударной вязкости. Свойства участка 3 (перекристаллизации), нагретого до температуры 1173–1373 К, такие же, как и основного металла. Участок 4 (неполной перекристаллизации) 993–1173 К и состоит из зёрен основного металла, прошедших и не прошедших перекристаллизацию. На участке 5 (рекристаллизации) происходит перекристаллизация его зёрен, ранее деформированных в холодном состоянии, снижаются прочностные свойства.

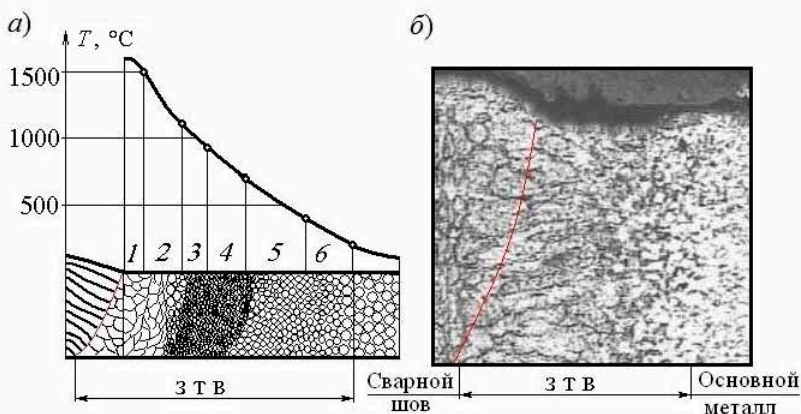


Рисунок 4.100 – Схема изменения температуры в зоне термического влияния (ЗТВ) на различных участках (а) и микрофотография зоны (б):

1 – сплавления; 2 – перегрева; 3 – перекристаллизации;
 4 – неполной перекристаллизации; 5 – рекристаллизации; 6 – старения

У дисперсионно-твердеющих сплавов увеличивается прочность, и снижается пластичность. Структура участка 6 (участок старения), нагреваемого до температуры 773 К, практически не изменяется, но в низколегированных сталях при повышенных содержаниях кислорода и азота при температуре 473–573 К может снижаться ударная вязкость $T, ^\circ\text{C}$.

Анализ количественного соотношения частоты появления дефектов различного вида в производственных сварных конструкциях (по данным, опубликованным в мировой печати) свидетельствует, что больше половины дефектов сварки приходится на холодные трещины. В целом же наиболее опасными дефектами являются трещины и трещиноподобные дефекты, непровары.

Все многочисленные виды сварки разделяют на две группы: сварку плавлением и давлением. В первом случае свариваемые заготовки располагают на некотором расстоянии друг от друга и осуществляют расплавление кромок заготовок и заполнение разделки присадочным (обычно из электрода) или оплавленным основным металлом. Во втором случае также возможно расплавление кромок, но сварку осуществляют при сдавливании свариваемых заготовок.

Сварку плавлением разделяют на виды по способу подвода энергии: газовая (горение газов типа ацетилена, пропана; этот способ сварки в настоящее время применяют всё реже), электродуговая (электрической дугой), электрошлаковая (нагревание шлака-флюса протекающим через него током), электронно-лучевая (сварка, источником энергии при которой является кинетическая энергия электронов в электронном пучке, сформированном электронной пушкой), плазменная, лазерная и др.

Кроме того, виды сварки различают по способам защиты от атмосферного воздуха зоны дуги и металлической ванны: с помощью плавящегося покрытия электрода, флюса (покрытия, растворяющего окислы), оттесняющих воздух газов (аргона, углекислого газа), вакуумирования.

Распространенными видами сварки плавлением являются электродуговая под флюсом и аргоно-дуговая, а для больших толщин – электрошлаковая. Быстро развивается электронно-лучевая сварка, которая используется для сварки тугоплавких, высокоактивных металлов в космической, авиационной промышленности, приборостроении и др. Электронно-лучевая сварка используется и при необходимости получения высококачественных швов с глубоким проплавлением металла, для крупных металлоконструкций.

Наиболее распространенным видом сварки давлением является контактная стыковая электросварка, в которой расплавления металла кромок достигают за счет пропуска сильного тока через свариваемые детали и повышенного электросопротивления в месте контакта. Затем свариваемые заготовки сильно сдавливают – осаживают. Ее варианты – точечная сварка, когда сваривают отдельные точки двух заготовок (пропускают ток через сжимающие металл электроды в виде металлических стержней); роликовая сварка, при которой вместо стержневых электродов для сдавливания металла и пропуска тока применяют катящиеся вдоль шва ролики.

К сварке давлением относят также сварку трением (вращение деталей с последующей осадкой), диффузионную сварку (сдавливание в вакууме хо-

рошо шлифованных и очищенных поверхностей), высокочастотную сварку (нагрев сдавленных кромок токами высокой частоты) и другие виды.

В процессе образования сварного соединения в металле шва, зонах термического влияния могут возникать дефекты, приводящие к снижению прочности, эксплуатационной надежности, точности, а также ухудшающие внешний вид изделия. Дефекты оказывают большое влияние на прочность сварных соединений и могут явиться причиной преждевременного разрушения сварных конструкций. Особенно опасны трещиноподобные дефекты, резко снижающие прочность, особенно при циклических перегрузках.

К дефектам, связанным с металлургическими и тепловыми явлениями, происходящими в процессе формирования и кристаллизации сварочной ванны и остывания металла, относятся: горячие и холодные трещины в металле шва и околошовной зоне, шлаковые включения [9].

К дефектам, связанным с нарушением режимов сварки, неправильной подготовкой и сборкой элементов конструкции под сварку, неисправностью оборудования, небрежностью и низкой квалификацией сварщика, относят: несоответствие швов расчетным размерам, непровары, подрезы, прожоги, наплывы, несваренные кратеры и др.

Дефекты сварных соединений по месту их расположения делятся на *внутренние* и *наружные*.

Каждому виду сварки свойственны свои характерные дефекты. Особенно сильно отличаются дефекты сварки плавлением и давлением.

Для сварки **плавлением** свойственны некоторые дефекты, характерные для литого металла:

- *поры* (иногда поры располагаются цепочками, группами) и *усадочные раковины* – пузыри (обычно сферической формы) различной величины, заполненные газами (водород, окись углерода). Образуются из-за присутствия газов, поглощаемых жидким металлом в процессе сварки;

- *включения в металле шва* – небольшие объемы, заполненные неметаллическими веществами (шлаками, флюсами, оксидами). Величина их колеблется от микроскопических размеров до нескольких миллиметров в поперечнике. Форма может быть самой различной – от сферической до плоской, вытянутой в виде пленки, которая разделяет прилегающие объемы наплавленного металла.

Неметаллические включения бывают двоякого рода и происхождения:

- 1) включения неметаллических частиц, попавших в металл извне; так, частицы шлака, огнеупора, графита, песка и т. д. могут попасть в форму вместе с расплавом и образовать шлаковые и песчаные включения, которые чаще всего расположены в верхних частях отливки или на их поверхности;

- 2) включения частиц окислов, сульфидов, силикатов, нитридов, образующихся внутри металла вследствие химического взаимодействия компонентов при расплавлении и заливке сплава. Они располагаются в виде цепочек

или сетки, часто по границам зёрен. По форме бывают округлые или удлиненные. Последние могут сильно снижать пластичность металла.

Специфические дефекты сварки плавлением.

Непровар – отсутствие сплавления между основным и наплавленным металлом в корне шва или по кромке, а также между отдельными слоями – проходами при многопроходной сварке.

Продрез – дефект в виде углубления между основным и наплавленным металлом на участке или по всему периметру сварного шва; большое превышение верхней выпуклости шва (ее иногда называют валиком усиления); смещение кромок сварного шва из-за недоброкачественной сборки.

Вогнутость, или превышение проплавления корня сварного шва (корнем называют участок в сечении шва, с которого начинают процесс сварки).

Прожег – дефект в виде сквозного отверстия в сварном шве, образовавшийся в результате вытекания сварочной ванны.

Отклонения в геометрии сварного шва и сварного соединения в виде подрезов, канавок, ряби, неполноты заполнения кратера, излишка металла, угловых и линейных смещений, вызванные неправильной техникой сварки или нетехнологичной конструкцией узла.

Особенно опасными дефектами являются **сварочные трещины**, возникающие обычно в процессе остывания сварного соединения. Они могут появиться не только в наплавленном металле, но также в основном металле соединения в зоне влияния на него сварочного процесса (зона термического влияния). Различают:

- *трещины в наплавленном металле* (могут быть продольными и поперечными относительно оси шва; разветвленными, паукообразными; образующими сетку). В изломе имеют темный цвет, сильно окисленные или светлые, с цветами побежалости;

- *холодные трещины в шве и переходной зоне*, расположенные под любым углом к шву, – в изломе светлые или со слабыми цветами побежалости. Возникают при остывании детали в зоне пониженных температур, преимущественно при дуговой сварке низколегированной стали большой толщины. Чаще всего трещины возникают в переходной зоне вследствие неправильной техники сварки или неправильно выбранного присадочного материала;

- *горячие трещины в переходной зоне от шва к основному материалу* – извилисты, в изломе имеют темный цвет, сильно окислены, распространяются по границам зёрен;

- *мелкие трещины (микротрещины) в шве или надрывы в переходной зоне* (на нетравленных шлифах под микроскопом видны в виде тонких линий), возникают вследствие неудовлетворительного качества присадочной проволоки, обмазки или флюса;

- *трещины, образующиеся в сварных соединениях при термообработке (закалке)* узлов, деталей – могут иметь любое направление; возникают из-за

несоблюдения режимов и условий термической обработки сварных узлов или вследствие неудовлетворительной (нетехнологичной) конструкции детали или узла;

– *трещины рихтовочные* – могут иметь любое направление, в изломе светлые. Причина образования – неправильная технология правки изделий, получивших коробление.

Причинами возникновения перечисленных дефектов могут быть неправильно выбранный состав и низкое качество сварочных материалов (электродов, присадочной проволоки, обмазки или флюса), неправильная подготовка к сварке (неверная форма разделки, неверно выбранное расстояние между свариваемыми заготовками); неправильные режимы и техника сварки; высокие внутренние напряжения в швах.

Трещины могут возникать также в результате неправильных конструкций сварного изделия, наличия включений, расслоений и других дефектов в основном металле, таких как пористость или шлаковые включения.

Многие крупногабаритные изделия в процессе сварки подогревают до 200–300 °С, а непосредственно после сварки помещают в печь для отжига или отпуска, чтобы снять внутренние напряжения. Захлаживание изделий, как правило, приводит к образованию трещин.

Дефекты формирования сварного шва (смещения кромок, подрезы, неправильная форма выпуклостей) проверяют визуально или с помощью шаблонов. Поверхностные несплошности обнаруживают поверхностными методами. Для выявления внутренних и некоторых поверхностных несплошностей применяют радиационные и УЗ-методы.

При сварке **давлением** встречаются некоторые дефекты, характерные для сварки плавлением, например, поры, смещение кромок и др.

Специфическим дефектом сварки давлением является *слипание*. Это хрупкое и непрочное соединение свариваемых заготовок, окисленное в большей или меньшей степени. Оно возникает при недостаточно хорошей очистке свариваемых поверхностей, недостаточном расплавлении металла кромок.

Существуют неразрешенные до настоящего времени затруднения в создании методов и средств НК таких дефектов. Перспективен УЗ-метод, однако четкое отражение УЗ удастся получить лишь от сильно окисленных (темных в изломе) поверхностей. Тонкое, светлое в изломе слипание не дает отражения УЗ, достаточного для регистрации такого дефекта. Слипание при точечной сварке листов удастся обнаруживать вихретоковыми дефектоскопами.

Отсутствие надежных средств обнаружения слипаний препятствует широкому применению сварки давлением при изготовлении ответственных конструкций, несмотря на ее очень высокую производительность.

Термины и определения, используемые при контроле сварных соединений

Горячие трещины (ГТ) – хрупкое межкристаллитное разрушение металла шва, возникающее в твердожидком состоянии при завершении кристаллизации шва под действием сварочных напряжений.

Дефект – несоответствие сварного шва или сварного соединения требованиям нормативно-технической документации.

Допустимый дефект – дефект, присутствие которого не ухудшает механических и эксплуатационных свойств сварного шва и разрешено нормативно-технической документацией.

Зона термического влияния (ЗТВ) – участок, нагретый при сварке до температуры 1350–2000 °С, в котором произошли структурные и механические изменения основного металла.

Контроль качества – процесс проверки соответствия показателей качества сварных соединений и изделий требованиям нормативных документов.

Кратер – усадочная раковина в конце валика сварного шва.

Недопустимый дефект – дефект, наличие которого категорически запрещено нормативно-технической документацией.

Оксидные включения – соединения кислорода с химическими элементами, например, $\text{SiO}_2\text{--MnO--FeO}$; $\text{SiO}_2\text{--MnO--Al}_2\text{O}_3$; $\text{SiO}_2\text{--FeO--Al}_2\text{O}_3$.

Остаточная деформация – деформация, возникающая в сварном изделии к моменту его полного охлаждения.

Погонная энергия – показатель сварочного процесса, представляющий собой отношение эффективной мощности источника теплоты к скорости сварки.

Режим сварки – совокупность характеристик сварочного процесса, которые должны выполняться для получения сварного соединения.

Свариваемость – технологическое свойство металлов или их сочетаний образовывать в процессе сварки соединения, отвечающие конструктивным и эксплуатационным требованиям к ним.

Сварка плавлением – процесс сварки, при котором металл в зоне соединения находится в жидком состоянии при нагреве выше температуры плавления.

Сварное соединение – совокупность трех участков: сварного шва, зоны сплавления – и зоны термического влияния.

Сварной шов – участок сварного соединения, в пределах которого металл был расплавлен, а затем закристаллизовался.

Сварочная ванна – объем металла, находящегося в расплавленном состоянии при сварке.

Сварочные деформации – деформации, возникающие в сварной конструкции вследствие нагрева и охлаждения металла при сварке.

Твердое включение – частица твердого инородного вещества в металле сварного шва. Такие включения могут быть шлаковыми, флюсовыми, оксидными и металлическими.

Термический цикл – характер изменения температуры во времени в данной точке сварного соединения.

Трещины основного металла (ТОМ) – трещины при производстве металлопроката, раскрывшиеся под действием термического цикла сварки.

Флюс – вещество, вводимое в зону сварки для создания защиты дуги и сварочной ванны от воздуха, а также для металлургических процессов во время сварки.

Холодные трещины (ХТ) – трещины, образующиеся в сварных соединениях преимущественно после охлаждения; возникают под действием сварочных напряжений.

Шлак – стекловидный расплав на поверхности шва после затвердевания различных окислов, образующихся в результате металлургических процессов во время сварки.

Эвтектика – механическая смесь кристаллов компонентов, образующаяся при затвердевании металла сварочной ванны и имеющая наиболее низкую температуру плавления по сравнению с металлом шва.

Классификация дефектов сварных соединений

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 6520-1–2012 [10] каждому дефекту присвоено трехзначное цифровое обозначение каждого дефекта или четырехзначное цифровое обозначение его разновидностей.

Например: натек имеет обозначение 509, а его разновидность – натек при горизонтальном положении сварки – 5091.

Большинству дефектов присвоено буквенное обозначение дефекта согласно Классификации дефектов Международного института сварки (МИС).

Например: трещина – E, газовая полость – a.

Дефекты сварки плавлением можно классифицировать на шесть групп.

Группа I. Трещины.

Трещины (100; e).

Микротрещина (1001).

Продольная трещина (101; Ea).

Поперечная трещина (102; Eb).

Радиальные трещины (103; E).

Трещина в кратере (104; Ec).

Раздельные трещины (105; E).

Разветвленные трещины (106; E).

Группа II. Поры.

Газовая полость (200; a).

Газовая пора (2011; Aa)

Равномерно распределенная пористость (2012; aa).

Скопление пор (2013).

Цепочка пор (2014).
Продолговатая газовая полость (2015; Ab).
Свищ (2016; Ab).
Поверхностная пора (2017).
Усадочная раковина (202; R)
Кратер (2024; K)

Группа III. Твердые включения.

Твердое включение (300).
Шлаковое включение (301; Ba).
Флюсовое включение (302; C).
Оксидное включение (303; J).
Металлическое включение (304; H).

Группа IV. Несплавление и непровары.

Несплавление (401).
Непровар и полный непровар (402; D).

Группа V. Нарушение формы шва.

Нарушение формы (500).
Подрез непрерывный протяженный (5011; F).
Подрез перемежающийся локальный (5012; P).
Усадочная канавка (5013).
Превышение выпуклости стыкового шва (502).
Превышение выпуклости углового шва (503).
Превышение проплава (504).
Местное превышение проплава (5041).
Неправильный профиль сварного шва (505).
Наплыв (506).
Линейное смещение (507).
Угловое смещение (508).
Натек (509).
Прожег (510).
Неполное заполнение разделки кромок (511).
Чрезмерная асимметрия сварного шва (512).
Неравномерная ширина шва (513).
Неровная поверхность шва (514).
Вогнутость корня шва (515).
Пористость в корне сварного шва (516).
Возобновление шва (517).
Группа VI. Прочие дефекты.
Следы случайной дуги (601).
Брызги металла (602).
Вольфрамовые брызги (6021).
Поверхностные задиры (603).
Утонение металла шва (606).

Виды дефектов сварных соединений

Рассмотрим более подробно дефекты сварки согласно приведенной выше классификации [10, 11].

Дефекты группы I – Трещины

Это самые опасные дефекты сварного соединения, часто приводящие к его разрушению. Проявляются они в виде разрыва в сварном шве или в прилегающих к нему зонах. Сначала трещины образуются с очень малым раскрытием, но под действием напряжений их распространение может быть соизмеримо со скоростью звука, в результате чего происходит разрушение конструкции.

Чаще всего трещины проявляются при сварке высокоуглеродистых и легированных сталей в результате быстрого охлаждения сварочной ванны. Вероятность появления трещин увеличивается при жестком закреплении свариваемых деталей.

Образованию трещин способствует повышенное содержание углерода в расплавленном металле, а также кремния, никеля и особенно вредных примесей серы, фосфора и водорода.

Причиной образования трещин чаще всего является несоблюдение технологии и режимов сварки. Это может проявляться, например, в неправильном расположении швов в сварной конструкции, что приводит к высокой концентрации напряжений. Большие напряжения в сварных конструкциях могут возникнуть также при несоблюдении заданного порядка наложения сварных швов.

Поверхностные трещины в сварных конструкциях устраняются в следующем порядке: сначала засверливают концы трещины, чтобы она не распространялась дальше по шву, затем трещину удаляют механическим путем или строжкой¹⁾, после чего место удаления дефекта зачищают и заваривают.

Внутренние трещины (как, впрочем, и остальные внутренние дефекты) удаляют механическим способом или строжкой с последующей заваркой данного участка. По происхождению трещины подразделяются на холодные (*cold cracks*) и горячие (*hot cracks*).

Холодные трещины возникают при температурах $< 300^{\circ}\text{C}$, то есть сразу после остывания шва. Кроме того, холодные трещины могут возникнуть и через длительный промежуток времени. Причиной появления холодных трещин являются сварочные напряжения, возникающие во время фазовых превращений, приводящих к снижению прочностных свойств металла. Причиной появления холодных трещин может стать растворенный атомарный

¹⁾ *Строжка металла* – процесс, представляющий собой разновидность резки. При этом снимается часть металла с поверхности, а не прорезается лист насквозь. Выполняется с помощью мощного сварочного оборудования.

водород, не успевший выделиться во время сварки. Причинами попадания водорода могут служить непросушенные швы или сварочные материалы, нарушения защиты сварочной ванны. Холодные трещины на изломе имеют чистый блестящий вид кристаллов.

Горячие трещины появляются в процессе кристаллизации металла при температурах 1100–1300 °С вследствие резкого снижения пластических свойств и развития растягивающих деформаций. Появляются горячие трещины на границах зёрен кристаллической решетки. Появлению горячих трещин способствует повышенное содержание в металле шва углерода, кремния, водорода, никеля, серы и фосфора.

Горячие трещины могут возникать как в массиве шва, так и в зоне термического влияния. Распространяться горячие трещины могут как вдоль, так и поперек шва. Они могут быть внутренними или выходить на поверхность. Горячие трещины на изломе имеют желтовато-оранжевый оттенок.

По размерам трещины подразделяются на макроскопические и микроскопические.

Виды трещин в зависимости от причин их образования как во время, так и после сварки представлены ниже.

Для кодирования дефектов используется следующая форма: трещина (100) обозначается как дефект ИСО 6520-1-100.

Макроскопические трещины (трещины (100; e), Cracks) – несплошность, вызванная местным разрушением шва и его охлаждением, либо действием нагрузок (рисунок 4.101)^Д.

Недопустимы, т. к. являются концентратором напряжения и очагом разрушения.

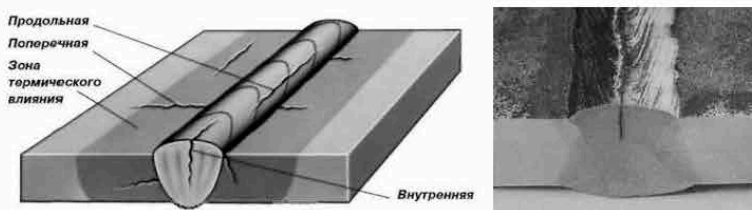


Рисунок 4.101 – Трещины в сварном соединении

Внешние признаки.

Наблюдаются разрывы металла по границам кристаллизующихся зёрен или по самим кристаллам металла сварного соединения.

^ДРисунки 4.101–4.152 взяты из работ [11–14].

Дефект обнаруживается при визуальном контроле невооруженным глазом или через лупу небольшого (2–4-кратного) увеличения.

Процесс возникновения.

Горячие трещины возникают в результате растягивающих напряжений, появляющихся во время охлаждения сварного соединения. Трещины в околошовной зоне или в основном металле относятся к холодным трещинам и имеют закалочное, водородное или смешанное происхождение.

Причины возникновения:

- высокие сварочные напряжения, возникающие при кристаллизации;
- повышенная жесткость свариваемой конструкции;
- неправильная форма шва из-за несоблюдения режима сварки;
- повышенное содержание углерода в основном металле;
- резкое охлаждение конструкции.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- правильно выбрать основной металл и сварочные материалы;
- выбрать оптимальный режим;
- использовать приспособления для снижения напряжений, возникающих при сварке.

Во время сварки:

- применять технику сварки, обеспечивающую оптимальный термический цикл и геометрию сварочной ванны;
- по возможности обеспечить измельчение зёрен материала сварочной ванны в период ее кристаллизации.

Способ устранения.

Место образования трещины удалить шлифовальным инструментом. Образовавшуюся полость заварить.

Микротрещина (1001) (Microcrack, Кристаллизационная трещина (Eb), Solidification crack) – трещина микроскопических размеров, которую обнаруживают физическими методами не менее чем при 10-кратном увеличении (рисунок 4.102).

Недопустима, т. к. является очагом развития макротрещины.

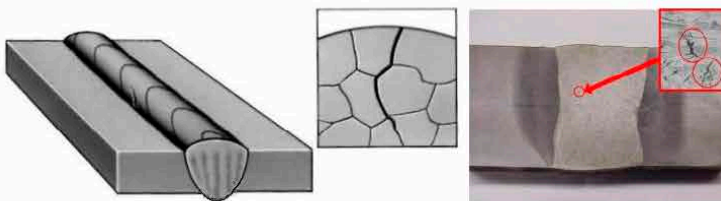


Рисунок 4.102 – Микротрещина

Внешние признаки.

Наблюдаются микроскопические разрывы по границам зёрен металла. Дефект обнаруживается при визуальном контроле невооруженным глазом или через лупу небольшого (2–4-кратного) увеличения.

Процесс возникновения.

Легкоплавкие соединения, присутствующие в металле шва, влекут за собой возникновение кристаллизационных трещин. В период, когда сварочная ванна находится в твердо-жидком состоянии, под действием сварочных напряжений происходит разрыв кристаллов.

Причины возникновения.

- повышенное содержание в основном металле примесей, искажающих кристаллическую решетку;
- повышенная деформация при сварке;
- избыток в сварочной ванне сульфидных и окисульфидных включений;
- чрезмерная скорость охлаждения, приводящая к укрупнению кристаллов.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- выбрать сварочные материалы, компенсирующие вредное влияние химических элементов, искажающих кристаллическую решетку;
- применять фиксирующие приспособления, которые исключают дополнительные напряжения, возникающие при сварке;
- выбрать режим сварки с минимальной погонной энергией.
- Во время сварки:
- вести сварку с оптимальной скоростью;
- применять перемешивание сварочной ванны в период ее кристаллизации.

После сварки:

- исключить внешние факторы, ускоряющие охлаждение сварочной ванны.

Способ устранения.

Место образования трещины удалить шлифовальным инструментом. Образовавшуюся полость заварить.

Продольная трещина (101; Ea) (Longitudinal crack) – трещина, ориентированная вдоль сварного шва (рисунок 4.103). Может располагаться в металле сварного шва (1011), на границе сплавления (1012), в зоне термического влияния (1013), в основном металле (1014).

Недопустима, т. к. является очагом концентрации напряжений и развития разрушения.

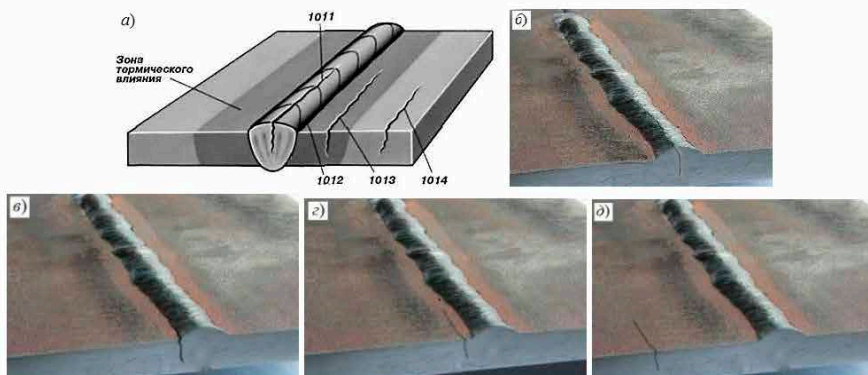


Рисунок 4.103 – Продольная трещина:
 а – схема расположения; б – в металле шва; в – на границе сплавления;
 г – в зоне термического влияния; д – в основном металле

Внешние признаки:

- продольные горячие трещины (1011, 1012) имеют на изломе желтовато-оранжевый оттенок;
- холодные трещины (1013) – чистый, блестящий вид кристаллов;
- трещины в основном металле (1014) – цвет металла.

Дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого увеличения (2–4-кратного) при визуальном контроле.

Процесс возникновения:

- горячие трещины образуются под действием напряжений по границам кристаллов, когда металл шва находится в твердо-жидком состоянии;
- холодные трещины образуются по местам, где возникают закалочные структуры, не выдержавшие внутренних напряжений;
- трещины в основном металле раскрываются под действием сварочных напряжений.

Причины возникновения:

- в металле шва (1011) и на границе сплавления (1012) – горячие трещины, возникающие под действием высоких поперечных сварочных напряжений;
- в зоне термического влияния (1013) – холодные трещины, вызванные появлением хрупких закалочных структур;
- в основном металле (1014) – трещины образовавшиеся в процессе изготовления металла.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- выбрать способ сварки и режимы, обеспечивающие минимальные сварочные напряжения;

- использовать сварочные материалы, исключая появление легкоплавких эвтектик;
- применять металлы с пониженным содержанием серы, фосфора, углерода;
- применять сборочные приспособления, исключая поперечные деформации.

Во время сварки:

- необходимо вести сварку на минимальной погонной энергии ниточными швами;
- применять способы и приемы, способствующие перемешиванию металла в сварочной ванне;
- следует формировать шов оптимальных размеров с плавным переходом к основному металлу.

После сварки дать остыть металлу сварочных швов конструкции, не вынимая ее из сборочного приспособления.

Способ устранения.

Место образования трещины удалить шлифовальным инструментом. Образовавшуюся полость заварить заново.

Поперечная трещина (102; Eb) (Transverse crack) – трещина, ориентированная поперек оси сварного шва (рисунок 4.104). Может располагаться в металле сварного шва (1021), в зоне термического влияния (1023), в основном металле (1024).

Недопустима, т. к. является очагом концентрации напряжений и развития разрушения.

Внешние признаки:

- поперечные горячие трещины (1021) имеют на изломе желтовато-оранжевый оттенок;
- холодные трещины (1023) – чистый, блестящий вид кристаллов;
- трещины в основном металле (1024) – цвет металла.

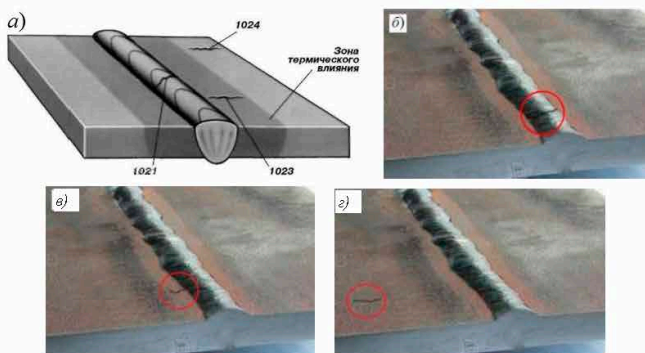


Рисунок 4.104 – Поперечная трещина:

a – схема расположения; *б* – в металле шва; *в* – в околошовной зоне; *г* – в основном металле

Дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого увеличения (2–4-кратного) при визуальном контроле.

Процесс возникновения:

- горячие трещины образуются, когда сварочная ванна представляет собой кристаллы и расплав. Легкоплавкие соединения являются причиной возникновения горячих трещин;
- холодные трещины образуются в результате разрушения хрупких закалочных структур при возникновении значительных напряжений;
- трещины в основном металле образуются под действием термического цикла сварки.

Причины возникновения:

- горячие трещины возникают в металле шва (1021) и на границе сплавления под действием растягивающих продольных напряжений, когда металл шва находится в твердо-жидком состоянии;
- поперечные холодные трещины (1023) возникают в твердом металле околосшовной зоны, где образуются хрупкие закалочные структуры, разрушающиеся под действием сварочных напряжений;
- трещины в основном металле (1024) образуются в результате раскрытия дефектов, существующих при производстве металла.

Способы предупреждения:

Перед сваркой:

- применять металлы с малым содержанием серы, фосфора, углерода;
- выбрать способ сварки и режимы, обеспечивающие минимальные продольные сварочные напряжения;
- применять сборочные приспособления, исключающие продольные деформации.

Во время сварки:

- вести сварку на минимальной погонной энергии ниточными швами;
- применять способы и приемы, снижающие уровень продольных напряжений;
- формировать шов оптимальных размеров, препятствующих образованию поперечных трещин.

После сварки дать остыть металлу сварочных швов конструкции, не вынимая ее из сборочного приспособления.

Способ устранения.

Место образования трещины необходимо удалить шлифовальным инструментом. Образовавшуюся полость заварить заново.

Стойкость металла к образованию горячих трещин зависит от величины и скорости нарастания действующих в период кристаллизации в металле шва растягивающих напряжений, химического состава металла шва и дли-

тельности его пребывания в состоянии пониженной пластичности; формы сварочной ванны; расположения межкристаллитных участков по отношению к растягивающим напряжениям, а также характера (темпа и изменения) упруго-пластической деформации.

Холодные трещины образуются в сварных соединениях при относительно невысоких температурах, когда металл шва и околошовной зоны приобретает высокие упругие свойства. Такие трещины зарождаются, как правило, через некоторое время после окончания сварки и затем медленно, на протяжении нескольких часов и даже суток распространяются подлине и глубине.

Радиальные трещины (103; E) (Radiating cracks) – трещины, радиально расходящиеся из одной точки (рисунок 4.105). Могут располагаться в металле сварного шва (1031), в зоне термического влияния (1033), в основном металле (1034). Трещины этого типа, расходящиеся в разные стороны, известны как звездоподобные.

Недопустимы, т. к. при действии рабочих нагрузок являются очагом развития разрушения конструкции.

Внешние признаки:

- радиальные горячие трещины (1031) имеют на изломе желтовато-оранжевый оттенок;
- холодные трещины (1033) – чистый, блестящий вид кристаллов;
- трещины в основном металле (1034) – цвет металла.

Дефект хорошо виден невооруженным глазом или через лупу небольшого (2–4-кратного) увеличения при визуальном контроле.

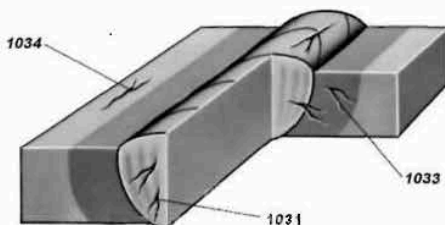


Рисунок 4.105 – Радиальные трещины

Процесс возникновения:

- горячие трещины образуются в результате силового воздействия сварочных напряжений по границам кристаллов, омываемых легкоплавкими эвтектиками;
- холодные трещины образуются в результате разрыва хрупких кристаллов в зоне термического влияния под действием сварочных напряжений;

– трещины в основном металле образуются как дефекты изготовления металла.

Причины возникновения:

– горячие трещины (1031) возникают в металле шва под действием растягивающих сварочных напряжений, когда металл шва находится в твердом жидком состоянии;

– радиальные холодные трещины (1033) возникают в твердом металле околошовной зоны, где образуются хрупкие закалочные структуры, которые разрушаются под действием продольных и поперечных сварочных напряжений;

– трещины в основном металле (1034) образуются под действием термического цикла сварки.

Способы предупреждения:

Перед сваркой:

– применять металлы и сварочные материалы с пониженным содержанием серы, фосфора, углерода;

– использовать технологические процессы сварки, обеспечивающие минимальный уровень сварочных напряжений;

– применять кондукторы и прижимные приспособления, снижающие уровень сварочных напряжений.

Во время сварки:

– применять способы и приемы, снижающие остаточные сварочные напряжения;

– формировать шов оптимальных размеров;

– применять режимы сварки, обеспечивающие уменьшение размеров кристаллов и деформацию сварного соединения.

После сварки дать остыть металлу сварных швов конструкции, не вынимая ее из сборочного приспособления.

Способ устранения.

Место образования трещины удалить шлифовальным инструментом. Образовавшуюся полость заварить заново.

Трещина в кратере (104; Ec) (Crater crack) – трещина в кратере сварного шва (рисунок 4.106). Может быть продольной (1045), поперечной (1046), звездообразной (1047).

Недопустима, т. к. при заварке может остаться незаваренная часть трещины.

Внешние признаки.

Наблюдаются разрывы металла кратера вдоль (1045), поперек (1046) и в различных направлениях из одной точки (1047).

Дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого увеличения (2–4-кратного) при визуальном контроле.

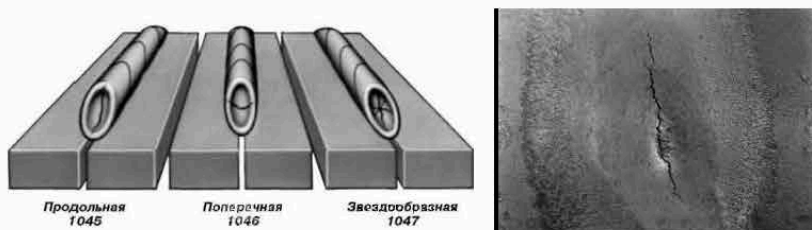


Рисунок 4.106 – Трещина в кратере

Процесс возникновения.

Когда металл кратера еще находится в жидко-твердом состоянии, под действием сварочных напряжений возникает разрыв металла шва по линиям эвтектик – легкоплавких соединений, расположенных между кристаллами.

Причины возникновения:

- продольная трещина (1045) возникает при чрезмерных поперечных напряжениях;
- поперечная трещина (1046) образуется под действием продольных напряжений;
- звездообразная трещина (1047) появляется, когда возникают сварочные напряжения, действующие в различных направлениях.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- применять кондукторы и сборочные приспособления, снижающие уровень сварочных напряжений;
- использовать технологические процессы сварки, обеспечивающие минимальный уровень сварочных напряжений;
- применять сварочные материалы, снижающие размеры кристаллитов в металле шва.

Во время сварки:

- правильно заваривать кратер;
- обеспечивать снижение тепловой мощности источника нагрева при окончании сварки.

После сварки дать остыть металлу кратера, не вынимая конструкцию из зажимного приспособления.

Способ устранения.

Место образования трещины удалить шлифовальным инструментом. Образовавшуюся полость заварить заново.

Раздельные трещины (105; E) (Group of disconnected cracks) – группа несвязанных трещин, ориентированных в разных направлениях (рисунок 4.107), которые могут находиться в металле сварного шва (1051), в зоне термического влияния (1053), в основном металле (1054).

Недопустимы, т. к. при действии рабочих нагрузок являются очагом развития разрушения конструкции.

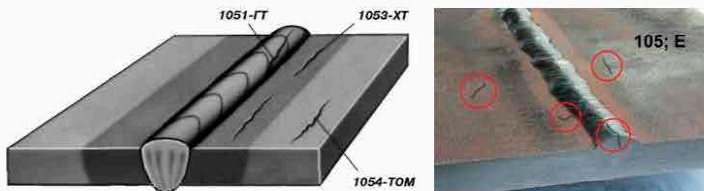


Рисунок 4.107 – Раздельные трещины

Внешние признаки:

- горячие трещины (1051) имеют на изломе желтовато-оранжевый оттенок;

- холодные трещины (1053) – чистый, блестящий вид кристаллов;

- трещины в основном металле (1054) – цвет металла.

Дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого увеличения (2–4-кратного) при визуальном контроле. Внутренние трещины в сварных соединениях лучше всего выявляются при УЗ-контроле.

Процесс возникновения:

- горячие трещины образуются в результате силового воздействия сварочных напряжений по границам кристаллов, омываемых легкоплавкими эвтектиками;

- холодные трещины образуются в результате разрыва хрупких кристаллов в зоне термического влияния под действием сварочных напряжений;

- трещины в основном металле образуются как дефекты изготовления металла.

Причины возникновения:

- горячие трещины (1051) возникают в металле шва под действием растягивающих сварочных напряжений, когда металл шва находится в твердом состоянии;

- холодные трещины (1053) возникают в твердом металле околосшовной зоны, где образуются хрупкие закалочные структуры, разрушающиеся под действием продольных и поперечных сварочных напряжений;

- трещины в основном металле (1054) образуются под действием термического цикла сварки.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- применять металлы и сварочные материалы с пониженным содержанием серы, фосфора, углерода;

- использовать технологические процессы сварки, обеспечивающие минимальный уровень сварочных напряжений;

- применять кондукторы и прижимные приспособления, снижающие уровень сварочных напряжений.

Во время сварки:

- применять способы и приемы, снижающие остаточные сварочные напряжения:

- формировать сварной шов оптимальных размеров;

- применять режимы сварки, обеспечивающие уменьшение размеров кристаллов и деформацию сварного соединения.

После сварки дать остыть металлу сварных швов конструкции, не вынимая ее из сборочного приспособления.

Способ устранения.

Место образования трещины удалить шлифовальным инструментом. Образовавшуюся полость заварить заново.

Горячие трещины возникают чаще всего при сварке высоколегированных сталей аустенитного класса, алюминиевых, алюминий-магниевого, титановых и никелевых сплавов. Чтобы снизить вероятность образования таких трещин, следует сваривать (с низкими значениями погонной энергии) металлы, содержащие минимальное количество вредных примесей и имеющие мелкозернистую структуру.

Холодные трещины образуются, главным образом, при сварке среднелегированных сталей перлитного и мартенситного классов. Для предотвращения холодных трещин не следует, где это возможно, жестко закреплять свариваемые элементы, сохраняя их податливость при сварке.

Разветвленные трещины (106; E) (Branching cracks) – группа связанных трещин, возникающая из одной трещины (рисунок 4.108).

Могут располагаться в металле сварного шва (1061), в зоне термического влияния (1063), в основном металле (1064).

Недопустимы, т. к. при действии рабочих нагрузок являются очагом развития разрушения конструкции.

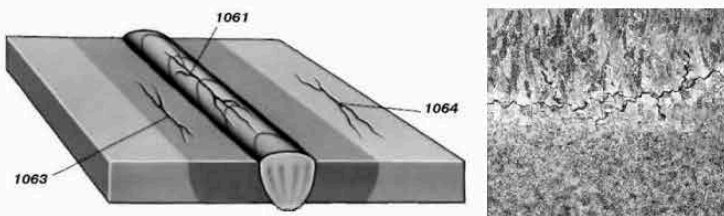


Рисунок 4.108 – Разветвленные трещины

Внешние признаки:

- горячие трещины (1061) имеют на изломе желтовато-оранжевый оттенок, холодные трещины (1063) – чистый, блестящий вид кристаллов;

- трещины в основном металле (1064) – цвет металла.

Дефект виден невооруженным глазом или через лупу небольшого увеличения (2–4-кратного) при визуальном контроле.

Процесс возникновения:

- горячие трещины образуются в результате силового воздействия сварочных напряжений по границам кристаллов, омываемых легкоплавкими эвтектиками;
- холодные трещины образуются в результате разрыва хрупких кристаллов в зоне термического влияния под действием сварочных напряжений;
- трещины в основном металле образуются как дефекты изготовления металла.

Причины возникновения:

- горячие трещины (1061) возникают в металле шва под действием растягивающих сварочных напряжений, когда металл шва находится в твердом жидком состоянии;
- холодные трещины (1063) возникают в твердом металле околошовной зоны, где образуются хрупкие закалочные структуры, разрушающиеся под действием продольных и поперечных сварочных напряжений;
- трещины в основном металле (1064) образуются под действием термического цикла сварки.

Способы предупреждения и устранения.

Место образования трещины удалить шлифовальным инструментом. Образовавшуюся полость заварить заново.

Дефекты группы II – Полости (поры)

Порами (200) (Cavity) в сварном шве называют полости, заполненные газами.

Возникают в жидком металле шва вследствие интенсивного газообразования, при котором не все газовые пузырьки успевают выйти наружу до затвердевания сварного шва. Размеры пор, образующихся в металле, бывают как микроскопическими, так и достигающими нескольких миллиметров. В сварном шве помимо одиночных пор могут возникать и скопления пор, а иногда даже раковины и свищи. Они могут быть округлой или вытянутой формы, а их размеры зависят от размеров пузырьков образовавшихся газов.

Причины образования пор:

- низкое качество зачистки свариваемых кромок и присадочной проволоки от загрязнений (окалины, ржавчины, масел и т. п.);
- большая скорость сварки, при которой газы не успевают выйти наружу;
- повышенное содержание углерода в основном металле и присадочном материале;
- повышенная влажность (например, сварка при сырой погоде, что отразится на состоянии электродных покрытий, флюса и т. д.);

Наличие пористости в сварном соединении снижает механические свойства металла (прочность, ударную вязкость и т. п.), а также герметичность изделия.

Способ устранения.

Участок сварочного шва, в котором присутствуют поры, подлежит переработке с предварительной механической зачисткой или строжкой с последующей механической обработкой.

Газовая полость (200; а) (Gas cavity) – полость произвольной формы, без углов, образованная газами, задержанными в расплавленном металле в виде одиночного дефекта в ответственных конструкциях (рисунок 4.109).

Недопустима в сварных швах ответственных конструкций.

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК.

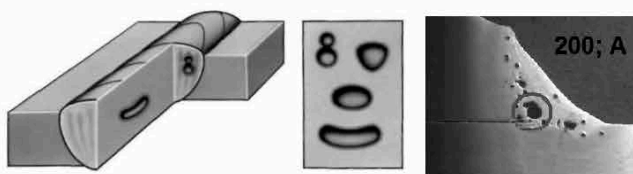


Рисунок 4.109 – Газовая полость

Процесс возникновения.

В сварочной ванне образуются пузырьки водорода, азота, окиси углерода и других газов. Эти пузырьки фиксируются в металле шва при его кристаллизации.

Причины возникновения:

- плохая защита сварочной ванны от влияния воздуха;
- неправильный выбор режима сварки;
- сварка с большой длиной дуги;
- недостаточное количество органических компонентов в составе электродного покрытия;
- плохая проковка электродов;
- некачественная зачистка свариваемых кромок от ржавчины и загрязнений.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- тщательно зачищать кромки от ржавчины и грязи;
- прокалывать покрытые электроды согласно паспортным режимам для каждого типа и марки;
- выбирать оптимальные режимы сварки.

Во время сварки:

- сварка короткой дугой;
- начало и конец сварного шва выполнять на выводных планках;

- исключить воздействие сквозняка и ветра на сварочную дугу;
- не вести сварку при повышенной влажности окружающей среды.

Способ устранения.

Дефектный участок вырубает или вычищают и вновь заваривают.

Газовая пора (2011; Aa) (Gas pore) – несплошность, образованная газами, задержанными в расплавленном металле (рисунок 4.110). Имеет, как правило, сферическую форму.

Недопустима в сварных швах ответственных конструкций.

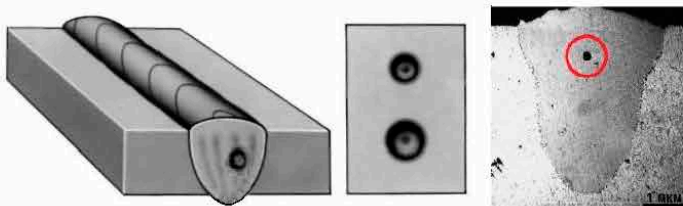


Рисунок 4.110 – Газовая пора

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва.

Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК.

Процесс возникновения.

В жидкой сварочной ванне образуются газовые пузырьки. Они фиксируются в расплавленном металле шва при его кристаллизации.

Причины возникновения:

- местные загрязнения свариваемых поверхностей органическими веществами или ржавчиной;
- неправильный выбор покрытого сварочного электрода;
- локальное нарушение оптимальных параметров режима сварки;
- сварка электродом с увлажненным покрытием;
- повышенная вязкость металла сварочной ванны.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- электроды не должны иметь окисленную поверхность стержня;
- тщательно защищать кромок от ржавчины и грязи;
- прокалывать покрытые электроды согласно паспортным режимам для каждого типа и марки.

Во время сварки:

- вести сварку преимущественно в нижнем положении;
- использовать режимы сварки с минимальной температурой сварочной ванны;
- перемешивать сварочную ванну;
- выполнять швы с увеличенной шириной сварочной ванны.

Способ устранения.

Дефектный участок вырубает или вычищают и вновь заваривают.

Равномерно распределенная пористость (2012; aa) (Uniformly distributed porosity) – группа газовых пор, равномерно распределенных в металле сварного шва (рисунок 4.111).

Недопустима, т. к. снижает прочностные характеристики металла шва.

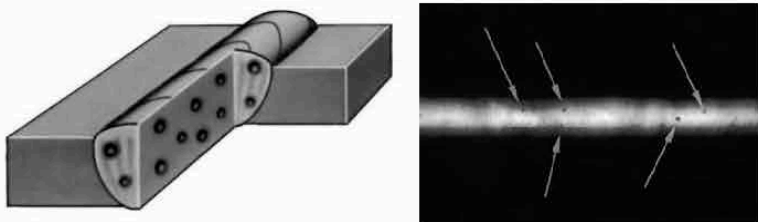


Рисунок 4.111 – Равномерно распределенная пористость

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва.

Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК

Процесс возникновения.

Газовые пузырьки образуются со скоростью меньшей, чем движется фронт кристаллизации. Пузырьки не успевают всплыть на поверхность сварочной ванны.

Причины возникновения:

- плохая защита металла шва от растворения в нем водорода, азота и окиси углерода;
- применение металла с большим количеством растворенных газов;
- применение сварочных материалов, повышающих вязкость металла шва;
- сварка с глубоким проплавлением;
- однопроводная сварка толстостенных конструкций с большой скоростью.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- правильный выбор основного металла и сварочных материалов;
- при сварке электродами с рутиловым покрытием строго выдерживать режимы по сварочному току;
- при сварке электродами с основным покрытием не допускать увлажнения покрытий;
- сварку на постоянном токе вести только при обратной полярности.

Во время сварки:

- вести сварку с минимальной погонной энергией;
- держать оптимальную длину дуги;
- техника сварки должна обеспечивать стабильность ее режима.

Способ устранения.

Дефектный участок вырубает или вычищают и вновь заваривают.

Скопление пор (2013) (Clustered (localized) porosity) – группа газовых полостей (три и более), расположенных кучно, с шагом менее трех максимальных размеров наибольшей из них (рисунок 4.112).

Недопустимо, т. к. является местным участком провала прочности шва и концентратором напряжения.

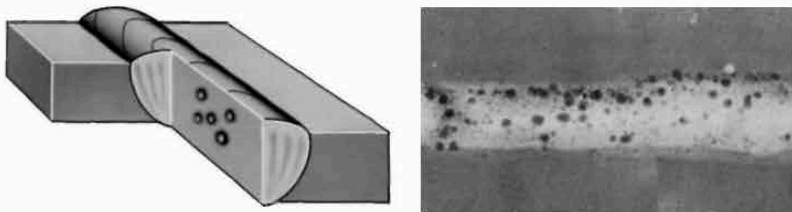


Рисунок 4.112 – Скопление пор

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК.

Процесс возникновения.

Жидкий металл сварочной ванны кристаллизуется быстрее, чем всплывают и лопаются на ее поверхности выделяющиеся пузырьки.

Причины возникновения:

- плохая газовая защита сварочной ванны, в частности, в начальный момент зажигания дуги (так называемая стартовая пористость);
- сварка по окисленным поверхностям конструкции;
- сварка длинной дугой;
- плохая прокалка электродов;
- покрытие электродов содержит избыток минеральных и органических пластификаторов.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- не применять электроды с осыпавшимся или вздутым покрытием;
- при сварке электродами с целлюлозным покрытием оставлять огарок длиной 50–70 мм:

- зажигать дугу на выводных планках.

Во время сварки:

- вести сварку без перерывов;
- при длинномерных швах возбуждать дугу для сварки 2-го и последующих швов на переносной специальной пластине из того же материала, что и основная конструкция;
- режим сварки должен соответствовать указанному в нормативно-технической документации.

Способ устранения.

Дефектный участок вырубают или вычищают и вновь заваривают.

Линейная пористость (цепочка пор) (2014) (Linear porosity) – ряд газовых пор, расположенных в линию, обычно параллельно оси шва, с шагом менее трех максимальных размеров наибольшей из пор (рисунок 4.113).

Недопустима, т. к. может стать причиной развития других опасных дефектов, например, трещин.

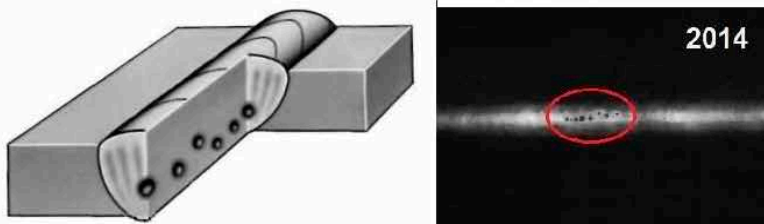


Рисунок 4.113 – Линейная пористость

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают методом НК.

Процесс возникновения.

Кристаллизация металла сварочной ванны периодически опережает всплытие газовых пузырьков.

Причины возникновения:

- неоптимальная конфигурация сварного шва;
- неправильный режим сварки;
- сварка в узкую разделку;
- сварка металла большой толщины на режимах с повышенной погонной энергией;
- подсос воздуха через зазор между кромками;
- подварка корня шва некачественными электродами;
- плохая зачистка соединения.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- прокалить электроды;
- очистить сварочную проволоку;
- при сварке толстостенных конструкций применять многопроходную и многослойную сварку;
- при сварке в щелевую разделку применять покрытые электроды с низким содержанием минеральных и органических пластификаторов.

Во время сварки:

- использовать электроды малого (например, 3 мм) диаметра;
- вести сварку швами с увеличенной шириной;

- перемешивать сварочную ванну;
- выдерживать постоянный режим сварки на всём протяжении шва.

Способы устранения.

Дефектный участок вырубает или вычищают и вновь заваривают.

Вытянутая полость (продолговатая газовая полость) (2015; Ab) (Elongated cavity) – несплошность, вытянутая вдоль оси сварного шва (рисунок 4.114). Длина несплошности не менее чем в два раза превышает высоту.

Недопустима, т. к. при действии малоцикловых рабочих нагрузок полость может стать причиной образования трещин.

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК.

Процесс возникновения.

При зарождении пузырька на границе твердого и жидкого металла давление в нем ниже атмосферного. Пузырек не может всплыть. В результате образуется полость из нескольких объединенных пузырьков.

Причины возникновения:

- наличие на поверхности металла отдельных мест, которые насыщены газами;
- остатки ржавчины на поверхности свариваемых кромок;
- высокая вязкость металла сварочной ванны.

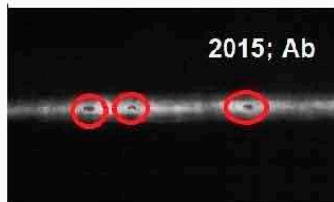
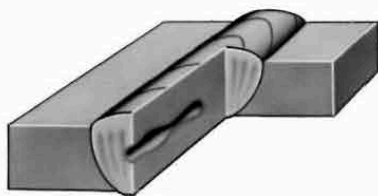


Рисунок 4.114 – Вытянутая полость

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- использовать плавящиеся электроды, образующие металл шва с низкой вязкостью;
- по возможности сварку вести при пониженном атмосферном давлении;
- тщательно соблюдать температурный режим прокалки электродов.

Во время сварки:

- сваривать швы в нижнем положении или в положении в лодочку;
- не применять электроды с отколовшейся при первом зажигании дуги обмазкой;
- применять технику сварки с перемешиванием жидкого металла сварочной ванны.

Способ устранения.

Дефектный участок вырубает или вычищают и вновь заваривают.

Свищ (2016; Ab) (Worm-hole) – трубчатая полость в металле сварного шва из-за выделений газа (рисунок 4.115). Форма и положение свища зависят от режима затвердевания и вида газа. Обычно свищи скапливаются и распределяются елочкой.

Недопустим, т. к. свищ является концентратором напряжения.

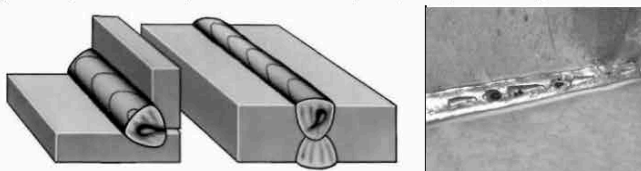


Рисунок 4.115 – Свищ

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК.

Процесс возникновения.

При сварке угловых швов в различных пространственных положениях, отличных от нижнего, подъемная сила не может выдавить пору наружу.

Причины возникновения:

- неблагоприятная геометрия сварочной ванны при сварке угловых, тавровых и нахлесточных соединений;
- высокая вязкость металла сварочной ванны при сварке в потолочном вертикальном и горизонтальном положениях;
- низкая пластичность металла шва;
- образование закалочных структур;
- внутреннее напряжения от неравномерного нагрева.

Примечание – Свищ образуется при случайных коротких замыканиях вольфрамового электрода или резком обрыве дуги, а также в результате неправильного гашения дуги при ручной и автоматической сварке. Возможной причиной развития свища чаще всего является некачественная подготовка поверхности и присадочной проволоки под сварку.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- использовать покрытые электроды, обеспечивающие пониженную вязкость металла сварочной ванны;
- прокалывать электроды согласно паспортным режимам;
- тщательно защищать кромки от ржавчины и грязи.

Во время сварки:

- сваривать швы в нижнем положении или в положении в лодочку;
- при многослойной сварке формировать более широкие швы;
- применять технику сварки с перемешиванием жидкого металла сварочной ванны.

Способ устранения.

Исправить такой дефект можно только после полного удаления металла шва на этом участке. Дефектный участок вырубают или вычищают и вновь заваривают.

Поверхностная пора (2017) (Surface pore) – газовая пора, нарушающая сплошность поверхности сварного шва (рисунок 4.116).

Допустима после зачистки поверхности шва, не приводящей к изменению его геометрии.

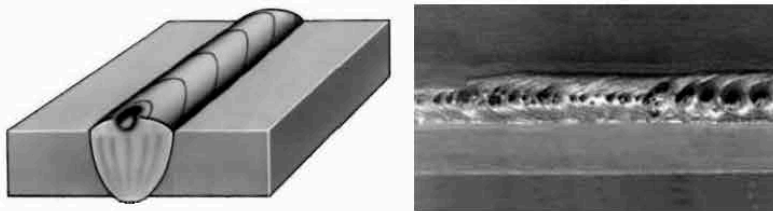


Рисунок 4.116 – Поверхностная пора

Внешние признаки.

Дефект виден при визуальном контроле невооруженным глазом или через лупу небольшого (2–4-кратного) увеличения.

Процесс возникновения.

Поры чаще всего представляют собой не успевшие выделиться до затвердевания металла пузырьки водорода, азота, водяного пара и окиси углерода. Основные возбудители пор при сварке сталей – водород и азот. Из-за высокой вязкости шлака на поверхности сварочной ванны газовый пузырек не может всплыть и кристаллизуется в виде полости на поверхности сварного шва.

Причины возникновения:

- повышенная вязкость шлака, расположенного на поверхности жидкой сварочной ванны;
- повышена влажность электрода;
- грязь на сварочной проволоке;
- плохая зачистка места соединения.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- прокалить электроды;
- удалить загрязнения со сварочной проволоки;
- применять сварочные материалы, дающие низкую вязкость шлака.

Во время сварки использовать режимы сварки, соответствующие нормативно-технической документации.

Способ устранения.

Удалить поверхностный слой абразивным инструментом, не нарушая требуемых размеров шва.

Усадочная раковина (202; R) – полость, образующаяся вследствие усадки металла во время затвердевания (рисунок 4.117).

Допустимо в конструкциях неответственного назначения.

Внешние признаки.

Дефект виден при визуальном контроле невооруженным глазом или через лупу небольшого (2–4-кратного) увеличения.



Рисунок 4.117 – Усадочная раковина

Процесс возникновения.

Под действием дуги зеркало сварочной ванны деформируется, приобретая вогнутый вид. При внезапном обрыве дуги оно не успевает спрямиться и затвердевает в форме впадины.

Причины возникновения:

- внезапный обрыв сварочной дуги;
- некачественная заварка кратера.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- отсутствуют.

Во время сварки:

- при сварке длинными швами выполнять перекрытие швов;
- по возможности вести сварку без случайных прерываний процесса;
- качественно заваривать кратер.

Способ устранения.

Удалить усадочную раковину абразивным инструментом и вновь заварить.

Кратер (2024; K) – усадочная раковина в конце валика сварного шва, не заваренная до или во время выполнения последующих проходов, или дефект сварного шва, который образуется в виде углублений в местах резкого отрыва дуги в конце сварки (рисунок 4.118).

В углублениях кратера могут появляться усадочные рыхлости, часто переходящие в трещины.

Недопустим, поскольку кратер является очагом развития трещин.

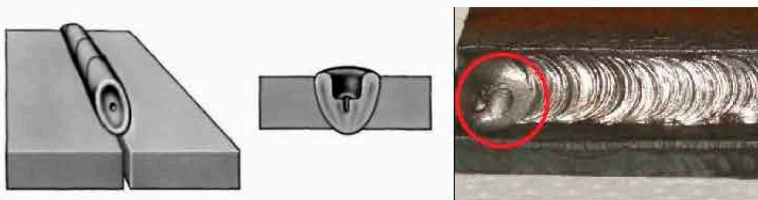


Рисунок 4.118 – Кратер

Внешние признаки.

Дефект виден при визуальном контроле невооруженным глазом или через лупу небольшого (2–4-кратного) увеличения.

Процесс возникновения.

При внезапном прекращении процесса сварки происходит мгновенная кристаллизация жидкого металла сварочной ванны. В сварном шве образуется углубление с впадиной в центре.

Причина возникновения – внезапное прекращение процесса сварки без заварки кратера.

Кратеры обычно появляются в результате неправильных действий сварщика. При автоматической сварке кратер может появляться в местах выводных планок, где обрывается сварочный шов. Кратеры уменьшают рабочее сечение сварочного шва, то есть снижают его прочность. Кроме того, в кратерах могут возникать усадочные рыхлости, которые способствуют образованию трещин.

Способы предупреждения.

Перед сваркой – отсутствуют.

Во время сварки заварить кратер одним из следующих приемов:

- 1) повторным зажиганием дуги и заполнением кратера жидким металлом;
- 2) возвратно-поступательным движением электрода.

Способ устранения.

Повторно заварить кратер (кратеры вырубают до основного металла, зачищают и заваривают).

Дефекты группы III – Твердые включения

Подобные включения ослабляют сечение шва, снижают его прочность и становятся зонами концентрации напряжений.

Твердое включение (300) – твердые инородные вещества металлического или неметаллического происхождения в металле сварного шва. Включения, имеющие хотя бы один острый угол, называются остроугольными (рисунок 4.119).

Недопустимо, поскольку является концентратором напряжения.

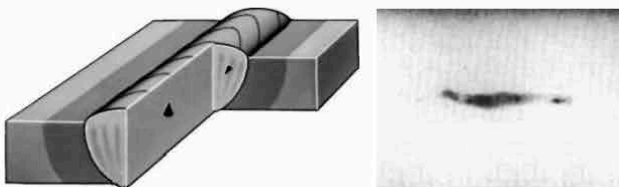


Рисунок 4.119 – Твердое включение

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК.

Процесс возникновения.

Тугоплавкие частицы инородных металлов и других включений (вольфрам, медь, корунд, кварц и т. д.) фиксируются в сварочной ванне при ее кристаллизации.

Причины возникновения:

- эрозия вольфрамового электрода при аргонодуговой сварке;
- случайное попадание тугоплавких частиц извне в жидкий металл сварочной ванны.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- использовать вольфрамовые электроды, легированные тугоплавкими окислами;
- правильно затачивать вольфрамовый электрод;
- не применять для поджига медную стружку.

Во время сварки:

- в начале сварки вольфрамовым электродом увеличивать ток плавно, от 5–7 А до рабочих значений;
- сварку вольфрамовым электродом вести на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе.

Способ устранения.

Места швов с твердыми включениями вырубают до здорового металла, удаляют шлифовальным инструментом или строжкой и впоследствии заваривают.

Шлаковое включение (301; Ва) – шлак, попавший в металл сварного шва (рисунок 4.120). В зависимости от условий образования включения бывают линейные (3011); разобщенные (3012); прочие (3013).

Допустимо при сварке неответственных конструкций. Недопустимо при сварке конструкций, работающих при малоцикловом нагружении, и ответственных конструкций.

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК.

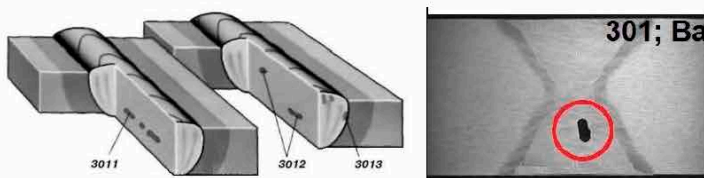


Рисунок 4.120 – Шлаковое включение

Процесс возникновения.

Металлургические реакции раскисления образуют оксиды MnO и SiO_2 , представляющие собой элементы шлака. Они всплывают на поверхность жидкой сварочной ванны. При медленном всплытии шлаковые включения кристаллизуются в металле шва.

Причины возникновения:

- сложные физико-химические процессы, протекающие в сварочной ванне при сварке покрытыми электродами;
- грязь на кромках;
- малый сварочный ток;
- большая скорость сварки.

Шлак, образующийся при плавлении электродного покрытия или флюса, всегда всплывает на поверхность сварочной ванны. Шлак может оставаться внутри металла только при нарушении техники и технологии процесса. Чаще всего шлаковые включения остаются в шве в результате подтекания шлака при выполнении корневых валиков и глубоких разделках. Сварка под флюсом кольцевых швов сопровождается шлаковыми включениями из-за несоблюдения рекомендуемой величины смещения электрода.

При сварке в защитных газах шлаковые включения встречаются редко. Шлаковые включения могут иметь размер до нескольких десятков миллиметров и поэтому являются очень опасными. Они уменьшают сечение шва и приводят к концентрации напряжений в нем.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- использовать электроды, обеспечивающие высокую жидкотекучесть металла сварочной ванны;
- не использовать электроды с тонким и особо тонким покрытиями;
- применять электроды с покрытиями, обеспечивающими низкую вязкость и хорошую смачиваемость.

Во время сварки:

- перемешивать жидкий металл сварочной ванны;
- формировать шов минимальной ширины;

– использовать режимы сварки, при которых время существования сварочной ванны минимально.

Способ устранения.

Участок шва, на котором шлаковые включения превышают допустимые нормы, подлежит вырубке или удалению шлифовальным инструментом и пересварке.

Флюсовое включение (302; С) – флюс в металле сварного шва.

В разных условиях образования включения бывают (рисунок 4.121) линейные (3021); разобщенные (3022); прочие (3023).

Допустимо округлое, малых размеров в неответственных конструкциях.

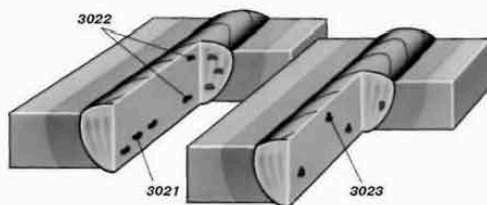


Рисунок 4.121 – Флюсовое включение

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК.

Процесс возникновения.

Гранулы флюса, не успев вступить в реакцию с расплавленным металлом и всплыть на поверхность жидкой сварочной ванны, быстро кристаллизуются в ней.

Причины возникновения:

- низкое качество флюса;
- завышенная скорость сварки;
- недостаточная сила тока;
- случайное попадание гранул флюса в жидкий металл сварочной ванны.

Флюсовые включения образуются из-за флюса, не вступившего в реакцию с расплавленным металлом шва и не всплывшего на поверхность сварного шва.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

– использовать флюсы тех марок и грануляции, которые указаны в нормативно-технической документации.

Во время сварки:

– соблюдать режим сварки, указанный в нормативно-технической документации;

– не допускать случайного попадания сварочного флюса в жидкий металл сварочной ванны.

Способ устранения.

Дефектный участок удалить шлифовальным инструментом и заварить повторно.

Оксидное включение (303; J) – оксид металла, попавший в металл сварного шва во время затвердевания (рисунок 4.122).

Допустимо малых размеров и благоприятной формы в неответственных конструкциях. Недопустимо в ответственных конструкциях, поскольку снижается прочность металла шва.

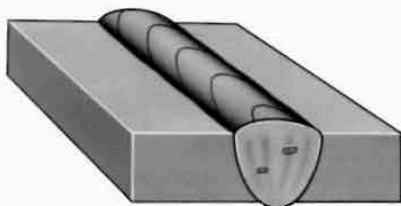


Рисунок 4.122 – Оксидное включение

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК.

Процесс возникновения.

В сварочной ванне происходит взаимодействие жидкого металла и электродного покрытия. В результате этих металлургических реакций и появляется большинство оксидных включений ($\text{SiO}_2\text{--MnO--FeO}$; $\text{SiO}_2\text{--MnO--Al}_2\text{O}_3$; $\text{SiO}_2\text{--FeO--Al}_2\text{O}_3$).

Причины возникновения:

- наличие в металле шва атомарного кислорода;
- образование в расплавленном металле сварочной ванны зародышей оксидов: Al_2O_3 ; SiO_2 ; MgO ; TiO_2 ; CaO и др.

Оксидные включения получают в результате образования труднорастворимых тугоплавких пленок. Чаще всего они возникают вследствие значительных поверхностных загрязнений или при нарушениях защиты сварочной ванны. Также окисные включения, могут возникать в металле шва из-за слабой их растворимости и слишком быстрого охлаждения.

Являясь прослойкой в массиве шва, оксидные включения резко снижают прочность сварного соединения и могут привести к его разрушению под приложенной в процессе эксплуатации нагрузкой.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- не применять электроды с окисленной поверхностью под покрытием;
- тщательно зачищать поверхность свариваемых кромок от ржавчины;
- прокалывать электроды по режиму, указанному в нормативно-технической документации.

Во время сварки:

- тщательно защищать металл сварочной ванны от кислорода воздуха;
- не применять электроды с осыпавшейся обмазкой;
- вести сварку на оптимальной длине дуги.

Способ устранения.

Дефектный участок удалить шлифовальным инструментом и заварить повторно.

Металлическое включение (304; Н) – частица инородного металла в металле сварного шва (рисунок 4.123).

Различают частицы из вольфрама (3041); меди (3042); других металлов (3043).

Допустимо округлое, малых размеров в неответственных конструкциях. Недопустимо в ответственных конструкциях.

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- или радиографическим методами НК.

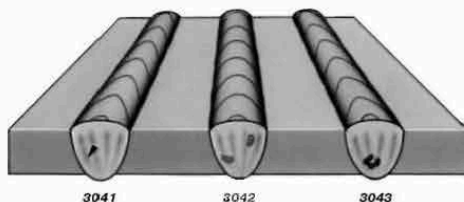


Рисунок 4.123 – Металлическое включение

Процесс возникновения.

Тугоплавкие, не успевшие раствориться в сварочной ванне металлические включения, кристаллизуются в металле сварного шва.

Причины возникновения:

- завышена сила тока;
- недостаточная скорость сварки;
- слишком остро заточен вольфрамовый электрод;
- наличие тугоплавких частиц в основном и присадочном металлах.

Вольфрамовые включения возникают при нарушении защиты сварочной ванны при сварке неплавящимся вольфрамовым электродом, а также при коротких замыканиях или завышенной плотности тока. Особенно часто встречаются вольфрамовые включения при сварке алюминия и его сплавов, в которых вольфрам нерастворим.

Характерные признаки образования вольфрамовых включений – замыкания треск и резкая вспышка дуги. Расплавленный конец электрода при этом разбрызгивается и попадает в расплавленный металл в виде мелких включений (или одного крупного). Если в момент замыкания металл шва был достаточно затвердевшим, вольфрамовое включение останется на его

поверхности. Чаще всего электрод замыкается при отделении капли присадочного металла во время сварки стыков в различных (неудобных для сварки) пространственных положениях шва. Отделившийся от электрода кусок вольфрама увлекается расплавленным присадочным металлом внутрь шва.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- правильно заточить вольфрамовый электрод;
- для вольфрамовых электродов применять тугоплавкие прутки, легированные лантаном.

Во время сварки:

- соблюдать оптимальные режимы сварки, в частности, по току;
- при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом зажигать дугу при пониженном токе;
- вести сварку на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе.

Способ устранения.

Дефектный участок удалить шлифовальным инструментом и заварить повторно.

Дефекты группы IV – Несплавления и непровар

Несплавление (401) – отсутствие соединения между металлом сварного шва и основным металлом или между отдельными валиками сварного шва (рисунки 4.124, 4.125).

Различают несплавления: по боковой стороне (4011), между валиками (4012), в корне шва (4013).

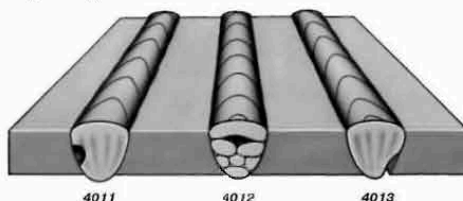


Рисунок 4.124 – Несплавление

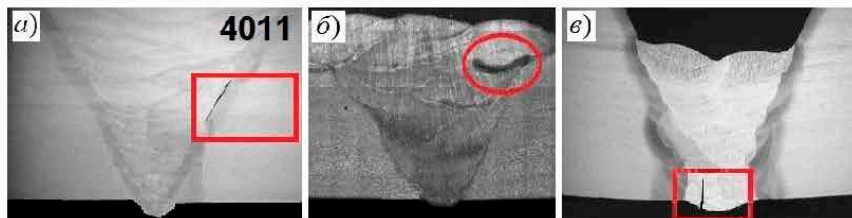


Рисунок 4.125 – Несплавления по боковой стороне (а), между валиками (б), в корне шва (в)

Недопустимо, т. к. является концентратором напряжения, вызывающим развитие трещин.

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- и рентгенографическим методами НК.

Процесс возникновения.

При дуговой сварке дуга не расплавила часть кромки стыка и не сформировала шов с ее участием.

Причины возникновения:

- неправильная подготовка кромок под сварку (форма и угол разделки);
- плохая зачистка свариваемых кромок;
- плохая подготовка поверхности валиков при многослойной сварке;
- химическая неоднородность металла;
- недостаточная сила тока;
- завышенная скорость сварки;
- низкая квалификация сварщика.

Несплавления образуются при дуговой сварке из-за того, что дуга не расплавила часть кромки стыка и не сформировала шов с ее участием.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- качественно готовить стык под сварку с соблюдением его геометрических размеров;
- зачищать выпуклые валики при многопроходной сварке;
- тщательно очищать свариваемые поверхности от ржавчины и оксидов.

Во время сварки строго соблюдать режимы сварки.

Способ устранения.

Если несплавление доступно для повторной заварки, то корень шва в месте дефекта вычищают и заваривают повторно.

Непровар и полный непровар (неполный провар) (402; D) – несплошность по всей длине шва или на его отдельном участке, возникающая из-за неспособности расплавленного металла проникнуть внутрь соединения (рисунок 4.126). Бывает в корне или в сечении шва.

Недопустим, т. к. является концентратором напряжения, вызывающим развитие трещин.

Внешние признаки отсутствуют, т. к. дефект находится внутри сварного шва. Обнаруживают УЗ- или радиографическим методами НК.

Процесс возникновения.

Сварочная дуга не может расплавить нижнюю кромку разделки и сформировать шов с ее участием. Расплавленный металл не проникает к корню соединения.

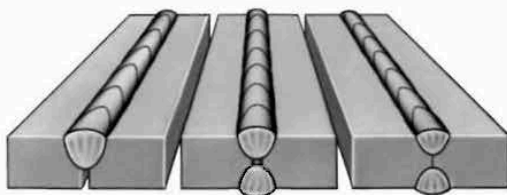


Рисунок 4.126 – Непровар и полный непровар

Причины возникновения:

- плохая зачистка свариваемых кромок;
- недостаточная сила тока;
- завышенная скорость сварки;
- низкая квалификация сварщика;
- неудобное пространственное положение шва.

Неполное проплавление (непровар) в стыковых соединениях может возникать в середине сечения при двусторонней сварке или в корне шва при односторонней сварке как без подкладки, так и на формирующей подкладке, за счет неравномерного ее прилегания.

Характерной особенностью непровара являются его окончания, имеющие вид трещин, размеры которых могут быть соизмеримы с межзёрнными расстояниями. Непровар может также сопровождаться присутствием пор и оксидных включений.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- правильно выбрать вид разделки кромок;
- собрать кромки с соблюдением их геометрических размеров;
- использовать кантователи для удобного расположения шва.

Во время сварки:

- строго соблюдать режимы сварки, в частности, по сварочному току;
- вести сварку на короткой дуге;
- вести сварку в нижнем положении и в положении в «лодочку».

Способ устранения.

Если непровар доступен для повторной заварки, то участки с непроварами в корне шва вырубает до основного металла, зачищают в месте дефекта и заваривают повторно.

Дефекты группы группы V – Отклонение формы и размера (нарушение формы шва)

Дефекты формы и размеров сварных швов снижают прочность и ухудшают внешний вид шва и косвенно указывают на возможность образования внутренних дефектов в шве.

Нарушение формы (500) – отклонение формы наружных поверхностей сварного шва или геометрии соединения от установленного значения (рисунок 4.127).

Допустимо, если не превышает требований НТД. Недопустимо в ответственных конструкциях.

Внешние признаки.

Изменяются ширина выпуклости и чешуйчатость шва по его длине.

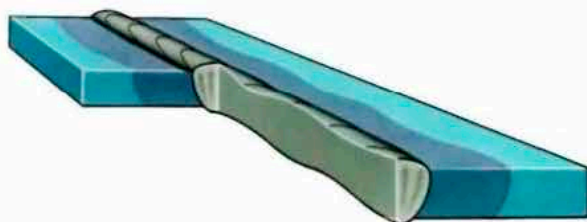


Рисунок 4.127 – Нарушение формы

Процесс возникновения.

Параметры режима сварки изменяются из-за вынужденных изменений длины дуги или напряжения питающей сети.

Причины возникновения:

- низкая квалификация сварщика;
- плохое качество электродов (влажность, нарушение сплошности и неравномерность толщины покрытия);
- колебания напряжения питающей сети;
- сварка от источника с полого падающей вольтамперной характеристикой;
- сварка длинной дугой;
- химическая неоднородность основного металла.

При механизированных способах сварки это проскальзывание проволоки в подающих роликах, неравномерная скорость сварки из-за люфтов в механизме перемещения сварочного автомата, неправильный угол наклона электрода, протекание жидкого металла в зазоры, их неравномерность по длине стыка и т. п.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- выбрать источник питания с оптимальной вольтамперной характеристикой;
- при химической неоднородности основного металла использовать инверторный источник питания;
- исключить влияние колебаний напряжения питающей сети.

Во время сварки:

- поддерживать стабильность параметров режима сварки;
- вести сварку на короткой дуге.

Способ устранения.

Дефектный участок удалить шлифовальным инструментом и заварить повторно облицовочным швом.

Подрез непрерывный протяженный (5011; F) – продольное углубление на наружной поверхности валика сварного шва (рисунок 4.128).

Недопустим, т. к. уменьшает поперечное сечение в месте перехода от шва к основному металлу и является концентратором напряжения.

Внешние признаки – углубление на протяжении всего шва по линии сплавления металла шва с основным металлом.

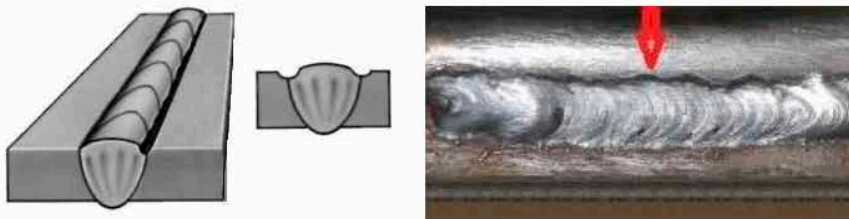


Рисунок 4.128 – Подрез непрерывный протяженный

Процесс возникновения.

Жидкий металл сварочной ванны вытесняется в ее центральную часть. Высокая скорость кристаллизации и низкая смачиваемость препятствуют растеканию металла в границах расплавления.

Причины возникновения:

- сварка при повышенном напряжении на дуге;
- чрезмерная скорость сварки;
- неточное ведение электрода по оси стыка;
- неудобное пространственное положение шва;
- недостаточная смачиваемость металла шва.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- улучшить смачиваемость за счет предварительного подогрева;
- выбрать оптимальный режим сварки;
- использовать приспособления для ориентации соединений в удобном для сварщика положении.

Во время сварки:

- вести сварку короткой дугой с оптимальной скоростью;
- сваривать угловые швы в положении в лодочку;
- использовать сварочные материалы с высокой смачиваемостью.

Способ устранения.

Место подреза зачищают и подваривают шов.

Подрез перемежающийся локальный (5012; F) – продольное углубление отдельными участками на наружной поверхности валика сварного шва (рисунок 4.129).

Недопустим, т. к. является концентратором напряжения.

Внешние признаки – локальные углубления в некоторых местах шва по линии сплавления металла шва с основным металлом.

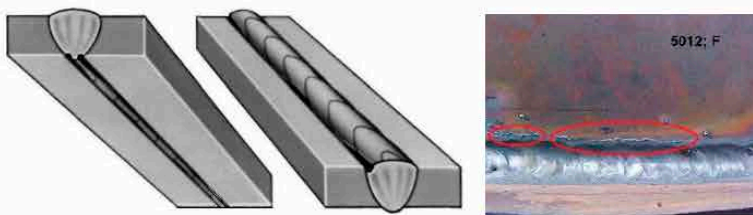


Рисунок 4.129 – Подрез перемежающийся локальный

Процесс возникновения.

Жидкий металл периодически вытесняется в центр сварочной ванны. Высокая скорость кристаллизации и низкая смачиваемость препятствуют растеканию металла в границах расплавления.

Причины возникновения:

- плохая зачистка свариваемых кромок;
- завышенная сила тока;
- низкая квалификация сварщика;
- нестабильность параметров режима сварки;
- химическая неоднородность основного металла.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- подогревать свариваемые кромки;
- использовать сварочные материалы, улучшающие смачиваемость расплава;
- использовать приспособления для формирования шва в оптимальном пространственном положении.

Во время сварки:

- вести сварку наклонным электродом углом вперед;
- точно ориентировать электрод по оси шва и длине дуги;
- использовать инверторный источник питания.

Способ устранения.

Место подреза зачищают и подваривают шов.

Усадочная канавка (5013) – подрез со стороны корня одностороннего сварного шва, вызванный усадкой вдоль границы сплавления (рисунок 4.130).

Недопустима, т. к. является концентратором напряжения.

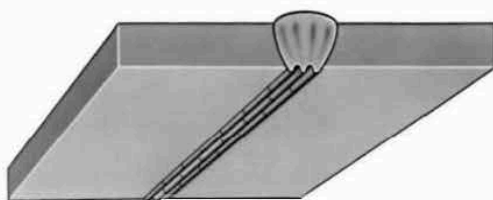


Рисунок 4.130 – Усадочная канавка

Внешние признаки – двустороннее углубление в металле корневого шва по линии сплавления основного металла со швом.

Процесс возникновения.

Жидкий металл под действием дуги вытесняется в центральную область нижней части сварочной ванны. Он мгновенно кристаллизуется, не успев заполнить впадину до линии сплавления.

Причины возникновения:

- нарушение геометрических размеров шва;
- неправильный выбор параметров режима сварки;
- низкая квалификация сварщика;
- неудобное пространственное положение шва.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- выбрать правильное пространственное положение;
- установить нужный режим;
- подготовить кромки под формирование точных геометрических размеров шва.

Во время сварки:

- использовать электроды малого (2–3 мм) диаметра;
- добиваться минимального проплавления основного металла;
- воздействовать на расплавленный металл сварочной ванны внешним магнитным полем.

Способ устранения.

Место усадочной канавки зачищают и подваривают корень шва.

Превышение выпуклости стыкового шва (502) – избыток наплавленного металла на лицевой стороне стыкового шва сверх установленного значения (рисунок 4.131).

Допустимо на ответственных конструкциях. Недопустимо на ответственных конструкциях, т. к. является концентратором напряжения.

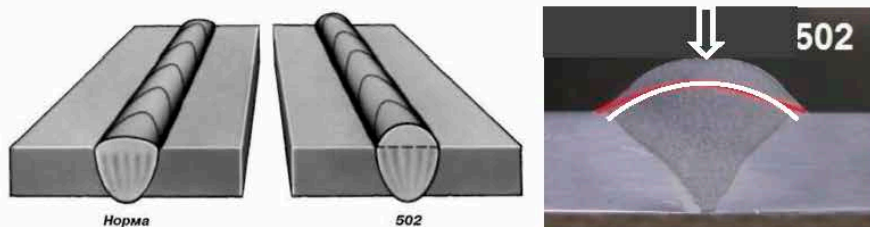


Рисунок 4.131 – Превышение выпуклости стыкового шва

Внешние признаки.

Выпуклость сварного шва превышает 2–3 мм над уровнем основного металла.

Процесс возникновения.

При формировании шва избыток металла кристаллизуется в центре сварочной ванны в виде выпуклости, превышающей допустимые значения.

Причины возникновения:

- малая скорость сварки;
- низкая квалификация сварщика;
- сварка углом назад конструкций с малой толщиной стенки;
- неправильный выбор параметров режима сварки;
- неудобное пространственное положение при сварке;
- односторонняя сварка в узкую разделку.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- выбрать оптимальные параметры режима сварки;
- вести сварку в положении, удобном для формирования шва нужных размеров;

– правильно разделять кромки в соответствии с толщиной металла.

Во время сварки:

- не снижать скорость сварки;
- не допускать манипулирования электродом, переходя на сварку углом назад;

– выдерживать оптимальный режим сварки.

Способ устранения.

Чрезмерную выпуклость удаляют шлифовальным инструментом.

Превышение выпуклости углового шва (503) – избыток наплавленного металла на лицевой стороне углового шва по всей длине или на участке (рисунок 4.132).

Допустимо на неответственных конструкциях. Недопустимо на ответственных конструкциях, т. к. является концентратором напряжения.

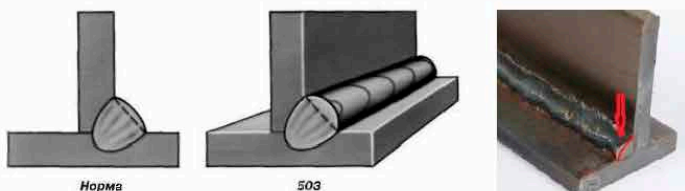


Рисунок 4.132 – Превышение выпуклости углового шва

Внешние признаки – увеличенная выпуклость углового шва.

Превышает требования нормативно-технической документации.

Процесс возникновения.

При формировании шва за счет высокого поверхностного натяжения металла на границе со шлаком образуется чрезмерная выпуклость.

Причины возникновения:

- неправильный выбор параметров режима сварки;
- низкая квалификация сварщика;
- неудобное пространственное положение при сварке;
- некачественная подготовка и сборка деталей под сварку.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- использовать сварочные материалы с пониженным поверхностным натяжением на границе со шлаком;
- качественно подготовить и собрать стык;
- кантовать конструкцию, добиваться удобного пространственного положения стыка под сварку.

Во время сварки:

- применять сварку на обратной полярности, тогда межфазное натяжение металла будет ниже;
- выдерживать оптимальный режим сварки.

Способ устранения.

Чрезмерную выпуклость удаляют шлифовальным инструментом.

Превышение проплава (504) – избыток наплавленного металла на обратной стороне стыкового шва (рисунок 4.133).

Допустимо на неответственных конструкциях. Недопустимо на ответственных конструкциях, т. к. место перехода от наплавленного металла к основному является концентратором напряжения.

Внешние признаки – чрезмерная выпуклость со стороны корня шва при сварке стыка в нижнем положении. Дефект виден невооруженным глазом при визуальном контроле.

Процесс возникновения.

Под действием собственного веса расплавленный металл сварочной ванны провисает, и шов формируется с избыточной выпуклостью в нижней части.

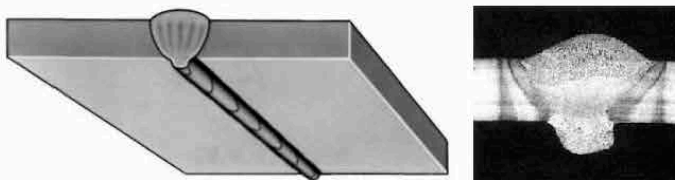


Рисунок 4.133 – Превышение проплава

Причины возникновения:

- чрезмерная текучесть расплавленного металла сварочной ванны;
- увеличенный зазор в стыке;
- неправильный выбор параметров режима сварки;
- повышенное поверхностное натяжение металла сварочной ванны;
- неодинаковая толщина металла по длине шва.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- соблюсти точность зазора в стыке;
- использовать сварочные материалы с повышенным межфазным натяжением;
- выбрать оптимальный режим сварки.

Во время сварки:

- уменьшать сварочный ток при сварке по широким зазорам и при уменьшении толщины стенки конструкции;
- выдерживать оптимальный режим сварки.

Способ устранения.

Чрезмерную выпуклость удалить шлифовальным инструментом.

Местное превышение проплава (5041) – местный избыточный проплав сверх установленного значения (рисунок 4.134).

Внешние признаки – локальная, иногда повторяющаяся, чрезмерная выпуклость с обратной стороны шва при сварке в нижнем положении.

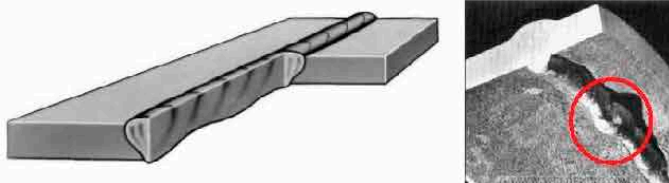


Рисунок 4.134 – Местное превышение проплава

Процесс возникновения.

При локальных увеличениях зазора, уменьшении толщины стенки под действием собственного веса расплавленный металл сварочной ванны провисает, и шов формируется с избыточной выпуклостью в корневой части.

Причины возникновения:

- неодинаковый зазор в стыке;
- химическая неоднородность свариваемого металла;
- неодинаковая толщина металла по шине шва;
- колебания сварочного тока из-за колебаний напряжения сети;
- низкая квалификация сварщика.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- тщательно подготовить и собрать стык с постоянным зазором;
- использовать источник питания со стабилизацией режима сварки;
- выбрать оптимальный режим сварки.

Во время сварки

- корректировать режим сварки при увеличении зазора в стыке, уменьшении толщины металла и т. д.;
- увеличивать скорость сварки и снижать сварочный ток при провисании корня шва.

Способ устранения.

Чрезмерную выпуклость удаляют шлифовальным инструментом.

Неправильный профиль сварного шва (505) – угол α между поверхностью основного металла и плоскостью, касательной к поверхности сварного шва, меньше установленного значения (рисунок 4.135).

Допустим на ответственных конструкциях. Недопустим на конструкциях, работающих при сложных нагружениях, т.к. место перехода от наплавленного металла к основному является концентратором напряжения.

Внешние признаки.

Угол сопряжения α между основным металлом и металлом шва менее 160° . Его определяют при измерительном контроле.

Процесс возникновения.

При формировании шва под действием давления дуги жидкий металл центральной части сварочной ванны вспучивается и после кристаллизации образует выпуклость.

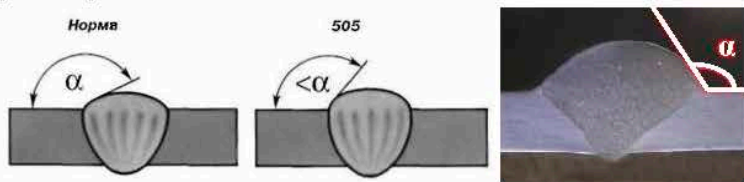


Рисунок 4.135 – Неправильный профиль сварного шва

Причины возникновения:

- малая скорость сварки;
- сварка углом назад металла малой толщины;
- плохая жидкотекучесть металла сварочной ванны;

- неправильная геометрия шва;
- высокое поверхностное натяжение;
- расплавленного металла или межфазного натяжения на границе со шлаком;

- низкая квалификация сварщика.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- тщательно подготовить кромки под сварку;
- собрать стык согласно требованиям технологической карты;
- выбрать оптимальную технику сварки.

Во время сварки:

- вести сварку на оптимальных режимах;
- вести сварку в удобном пространственном положении.

Способ устранения.

Чрезмерную выпуклость удалить шлифовальным инструментом.

Наплав (506) (напыл) – избыток наплавленного металла сварного шва, нагекший на поверхность основного металла, но не сплавленный с ним (рисунок 4.136).

Напльвы могут быть местными – в виде отдельных застывших капель, а также иметь значительную протяженность вдоль шва.

Допустим на неотчетственных конструкциях. Недопустим на ответственных конструкциях.

Внешние признаки – избыток металла шва по его краю. Дефект виден невооруженным глазом при визуальном контроле.

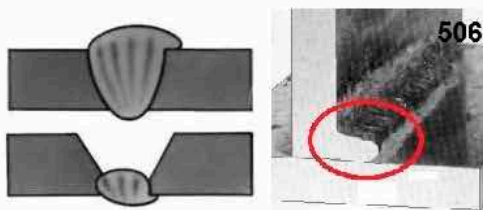


Рисунок 4.136 – Наплав

Процесс возникновения.

При формировании шва избыток металла сварочной ванны натекает на холодные кромки основного металла, не образуя с ним соединения.

Причины возникновения:

- ошибки в технике сварки (неправильный наклон электрода, большой угол наклона изделия при сварке на спуск, плохая очистка свариваемых кромок);
- нарушение параметров режима сварки (большой сварочный ток; излишняя длина дуги);

- неправильный выбор сварочных материалов;
- неудобство формирования шва, вызванное наличием мешающих конструкций.

При выполнении кольцевых швов напильники образуются при недостаточном или избыточном смещении электрода с зенита. В местах напильников часто могут выявляться непровары, трещины и др.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- выбрать оптимальный режим сварки;
- строго соблюдать требования технологического процесса;
- использовать соответствующие сварочные материалы.

Во время сварки:

- корректировать режим сварки в зависимости от схемы формирования шва;
- вести сварку строго по середине разделки кромок;
- вести сварку дугой средней длины.

Способ устранения.

Удалить излишек металла шлифовальным инструментом, сделав плавный переход от металла шва к основному металлу, проверив, нет ли в этих местах непровара.

Линейное смещение (депланация свариваемых листов) (507) – смещение между двумя свариваемыми элементами, при котором их поверхности располагаются параллельно, но не на требуемом уровне (рисунок 4.137).

Допустимо на ответственных конструкциях. Недопустимо на ответственных конструкциях.

Внешние признаки – расположение двух свариваемых деталей не в одной плоскости. Дефект виден невооруженным глазом. Размер смещения определяют при измерительном контроле.

Процесс возникновения.

При сварке двух деталей под действием термического цикла сварки происходит параллельное смещение одной свариваемой детали относительно другой.



Рисунок 4.137 – Линейное смещение

Причины возникновения:

- отсутствие приспособлений для жесткой фиксации свариваемых деталей в горизонтальном положении;

- нарушение технологического процесса изготовления конструкции;
 - чрезмерная тепловая мощность сварочной дуги при сварке первого шва.
- Способы предупреждения.*

Перед сваркой:

- использовать специальное приспособление для жесткой фиксации свариваемых деталей;
- строго соблюдать требования технологического процесса;
- использовать методы регулирования термического цикла для того, чтобы уменьшить деформации сварной конструкции.

Во время сварки:

- вести сварку с минимальной погонной энергией, чтобы снизить сварочные деформации.

Способ устранения.

Сварное соединение разрезать и сварить заново.

Угловое смещение (508) – смещение между двумя свариваемыми элементами, при котором их поверхности располагаются под углом, отличающимся от требуемого (рисунок 4.138).

Допустимо на неответственных конструкциях. Недопустимо на ответственных конструкциях.



Рисунок 4.138 – Угловое смещение

Внешние признаки – расположение двух сваренных деталей под некоторым углом относительно друг друга. Дефект виден невооруженным глазом. Размер смещения определяют при измерительном контроле.

Процесс возникновения.

При сварке двух деталей под действием термического цикла сварки происходит смещение одной свариваемой детали под углом относительно другой.

Причины возникновения:

- отсутствие приспособлений для жесткой фиксации свариваемых деталей в горизонтальном положении;
- нарушение технологического процесса изготовления конструкции;
- чрезмерная тепловая мощность сварочной дуги при сварке первого шва.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- использовать специальное приспособление для жесткой фиксации свариваемых деталей.

- строго соблюдать требования технологического процесса;
- использовать методы регулирования термического цикла для того, чтобы уменьшить деформации сварной конструкции.

Во время сварки:

- вести сварку с минимальной погонной энергией, чтобы снизить сварочные деформации.

Способ устранения.

Сварное соединение разрезать и сварить заново.

Натек (509) – металл шва, осевший от тяжести и не сплавленный с соединяемой поверхностью, при горизонтальном (5091), нижнем или потолочном (5092) положении сварки, в угловом шве (5093), в нахлесточном соединении (5094) (рисунок 4.139).

Допустим на неответственных конструкциях. Недопустим на ответственных конструкциях

Чаше всего натек образуется при выполнении горизонтальных сварных швов на вертикальной плоскости.

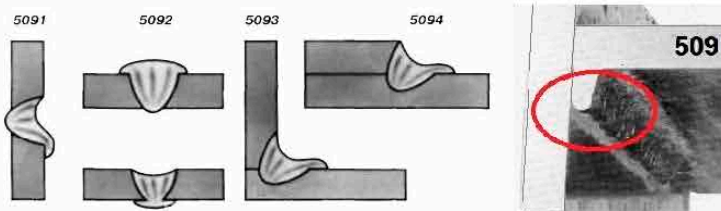


Рисунок 4.139 – Натек

Внешние признаки.

Расплавленный металл сварочной ванны натек на одну из кромок без сплавления с ней, что привело к дефекту формообразования.

Процесс возникновения.

Во время образования жидкой сварочной ванны расплавленный металл под действием силы тяжести натекает на основной металл.

Причины возникновения:

- неблагоприятное пространственное положение при сварке;
- высокая жидкотекучесть металла сварочной ванны;
- применение сварочных материалов с низкой вязкостью шлака;
- низкая квалификация сварщика;
- нарушение режима сварки и технологического процесса изготовления конструкции.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- применять кантователи, вращатели для формирования шва в удобном пространственном положении;

- использовать сварочные материалы с повышенной вязкостью шлака;
- применять импульсно-дуговые способы сварки.

Во время сварки:

- вести сварку на минимальной погонной энергии;
- не допускать большого объема сварочной ванны.

Способ устранения.

Недостающий металл поверхности шва наплавить дополнительно. Натеки удалить шлифовальным инструментом.

В зависимости от условий это может быть:

- натек при горизонтальном положении сварки 5091;
- в нижнем или потолочном положении сварки 5092;
- натек в угловом сварном шве 5093;
- натек в шве нахлесточного соединения 5094.

Чаще всего натеки образуются при выполнении горизонтальных сварных швов на вертикальной плоскости. Причины образования натеков и методы их устранения одинаковы с наплавами (наплывами).

Прожог (510) – вытекание металла сварочной ванны, в результате чего образуется сквозное отверстие в сварном шве (рисунок 4.140).

Недопустим, т. к. нарушает сплошность сварного шва.

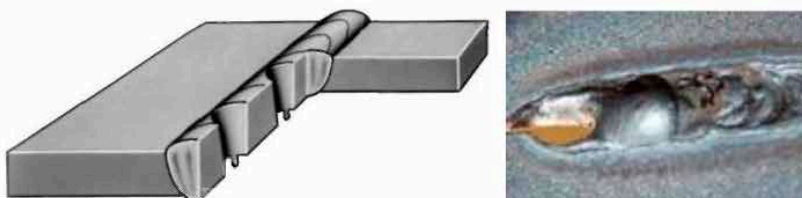


Рисунок 4.140 – Прожог

Внешние признаки – сквозные отверстия или полости, образованные вследствие расплава сварочной ванны.

Процесс возникновения.

В сварочной ванне образуется чрезмерный объем жидкого металла. Он не удерживается силами поверхностного натяжения и самопроизвольно вытекает из шва.

Причины возникновения:

- химическая неоднородность свариваемого металла;
- завышенная сила тока при недостаточной скорости сварки;
- некачественная сборка стыка под сварку (под свариваемый шов плохо поджата флюсовая подушка или медная подкладка), чрезмерные зазоры;
- низкая квалификация сварщика.

Прожоги чаще всего образуются на тонкостенных соединениях или соединениях с подкладными полосами, кольцами, когда сварку выполняют на

повышенном режиме или при увеличенном зазоре между кромками. В местах прожога металл окисляется и становится рыхлым, непрочным, неплотным. Прожог может образоваться при внезапной остановке подачи защитного газа. При сварке поворотных кольцевых стыков прожоги вызываются неправильным расположением электрода относительно зенита.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- использовать специальные подкладки (остающиеся и не остающиеся);
- оптимизировать режим сварки по скорости и мощности источника нагрева;
- применять кантователи, вращатели для выбора пространственного положения, исключающего прожог.

Во время сварки:

- применять импульсно-дуговые режимы сварки;
- вести дуговую сварку углом вперед, а газовую – левым способом;
- строго соблюдать постоянство зазора в стыке.

Способ устранения.

Прожоги исправляют путем их вырубки. Место прожога очищают от окалины и натеков с помощью шлифовального инструмента и повторно подваривают.

Неполное заполнение разделки кромок (511) – продольная непрерывная или прерывистая канавка на поверхности сварного шва из-за недостаточности присадочного материала (рисунок 4.141).

Допустимо на неответственных конструкциях. Недопустимо на ответственных конструкциях.

Внешние признаки – вогнутость внешней поверхности шва, вызванная недостаточным количеством расплавленного металла сварочной ванны.

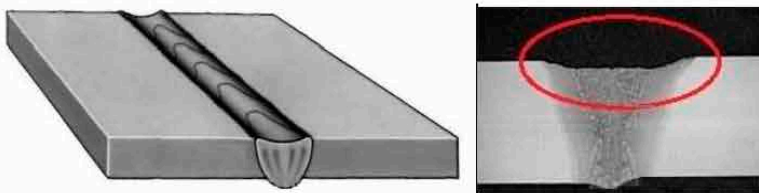


Рисунок 4.141 – Неполное заполнение разделки кромок

Процесс возникновения.

При недостатке жидкого металла сварочной ванны шов формируется с углублением в центре или по краям.

Причины возникновения:

- низкая квалификация сварщика;
- неправильно выбраны марка и размеры присадочного материала;
- нарушение технологии изготовления конструкции;

- неправильно разделаны кромки;
- неправильное пространственное положение, вызывающее стекание металла на одну сторону.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- правильно выбрать покрытый электрод или присадочный материал;
- применять кантователи, вращатели для сварки в удобном пространственном положении;
- качественно подготовить и собрать стык под сварку.

Во время сварки:

- использовать поперечные колебания электрода;
- вести дуговую сварку углом назад, а газовую – правым способом;
- строго соблюдать параметры режима сварки.

Способ устранения.

Зачистить места углублений, а затем подварить их.

Чрезмерная асимметрия сварного шва (512) – один катет шва значительно больше другого (рисунок 4.142).

Допустима на неотчетливых конструкциях. Недопустима на ответственных конструкциях.

Внешние признаки – несимметричность углового шва, вызванная тем, что один из катетов превышает другой более чем в 1,5 раза.

Процесс возникновения.

В процессе сварки не удается сформировать симметричное, равностороннее сечение углового шва.

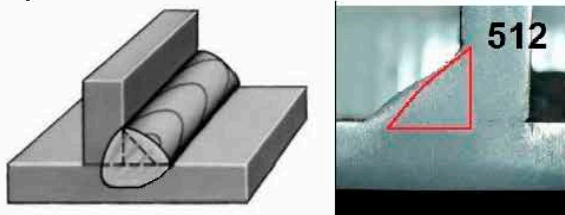


Рисунок 4.142 – Чрезмерная асимметрия сварного шва

Причины возникновения:

- неудобное пространственное положение для формирования шва;
- низкая квалификация сварщика;
- высокая жидкотекучесть металла сварочной ванны;
- нарушение технологии изготовления конструкции;
- различная теплопроводность металла свариваемых деталей.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- правильно выбрать покрытый электрод или присадочный материал;

- применять кантователи, вращатели для сварки в удобном пространственном положении;

- выбрать оптимальные параметры режима сварки.

Во время сварки:

- корректировать положение источника нагрева относительно свариваемых деталей;

- строго соблюдать параметры режима сварки.

Способ устранения.

Зачистить места сплавления меньшего катета с основным металлом и выполнить подварку.

Неравномерная ширина шва (513) – отклонение ширины сварного шва от установленного значения (рисунок 4.143).

Недопустима на ответственных конструкциях.

Внешние признаки – изменение ширины шва по его длине.

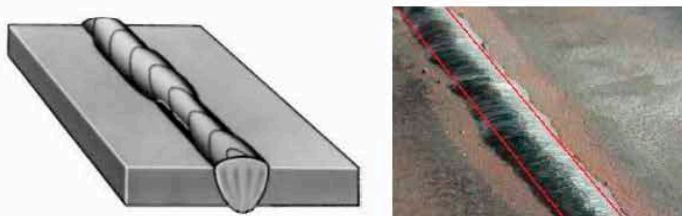


Рисунок 4.143 – Неравномерная ширина шва

Процесс возникновения.

Под действием указанных ниже причин формируется шов переменной ширины.

Причины возникновения:

- колебания напряжения питающей сети;
- использование при ручной сварке источника питания с плогопадающей или жесткой вольтамперной характеристикой;

- низкая квалификация сварщика;

- плохая подготовка кромок;

- сварка длинной дугой;

- нарушение технологии сварки при изготовлении конструкции.

- неточное направление электрода.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- использовать источник питания со стабилизацией параметров режима;
- применять для ручной сварки источник питания с крутопадающей вольтамперной характеристикой;

- тщательно подготовить стык, соблюсти стабильный зазор по его длине или периметру;

– тщательно зачистить кромки.

Во время сварки:

- вести сварку на короткой или средней дуге;
- строго соблюдать параметры режима сварки.

Способ устранения.

Узкие места шва подваривают, а уширения устраняют шлифованием.

Неровная поверхность шва (514) – грубая неравномерность формы выпуклой поверхности шва подлине (рисунок 4.144).

Допустима на неответственных конструкциях. Недопустима на ответственных конструкциях, если превышает нормативы для каждого объекта.

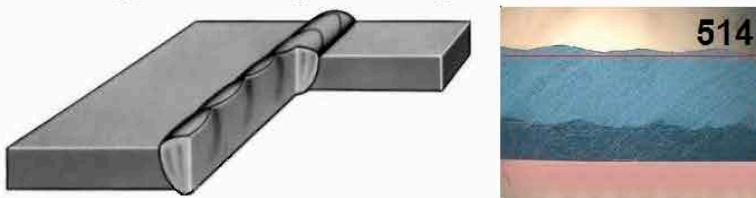


Рисунок 4.144 – Неровная поверхность шва

Внешние признаки.

На поверхности шва четко видны гребни и впадины затвердевшего металла по изотермам кристаллизации (чешуйчатость).

Процесс возникновения.

Под действием указанных ниже причин шов формируется дискретно, с определенным шагом между соседними гребнями или впадинами.

Причины возникновения:

- низкая квалификация сварщика;
- нарушение технологии сварки при изготовлении конструкции;
- применение сварочных материалов с низкой жидкотекучестью;
- неравномерная скорость перемещения источника нагрева.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- правильно выбрать сварочные материалы;
- использовать источник питания постоянного тока с обратной полярностью;
- строго соблюдать требования технологического процесса.

Во время сварки:

- равномерно перемещать источник нагрева вдоль шва;
- использовать устройства электромагнитного управления процессом формирования шва.

Способ устранения.

Удалить поверхностные дефекты шлифовальным инструментом. Выполнить подварку облицовочный швом.

Вогнутость корня шва (515) – неглубокая канавка со стороны корня одностороннего сварного шва (рисунок 4.145).

Допустима на неответственных конструкциях. Недопустима на ответственных конструкциях.

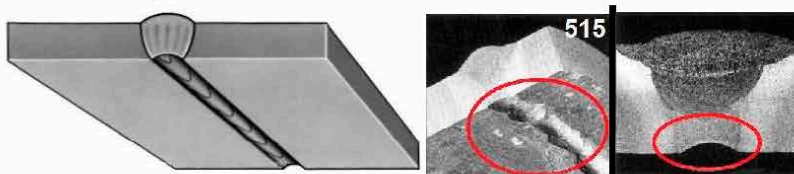


Рисунок 4.145 – Вогнутость корня шва

Внешние признаки.

С обратной стороны шва корень имеет вогнутость.

Дефект виден невооруженным глазом при визуальном контроле.

Процесс возникновения.

При формировании корневого шва поверхностное натяжение металла снижается. Происходит утяжка корня шва, образуется вогнутая поверхность.

Причины возникновения:

- неправильно подготовлены и собраны стыкуемые кромки;
- неправильно выбраны сварочные материалы;
- низкая квалификация сварщика;
- нарушение технологии сварки при изготовлении конструкции.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- правильно выбрать сварочные материалы;
- тщательно подготовить и собрать стык;
- строго соблюдать требования технологического процесса.

Во время сварки:

- вести сварку на постоянном токе обратной полярности;
- соблюдать оптимальные параметры режима сварки.

Способ устранения.

Зачистить корень шва от шлака, оксидов и выполнить подварку.

Пористость в корне сварного шва (516) – наличие пор в корневой части сварного шва (рисунок 4.146).

Допустима на неответственных конструкциях.

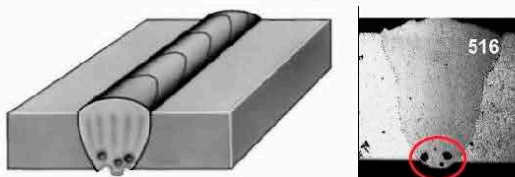


Рисунок 4.146 – Пористость в корне сварного шва

Процесс возникновения.

Водород, растворенный в жидком металле сварочной ванны, а также оксид углерода образуют на фронте кристаллизации пузырьки, которые превращаются в поры по мере затвердевания металла.

Причины возникновения.

- оксиды, загрязнения, влажность на внутренней поверхности свариваемых кромок;
- дефекты покрытия электродов;
- нарушение режима проковки электродов;
- низкая квалификация сварщика;
- стартовые поры при сварке легированных сталей электродами с основным покрытием;
- малые размеры сварочной ванны, минимальная ширина шва.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- тщательно подготовить обратную сторону кромок;
- выбрать качественные покрытые электроды;
- строго соблюдать режим проковки электродов;
- для начального зажигания дуги использовать выводные планки;
- для электродов с основным покрытием применять источники постоянного тока.

Во время сварки:

- вести сварку на короткой дуге;
- соблюдать оптимальные параметры режима сварки.

Способ устранения.

Зачистить корень шва в месте образования пор и подварить заново.

Возобновление шва (517) – местная неровность поверхности в месте возобновления сварки (рисунок 4.147).

Допустимо на неотчетливых конструкциях.

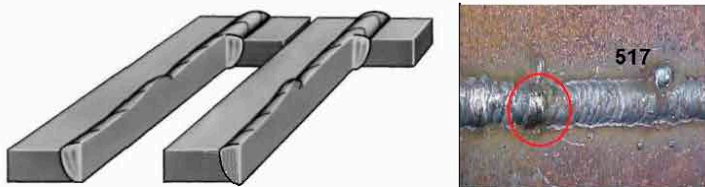


Рисунок 4.147 – Возобновление шва

Внешние признаки – наплывы или углубления в длинномерных швах в местах стыковки одного участка с другим.

Процесс возникновения.

При выполнении длинномерных швов при переходе от предыдущего участка к последующему образуется наплыв металла или канавка.

Причины возникновения:

- низкая квалификация сварщика;
- низкое качество покрытых электродов;
- нарушение режима проковки покрытых электродов;
- низкая жидкотекучесть металла сварочной ванны;
- некачественная зачистка конца предыдущего шва.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- выбрать качественные покрытые электроды;
- строго соблюдать оптимальный режим проковки электродов;
- тщательно зачищать предыдущий шов от шлака;
- применять электроды с ионизирующим покрытием торца;
- использовать источник питания с системой поджига электрода.

Во время сварки:

- формировать окончание шва с пологим наклоном;
- зажигать последующий электрод на застывшем кратере, в верхней его части.

Способ устранения.

Зачистить наплывы шлифовальным инструментом. При необходимости выполнить подварку.

Дефекты группы VI – Прочие дефекты

Прочие дефекты (600) – все дефекты, которые не могут быть включены в группы I–V.

Случайная дуга (601) – местное повреждение поверхности основного металла, примыкающего к сварному шву, возникшее в результате случайного горения дуги (рисунок 4.148).

Случайная дуга особенно опасна для нержавеющей сталей т. к. может быть причиной начала коррозии.

При сварке закаливаемых сталей случайная дуга может стать причиной образования трещин.

Допустимы на ответственных конструкциях. Недопустимы на ответственных конструкциях.

Внешние признаки – местные язвы от выплавленного металла, следы ожога металла от дугового разряда.

Ожог может быть причиной образования трещин при сварке закаливаемых материалов. Дефект виден невооруженным глазом при визуальном контроле.

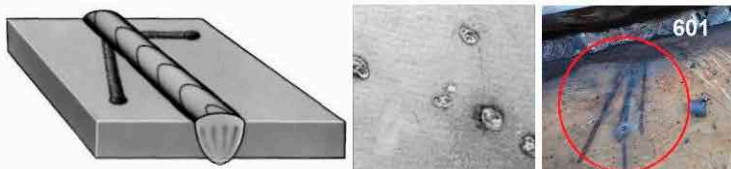


Рисунок 4.148 – Случайная дуга

Процесс возникновения.

Зажигание дуги на основном металле с последующим переводом ее в разделку. От точки зажигания до разделки образуется ожог металла.

Причины возникновения:

- низкая квалификация сварщика;
- высокая плотность светофильтра относительно сварочного тока;
- снижение остроты зрения у сварщика;
- отсутствие заходной планки для зажигания дуги.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- выбрать защитные щитки с меняющейся плотностью светофильтра;
- использовать заходную планку для зажигания дуги;
- зажечь дугу в разделке, а затем переплавить место ожога.

Во время сварки:

- не допускать обрыва дуги в процессе горения одного электрода;
- вести сварку строго в пределах разделки кромок.

Способ устранения.

Зачистить место ожога шлифовальным инструментом.

Брызги металла (602) – капли наплавленного или присадочного металла, образовавшиеся во время сварки и прилипшие к поверхности затвердевшего металла сварного шва или околошовной зоны основного металла (рисунок 4.149).

Брызги на сваренном металле не только портят внешний (товарный) вид шва, но и являются очагами образования коррозии для нержавеющей сталей и местом образования трещин для закаливаемых сталей.

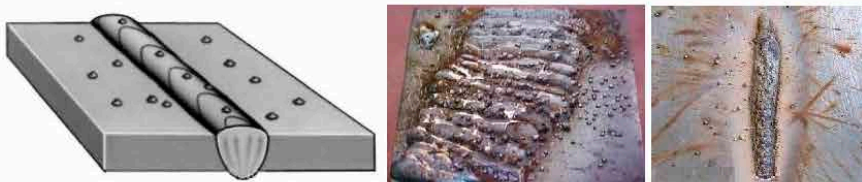


Рисунок 4.149 – Брызги металла

Внешние признаки – мелкие капли электродного металла, осевшие на лицевую сторону сварного соединения и плотно сцепившиеся с поверхностью основного металла.

Дефект виден невооруженным глазом при визуальном контроле.

Процесс возникновения.

При сварке в момент короткого замыкания дугового промежутка под действием электродинамического удара сварочного тока часть электродного металла разлетается и оседает на поверхности основного металла, прилегающего ко шву.

Причины возникновения:

- некачественная подготовка покрытого электрода;
- завышенный сварочный ток;
- отсутствие защитных покрытий, обеспечивающих легкое удаление брызг после сварки.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- выбрать и хорошо подготовить соответствующие сварочные материалы;
- выбрать оптимальный режим сварки;
- нанести на поверхность основного металла специальное защитное покрытие.

Во время сварки:

- соблюдать оптимальные параметры режима;
- не вести сварку длинной дугой.

Способ устранения.

Зачистить шлифовальным инструментом поверхность сварного соединения от брызг металла.

Вольфрамовые брызги (6021) – частицы вольфрама, выброшенные из расплавленной зоны электрода на поверхность основного металла или затвердевшего металла сварного шва (рисунок 4.150).

Допустимы на неотчетственных конструкциях. Недопустимы на ответственных и декоративных конструкциях.

Внешние признаки – мелкие точечные включения капель расплавленного вольфрама на поверхности основного металла, прилегающего к сварному шву.

Дефект виден невооруженным глазом при визуальном контроле.

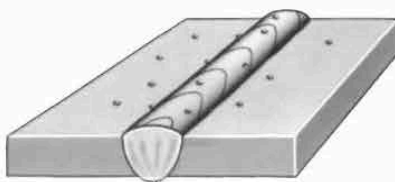


Рисунок 4.150 – Вольфрамовые брызги

Процесс возникновения.

При расплавлении вольфрамового электрода под действием электромагнитных сил часть расплава оседает на поверхности основного металла в виде брызг.

Причины возникновения:

- вольфрамовый электрод не легирован тугоплавкими компонентами;
- неправильно выбран диаметр вольфрамового электрода;
- неправильно заточен электрод;
- неправильно выбраны параметры режима сварки.

Способы предупреждения.

Перед сваркой:

- выбрать вольфрамовый электрод соответствующей марки и диаметра;
- правильно заточить электрод;
- выбрать оптимальный режим сварки.

Во время сварки:

- не допускать обгорания и расплавления вольфрамового электрода;
- следить за значениями тока для выбранного режима сварки.

Способ устранения.

Зачистить места, загрязненные вольфрамовыми брызгами, шлифовальным инструментом с мягкими щетками.

Поверхностные задиры (603) – повреждения поверхности, вызванные удалением временно приваренного приспособления (рисунок 4.151).

Допустимы на неотвественных конструкциях.

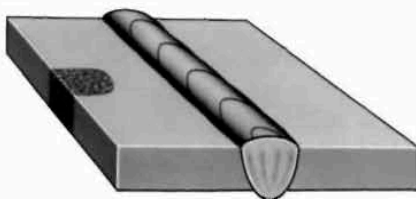


Рисунок 4.151 – Поверхностные задиры

Внешние признаки – местные задиры и вырывы основного металла в местах приварки вспомогательных приспособлений.

Задир может быть причиной образования трещины в материале с низкой пластичностью. Дефект виден невооруженным глазом при визуальном контроле.

Процесс возникновения.

Механические повреждения основного металла в виде задигов, вырывов, шероховатости под действием вспомогательного приспособления или при его удалении.

Причины возникновения:

- механический отрыв приспособления с вырывом прихваток;
- нанесение задигов и механических повреждений основного металла при работе и эксплуатации вспомогательных приспособлений;
- небрежное удаление приспособлений с применением шлифмашинки.

Способы предупреждения:

- устанавливать приспособления в местах, которые либо будут удалены, либо не влияют на работоспособность конструкции;
- применять при установке приспособлений струбцины, прижимы, механические фиксаторы;

– удалять приваренные приспособления с помощью шлифмашинки аккуратно, срезая прихватки.

Способ устранения.

Зачистить поврежденные участки шлифовальным инструментом с мягкими щетками.

Вышеуказанные дефекты группы VI достаточно легко исправимы, необходимо просто удалить шлифованием данные места до «здорового» металла.

Утонение металла шва (606) – уменьшение толщины металла шва до значения меньше допустимого при механической обработке (рисунок 4.152).

Недопустимо, т. к. уменьшается прочность сварного соединения.

Внешние признаки – уменьшение толщины металла шва при снятии выпуклости шва механическим путем сверх значений, установленных НТД.

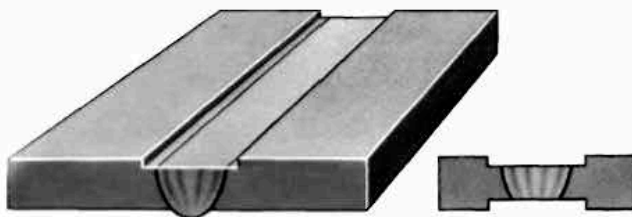


Рисунок 4.152 – Утонение металла шва

Дефект виден невооруженным глазом. Размер утонения определяют при измерительном контроле.

Процесс возникновения.

Удаление металла шва сверх установленных нормативов в результате механической обработки соединения.

Причины возникновения:

- низкая квалификация рабочих механического цеха;
- плохо отлажено механическое оборудование;
- нарушение технологии изготовления конструкции.

Способы предупреждения:

- применять качественное механическое оборудование;
- готовить и обучать рабочих по механической обработке при работе со сварными конструкциями;
- строго соблюдать технологию изготовления сварной конструкции.

Способ устранения.

Наплавка с последующей механической обработкой. Если в результате чрезмерного удаления дефектов обнаружено утонение металла, необходимо в данном месте выполнить наплавку с последующей механической обработкой.

4.2.2 Дефекты пайки (паяных соединений)

Пайкой называют способ соединения металлов путем заполнения зазора между ними жидким относительно более легкоплавким сплавом – припоем – с образованием между паяемым материалом и припоем прочной связи. Сцепление между ними возникает в результате диффузионного взаимодействия материала заготовки и жидкого припоя с последующей кристаллизацией припоя [15].

Перед пайкой на обе соединяемые поверхности наносят тонкий слой припоя – лужение. Обычно для хорошего соединения припоя с металлом с поверхности последнего необходимо удалить слой оксида. Это делают с помощью флюса. Луженые поверхности сдавливают при температуре выше температуры плавления припоя, а затем температуру уменьшают, происходит твердение припоя [16].

Качество паяных изделий определяется их прочностью, степенью работоспособности, надежностью, коррозионной стойкостью, способностью выполнять специальные функции (теплопроводность, электропроводность, коммутационные характеристики и т. п.) [17]. Обеспечение этих характеристик достигается оптимальными решениями в процессе производства паяного изделия. Дефекты, возникающие при изготовлении паяных изделий, можно разделить на дефекты заготовки и сборки, дефекты паяных соединений и паяных изделий [18].

К наиболее типичным дефектам паяных соединений относятся *поры, раковины, шлаковые и флюсовые включения, непропаи, трещины*.

Эти дефекты классифицируют на две группы: 1) связанные с заполнением расплавом припоя зазора между соединенными пайкой деталями; 2) возникающие в процессе охлаждения изделия с температуры пайки.

Дефекты первой группы связаны главным образом с особенностями заполнения капиллярных зазоров в процессе пайки.

Дефекты второй группы обусловлены уменьшением растворимости газов в металлах при переходе их из жидкого состояния в твердое, и усадочными явлениями. К ним также относится пористость кристаллизационного и диффузионного происхождения.

Одним из основных дефектов, чаще всего встречающихся в паяном шве, является *непропай* – отсутствие его сплошности, пустоты и пористости.

Так как пустоты нарушают непрерывность слоя припоя, они неизбежно оказывают неблагоприятное влияние на прочность паяного соединения, поэтому нужно создавать такие условия, при которых пустоты можно свести к минимуму.

В зависимости от условий паяния площадь пустот в паяном соединении может изменяться в пределах от 5 до 65 % всей площади спая.

Особенно резко снижают усталостную прочность паяного соединения пустоты, расположенные у его края. При этих условиях они вызывают кон-

центрацию напряжений и образец разрушается при напряжении, на 35 % меньшем обычного. Для того чтобы обеспечить высокое качество паяного соединения, необходимо, прежде всего, добиться минимального количества этих пустот или, по крайней мере, рассеянного расположения их.

В настоящее время еще нет единого мнения о причинах появления пустот в паяном соединении.

В общем случае образование пустот в слое припоя зависит:

- от физико-химической природы и количества флюса;
- атмосферы, в которой производилось паяние;
- состояния поверхности основного металла перед пайкой;
- состава припоя и металла основы, от температуры и способа паяния.

Из всех этих факторов наибольшее влияние на появление пустот (раковин) оказывают 1) количество флюса; 2) способ паяния.

Для получения удовлетворительного паяного соединения прежде всего нужно, чтобы как флюс, так и припой хорошо смачивали поверхность основного металла. При этом относительная смачивающая способность припоя должна быть больше, чем у флюса, в противном случае припой не будет замещать флюс в шве. Обычно эти условия соблюдаются, однако в некоторых отдельных участках паяного соединения вследствие растворения во флюсе окислов, местных изменений поверхностного натяжения жидкого припоя или же ввиду неоднородности припоя или флюса, могут создаваться условия, при которых жидкий припой не сможет заместить флюс; в этом случае в шве появятся включения флюса, ведущие к образованию раковин (рисунок 4.153).



Рисунок 4.153 – Отсутствие смачивания припоем

Другой причиной нарушений непрерывности слоя припоя в соединении являются *пузырьки газа*, образующегося в результате разложения флюса при температуре паяния. Эти газовые пузырьки аналогичны газовым раковинам в отливках. Чем значительнее площадь спая, тем труднее удаляется жидкий флюс из шва с избыточным припоем и тем больше возможность образования многочисленных раковин. Вредного влияния остатков флюса можно избежать, применяя пайку в газовой среде без жидких или порошкообразных флюсов.

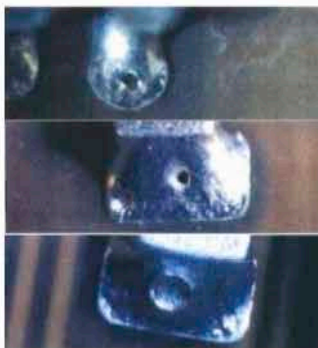


Рисунок 4.154 – Раковины, поры, пустоты

Влага во флюсе способствует образованию пустот (рисунок 4.154). Лабораторные испытания и производственные наблюдения показывают, что при паянии с приложением давления или при скользящем смещении спаиваемых частей относительно друг друга образование раковин резко снижается.

В процессе охлаждения соединения из-за уменьшения растворимости газов происходит их выделение и образование *рассеянной газовой пористости*.

Опыт высокотемпературной пайки алюминиевых сплавов с предварительной дегазацией припоев и флюсов показывает, что пористость металла шва при этом резко уменьшается.

Другой весьма распространенной причиной образования рассеянной пористости является возникновение так называемой *усадочной пористости*. Это явление характерно для случая затвердевания сплава с широким интервалом кристаллизации.

При малых зазорах усадочные междендритные пустоты, как правило, тянутся в виде цепочки в центральной части шва.

При больших зазорах усадочные поры располагаются в шве более равномерно в междендритных пространствах.

Причиной образования пор в паяных швах может быть *эффект сфероидизации*. В этом случае пористость в зоне шва возникает в результате некомпенсированной диффузии атомов припоя и паяемого металла. Такого рода пористость возникает в системах припоя – паяемый металл, у которых имеется заметное различие в коэффициентах диффузии.

Одной из существенных причин, вызывающих дефекты в паяных соединениях, является недостаточно тщательная подготовка паяемых поверхностей, плохая очистка от окислов и жира. В этом случае припой плохо затекает в зазор и не образует прочного соединения из-за недостаточной площади контакта между спаиваемыми поверхностями. Поэтому на очистку соединяемых поверхностей следует обратить особое внимание.

Причиной образования *непропаев*, которые берут начало у границы раздела с паяемым металлом, может явиться неправильное конструирование паяного соединения (наличие «глухих», не имеющих выхода полостей), блокирование жидким припоем газа при наличии неравномерного нагрева или неравномерного зазора, местное отсутствие смачивания жидким припоем поверхности паяемого металла. Причиной появления заблокированных остатков газа в швах может быть неравномерность движения фронта жидко-

сти при затекании припоя в зазор. Фронт дробится на участки ускоренного и замедленного продвижения, в результате чего могут отсекаются малые объемы газа. Таким же образом может происходить захват флюса и шлаков в шве.

Трещины в паяных швах могут возникать под действием напряжений и деформаций металла изделия в процессе охлаждения (рисунок 4.155). Принято различать *холодные* и *горячие* трещины.

Холодные трещины образуются при температурах до 200 °С.

Горячими называются трещины, образующиеся при температуре выше 200 °С. Эти трещины обычно имеют *кристаллизационное* или *полигонизационное* происхождение. Если в процессе кристаллизации скорость охлаждения высока и возникающие напряжения велики, а деформационная способность металла шва мала, то появляются *кристаллизационные трещины*.

Полигонизационные трещины возникают уже при температурах ниже температуры солидуса¹⁾ после затвердевания сплава по так называемым полигонизационным границам, образующимся при выстраивании дислокации в металле в ряды и образовании сетки дислокаций под действием внутренних напряжений.

Холодные трещины возникают чаще всего в зоне спаев, особенно в случае образования прослойки хрупких интерметаллидов. Трещины в паяемом металле могут появиться и в результате воздействия жидких припоев, вызывающих адсорбционное понижение прочности.



Рисунок 4.155 – Трещины в паяных соединениях [18]

Неметаллические включения типа флюсовых или шлаковых возникают при недостаточно тщательной подготовке поверхности изделия к пайке или при нарушении ее режима. При слишком длительном нагреве под пайку флюс реагирует с паяемым металлом с образованием твердых остатков, которые плохо вытесняются из зазора припоем. Шлаковые включения могут образоваться также из-за взаимодействия припоев и флюсов с кислородом воздуха или пламенем горелки.

Правильное конструирование паяного соединения (отсутствие замкнутых полостей, равномерность зазора), точность сборки под пайку, дозиро-

¹⁾ *Солидус* (лат. *solidus* «твёрдый») – температура, при которой плавится самый легкоплавкий компонент или линия на фазовых диаграммах, ниже которой находится только твердая фаза.

ванное количество припоя и флюсующих сред, равномерность нагрева – условия бездефектности паяного соединения.

Методы контроля паяных изделий, браковочные признаки и нормы определяются назначением изделия и обусловлены техническими требованиями на их производство.

Классификация дефектов пайки (паяных соединений)

Продольная трещина – представляет собой разрыв металла, идущий параллельно плоскости спая. Она может располагаться в шве, в основном металле, в зоне спая. Возникают под действием собственных напряжений, образующихся при сборке, нагреве под пайку, кристаллизации металла шва и охлаждения паяного изделия.

Поперечная трещина – разрыв металла, идущий перпендикулярно плоскости спая. Она может возникнуть в шве, в основном металле и в зоне спая. Часто образуются при пайке разнородных материалов с резко различными физико-химическими свойствами.

Пора и газовая раковина – шарообразная или вытянутая плоскость, заполненная газом. Дефект связан с химическими реакциями, протекающими в металле, со скоплением окислов и нитридов, с газовыделениями и усадочными явлениями, происходящими при переходе металла из жидкого состояния в твердое.

Рассеянная пористость – разбросанные по достаточно большой области многочисленные поры и (или) раковины. Возникновение этого дефекта связано с химическим составом сплавов, она тем больше, чем шире диффузная зона затвердевающего сплава.

Сосредоточенная пористость – локальное скопление пор и (или) раковин. Образуется в результате выделения из металла при кристаллизации растворимых в нем газов.

Цепочка пор – поры и (или) раковины, возникающие примерно по одной линии. Причиной их образования может быть выделение в процессе пайки газов, образующихся при испарении определенных компонентов припоев и флюсов.

Пора удлиненная – заполненная газом червеобразная полость. Образуется в результате недостаточного питания соединительного зазора припоем и усадочных явлений, происходящих при кристаллизации.

Пузырь-вздутие – большое газовое включение вблизи поверхности. Возникает из-за наличия влаги во флюсе и на заготовках припоя в виде адсорбированного локального слоя.

Твердотельное включение – дефект в виде поры внутри которой имеется металлический остаток.

Оксидное включение – полость, заполненная оксидами. Причины их появления связывают с химическими реакциями, протекающими в металле, со скоплениями окислов и влиянием окисной пленки.

Включение чужеродного металла – полости, заполненные чужеродным металлом.

Флюсовое и шлаковое включение – полости, заполненные флюсом или шлаком. Образуются вследствие небрежной подготовки поверхности соединяемых элементов изделия перед пайкой, а также при слишком длительном нагреве под пайку, когда флюс, реагируя с основным металлом, образует твердые остатки, которые плохо вытесняются припоем.

Непронат – несплошное заполнение зазора припоем. Возникает из-за неправильного температурного режима, недостаточного затекания припоя в зазор, в результате неправильной укладке перед пайкой или недостаточного его количества, включений флюса, плохой очистки поверхности основного металла, несоблюдения требуемого зазора.

Неспай – отсутствие в определенных местах спая между основным металлом и припоем. Причиной неспая может быть локальное несмачивание основного металла.

Подрез – дефект поверхности в зоне спая в виде углубления, расположенного по всей длине, или на отдельных участках зоны спая. Возникает из-за неправильной настройки аппаратуры и несоблюдения технологии пайки.

Наплыв пайки – дефект в виде напывшего на основной металл припоя, неспаивающегося с основным металлом. Причиной может быть небрежная пайка.

Проплавление – дефект в виде сквозной несплошности в основном металле. Может возникать из-за дефектов в основном металле или слишком большой выдержки при пайке.

Неполномерный шов – неполное заполнение соединения припоем. Возможной причиной образования может быть недостаточный нагрев при пайке или недостаточное количество припоя.

Брызги – прилипшие к поверхности паянного соединения капли припоя. (рисунок 4.156). Причиной возникновения является небрежная пайка.

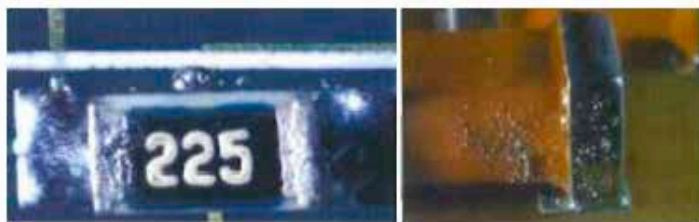


Рисунок 4.156 – Шарики, брызги припоя

Контроль качества паяных изделий

Методы контроля паяных изделий, браковочные признаки и нормы определяются назначением изделия и обусловлены техническими требованиями на их производство [17]. Метод контроля пайки выбирается в зависимости от требований к паяемому изделию. Чаще всего контроль ограни-

чивается внешним осмотром после очистки от флюса и окислов: паяный шов не должен иметь видимых непропаянных мест, наплывов припоя и черноты. Детали, от которых требуется герметичность шва, испытываются воздухом или жидкостью под давлением.

Выборочным контролем определяется степень пропайвания, для чего детали разогревают до размягчения припоя, разъединяют и устанавливают качество затекания припоя в шов. В некоторых случаях определяется структура паяных соединений или исследуются образцы, вырезанные из паяных деталей.

Для оценки качества паяных изделий применяются методы *разрушающего* и *неразрушающего* контроля [19].

При разрушающих методах контроля паяных изделий испытанию до разрушения подвергают: непосредственно изделие, образцы, вырезанные из взятого от партии изделия, или образцы, вырезанные из «свидетеля», т. е. паявшегося по той же технологии изделия, предназначенного для проведения испытаний. Для выявления механических свойств паяных соединений проводят испытания паяных образцов при различных способах нагружения: растяжении, сжатии, изгибе, кручении и др. Вид и требования разрушающих методов контроля определяются техническими условиями на паяное изделие.

При контроле паяных изделий *разрушающими методами* испытанию до разрушения подвергают: непосредственно изделие, образцы, вырезанные из взятого от партии изделия, или образцы, вырезанные из «свидетеля», т. е. паявшегося по той же технологии изделия, предназначенного для проведения испытаний. Для выявления механических свойств паяных соединений проводят испытания паяных образцов при различных способах нагружения: растяжении, сжатии, изгибе, кручении и др. Применение разрушающих методов контроля паяного изделия оговаривается техническими условиями на изделие.

Визуальный осмотр изделий невооруженным глазом или с применением оптики в сочетании с измерениями позволяет проверить качество поверхности, заполнение зазоров припоем, полноту галтелей, наличие трещин и других наружных дефектов [20, 21].

Паяные соединения контролируют УЗ с применением эхо-, теневого или низкочастотных методов, когда с помощью пайки изготавливают многослойные панели. Ультразвуковой метод применяют также для контроля процесса лужения. Для этого используют поверхностные волны. Участки поверхности, не соединившиеся с припоем, вызывают отражение УЗ-колебаний [22].

Для выявления непропаев паяных соединений и других неоднородностей объекта применяют рентгенотелевизионный метод [23]. В этом методе контроля не выявляют поры и включения диаметром поперечного сечения менее удвоенной абсолютной чувствительности контроля; непровары и

трещины, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением пучка излучения или с направлением строк телевизионного раstra; дефекты, изображения которых совпадают с изображением посторонних деталей, острых углов и резких перепадов толщин объекта контроля.

Выбор метода или комплекса методов контроля для обнаружения дефектов паяных соединений следует проводить в соответствии с требованиями, предъявляемыми к качеству паяных соединений стандартами, техническими условиями и чертежами, утвержденными в установленном порядке, и с учетом размеров фактически выявляемых дефектов и производительности методов контроля. Допускается использование других методов контроля качества паяных соединений при условии обеспечения чувствительности, гарантирующей выявление дефектов, недопустимых по требованиям НТД на данное изделие, утвержденной в установленном порядке.

В соответствии с требованиями технических условий паяные изделия подвергают контролю другими методами НК (см. разд. 8). Кроме этого при контроле паяных соединений используют НТД, регламентирующую контроль качества паяных соединений [24–29].

4.2.3 Дефекты клеевых соединений

Клеевое соединение получают с помощью клея – вязкого полимерного материала, обеспечивающего соединение деталей за счет адгезионной связи.

Прочность клеевого соединения обеспечивается адгезионной¹⁾ прочностью клея и соединяемых материалов, а также когезионной²⁾ прочностью самого клея. Адгезионную прочность количественно определяют работой, затрачиваемой на разделение тел в расчете на единицу площади. Силы, действующие между молекулами, находящимися в разных фазах, называют силами адгезии, а внутри фазы – силами когезии.

Клейку, так же как и пайку, часто выполняют с предварительным нанесением клея на очищенные соединяемые поверхности, но обычно в отличие от полуды клей не доводят до полного твердения (высыхания). После этого наносят дополнительный слой клея (иногда этого не делают) и сдавливают поверхности при повышенной или комнатной температуре. Давление сохраняют до затвердевания клея [30].

Клеевые соединения применяют для соединения деталей из металла и неметаллических материалов.

¹⁾ *Адгезия* (от лат. *adhaesio* – прилипание, сцепление, притяжение) – связь между разнородными конденсированными телами при их молекулярном контакте (Большая российская энциклопедия. Т. 1., М., 2005, С. 219).

²⁾ *Когезия* (от лат. *cohaesus* – связанный, сцепленный) – сцепление частиц вещества (молекул, атомов или ионов), составляющих одну конденсированную фазу (Большая российская энциклопедия. Т. 14., М., 2009, С. 393).

Достоинства клеевых соединений:

- 1) возможность соединения разнородных материалов;
- 2) герметичность;
- 3) стойкость против коррозии;
- 4) возможность соединения очень тонких листовых деталей;
- 5) весьма малая концентрация напряжений.

Недостатки клеевых соединений:

- 1) сравнительно невысокая прочность;
- 2) низкая прочность на сдвиг;
- 3) склонность к ползучести при длительном воздействии больших статических нагрузок;
- 4) низкая тепловая стойкость (при температуре выше $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ прочность их резко снижается);
- 5) длительные сроки сушки;
- 6) необходимость нагрева для получения стойких и герметичных соединений.

Факторы, влияющие на прочность клеевых соединений:

- 1) характер нагрузок;
- 2) конструкция соединения;
- 3) марка клея;
- 4) технология склеивания и время (с течением времени прочность некоторых клеев уменьшается).

Для склеивания различных материалов применяется большое количество марок клеев, отличающихся физико-механическими и технологическими свойствами (клеи БФ, ВК-1, ВК-2, МПФ-1 и др.) [31].

Прочность клеевого соединения в значительной степени зависит от толщины слоя клея. Рекомендуемые значения составляют 0,05–0,15 мм. Толщина слоя клея зависит от его вязкости и давления склеивания [32].

Клеевые соединения лучше работают на сдвиг, хуже – на обрыв. Поэтому предпочтительны нахлесточные соединения. Расчет на прочность клеевых соединений производят на сдвиг методами сопротивления материалов. Для соединений, полученных клеями основных марок, принимают допускаемое напряжение на сдвиг $\tau_c = 15 \dots 20\text{ Н/мм}^2$ [33, 34].

Надежное соединение деталей малой толщины, как правило, возможно только склеиванием. Клеевые соединения осуществляют различными способами: внахлестку и встык с помощью планки, втулки и т. п.

В настоящее время наибольшее применение в машиностроении получили клеевые соединения внахлестку, работающие на сдвиг. На рисунке 4.157 показаны наиболее распространенные клеевые соединения.

Все дефекты клеевых соединений получаются в результате несоблюдения технологического процесса склеивания.

Различают следующие дефекты клеевых соединений.

1 *Слабое сцепление*. Этот дефект является скрытым и поэтому наиболее опасным, т. к. снижает прочность соединения. Он получается в результате:

- а) склеивания замасленных или загрязненных поверхностей, снижающих адгезию;
- б) применения некачественного клея;
- в) несоблюдения технологических режимов склеивания.

2 *Местные непроклеи*. Эти дефекты встречаются при склеивании изделий сложной конфигурации и возникают в следствие:

- а) плохой пригонки склеиваемых поверхностей;
- б) недостаточного давления при склеивании;
- в) высокой вязкости клея;
- г) нанесения слишком толстого слоя клея.

3 *Пористая клеевая прослойка*. Этот вид дефекта дает значительное снижение прочности при сдвиге. Он возникает в результате:

- а) большого количества растворителя в клеевой прослойке, вызывающего вспенивание клея;
- б) недостаточного давления при склеивании;
- в) плохой пригонки соединяемых поверхностей.

4 *Расплавление и трещины*. Эти дефекты чаще всего наблюдаются в клеевых соединениях как в результате больших внутренних напряжений, возникающих в следствие высокого давления, так и при слабом сцеплении.

5 *Голодное клеевое соединение* получается при чрезмерно высоком давлении или нанесении слишком тонкого слоя клея.

Основным типом дефекта клеевого соединения является *непроклей*, возникающий в результате недоброкачественной очистки склеиваемых поверхностей или нарушения режима склейки. Для его выявления применяют те же методы, что и при контроле паяных соединений. Один из неразрушающих методов проверки прочности клеевого соединения на адгезионную, а также на когезионную прочность основан на применении резонансного УЗ-способа. Резонансная частота колебаний УЗ-преобразователя, прижатого к поверхности ОК, зависит от акустических (коррелирующих с прочностными) свойств клеевого соединения.

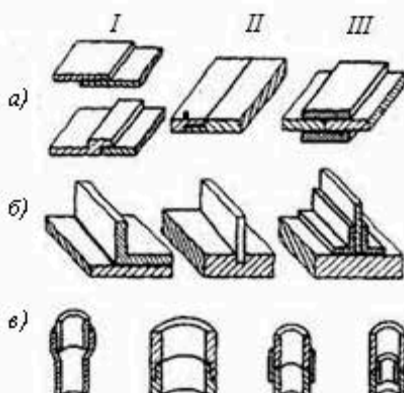


Рисунок 4.157 – Рекомендуемые конструктивные формы клеевых соединений: а – плоскостные; б – тавровые; в – цилиндрические: I – нахлесточные, II – врезные (шпунтовые); III – стыковые

Контрольные вопросы

Подраздел 4.1

1 Перечислите основные операции, входящие в технологический цикл изготовления металлических изделий.

2 На какие группы можно классифицировать дефекты металлов?

3 Изложите сущность процесса литья, дайте определение понятиям «изложница», «литьевая форма», «слиток», «отливка».

4 На какие группы по степени пораженности дефектами подразделяют отливки?

5 На какие группы подразделяют дефекты отливок из чугуна и стали согласно ГОСТ 19200–80?

6 Перечислите основные дефекты группы «Несоответствия по геометрии».

7 Перечислите основные дефекты группы «Дефекты поверхности».

8 Перечислите основные дефекты группы «Несплошности в теле отливки».

9 Перечислите основные дефекты группы «Включения».

10 Перечислите основные дефекты группы «Несоответствие по структуре».

11 Изложите сущность процесса обработки давлением. Дайте определения понятиям «прокатка», «волочение», «прессование», «ковка», «штамповка».

12 На какие группы подразделяют дефекты прокатанного и кованого металла согласно ГОСТ 21014–88?

13 Перечислите дефекты, возникающие при термической и механической обработке.

Пункт 4.2.1

1 Перечислите способы соединения деталей.

2 Опишите схему зон сварного соединения, особенности структуры металла.

3 Какие виды сварки вы знаете? Дайте им характеристику.

4 Перечислите общие и специфические дефекты, возникающие при сварке плавлением и давлением.

5 Дайте классификацию дефектов сварных соединений в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6520–1–2012.

6 Дайте определение основным терминам, используемым при контроле сварных соединений.

Пункт 4.2.2

1 Дайте определение пайке. Перечислите основные технологические операции пайки.

2 Назовите типичные дефекты пайки и перечислите причины появления дефектов в паяном соединении.

3 Дайте классификацию дефектов пайки (паяных соединений).

4 Какие методы используют для контроля паяных соединений?

Пункт 4.2.3

1 Дайте определение клеевому соединению.

2 Опишите технологию склеивания материалов.

3 Дайте определение адгезии и когезии.

4 Перечислите достоинства и недостатки клеевых соединений.

5 Перечислите факторы, влияющие на прочность клеевых соединений.

6 Назовите основные конструктивные формы клеевых соединений.

7 Охарактеризуйте основные дефекты клеевых соединений.

5 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ

Воздействие эксплуатационных факторов связано с режимом хранения или активной эксплуатацией. В устройствах, подвергающихся длительному хранению перед активной эксплуатацией, постепенное изменение свойств и характеристик элементов при хранении может иметь доминирующее значение, особенно для элементов, чувствительных к влиянию таких внешних факторов, как влажность, атмосферное давление, облучение, состав и загрязнение атмосферы, окружающая температура. Влияние факторов, действующих при активной эксплуатации, зависит от режима эксплуатации, от того, является ли этот режим непрерывным, циклическим, случайным повторно-прерывистым или одноразовым, установившимся или переходным.

Разрушение объектов при эксплуатации может произойти под действием чрезмерных внешних нагрузок. Нагрузка может быть *кратковременной* (в том числе ударной), *длительной* и *многократно прилагаемой*.

Длительная статическая нагрузка может привести к разрушению объекта даже в тех случаях, когда такая же кратковременная нагрузка для него не опасна. Под действием длительной нагрузки происходит медленная деформация объекта, постепенно ослабляющая его прочность. Это явление называют *ползучестью*. Оно особенно часто проявляется при эксплуатации объектов из пластмасс, композитов, но существует также и для металлических деталей, особенно при повышенной температуре [35].

Допустимые многократно прилагаемые (циклические) нагрузки значительно меньше допустимых статических.

Разрушение под действием внешних нагрузок (особенно циклических) начинается в местах, где расположены концентраторы напряжений. Ими являются элементы конструкции (утонение, надпил, отверстие), а также дефекты типа несплошностей. Чем резче профиль утонения (например, меньше радиус отверстия), тем больше концентрация напряжений вблизи них. По этой причине дефекты плоскостного характера типа *несплоstin*, *закатов* и особенно *трещин* гораздо опаснее округлых дефектов типа *раковин* и *шлаковых включений*.

Для предотвращения катастрофического разрушения ответственные объекты периодически подвергают контролю, проводят плановые ремонты. Обычно в процессе эксплуатации применяют визуальный осмотр, контроль

капиллярными, магнитными и вихретоковыми методами для выявления поверхностных дефектов.

Внутренние трещины любого происхождения обнаруживают УЗ-методом (обычно эхо-метод). Утонения труб, сосудов под действием коррозии (в том числе локальной) определяют с помощью УЗ-толщиномеров.

Трещины-надрывы в поверхностном слое металла образуются в результате высоких одноразово приложенных напряжений (растяжение, изгиб, кручение), когда нагрузка превышает прочность детали, например, при нарушении технологии правки детали, демонтаже или монтаже детали с хрупким поверхностным слоем или при перегрузке детали в эксплуатации (работа в нерасчетном режиме).

Трещины усталости (усталостные трещины) являются наиболее распространенными эксплуатационными дефектами в деталях машин и механизмов и одними из самых опасных (рисунок 5.1). Основная причина усталостных разрушений деталей – действие высоких переменных напряжений.

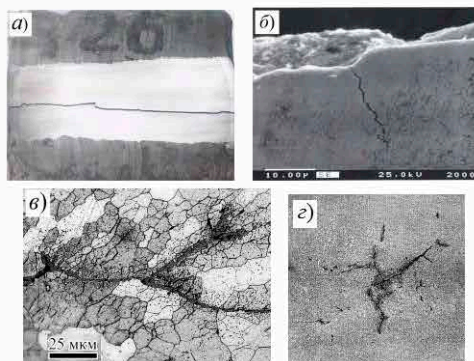


Рисунок 5.1 – Дефекты, образовавшиеся в результате действия механических напряжений:

а – трещина-расслоение; *б* – усталостная трещина; *в* – трещина в железе, образовавшаяся при горячей деформации сжатием; *г* – внутренний разрыв от деформации

Усталостные трещины возникают в местах концентрации напряжений: по галтелям, в местах с резкими переходами сечений и наличием подрезов, у основания резьбы и зубьев шестерен, в углах шпоночных канавок, у отверстий для смазки или в местах других конструктивных или технологических концентраторов напряжений. Усталостные трещины появляются также в местах дефектов металлургического и технологического происхождения или следов грубой механической обработки поверхности (глубоких рисок, следов резца и т. п.).

Усталостные трещины, как правило, развиваются в поперечном или в наклонном направлении.

Трещины усталости различают по внешнему виду. Чаще всего они бывают двух типов:

- поперечные, или кольцевые, развивающиеся на цилиндрических деталях по окружности в сечении, перпендикулярном к оси детали;
- расположенные под углом к оси детали.

В зоне усталостного разрушения отсутствуют какие-либо признаки пластической деформации даже у самых пластичных материалов. Ширина раскрытия усталостной трещины у выхода ее на поверхность в начальной стадии разрушения не превышает нескольких микрон.

Контактное усталостное выкрашивание (питтинг) с последующим развитием усталостного разрушения по сечению деталей (рисунок 5.2) наблюдается в таких деталях, как подшипники качения и скольжения, на зубьях шестерен, замковых соединениях и пр.

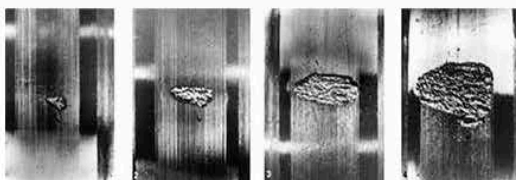


Рисунок 5.2 – Стадии разрушения поверхности роликового подшипника вследствие контактной усталости

Трещины ползучести. Разрушение деталей после пластического течения их материала под воздействием постоянного напряжения при относительно высоких температурах называется разрушением от ползучести.

Для ползучести является характерным множественное трещинообразование. Большое влияние на характер разрушения оказывает размер зёрен и их разновидность. Для материала с разнородным зерном характерно межзёрненное разрушение в области малых зёрен и внутризёрненное – по более крупным (рисунок 5.3).

Разрушение при ползучести начинается с появления пор и клиновидных трещин на границе зёрен, которые растут, объединяются, образуя макро-трещины.



Рисунок 5.3 – Форма пор ползучести (а) (обозначены стрелками, $\times 3500$) и трещины ползучести (б) ($\times 25000$) в сварном соединении

Трещины термической усталости (рисунок 5.4, а). Разрушение деталей после многократного воздействия периодически изменяющегося во времени уровня термических напряжений представляет собой явление термической усталости. Для этого вида разрушения характерно множественное возникновение трещин, что объясняется локальностью действия термических напряжений и относительно быстрой их релаксацией. Характерными для термоусталости являются трещины с широкими полостями и тупыми окончаниями – трещины «разгара».

Стенки большинства трещин интенсивно окислены. Трещины термоусталости могут иметь местные уширения, когда они пересекают границы зёрен, неблагоприятно ориентированные для развития по ним трещин.

Трещины химической усталости (коррозионно-усталостные) (рисунок 5.4, б). Разрушение материала в результате действия повторно приложенных нагрузок и коррозионной среды называют коррозионно-усталостным разрушением. Коррозионно-усталостные трещины – это в большинстве случаев многочисленные трещины, разветвляющиеся по мере роста и заканчивающиеся пучками, напоминающими корневую систему растений [1].



Рисунок 5.4 – Дефекты, образовавшиеся в результате термических воздействий: трещины термической (а), химической (б) усталости; растрескивание под действием термических напряжений (в)

Растрескивание под действием термических напряжений происходит только вследствие теплового градиента, без приложения внешней механической нагрузки. Причиной возникновения трещин при этом является образование локальных полей напряжений. Возможно растрескивание под действием внутренних напряжений.

Кавитационное изнашивание. Кавитация означает образование полости на поверхности твердого тела при разрушении газообразных пузырьков (рисунок 5.5, а). Лопающиеся пузырьки производят разрушения в слое металла на границе с жидкостью. Усталостная кавитация наблюдается, когда колеблющаяся поверхность граничит с жидкостью (например, в циклически нагружаемых подшипниках скольжения).

Водородное охрупчивание (разрушение под влиянием водорода). Под влиянием растворенного водорода металлы могут настолько охрупчиваться, что уже при приложении малого растягивающего напряжения образуются трещины (рисунок 5.5, б, в).

Источниками поступления водорода могут быть явиться термическая диссоциация воды при металлургических процессах (литье, сварка), диссоциация газов, коррозия, гальванические процессы и т. п.

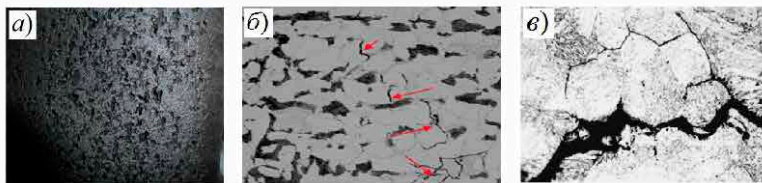


Рисунок 5.5 – Дефекты, возникающие при кавитационном изнашивании (а) и водородном охрупчивании (б, в)

Коррозионные процессы отличаются широким распространением и разнообразием условий и сред, в которых она протекает. Поэтому нет единой и всеобъемлющей классификации встречающихся случаев коррозии.

Наибольшие потери металла происходят из-за *атмосферной коррозии*¹⁾ Она может быть поверхностной, может распространяться в глубь металла.

Межкристаллитная коррозия является одной из наиболее опасных разновидностей местной коррозии и вызывает избирательное разрушение по границам зёрен, в результате которого теряется прочность и пластичность металла и всей металлической конструкции (рисунок 5.6, а).

Язвенная коррозия характеризуется появлением на поверхности конструкции отдельных или множественных повреждений, глубина и поперечные размеры которых (от долей миллиметра до нескольких миллиметров) соизмеримы (рисунок 5.6, б).

Коррозионное растрескивание – особенно опасный вид коррозионного разрушения, происходящий при одновременном воздействии статических растягивающих напряжений (внешних или внутренних) и коррозионной среды. При этом наблюдается хрупкое разрушение, которое направлено перпендикулярно действию растягивающих напряжений.

Специфическим видом разрушения является *коррозионное растрескивание под напряжением* (стресс-коррозия) (рисунок 5.6, в). Это один из видов коррозионного разрушения, при котором в металле зарождается и развивается множество трещин. Возникает стресс-коррозия при одновременном воздействии на металл агрессивной коррозионной среды и статических или циклических растягивающих напряжений.

Коррозионному растрескиванию могут подвергаться все металлы и сплавы, которые находятся в напряженном состоянии. Большое влияние на

¹⁾ Коррозия (от лат. *corrosio* – разъедание) – самопроизвольное разрушение металлов в результате химического или физико-химического взаимодействия с окружающей средой.

интенсивность коррозионного растрескивания оказывает коррозионная среда (ее характер, состав и концентрация агрессивных компонентов).

Большую опасность представляет *фреттинг-коррозия*, возникающая на контактирующих металлических поверхностях при относительных колебательных перемещениях малой амплитуды (рисунок 5.6, *з*).

Питтинговая коррозия (англ. *pitting, pit* – покрывать(ся) ямками) – коррозия металлов, ведущая к образованию язв, полостей в металле, начинающихся с его поверхности и распространяющихся внутри материала.

Питтинговая, или точечная, коррозия – это вид локального поражения поверхности металлов, который может инициировать процессы коррозионного растрескивания и коррозионной усталости (рисунок 5.6, *д*).

Этот тип коррозии считается одним из самых опасных, потому что, в отличие от общей коррозии, он плохо виден невооруженным глазом на поверхности материала.

Коррозионные повреждения различного вида встречаются на разных деталях. Степень коррозионного повреждения зависит от наличия агрессивных сред, качества защитных покрытий, неблагоприятного сочетания материалов деталей в узле и др. В эксплуатации коррозией часто поражаются закрытые, внутренние полости, труднодоступные для осмотра.

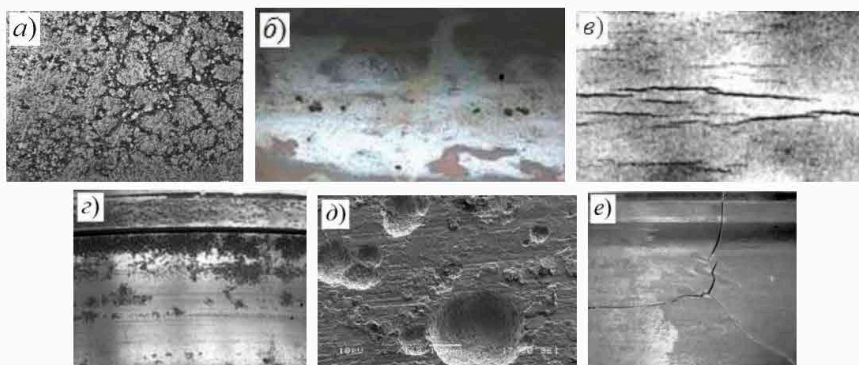


Рисунок 5.6 – Дефекты, связанные с коррозионными процессами и механическим воздействием:

а – межкристаллитная коррозия; *б* – язвенная коррозия; *в* – коррозионное растрескивание под напряжением; *з* – фреттинг-коррозия; *д* – питтинговая коррозия;
е – механические повреждения поверхности

Процесс развития коррозионного разрушения состоит из трех стадий:

1) медленное развитие трещин, когда процесс в основном определяется коррозионным фактором;

2) скачкообразное, относительно быстрое развитие трещин при увеличивающемся влиянии механического фактора;

3) лавинообразное разрушение (долом). Особенностью трещин при коррозионном растрескивании является их сильная разветвленность.

При хранении, транспортировке и монтаже изделие может получить *механические повреждения*: забоины, вмятины, надирь, риски, местный наклеп (см. рисунок 5.6, е). Их причины могут быть разнообразными.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите и охарактеризуйте основные эксплуатационные дефекты.
- 2 Что такое концентраторы напряжений и как они влияют на разрушение?
- 3 Что такое ползучесть?
- 4 Назовите причины появления и особенности развития усталостных трещин.
- 5 Что такое трещины термической и химической усталости?
- 6 Дайте определение кавитационного растрескивания.
- 7 Дайте определение водородного охрупчивания.
- 8 Перечислите основные виды коррозионного разрушения.
- 9 Опишите процесс коррозионного разрушения.

6 ДЕФЕКТЫ РЕЛЬСОВ

6.1 Общие вопросы. Термины и определения

В рельсах в процессе эксплуатации по мере наработки тоннажа, измеряемого в млн т брутто, происходят процессы износа, смятия, коррозии и усталости, в том числе контактной, изгибной и коррозионной усталости. В результате протекания этих процессов в рельсах образуются различные повреждения и дефекты.

Дефект рельса характеризуется отклонениями от установленных норм его геометрических параметров или прочности, соблюдение которых обеспечивает работоспособное состояние рельса в установленных условиях эксплуатации. К дефектам рельсов относятся: выкрашивания, выколы, трещины, изломы, все виды износа, пластические деформации в виде смятия, сплывов металла головки рельса, коррозия, механические повреждения, величины которых превышают нормированные значения.

Отказ рельса вызывается дефектом, при котором исключается пропуск поездов (полный отказ, например, при изломе рельса) или возникает необходимость в ограничении скоростей движения поездов (частичный отказ, например, образование волнообразных неровностей сверх нормируемых значений на поверхности катания головки рельса и т. п.).

Для правильного определения кода дефектов в рельсах, основной причины их появления и развития, а также для принятия мер по безопасной эксплуатации рельсов, для статистического учета поврежденных рельсов, анализа уровня эксплуатационной стойкости и надежности рельсов разработаны классификация и каталог дефектов рельсов [36].

Все дефекты в зависимости от их типа, расположения по сечению рельса, основных причин их происхождения и места расположения по длине рельса имеют свой цифровой код. Объясняется структура кодового цифрового обозначения дефектов рельсов, дается подробное описание каждого дефекта и приводятся его фотографии, способы выявления и указания по эксплуатации дефектных рельсов, определяется степень опасности конкретных дефектов рельсов для движения поездов.

Поврежденные рельсы в зависимости от степени опасности дефектов подразделяются на два вида: остродефектные (ОДР) и дефектные (ДР).

К остродефектным рельсам относятся рельсы с изломами, выколами и трещинами, которые могут привести к внезапным разрушениям. Остродефектные рельсы непосредственно угрожают безопасности движения поездов из-за непредсказуемости последствий разрушений рельсов и поэтому требуют изъятия их из пути после обнаружения дефекта без промедления в соответствии с установленным порядком.

Дефектные рельсы, как правило, не препятствуют пропуску поездов, но при достижении определенных параметров дефектов требуют ограничения скоростей движения поездов. В связи с возможностью визуального наблюдения за развитием этих дефектов изменение их размеров в большинстве случаев можно прогнозировать.

В зависимости от категории пути, типа и степени развития дефектов на поверхности катания головки, на шейке или подошве для дефектных рельсов устанавливается соответствующий порядок их изъятия из пути от замены в плановом порядке до замены в первоочередном порядке.

По дефектным рельсам на срок до устранения дефекта или замены дефектных рельсов при достижении определённых параметров дефектов устанавливаются ограничения скорости движения поездов с учетом конкретных условий состояния пути.

Все остродефектные рельсы, внутренние дефекты в которых обнаружены при дефектоскопировании, после изъятия из пути должны подвергаться обязательному вскрытию для подтверждения кода дефекта. Долом рельсов для вскрытия дефектов должен производиться средствами дистанций пути. При анализе вскрытых дефектов должно быть обращено внимание на источник (фокус) зарождения дефекта, на его место расположения и ориентацию в рельсе, на характер развития дефекта. Работник дистанции пути с помощью цифровой техники фиксирует вид излома рельса.

Результаты вскрытия остродефектного рельса фиксируются в специальном журнале и передаются вместе с цифровыми фотографиями для анализа в соответствующие подразделения Службы путевого хозяйства.

В настоящем разделе используются термины с соответствующими определениями из стандартов [37–40], нормативно-технической документации и технической литературы.

Повреждение рельса – появление неисправности при сохранении работоспособного состояния, обеспечивающего безопасный пропуск поездов с установленной скоростью.

Разрушение рельса – процесс зарождения и развития в рельсе трещин, приводящий к разделению рельса на части.

Трещина – двумерная несплошность в рельсе, два размера которой (длина и ширина) существенно больше третьего (толщины). На начальной

стадии развития трещины не приводят к отделению разделенных трещиной частей рельса.

Выкрашивание – поверхностное разрушение рельса в местах контакта с колесами, выражающееся в образовании поверхностных или подповерхностных трещин контактной усталости, развитие которых приводит к отслаиванию и отделению частиц металла.

Излом рельса – термин используется для определения:

1) факта разрушения рельса по всему сечению или с отделением части головки или части головки и шейки рельса;

2) поверхности разрушения полностью разрушенного на два или более куска рельса.

Примечание – Образование поверхности разрушения происходит либо в результате развития одной или нескольких трещин, либо в результате слияния расположенных рядом трещин в одну магистральную трещину, по которой и происходит разрушение рельса.

Фокус трещины – очаг разрушения, зона на изломе, откуда началось разрушение.

Долом – зона на изломе, соответствующая конечной стадии разрушения, четко отделяется от зоны усталостного развития трещины.

Выкол головки – отделение головки рельса при сохранении целостности шейки и подошвы.

Выкол подошвы – отделение части подошвы рельса при сохранении поверхности катания.

Износ – результат процесса отделения мелких частиц металла с поверхности рельса при взаимодействии с колёсами подвижного состава или с элементами креплений, проявляющийся в постепенном изменении размеров и формы рельса.

Смятие – результат процесса поверхностной пластической деформации рельса при взаимодействии с колёсами подвижного состава, проявляющийся в постепенном изменении формы и размеров рельса.

Остродефектный рельс (ОДР) – рельс с дефектом, представляющий прямую угрозу безопасности движения из-за возможного разрушения под поездом или схода колёс с рельса. После обнаружения дефекта остродефектный рельс подлежит изъятию из пути (замене) без промедления или требует принятия специальных мер для пропуска поездов до его замены с учетом рекомендаций настоящей инструкции.

Дефектный рельс (ДР) – рельс, у которого в процессе эксплуатации происходит постепенное снижение служебных свойств ниже нормативного уровня, но по которому еще обеспечивается безопасный пропуск поездов, хотя в ряде случаев уже требуется введение ограничения скоростей движе-

ния. Такие рельсы заменяются в установленном порядке. Режим их эксплуатации до момента устранения дефектов или изъятия назначают в зависимости от конкретных условий с учетом существующих нормативов.

Контроленепригодный рельс – рельс, на поверхности которого при дефектоскопировании не обеспечивается акустический контакт из-за наличия выкрашиваний или трещин и/или наблюдается срабатывание индикации дефектоскопа при минимальной допустимой чувствительности (определенной нормативной документацией на контроль) из-за наличия рябизны или отпечатков либо сильной коррозии.

Фрагмент – часть разрушившегося рельса, образовавшаяся при ветвлении трещин и разрушении рельса на три и более части.

Проба – часть разрушенного рельса, которая вырезается из него для передачи на исследование.

Отказ рельса – состояние неисправности с последующим скоростным ограничением.

Излом – разрушение рельса в продольном или поперечном направлении, при котором его дальнейшая эксплуатация невозможна.

Первоочередная замена рельсов – замена рельсов в течение 14 суток. В случае невыполнения работ по замене дефектного рельса в указанный срок скорость движения поездов ограничивается до 40 км/ч.

6.2 Структура обозначения дефектов рельсов

Все дефекты рельсов в классификации кодированы трехзначным числом. Использована следующая структура кодового обозначения:

- первая цифра кода определяет группу дефектов по месту появления дефекта по элементам сечения рельса (головка, шейка, подошва, всё сечение);
- вторая цифра определяет тип дефекта рельсов с учетом основной причины его зарождения и развития;
- третья цифра указывает на место расположения дефекта по длине рельса.

Первые две цифры кода дефектов рельсов отделяются от третьей цифры точкой.

Группа дефектов и место их появления по элементам сечения рельса (головка, шейка, подошва, все сечение) определяется следующими цифрами (первый знак):

- 1 – трещины и выкрашивания металла на поверхности катания головки рельса;
- 2 – поперечные трещины в головке рельса;
- 3 – продольные трещины в головке рельса и в зоне перехода головки в шейку в стыке;

4 – пластические деформации (смятие), вертикальный, боковой и неравномерный износ головки рельса (длинные волны и короткие волны – *рифли* (от англ. *riffle* – желобок, канавка) – острые бороздки на какой-либо поверхности (также от нем. *schienenriffel* – волнообразные неровности на головке рельса));

5 – дефекты и повреждения шейки рельса;

6 – дефекты и повреждения подошвы рельса;

7 – изломы рельса по всему сечению;

8 – изгибы рельса в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

9 – прочие дефекты и повреждения рельса, включая коррозию подошвы и шейки, а также лишние отверстия в зоне накладок и вдавленная маркировка в зоне стыка.

Тип дефекта рельсов, определяемый основной причиной его зарождения и развития (второй знак), обозначается следующими цифрами:

0 – дефекты, связанные с нарушениями технологии изготовления рельсов;

1 – дефекты, зависящие от недостаточно высокого металлургического качества рельсовой стали (например, от местных скоплений неметаллических включений, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек) и недостаточной прочности рельсового металла, приведшие к отказам рельсов после пропуска гарантийного тоннажа (после окончания срока гарантии);

2 – дефекты, зависящие от недостаточно высокого металлургического качества рельсовой стали (например, от местных скоплений неметаллических включений, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек) и недостаточной прочности рельсового металла, приведшие к отказам рельсов до пропуска гарантийного тоннажа (в пределах срока гарантии);

3 – дефекты в зоне болтовых стыков, связанные с повышенным динамическим воздействием колёс на путь, с нарушением требований инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути, с нарушениями технологии обработки болтовых отверстий и торцов рельсов металлургическими комбинатами, линейными подразделениями и промышленными предприятиями путевого хозяйства дорог;

4 – дефекты, связанные с ненормативным специфическим воздействием подвижного состава на рельсы и условиями эксплуатации рельсов (боксование, юз, ползуны и др.), в том числе из-за нарушения режимов вождения поездов, из-за недостатков подвижного состава, из-за нарушений норм текущего содержания пути;

5 – дефекты в зоне сварных стыков, связанные с недостатками и нарушениями технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, приведшие к отказам рельсов после пропуска гарантийного тоннажа;

6 – дефекты рельсов, полученные в результате ненормативных механических воздействий на рельсы (удар инструментом, рельса о рельс и т. п.);

7 – дефекты в зоне сварных стыков, связанные с недостатками и нарушениями технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, приведшие к отказам рельсов до пропуска гарантийного тоннажа;

8 – дефекты, связанные с недостатками и нарушениями технологии наплавки рельсов, приварки рельсовых соединителей и другие дефекты;

9 – дефекты, вызванные коррозионной усталостью, контроленепригодностью рельсов, и изломы без усталостных трещин.

Примечание – Появление дефекта рельса часто бывает следствием нескольких причин. Так, недостатки в содержании пути ускоряют развитие заводских дефектов. В связи с этим при определении типа дефекта должна быть выявлена основная причина, с которой связано его появление и развитие.

Цифровое обозначение места расположения дефекта (третья цифра в коде дефекта) принято следующим:

0 – по всей длине рельса;

1 – в болтовом стыке на расстоянии 750 мм и менее от торца рельса;

2 – вне болтового стыка на расстоянии >750 мм от торца рельса;

3 – в сварном стыке, полученном электроконтактной сваркой;

4 – в сварном стыке, полученном алюминотермитной сваркой.

Примечания

1 Для сварного стыка, полученного электроконтактной сваркой рельсов после 2000 г., зона стыка определяется на расстоянии 120 мм симметрично по 60 мм в обе стороны от оси сварного шва с учётом толщины сварного шва и зон термического влияния от сварки и термообработки после сварки, а зона разрушения сварных рельсов из-за поджогов в подошве определяется на расстоянии 700 мм симметрично по 350 мм в обе стороны от оси сварного шва расположением прижимных электродов губок контактной сварочной машины.

2 Для сварного стыка, полученного алюминотермитной сваркой, зона стыка определяется на расстоянии 120 мм симметрично по 60 мм в обе стороны от оси сварного шва с учётом толщины сварного шва и зон термического влияния от сварки.

3 Буква «Н», стоящая после цифрового кода дефекта, указывает, что дефект взят в накладки.

4 В случае необходимости отнесения дефекта к двум и более кодам допускается их обозначение с помощью двух и более кодов через знак дроби. Например, излом рельса, который произошел из-за образования поперечной трещины контактной усталости, обозначается как 71.2/21.2, а излом рельса, который произошел из-за образования продольной трещины в головке, – как 71.2/31.2.

Структура классификации дефектов приведена в таблице 6.1 [36]. Для правильного определения дефектов в таблице 6.1 приведены в скобках прежние обозначения дефектов по НТД/ЦП-1–93 [41], если их обозначение изменилось, и выделены обозначения новых дефектов.

Таблица 6.1 – Структура классификации дефектов

Элемент профиля	Номер группы	Тип дефекта (основная причина образования). Наименование группы дефектов	Нарушения технологии изготовления рельсов	Недостаточная прочность (после пропусков гарантийного тоннажа)	Недостаточная прочность, (до пропуска гарантийного тоннажа)	Дефекты в зоне болтовых стыков	Ненормативные условия эксплуатации рельсов	Ненормативное механическое воздействие на рельсы	Дефекты в зоне сварных стыков (после пропуска гарантийного тоннажа)	Дефекты в зоне сварных стыков (до пропуска гарантийного тоннажа)	Другие дефекты	Контрольные-пригодность, коррозионная усталость, изломы без усталостных трещин
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Головка	1	Трещины и выкрашивания на поверхности	10.1-2	11.1-2	12.1-2**	13.1* (17.1)	14.1-2		16.3-4**	17.3-4**	18.1-2	19.0-1-2**
	2	Поперечные трещины	20.1-2	21.1-2	22.1-2**		24.1-2	25.1-2	26.3-4	27.3-4**		
	3	Продольные трещины в головке и в зоне перехода головки в шейку	30.1-2 (30Г.1-2)	31.1-2 (30В.1-2)		33.1* (52.1)					38.1	
	4	Износ и смятие	40.0 (40+49)	41.0, 2 (41.2+43)		43.1* (41.1+47.1)	44.0		46.3-4	47.3-4**		
Шейка	5	Дефекты в шейке	50.1-2			53.1		55.1-2 (55+52.2+53.2)	56.3-4	57.3-4**		
Подошва	6	Дефекты в подошве	60.1-2* (60.1-2 +62.1-2)				64.1-2**	65.1-2	66.3-4	67.3-4**		69.1-2
Все сечение	7	Изломы	70.1-2/20.1-2, 70.1-2/60.1-2	71.1-2/21.1-2, 71.1-2/31.1-2	72.1-2/22.1-2	73.1/33.1, 73.1/53.1	74.1-2/24.1-2, 74.1-2/64.1-2	75.1-2/25.1-2, 75.1-2/55.1-2, 75.1-2/65.1-2	76.3-4/26.3-4, 76.3-4/56.3-4, 76.3-4/66.3-4	77.3-4/27.3-4,** 77.3-4/57.3-4, 77.3-4/67.3-4		79.1-2/69.1-2
Все сечение	8	Изгибы						85.1-2	86.3-4			
Любой	9	Прочие									98.0, 1, 2, 3, 4**	99.1, 2, 3, 4

* Смена кода дефекта (в скобках указан старый код дефекта по НТД/ЦП-1-93.
** Новый дефект

6.3 Классификация и каталог дефектов рельсов

Трещины и выкрашивания металла на поверхности катания головки из-за нарушений технологии изготовления рельсов (закатов, волосовин, плен) (рисунок 6.1).*

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировочное обозначение):

- в стыке (10.1);
- вне стыка (10.2).



Рисунок 6.1 – Схематическое изображение дефекта 10.1-2 (а) и его вид (б, в)

Причины появления и развития.

На ранних стадиях эксплуатации до пропуска тоннажа $\approx 150\text{--}250$ млн т брутто трещины и выкрашивания на поверхности катания образуются из-за наличия в этих местах поверхностных дефектов металлургического происхождения (волосовин, закатов, плен, участков бейнита в структуре и др.).

На поздних стадиях эксплуатации после пропуска $>150\text{--}250$ млн т брутто трещины и выкрашивания на поверхности катания образуются в результате многократного воздействия высоких контактных напряжений.

К дефектам 10.1-2 следует относить продольные горизонтальные трещины с глубиной расположения до 8,0 мм.

Способы выявления.

Внешний осмотр, контроль линейных размеров измерительными приборами (линейка, штангенциркуль с глубиномером, универсальный шаблон модели 00316 и др.), УЗ-дефектоскопирование в пределах ± 300 мм от предполагаемого дефектного сечения.

При УЗ-дефектоскопировании необходимо убедиться в отсутствии под выкрашиванием или под горизонтальной трещиной поперечной трещины.

Указания по эксплуатации.

Для скоростей движения 140 км/ч и менее рельсы, имеющие дефекты 10 глубиной $h > 2,0$ мм при длине l (вдоль рельса) $> 25,0$ мм и ширине a (поперек рельса) $< 35,0$ мм («узкие»), а также глубиной $h > 1,0$ мм при длине l (вдоль рельса) $> 25,0$ мм и ширине a (поперек рельса) ≥ 35 мм («широкие») и,

* Представленные в данном разделе фотографии дефектов (рисунки 6.1–6.41) взяты с сайта «Трудовой десант» [36].

кроме того, глубиной $>6,0$ мм (до $8,0$ мм) при длине $<25,0$ мм («короткие»), считают дефектными.

С целью отдаления начала образования дефекта 10 и уменьшения его глубины, длины и ширины должна производиться периодическая шлифовка головки рельсов начиная с первой шлифовки сразу же после укладки в путь новых рельсов.

После проведения шлифовки улучшаются условия дефектоскопирования рельсов, снижается вероятность образования внутренних дефектов в головке, в частности, поперечных трещин, развивающихся под прикрытием дефекта 10.

До устранения дефекта шлифовкой, или наплавкой, или (при невозможности или нецелесообразности их выполнения) до замены дефектного рельса должна быть ограничена скорость движения по нему в зависимости от глубины дефекта h :

- для «узких» дефектов – скорость движения не более:
 - 120 км/ч при $2,0 < h \leq 3,0$ мм;
 - 100 км/ч при $3,0 < h \leq 4,0$ мм;
 - 70 км/ч при $4,0 < h \leq 6,0$ мм и замена в плановом порядке;
 - 40 км/ч при $6,0 < h \leq 8,0$ мм и замена в первоочередном порядке;
 - 25 км/ч при $8,0 < h$;
- для «широких» дефектов – скорость движения не более:
 - 120 км/ч при $1,0 < h \leq 2,0$ мм;
 - 100 км/ч при $2,0 < h \leq 4,0$ мм;
 - 70 км/ч при $4,0 < h \leq 6,0$ мм и замена в плановом порядке;
 - 40 км/ч при $6,0 < h \leq 8,0$ мм и замена в первоочередном порядке;
 - 25 км/ч при $8,0 < h$;
- для «коротких» дефектов – скорость движения не более:
 - 40 км/ч при $6,0 < h \leq 8,0$ мм и замена в первоочередном порядке;
 - 25 км/ч при $8,0 < h$.

Глубину и ширину дефекта измеряют в месте его наибольшего развития, а длину – по протяжению данного дефекта вдоль головки рельса. При образовании цепочки из отдельных дефектов в длину дефекта включают те из смежных дефектов, которые расположены на расстоянии, меньшем длины наименьшего из двух смежных дефектов.

Наблюдения за развитием дефекта производят при очередных проверках рельсов. При обнаружении поперечных трещин в местах образования дефекта 10 рельсов считают остродефектным при любых характеристиках дефекта, и он подлежит замене без промедления.

При длине горизонтальной трещины (вдоль рельса) >70 мм, оцениваемой по пропаданию донного УЗ-сигнала, рельс считают остродефектным, и он подлежит замене без промедления.

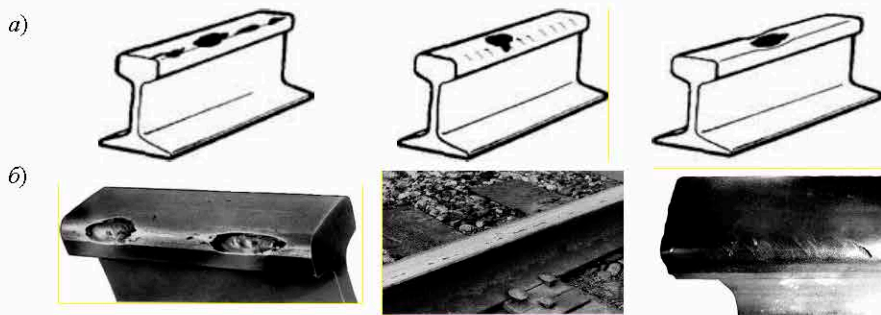
При возникновении дефекта в эксплуатационных условиях, отвечающих гарантийным обязательствам, следует предъявить рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельсов.

Трещины и выкрашивания металла на боковой рабочей выкружке или на средней части головки, возникшие от местных скоплений неметаллических включений внутри, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек, или возникшие от наружной поверхности рельса из-за недостаточной контактно-усталостной прочности рельсового металла, **после пропуска гарантийного тоннажа** (рисунок 6.2).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (11.1);
- вне стыка (11.2).

Выкрашивание металла



Трещины металла

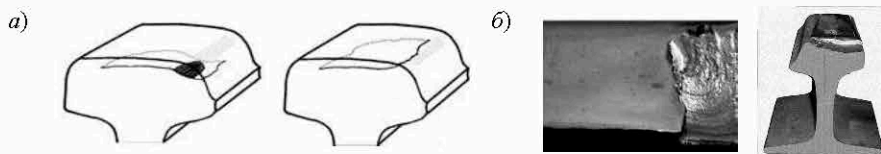


Рисунок 6.2 – Схематическое изображение дефекта 11.1-2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Недостатки в металлургическом качестве рельсовой стали (местные скопления неметаллических включений, вытянутых вдоль направления прокатки), определяют недостаточную контактно-усталостную прочность металла. Чаще всего повреждается рабочая грань наружных нитей в кривых участках пути ($R = 400 \dots 1000$ м). Выкрашивания начинаются с образования и развития внутренних продольных трещин (ВПТ) контактной усталости в зоне рабочей выкружки головки рельса.

Трещины контактной усталости также возникают от поверхности катания на средней части головки рельса, постепенно заглубляясь под поверхность катания и образуя протяжённые горизонтальные контактно-усталостные трещины. Часто дефект возникает на выкружке рабочей грани наружных рельсов кривых малого радиуса, может сопровождаться боковым износом. От неглубоких поверхностных параллельных трещин контактной усталости иногда образуется продольная трещина, которая углубляется по мере своего развития.

К дефекту 11.1-2 следует относить продольные трещины с глубиной расположения до 8,0 мм.

Развитие продольных трещин контактной усталости приводит к образованию выкрашиваний.

Наибольшую опасность представляет возможное образование от продольной трещины (дефект 11) поперечной усталостной трещины (дефект 21.1-2).

Способы выявления.

Внешний осмотр, контроль линейных размеров измерительными приборами (линейка, штангенциркуль с глубиномером, универсальный шаблон модели 00316 и др.), УЗ-дефектоскопия в пределах ± 300 мм от предполагаемого дефектного сечения.

При УЗ-дефектоскопировании необходимо убедиться в отсутствии около дефекта поперечной трещины.

Указания по эксплуатации.

Для скоростей движения ≤ 140 км/ч рельсы, имеющие дефекты 12 глубиной $h > 2,0$ мм при длине (вдоль рельса) $l > 25,0$ мм и ширине (поперек рельса) $a < 35,0$ мм («узкие»), а также глубиной $h > 1,0$ мм при длине (вдоль рельса) $l > 25,0$ мм и ширине (поперек рельса) $a \geq 35,0$ мм (широкие) и, кроме того, глубиной $h > 6,0$ мм (до 8,0 мм) при длине $l = 6,1 \dots 25,0$ мм («короткие»), считают дефектными.

С целью отдаления начала образования дефекта 11 и уменьшения его глубины, длины и ширины должна производиться периодическая профильная шлифовка головки рельсов в соответствии с действующими Техническими указаниями на шлифовку.

После проведения шлифовки улучшаются условия дефектоскопирования рельсов, снижается вероятность образования других аналогичных дефектов в головке и поперечных трещин, развивающихся под прикрытием дефекта 11.

До устранения дефекта шлифовкой, или наплавкой, или (при невозможности или нецелесообразности их выполнения) до замены дефектного рельса должна быть ограничена скорость движения по нему в зависимости от глубины дефекта h :

- для «узких» дефектов – скорость движения не более:

- 120 км/ч при $2,0 < h \leq 3,0$ мм;
- 100 км/ч при $3,0 < h \leq 4,0$ мм;
- 70 км/ч при $4,0 < h \leq 6,0$ мм и замена в плановом порядке;
- 40 км/ч при $6,0 < h \leq 8,0$ мм и замена в первоочередном порядке;
- 25 км/ч при $8,0 < h$;
- для «широких» дефектов – скорость движения не более:
 - 120 км/ч при $1,0 < h \leq 2,0$ мм;
 - 100 км/ч при $2,0 < h \leq 4,0$ мм;
 - 70 км/ч при $4,0 < h \leq 6,0$ мм и замена в плановом порядке;
 - 40 км/ч при $6,0 < h \leq 8,0$ мм и замена в первоочередном порядке;
 - 25 км/ч при $8,0 < h$.

Дефектный рельс с «коротким» дефектом глубиной $h = 8,0$ мм и более следует считать остродефектным, и он подлежит замене без промедления.

Глубину и ширину дефекта измеряют в месте его наибольшего развития, а длину – по протяжению данного дефекта вдоль головки рельса. При образовании цепочки из отдельных дефектов в длину дефекта включаются те из смежных дефектов, которые расположены на расстоянии, меньшем длины наименьшего из двух смежных дефектов.

При длине горизонтальной трещины (вдоль рельса) $>70,0$ мм, оцениваемой по пропаданию донного сигнала УЗ-контроля, рельс считают остродефектным, и он подлежит замене без промедления.

При развитии дефекта 12 на глубину $\geq 8,0$ мм рельс считают остродефектным, и он подлежит замене без промедления.

Наблюдения за развитием дефекта производят при очередных проверках рельсов. При обнаружении поперечной трещины (дефект 21) в местах образования дефекта 12 следует действовать в соответствии с указаниями по эксплуатации рельсов с дефектом 21.

В обязательном порядке предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельсов.

Трещины и выкрашивания металла на боковой рабочей выкружке или на средней части головки, возникшие изнутри от местных скоплений неметаллических включений, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек, или возникшие от наружной поверхности рельса из-за недостаточной контактно-усталостной прочности рельсового металла, **до пропуска гарантийного тоннажа** (см. рисунок 6.2)

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (12.1);
- вне стыка (12.2).

Причины появления и развития, способы выявления, указания по эксплуатации аналогичны представленным для предыдущего дефекта.

Выкрашивания металла на поверхности катания из-за повышенного динамического воздействия в болтовых стыках (рисунок 6.3).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодированное обозначение) – в стыке (13.1).



Рисунок 6.3 – Схематическое изображение дефекта 13.1 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

В процессе эксплуатации из-за повышенного динамического воздействия колес в болтовых стыках в результате протекания процессов ударной контактной усталости у торца рельса образуются выкрашивания рельсового металла. Ускорению проявления дефекта способствует искривленность рельсовых концов, растянутые зазоры, а также некачественная механическая обработка торцов. Образованию выкрашивания может предшествовать сплыв металла, с образованием выколов металла при слепых зазорах.

Способы выявления.

Внешний осмотр, контроль линейных размеров измерительными приборами (линейка, штангенциркуль с глубиномером, универсальный шаблон модели 00316 и др.), УЗ-дефектоскопия.

При УЗ-дефектоскопировании необходимо убедиться в отсутствии под выкрашиванием поперечной трещины.

Указания по эксплуатации.

Для скоростей движения ≤ 140 км/ч рельсы, имеющие выкрашивания металла на поверхности катания на концах глубиной $h > 2,0$ мм при длине (вдоль рельса) $l > 25$ мм, а также глубиной $h > 6,0$ мм при длине $l \leq 25$ мм, относят к дефектным.

Провести наплавку конца рельса по типовому технологическому процессу или замену рельса в плановом порядке.

До устранения дефекта наплавкой головки или при невозможности выполнения этой операции до плановой замены дефектного рельса в зависимости от глубины дефекта h при длине дефекта $l > 25$ мм скорость движения поездов не должна превышать:

- 100 км/ч при $2,0 < h \leq 4,0$ мм;
- 70 км/ч при $4,0 < h \leq 6,0$ мм;
- 40 км/ч при $6,0 < h \leq 8,0$ мм и замена в первоочередном порядке;
- 25 км/ч при $8,0 < h$.

При глубине дефекта $h > 6,0$ мм и длине $l > 25,0$ мм дефектные рельсы заменяют или восстанавливают в первоочередном порядке.

Длину дефекта (вдоль рельса) определяют по его наибольшему протяжению от торца рельса. Измерения размеров дефекта выполняют линейкой и штангенциркулем с глубиномером или универсальным шаблоном модели 00316 и др.

При образовании выкрашиваний и выколов металла, препятствующих надежному дефектоскопированию головки и шейки рельса, рельс также может быть отнесен к дефектным из-за его контроленепригодности (дефект 19).

Наблюдения за развитием дефекта производят при очередных проверках рельсов.

При возникновении дефекта в эксплуатационных условиях, отвечающих гарантийным обязательствам, следует предъявить рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельсов.

Пробоксовки в виде местного износа и выкрашивания металла в местах термомеханических повреждений головки рельса из-за боксования, юза колес подвижного состава или нарушения режимов шлифования рельсошлифовальными поездами (рисунок 6.4).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (14.1);
- вне стыка (14.2).



Рисунок 6.4 – Схематическое изображение дефекта 14.1-2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Ненормативное воздействие колес подвижного состава при боксовании и юзе вызывает образование на обеих рельсовых нитях местных участков термомеханических повреждений с образованием хрупких поверхностных слоев с измененной микроструктурой металла рельсов. Эти повреждения проявляются в виде местного износа (седловин) на поверхности головки, трещин и выкрашиваний. То же происходит с рельсами при нарушении режимов их шлифовки рельсошлифовальными поездами. Наибольшую опасность представляет возможное образование в местах термомеханических повреждений поперечной усталостной трещины (дефект 24.1-2).

Способы выявления.

Внешний осмотр, контроль линейных размеров измерительными приборами (линейка, штангенциркуль с глубиномером, универсальный шаблон модели 00316 и др.), УЗ-дефектоскопия в пределах ± 300 мм от дефекта.

При УЗ-дефектоскопировании необходимо убедиться в отсутствии под дефектом поперечной трещины.

Указания по эксплуатации.

Для скоростей движения ≤ 140 км/ч рельсы с пробоксовками глубиной $h > 1,0$ мм считаются дефектными и подлежат ремонту наплавкой для ликвидация отдельных пробоксовок или шлифовке рельсошлифовальными поездами при массовых поражениях рельсов этим типом повреждений.

До устранения дефекта наплавкой, шлифовкой, фрезерованием или плановой замены в зависимости от глубины пробоксовки и наличия и глубины выкрашиваний в месте пробоксовки скорость движения поездов по таким рельсам не должна превышать указанную в таблице 6.2

Таблица 6.2 – Зависимость скорости движения поезда от вида дефектов рельса

Глубина пробоксовки h , мм	Глубина выкрашивания h_1 , мм	Скорость поездов, км/ч, не более
$1,0 < h \leq 2,0$	Нет	120
	$h_1 \leq 2,0$	70
	Более 2,0	25 и ЗПП
$2,0 < h \leq 3,0$	Нет	70
	$h_1 \leq 2,0$	40*
	Более 2,0	25*
$3,0 < h \leq 4,0$	Нет	40*
	$h_1 \leq 2,0$	25*
	Более 2,0	То же
$> 4,0$	Нет	»
	$h_1 \leq 2,0$	»
	Более 2,0	»
*Замена в первоочередном порядке		

Выкрашивания металла на поверхности катания головки в зоне сварного стыка после пропуска гарантийного тоннажа (рисунок 6.5).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировое обозначение) – в сварном стыке (16.3-4).

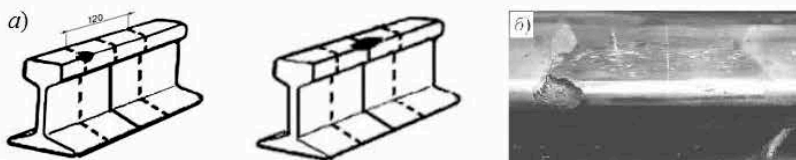


Рисунок 6.5 – Схематическое изображение дефекта 16.3-4 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Вследствие нарушения технологии сварки и обработки сварного стыка в поверхностном слое головки могут образоваться участки мартенсита или другие структурные неоднородности, от которых под воздействием колес подвижного состава происходит образование трещин контактной усталости и выкрашиваний металла по ним.

Способы выявления.

Внешний осмотр, контроль линейных размеров измерительными приборами (линейка, штангенциркуль с глубиномером, универсальный шаблон модели 00316 и др.), УЗ-дефектоскопия в пределах ± 300 мм от дефекта.

При УЗ-дефектоскопировании необходимо убедиться в отсутствии под выкрашиванием поперечной трещины.

Указания по эксплуатации.

Рельсы, имеющие выкрашивания металла на поверхности катания в зоне сварного стыка, относят к дефектным, если глубина выкрашиваний $h > 2,0$ мм.

До проведения шлифовки рельса, или при невозможности ее выполнения, до плановой замены рельса или вырезки дефектного участка и восстановления вваркой вставки, в зависимости от глубины выкрашивания h металла на поверхности катания головки скорость движения по сварному стыку не должна превышать:

- 120 км/ч при $2,0 < h \leq 3,0$ мм;
- 100 км/ч при $3,0 < h \leq 4,0$ мм;
- 70 км/ч при $4,0 < h \leq 6,0$ мм;
- 40 км/ч при $6,0 < h \leq 8,0$ мм;
- 25 км/ч при $8,0 < h$.

Наблюдения за развитием дефекта производят при очередных проверках рельсов. Измерения глубины дефекта производят жесткой стальной линейкой и штангенциркулем с глубиномером или универсальным шаблоном модели 00316 и др. в месте наибольшей глубины выкрашивания.

При обнаружении поперечных трещин в зоне сварного стыка рельс относят к категории острodefектных и заменяют без промедления.

При образовании дефекта в эксплуатационных условиях, отвечающих гарантийным обязательствам, следует предъявить рекламацию изготовителю сварного стыка.

Выкрашивания металла на поверхности катания головки в зоне сварного стыка **до пропуска гарантийного тоннажа** (см. рисунок 6.5)

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировое обозначение) – в сварном стыке (17.3-4).

Причины появления и развития, способы выявления, указания по эксплуатации аналогичны представленным для предыдущего дефекта.

Выкрашивание наплавленного слоя металла в местах наплавки (рисунок 6.6).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (18.1);
- вне стыка (18.2).



Рисунок 6.6 – Схематическое изображение дефекта 18.1-2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

При нарушении технологии наплавки рельсов не обеспечивается необходимая прочность соединения наплавленного и основного металла. В процессе эксплуатации под воздействием колес подвижного состава наплавленный слой выкрашивается.

Способы выявления.

Внешний осмотр, контроль линейных размеров измерительными приборами (линейка, штангенциркуль с глубиномером), УЗ-дефектоскопия.

При УЗ-дефектоскопировании необходимо убедиться в отсутствии под выкрашиванием поперечной трещины.

Указания по эксплуатации.

Рельсы, имеющие выкрашивания, отслоения и выколы наплавленного металла на поверхности катания головки на концах или на остальном протяжении рельса глубиной $h > 2,0$ мм при длине $l > 25,0$ мм, а также глубиной $h > 6,0$ мм при длине $l \leq 25,0$ мм включительно, относят к дефектным.

До устранения дефекта повторной (очередной) наплавкой головки по типовому технологическому процессу или при невозможности осуществления этой операции до плановой замены рельсов с дефектом длиной $l > 25$ мм должна быть ограничена скорость движения поездов по дефектному рельсу в зависимости от глубины дефекта h . Скорость не должна превышать:

- 120 км/ч при $2,0 < h \leq 3,0$ мм,
- 100 км/ч при $3,0 < h \leq 4,0$ мм,
- 70 км/ч при $4,0 < h \leq 6,0$ мм,
- 40 км/ч при $6,0 < h \leq 8,0$ мм,
- 25 км/ч при $8,0 < h$.

Глубину дефекта измеряют жесткой стальной линейкой и штангенциркулем с глубиномером или универсальным шаблоном модели 00316 и др. Длину дефекта определяют по его наибольшему протяжению вдоль головки рельса.

При образовании выкрашиваний металла, препятствующих надежному дефектоскопированию головки и шейки рельса, рельс также может быть отнесен к дефектным из-за его контроленепригодности (дефект 19).

Наблюдения за развитием дефекта производят при очередных проверках рельсов. При обнаружении от дефекта поперечной трещины рельс считается остродефектным и подлежит замене без промедления.

При преждевременном возникновении дефекта в эксплуатационных условиях, отвечающих гарантийным обязательствам, предъявить рекламацию производителю наплавочных работ.

Контроленепригодность из-за наличия выкрашиваний, трещин на поверхности катания, или рябизны, отпечатков, или сильной коррозии на нижней поверхности головки рельса (рисунок 6.7).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- по всей длине рельса (19.0);
- в стыке (19.1);
- вне стыка (19.2).

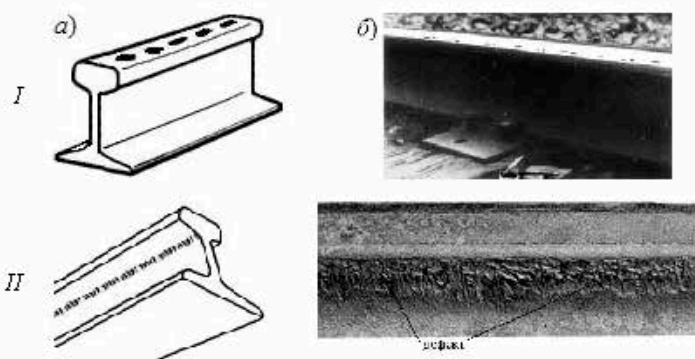


Рисунок 6.7 – Схематическое изображение дефекта 19.0-1-2 (а) и его вид (б).

Контроленепригодность из-за развития многочисленных выкрашиваний на поверхности катания рельса (I) и из-за протяжённых дефектов изготовления на нижней поверхности головки рельса (II)

Причины появления и развития.

В процессе развития контактно-усталостных повреждений на рабочей поверхности головки рельса иногда возникают трещины и выкрашивания, которые делают рельс контроленепригодным, так как мешают обнаружению внутренних дефектов при УЗ-контроле рельса дефектоскопом.

Рельсы иногда имеют на нижней поверхности головки и (или) в месте перехода головки в шейку отпечатки или рябизну (дефекты изготовления, пропущенные при приёмке рельсов), или коррозионные каверны из-за сильной коррозии. В таких случаях наблюдается срабатывание индикации дефектоскопа при минимальной допустимой чувствительности (определённой нормативной документацией на контроль).

Способы выявления.

Если при контроле рельсов не обеспечивается акустический контакт из-за наличия выкрашиваний или трещин, и на участке пути 12,5 м имеется три места и более с пропаданием донного сигнала от 20,0 до 70,0 мм и суммарной протяженностью >140 мм, то такие рельсы признаются контроленепригодными.

Указания по эксплуатации.

При наличии на головке рельса поверхностных дефектов, делающих рельс контроленепригодным для дефектоскопных средств сплошного контроля, рельс считают дефектным.

В течение пяти дней после выявления дефекта принимается решение по его дальнейшей эксплуатации и определяются меры (наплавка, шлифовка или замена) по устранению причин контроленепригодности.

В течение четырнадцати дней с момента выявления разработанные меры должны быть реализованы. В случае превышения срока устранения причин контроленепригодности скорость движения поездов ограничивается до 60 км/ч.

Если при сплошном контроле рельсов срабатывание индикации УЗ-каналов дефектоскопа, контролирующих головку рельса, наблюдается при минимально допустимой чувствительности (определённой документацией на контроль), то такой рельс считают «шумящим», относят к дефектным и заменяют в первоочередном порядке.

При возникновении дефекта в эксплуатационных условиях, отвечающих гарантийным обязательствам, предъявить рекламацию изготовителю рельсов.

Поперечные трещины в головке в виде светлого или темного пятна, вызванные внутренними пороками изготовления рельсов (флокенами, газовыми пузырями, засорами, крупными скоплениями неметаллических включений) (рисунок 6.8). В фокусах трещин наблюдаются металлургические дефекты; вокруг них поперечные усталостные трещины с характерными усталостными кольцами); остальное – зона хрупкого разрушения при доломе.



Рисунок 6.8 – Схематическое изображение дефекта 20.1-2 (а) и его вид (б).

Вид поверхности излома после долома рельсов на прессе
(все дефекты выявлены УЗ-дефектоскопированием)

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировое обозначение):

- в стыке (20.1);
- вне стыка (20.2).

Причины появления и развития.

Основной причиной образования трещин являются флокены, которые обычно располагаются на глубине > 10 мм от поверхности. Флокеном называется зернистый надрыв, от которого под действием нагрузки от подвижного состава радиально развивается усталостная трещина. Усталостные трещины также развиваются от газовых пузырей, неметаллических включений и резко выраженной ликвации – неравномерного по сечению распределения входящих в состав стали химических элементов. Если поперечная трещина не вышла на поверхность головки, то в месте излома имеется светлое пятно (сталь не окислена), если же вышла, то – темное пятно. При своем развитии до размера, превышающего критический (14–16 мм по высоте или 25–30 % поперечного сечения головки при температуре выше -20°C и от 15 % при температуре ниже -20°C) поперечные трещины могут привести к излому всего рельса (дефект 71.1-2).

Способ выявления – УЗ-дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельс с поперечной трещиной в головке является остродефектным и подлежит замене без промедления.

Для подтверждения причины возникновения дефекта из рельса должна быть вырезана проба длиной $1,2 \pm 0,1$ м с дефектом посередине и испытана на гидропрессе до излома для вскрытия дефекта. Обломки пробы с дефектом и цифровая фотография излома, или проба без испытаний должны быть отправлены в аккредитованную лабораторию для вскрытия дефекта и выполнения металлографического исследования.

При подтверждении наличия флокенов, газовых пузырей и др. все рельсы данной плавки подлежат изъятию из эксплуатации. В этом случае следует предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламации металлургическому комбинату – изготовителю рельсов.

Поперечные усталостные трещины в головке в виде светлого или темного пятна, возникшие от внутренней или наружной продольной трещины, которая образовалась вследствие недостаточной контактно-усталостной прочности металла, и приведшие к отказу рельса **после пропуска гарантийного тоннажа** (рисунок 6.9).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировое обозначение):

- в стыке (21.1);
- вне стыка (21.2).

Причины появления и развития.

Началом образования дефекта является возникновение внутренней продольной трещины (ВПТ) от скоплений неметаллических включений, вытя-

нутых при прокатке в виде строчек-дорожек, или продольной трещины от поверхности рельса. Развитие продольной трещины приводит либо к выкрашиванию металла, дефект 11.1-2, либо к образованию поперечной трещины (дефект 21.1-2).

Вид излома после вскрытия внутренних продольной и поперечной трещин показан на рисунке 6.9, б, 1. Источником первоначальной контактно-усталостной внутренней продольной трещины является выпянутое вдоль рельса в виде строчки-дорожки скопление неметаллических включений (на рисунке видно, как светлая линия вдоль рельса в середине ВПТ). Вокруг строчечного скопления неметаллических включений видны характерные кольца контактно-усталостного роста трещины. От края ВПТ развилась поперечная контактно-усталостная трещина (дефект 21.1-2).

Вид излома после вскрытия трещины контактной усталости, возникшей от поверхности, из-за одной из неглубоких поверхностных параллельных трещин контактной усталости, которая углубляется по мере своего развития (дефект 11.1-2) показан на рисунке 6.9, б, 2. От края продольной трещины развилась поперечная контактно-усталостная трещина (дефект 21.1-2).

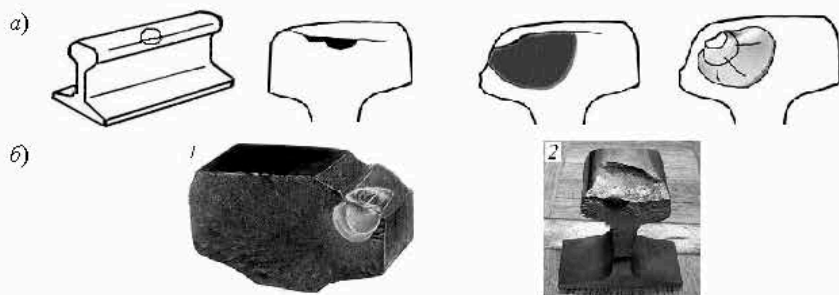


Рисунок 6.9 – Схематическое изображение дефекта 21.1-2 (а) и его вид в изломе (б)

При своем развитии до размера, превышающего критический (14–16 мм по высоте, или 25–30 % площади поперечного сечения головки при температуре выше -20°C и от 15 % при температуре ниже -20°C), поперечные трещины могут привести к излому всего рельса (дефект 71.1-2).

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ-дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельсы типа Р50 с выявленными в них поперечными трещинами независимо от их размера являются остродефектными (ОДР) и подлежат замене без промедления.

Рельсы типов Р65 и Р75 при обнаружении в них при дефектоскопировании поперечных трещин в головке, выходящих за вертикальную ось симметрии рельса или на поверхность рельса, являются остродефектными и также подлежат замене без промедления.

В том случае, когда внутренняя поперечная трещина не выходит на поверхность рельса, а границы её – за середину головки, рельс также является остродефектным и подлежит замене без промедления, или рекомендуется перевод рельса из остродефектного в дефектный путём установки на поврежденное место на рельсах типов Р65 и Р75 шестидырных накладок временно на четыре струбцины, а затем с четырьмя болтами так, чтобы середины накладок совмещались с дефектом. При этом отверстия для двух средних болтов не сверлят во избежание развития дефекта в их сторону. После установки накладок указанным способом поезд пропускается с установленной скоростью.

Шестидырные накладки не допускается устанавливать в том случае, если дефект расположен на расстоянии < 3 м от сварного шва, $< 2,5$ м от торца рельса (конца плети) или если он расположен ближе $12,5$ м от уже имеющегося дефекта, взятого в накладки.

Дефект, на котором установлены накладки, именуется в дальнейшем как дефект 21.2.Н, а сам рельс считается дефектным. До замены рельса в звеньевом пути или окончательного восстановления рельсовой плети бесстыкового пути, выполняемых в плановом порядке, дефект 21.2.Н подвергается визуальному контролю и периодическому дефектоскопированию.

Если поперечная внутренняя трещина дефекта 21.2. в процессе эксплуатации распространилась со стороны рабочей грани головки за ее середину (за вертикальную ось симметрии рельса) или вышла на поверхность рельса, или образовалось выкрашивание, которое препятствует определению размеров трещины, то такой рельс переходит в категорию остродефектных и заменяется без промедления.

Поперечные усталостные трещины в головке в виде светлого или темного пятна, возникшие от внутренней или наружной продольной трещины, образовавшейся вследствие недостаточной контактно-усталостной прочности металла, и приведшие к отказу рельса **до пропуска гарантийного тоннажа** (см. рисунок 6.9).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировое обозначение):

- в стыке (22.1);
- вне стыка (22.2).

Причины появления и развития, способы выявления, указания по эксплуатации аналогичны представленным для предыдущего дефекта.

Поперечные трещины в головке, возникшие от термомеханических повреждений из-за боксования или юза (рисунок 6.10).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировое обозначение):

- в стыке (24.1);
- вне стыка (24.2).

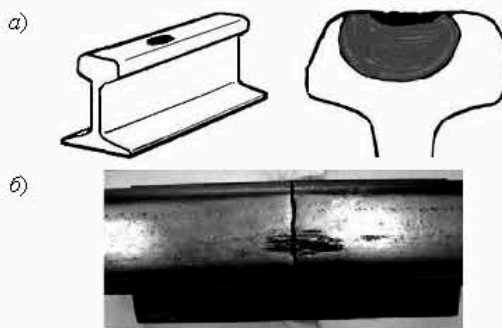


Рисунок 6.10 – Схематическое изображение дефекта 24.1-2 (а) и вид поверхности катания (б)

Причины появления и развития.

Дефект образуется вследствие боксования или юза, когда происходит термомеханическое повреждение металла головки рельса, где в поверхностных слоях изменяется микроструктура стали – возникает хрупкий белый слой, от которого затем растут поперечные усталостные трещины. Эти поперечные трещины могут привести к хрупкому излому, в особенности при низких температурах (дефект 74.1-2).

Поперечные трещины иногда могут образовываться от термомеханического повреждения в результате сильных ударов при проходе колес с ползунами или выщербинами.

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ-дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельс с обнаруженной поперечной трещиной (дефект 24), является острodefектным и подлежит замене без промедления.

На участке, где прошел подвижной состав с неисправными колесами или где имели место боксование и (или) юз, до плановой замены рельсов необходимо более частое (по утвержденному начальником дистанции пути графику) наблюдение и дефектоскопирование рельсов, даже если никаких внешних признаков повреждения рельсов нет.

Следует предъявить претензии и штрафные санкции локомотивным или вагонным депо. В случае невозможности определения конкретного вагонного или локомотивного депо, по вине которого было допущено повреждение рельса, претензии предъявляются соответствующей службе железной дороги.

Поперечные трещины в головке вследствие ударов по рельсу (инструментом, рельсом о рельс), других механических повреждений (рисунок 6.11.)

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (25.1);
- вне стыка (25.2).

Причины появления и развития.

В результате механических повреждений могут образоваться концентраторы напряжений, которые могут служить местами образования трещин. Трещины могут привести к излому рельса (дефект 75.1-2).

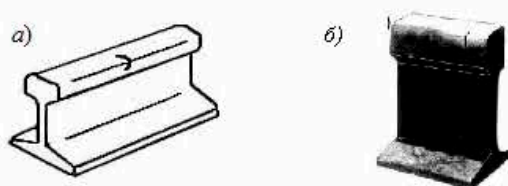


Рисунок 6.11 – Схематическое изображение дефекта 25.1-2 (а) и его вид (б)

Способы выявления: внешний осмотр, дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельс с поперечной трещиной является остродефектным (ОДР) и подлежит замене без промедления.

При погрузочно-разгрузочных работах и эксплуатации рельсов в пути необходимо бережно обращаться с ними, не допуская ударов и повреждений.

Поперечные трещины в головке из-за нарушений технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, приведшие к отказу рельса **после пропуска гарантийного тоннажа** (рисунок 6.12).

Расположение дефекта по длине рельсов (ходовое обозначение) – в сварном стыке (26.3-4).

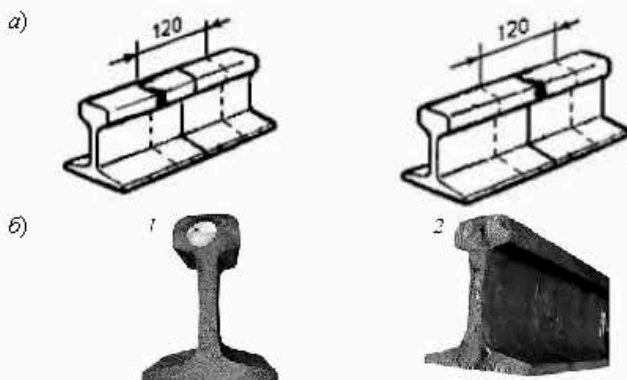


Рисунок 6.12 – Схематическое изображение дефекта 26.3-4 (а) и его вид (б):

- 1 – вид поверхности излома после вскрытия трещины,
2 – дефект сварки в головке и хрупкая трещина от него

Причины появления и развития.

Наличие непроваров, неметаллических включений, пор, раковин, трещин в головке рельса в месте сварки из-за нарушения режимов сварки,

наличие участков недопустимой микроструктуры из-за нарушения режимов термической обработки сварного стыка. От зародышевого дефекта развивается поперечная усталостная трещина, имеющая светлую поверхность (если трещина не вышла на поверхность рельса) или темную поверхность (если трещина вышла на поверхность рельса и подверглась коррозии). При грубых нарушениях технологии сварки наблюдаются хрупкие разрушения.

Способы выявления.

Внешний осмотр. Контроль сварных стыков проводится в соответствии с действующей технологической инструкцией по УЗ-контролю сварных стыков в рельсов в рельсосварочных предприятиях и в пути, а также правилами контроля стыков алюминотермитной сварки рельсов в пути.

Указания по эксплуатации.

Рельс с поперечной трещиной в головке в месте сварки является остродефектным и подлежит замене без промедления. В сварной шпите необходимо вырезать участок рельса с трещиной и сварить новую вставку.

Следует проинформировать предприятие, которое произвело сварку рельсов, о факте обнаружения дефекта.

Поперечные трещины в головке из-за нарушений технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, приведшие к отказу рельса до **пропуска гарантийного тоннажа** (см. рисунок 6.12).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение) – в сварном стыке (27.3-4).

Причины появления и развития, способы выявления, указания по эксплуатации аналогичны представленным для предыдущего дефекта.

Горизонтальные продольные трещины в головке из-за нарушения технологии изготовления рельсов (рисунок 6.13).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (30.1);
- вне стыка (30.2).

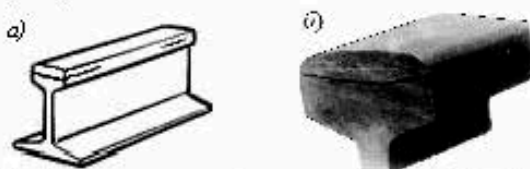


Рисунок 6.13 – Схематическое изображение дефекта 30.1-2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

При наличии загрязнений стали в виде крупных скоплений неметаллических включений, вытянутых вдоль прокатки, в эксплуатации могут возникнуть горизонтальные продольные трещины на глубине $> 8,0$ мм различ-

ной длины. К образованию таких продольных трещин может также приводить постепенное заглубление продольных трещин, образовавшихся на поверхности рельсов и развивающихся сначала на глубине, меньшей 8,0 мм. При глубине залегания их $\geq 8,0$ мм от поверхности катания они обычно имеют значительную протяженность.

Наибольшую опасность представляют поперечные трещины (дефекты 21.1-2, 22.1-2), которые могут образовываться от продольных, и приводить к поперечному излому рельса (дефекты 71.1-2, 72.1-2).

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ-дефектоскопирование.

При дефектоскопировании необходимо убедиться в отсутствии поперечных трещин.

Указания по эксплуатации.

Рельс с обнаруженной продольной трещиной в головке на глубине $>8,0$ мм является остродефектным вне зависимости от длины и зоны расположения трещины по длине рельса, и подлежит замене без промедления.

Предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельсов.

Вертикальные продольные трещины в головке из-за недостаточной прочности металла (рисунок 6.14).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (31.1);
- вне стыка (31.2).



Рисунок 6.14 – Схематическое изображение дефекта 31.1.1-2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Вертикальные продольные, часто клинообразные, расширяющиеся кверху трещины образуются в результате раздавливания головки рельсов под колесами подвижного состава. Этому способствуют излишнее возвышение наружной рельсовой нити в кривой для данного радиуса кривой и скорости движения поездов (тогда трещины возникают на рельсах внутренней нити), недостаточная прочность рельсовой стали и ее пониженное сопротивление смятию (см. также дефект 41.0, 40.2).

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ-дефектоскопирование.

Особенно тщательно исследовать рельс с уширенной головкой (>85 мм) и наличием продольного желоба.

Указания по эксплуатации.

Рельс с вертикальной продольной трещиной в головке является остродефектным и подлежит замене без промедления.

Необходимо восстановить соответствие между возвышением наружного рельса и реализуемыми скоростями движения поездов в кривой.

Продольные трещины в местах перехода головки в шейку в зоне болтового стыка (рисунок 6.15).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировое обозначение) – в стыке (33.1).



Рисунок 6.15 – Схематическое изображение дефекта 33.1 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Повышенные динамические воздействия в болтовых стыках, высокие местные напряжения, появлению которых способствуют некачественная обработка кромок торцов рельсов, чрезмерные усилия затяжки стыковых болтов, изношенные накладки, использование вышедших из строя прокладок и подкладок, просадки в стыках, нарушение подуклонки рельсов, односторонняя перегрузка головки рельса.

При развитии трещина может изменить направление и привести к излому-отделению части головки рельса (дефект 73.1).

Способы выявления: внешний осмотр со снятием стыковых накладок, УЗ-дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельс с продольной трещиной в местах перехода головки в шейку в стыковой зоне является остродефектным и подлежит замене без промедления.

При наличии концентраторов напряжений из-за некачественной обработки торцов рельсов (заусенцы, вырывы металла, отсутствие фаски в подголовочной части и др.) в соответствии с гарантийными обязательствами следует предъявить рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельсов или предприятию, производившему разрезку рельсов.

Трещины в головке в месте приварки рельсового соединителя (рисунок 6.16).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировое обозначение) – в стыке (38.1).

Причины появления и развития.

Из-за нарушения режима приварки рельсовых соединителей могут возникнуть сварочные трещины, непровары, поджоги, которые в результате

развития усталостных трещин могут привести к трещинам различной ориентации, к излому и отделению части головки. При повторных приварках рельсовых соединителей необходимо убедиться в отсутствии трещин в местах приварок.

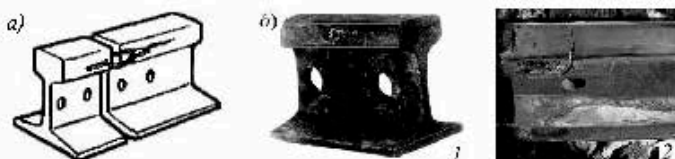


Рисунок 6.16 – Схематическое изображение дефекта 38.1 (а) и его вид (б).

Вид горизонтальной трещины от места приварки рельсового соединителя (1) и выкола части головки рельса из-за горизонтальной трещины в месте приварки рельсового соединителя, перешедшей в поперечную трещину (2)

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ-дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельс, имеющий любые трещины в основном металле головки из-за нарушений технологии приварки рельсовых соединителей, является остродефектным и подлежит замене без промедления.

При обнаружении трещин в наплавленном металле за дефектным местом устанавливают периодические наблюдения и при развитии трещины с переходом в основной металл рельс переводят в категорию остродефектного с заменой без промедления.

Следует предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию производителю работ по приварке рельсовых соединителей.

Волнообразный износ и смятие головки рельса (длинные (25–150 см) и короткие (<25 см рифли) волны) (рисунок 6.17).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение) – по всей длине рельса (40.0).

Причины появления и развития.

Начальная волнообразная деформация головки (длиной 25,0–150,0 см), как правило, возникает при прокатке и правке рельсов на металлургических комбинатах вследствие вибрации прокатной клетки, биения валков и других причин, а в эксплуатации происходит дальнейшее развитие первоначальных дефектов и увеличение амплитуды волнообразных неровностей. Короткие (длиной 3,0–25,0 см) волнообразные неровности (рифли) возникают из-за периодического проскальзывания колес, что вызывает сдвиги или повышенное истирание верхних слоев металла в местах проскальзывания.

Способы выявления: внешний осмотр, измерение жёсткой линейкой длиной 1 м с набором щупов, штангенциркулем с глубиномером, универсальным шаблоном модели 00316 и др., рельсоизмерительными тележками.

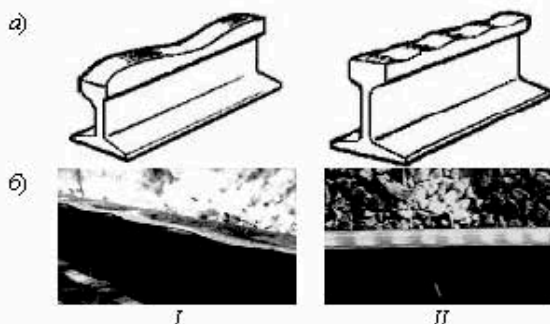


Рисунок 6.17 – Схематическое изображение дефекта 40.0 (а) и его вид (б).
Волнообразный износ и смятие в виде длинных волн (25–150 см) (I)
и коротких (3–25 см) волнообразных неровностей – рифлей (II)

Указания по эксплуатации рельса.

Рельсы с глубиной волны $>1,0$ мм при измерении на базе 1 м являются дефектными.

При преждевременном образовании в рельсе дефекта 40.0 в виде волнообразного износа и смятия головки рельсов с длинными (25,0–150,0 см) волнами в эксплуатационных условиях, отвечающих гарантийным обязательствам, предъявить рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельсов. В остальных случаях дефектные рельсы подлежат шлифовке с периодичностью по утвержденному графику.

При обнаружении волнообразного износа и смятия головки рельсов с длинными (25,0–150,0 см) волнами высотой h до удаления неравномерного смятия и износа головок рельсов (полностью или частично) или при невозможности выполнения этих работ до плановой замены дефектных рельсов скорость движения по ним не должна превышать:

- 140 км/ч при $1,0 < h \leq 1,5$ мм,
- 100 км/ч при $1,5 < h \leq 2,0$ мм,
- 70 км/ч при $2,0 < h \leq 3,0$ мм,
- 40 км/ч при $3,0 < h$ (замена в первоочередном порядке).

При глубине длинных неровностей $>3,0$ мм дефектные рельсы заменяют в первоочередном порядке.

При обнаружении волнообразного износа и смятия головки рельсов с короткими (2,5–25,0 см) волнами (рифлями) глубиной h до удаления неравномерного смятия и износа головок рельсов (полностью или частично) или при невозможности выполнения этих работ до плановой замены дефектных рельсов скорость движения по ним не должна превышать:

- 140 км/ч при $1,0 < h \leq 1,5$ мм,
- 100 км/ч при $1,5 < h \leq 2,0$ мм,
- 70 км/ч при $2,0 < h \leq 3,0$ мм,
- 40 км/ч при $3,0 < h$ (замена в первоочередном порядке).

При глубине рифлей $> 3,0$ мм дефектные рельсы подлежат замене в первоочередном порядке.

Смятие и вертикальный износ головки рельса из-за недостаточной прочности металла (равномерные и местные) (рисунок 6.18).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- по всей длине рельса (41.0);
- вне стыка (41.2).

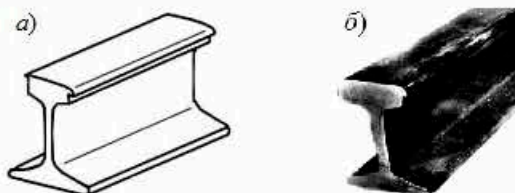


Рисунок 6.18 – Схематическое изображение дефекта 41.0, 41.2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

При несоответствии прочности металла головки рельса условиям ее нагружения колесами подвижного состава металл быстро деформируется, сплывает на боковую грань головки или изнашивается. Смятию по всей длине рельсов способствует увеличенное давление колес на внутреннюю нить кривых, вызванное снижением фактически реализуемых скоростей движения грузовых поездов относительно принятых при расчете возвышения. При раздавливании головок в металле возникают значительные растягивающие напряжения, которые при неблагоприятных условиях могут привести к возникновению продольных вертикальных трещин (дефект 31.1-2).

Способы выявления.

Для выявления равномерного смятия и износа проводят внешний осмотр, проверку штангенциркулем, измерительными приборами. Неравномерное местное смятие и износ выявляют внешним осмотром, измерением по оси головки рельса максимального отклонения от жесткой линейки длиной 1 м с помощью набора щупов или концевых мер длины, штангенциркулем с глубиномером или универсальным шаблоном модели 00316 и др.

Указания по эксплуатации.

Рельсы типов Р50, Р65 и Р75 с равномерным износом, превышающим предельные допустимые величины [36, 41], считают дефектными и заменяют в плановом порядке.

При наличии неравномерного местного смятия головки, затрудняющего содержание ширины колеи в пределах установленных норм, или равномерного смятия и износа, величина которых превышает допустимую для вертикального износа, рельсы являются дефектными и подлежат замене в плановом порядке.

Для удаления или уменьшения неравномерного смятия и износа головок рельсов производят их шлифовку, фрезерование или наплавку. До ликвидации или уменьшения неравномерного смятия головки или до замены рельсов скорость движения по ним в зависимости от глубины местных неровностей h не должна превышать:

- 140 км/ч при $1,5 < h \leq 2,0$ мм,
- 120 км/ч при $2,0 < h \leq 3,0$ мм,
- 100 км/ч при $3,0 < h \leq 4,0$ мм,
- 70 км/ч при $4,0 < h \leq 6,0$ мм,
- 40 км/ч при $6,0 < h$ (замена в первоочередном порядке).

При глубине неровностей $>6,0$ мм рельсы подлежат замене в первоочередном порядке. Рельсы с неравномерным смятием головки, затрудняющим содержание ширины колеи в пределах установленных норм даже после удаления наплавов металла шлифовкой, являются дефектными и подлежат плановой замене.

Рельсы типов Р65 и Р75 с шириной головки 90,0 мм и более и Р50 с шириной головки 85,0 мм и более также являются дефектными и подлежат плановой замене.

При ширине головки $> 90,0$ мм (для рельсов типов Р65 и Р75) и 85,0 мм (для рельсов типа Р50), а также при напльвах на боковой поверхности головки $\geq 5,0$ мм, при наличии темного желобка на поверхности катания глубиной $> 1,0$ мм, при осыпании окалины и наличии узкой полоски красноты в зоне сопряжения головки с шейкой со стороны рабочей грани необходимо проведение УЗ-контроля ручными ПЭП. В случае обнаружения эхо-сигнала от трещины (дефект 31.1-2) рельсы считают остродефектными и заменяют без промедления. При затруднении УЗ-контроля рельс признаётся контроленепригодным (дефект 19).

Необходимо восстановить соответствие между возвышением наружного рельса и реализуемыми скоростями движения поездов в кривой.

Смятие головки в виде седловины в зоне болтового стыка из-за повышенного динамического воздействия в стыке (рисунок 6.19).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодирование) – в стыке (43.1).

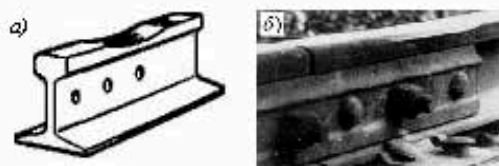


Рисунок 6.19 – Схематическое изображение дефекта 43.1 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Смятие головки в виде седловины связано с особенностями динамического воздействия колеса на рельс при прохождении им зоны стыка и недостаточным сопротивлением рельсов смятию, использованием изношенных накладок, вышедших из строя прокладок и подкладок, просадками в стыках, нарушением подуклонки рельсов.

Способы выявления.

Внешний осмотр, проверка жёсткой линейкой длиной 1 м с набором шупов или с концевыми мерами длины, штангенциркулем с глубиномером, универсальным шаблоном модели 00316 и другими измерительными приборами. Дефектоскопирование затруднено из-за изменения формы поверхности катания и ухудшения акустического контакта. При дефектоскопировании следует убедиться в отсутствии под дефектом поперечных трещин (дефект 31.1).

Указания по эксплуатации.

Рельсы, имеющие седловины глубиной $>1,5$ мм при измерении их по оси головки от линейки длиной 1 м, являются дефектными.

Для полного или частичного устранения дефектов производят шлифовку поверхности катания, наплавку, а для того, чтобы сделать пологими уклоны неровности в зоне седловин – местную шлифовку.

Изношенные стыковые накладки, подкладки и прокладки следует заменить годными. Следует выполнить подбивку шпал стыка. Провисшие концы рельсов в стыках рекомендуется выправить, если имеется машина для подгиба концов рельсов в пути.

До выполнения указанных выше работ или при невозможности их выполнения до плановой замены дефектных рельсов в зависимости от глубины седловины h скорость движения поездов не должна превышать:

- 140 км/ч при $1,5 < h \leq 2,0$ мм;
- 120 км/ч при $2,0 < h \leq 3,0$ мм;
- 100 км/ч при $3,0 < h \leq 4,0$ мм;
- 70 км/ч при $4,0 < h \leq 6,0$ мм;
- 40 км/ч при $6,0 < h$ (замена в первоочередном порядке).

При глубине седловины $>6,0$ мм дефектные рельсы заменяют в первоочередном порядке.

Боковой износ головки рельса сверх допускаемых норм (рисунок 6.20).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение) – по всей длине рельса (44.0).

Причины появления и развития.

Недостаточная износостойкость рельсового металла и усиленное проскальзывание, связанное, как правило, с увеличением углов набегания греб-

ней колес на боковую грань рельсов из-за нарушений нормального вписывания тележек подвижного состава в кривые участки пути. Недостаточная лубрикация боковой грани головки рельсов.

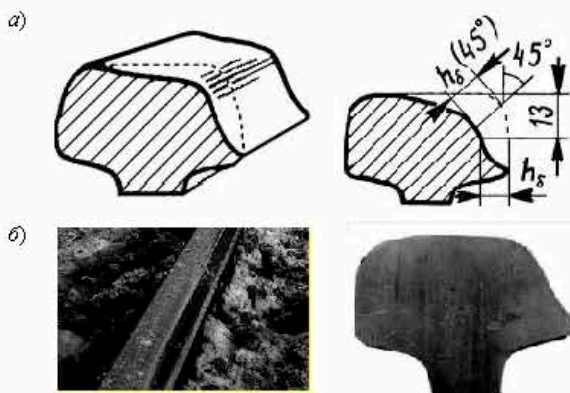


Рисунок 6.20 – Схематическое изображение дефекта 44.0 (а) и его вид (б) (поперечный темплет рельса)

Способы выявления.

Внешний осмотр, проверка измерительными приборами. Боковой износ измеряется на высоте 13 мм ниже существующей поверхности катания и определяется как разница проектной ширины головки рельса и измеренной ширины головки рельса ниже поверхности катания на 13 мм без учета наплывов с нерабочей грани рельса.

Указания по эксплуатации.

При движении по рельсам типов Р50, Р65 и Р75 с равномерным боковым износом допустимые скорости движения устанавливаются в соответствии с рекомендациями, приведенными в Инструкции [36, 41].

При интенсивном боковом износе следует использовать гребнесмазывать и рельсосмазывать (передвижные и/или стационарные).

В наружные нити кривых радиусами ≤ 650 м рекомендуется укладывать рельсы типа Р65К, рельсы, изготовленные из износостойкой стали. Необходимо обеспечивать правильное положение кривых в плане, ликвидировать возможные отступления по возвышению наружного рельса, по подуклонке рельсов и не допускать в эксплуатации отступлений в содержании ходовых частей подвижного состава.

Если рельсы с боковым износом в наружных нитях кривых удовлетворяют действующим Техническим указаниям по перекладке термоупрочненных рельсов типов Р65 и Р75 в звеньевом пути, то производят их пере-

кладку с переменной рабочей канта в прямые или во внутренние нити кривых.

По рельсам, имеющим боковой износ $> 15,0$ мм, должны производиться ежемесячные замеры величины бокового износа дорожным мастером на данных участках с последующим анализом интенсивности нарастания износа начальником дистанции пути и его докладом в службу пути.

Смятие и износ головки в зоне сварного стыка из-за местного снижения механических свойств металла после пропуска гарантийного тоннажа (рисунок 6.21).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодированное обозначение) – в сварном стыке (46.3-4).

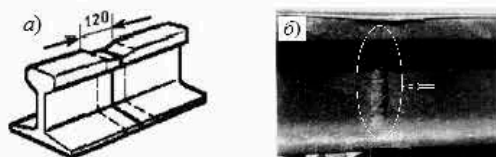


Рисунок 6.21 – Схематическое изображение дефекта 46.3-4 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Вследствие неоднородности механических свойств металла, получающейся при сварке рельсов, образуется местное одиночное (одна седловина) или двойное (две седловины) смятие головки рельса.

Интенсивному развитию седловин в эксплуатации способствуют наличие начальной неровности в сварном стыке, образовавшейся при сварке рельсов с концевой искривленностью, отсутствие или нарушение технологии упрочняющей термической обработки сварных стыков.

Способы выявления: внешний осмотр, проверка измерительными приборами, универсальным шаблоном модели 00316 и др.; контроль сварных стыков в соответствии с Технологической инструкцией по УЗ-контролю сварных стыков рельсов в рельсосварочных предприятиях и в пути и Правилами контроля стыков алюминотермитной сварки рельсов в пути.

Указания по эксплуатации.

Рельсы, имеющие смятие головки при измерении по оси головки от линейки длиной 1 м более 1,0 мм, являются дефектными.

Для уменьшения уклонов неровности на поверхности катания головки в зоне сварного стыка производят местное шлифование рельса. Для полного или частичного устранения неровностей производят шлифовку рельсов по всей длине рельсошлифовальными поездами. Для полного устранения неровностей проводят восстановление сварного стыка вырезкой дефектного участка и вваркой вставки.

До выполнения указанных работ или при невозможности их выполнения до плановой замены рельсов или восстановления сварного стыка в зависимости от глубины смятия сварного стыка h скорость движения поездов не должна превышать:

- 120 км/ч при $1,0 < h \leq 2,0$ мм,
- 70 км/ч при $2,0 < h \leq 3,0$ мм,
- 40 км/ч при $3,0 < h \leq 4,0$ мм,
- 25 км/ч при $4,0 < h$.

При глубине смятия $>4,0$ мм рельсы заменяют или восстанавливают в первоочередном порядке.

При нарастании числа дефектных рельсов с дефектом 46.3-4 в условиях эксплуатации, соответствующих действующим нормативам, информировать об этом предприятие, выполнившее сварку рельсов.

Смятие и износ головки в зоне сварного стыка из-за местного снижения механических свойств металла **до пропуска гарантийного тоннажа** (см. рисунок 6.21).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировочное обозначение) – в сварном стыке (47.3-4).

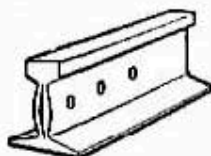
Причины появления и развития, способы выявления, указания по эксплуатации аналогичны представленным для предыдущего дефекта.

Вертикальные расслоения шейки из-за нарушения технологии изготовления рельсов (рисунок 6.22).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировочное обозначение):

- в стыке (50.1);
- вне стыка (50.2).

а)



б)



Рисунок 6.22 – Схематическое изображение дефекта 50.1-2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Дефекты технологии изготовления рельсов в виде остатков усадочной раковины, центральной пористости, резко выраженной ликвации в шейке рельса или наличия скоплений неметаллических включений могут привести к образованию расслоения шейки в эксплуатации.

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ-дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельсы, имеющие расслоение шейки, являются остродефектными и подлежат замене без промедления.

Следует предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельсов.

Трещины в шейке от болтовых отверстий в рельсе из-за повышенного динамического воздействия в стыках (рисунок 6.23).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение) – в болтовом стыке (53.1).

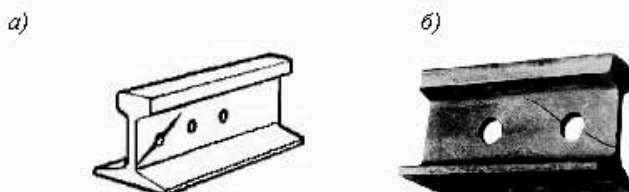


Рисунок 6.23 – Схематическое изображение дефекта 53.1 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Концентрация напряжений на кромках болтовых отверстий. Неудовлетворительное содержание стыков (ослабление болтов, смятие и провисание концов рельсов, просадки, большие растянутые зазоры) может стать причиной появления и развития дефекта.

Отсутствие упрочнения болтовых отверстий, отсутствие или некачественное исполнение фасок, надрывы на кромках отверстий, неровности на поверхности отверстий из-за некачественного сверления и коррозии ускоряют и облегчают процесс трещинообразования.

Способы выявления: внешний осмотр со снятием накладок, УЗ-дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельсы с трещинами в шейке от болтовых отверстий являются остродефектными и подлежат замене без промедления.

При установлении причины возникновения трещины от некачественного изготовления отверстия следует предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию металлургическому комбинату или другому изготовителю отверстий в рельсах.

Трещины в шейке и в местах перехода к головке от ударов по шейке и других механических повреждений, от маркировочных знаков, отверстий и других концентраторов напряжений (рисунок 6.24).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (55.1);
- вне стыка (55.2).

Причины появления и развития.

В результате ударов по шейке и других механических повреждений в шейке или в месте перехода шейки в головку могут образовываться трещи-

ны, которые при своем развитии могут привести к излому рельса. Концентраторы напряжений в виде отверстий, острых маркировочных знаков или острых кромок в местах перехода шейки в головку могут способствовать образованию трещин.

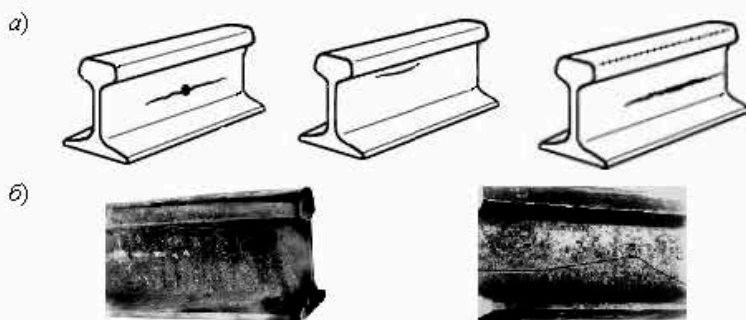


Рисунок 6.24 – Схематическое изображение дефекта 55.1-2 (а) и его вид (б)

Способы выявления: внешний осмотр, в том числе со снятием стыковых накладок, УЗ-дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельсы с трещинами в шейке и в месте её перехода в головку являются остродефектными и подлежат замене без промедления.

В случае обнаружения трещины от маркировочных знаков и других концентраторов напряжений, возникших при изготовлении рельсов, следует предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельсов.

Трещины в шейке в зоне сварного стыка из-за нарушений технологии сварки и обработки сварных стыков, приведшие к отказу рельса **после пропуска гарантийного тоннажа** (рисунок 6.25).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение) – в сварном стыке (56.3-4).

Причины появления и развития.

Основными причинами образования дефекта являются нарушения технологии сварки и обработки сварных стыков. Горизонтальные трещины преимущественно возникают из-за неудовлетворительной обработки сварного шва после сварки, а вертикальные – в результате нарушения режима сварки.

Способы выявления: внешний осмотр, контроль сварных стыков в соответствии с действующей Технологической инструкцией по УЗ-контролю сварных стыков рельсов в рельсосварочных предприятиях и в пути Правилами контроля стыков алюминотермитной сварки рельсов в пути.

Указания по эксплуатации.

Рельс с трещиной является остродефектным и подлежит замене без промедления. Следует информировать предприятие, которое производило сварку рельсов, о факте образования дефекта и условиях работы рельса.

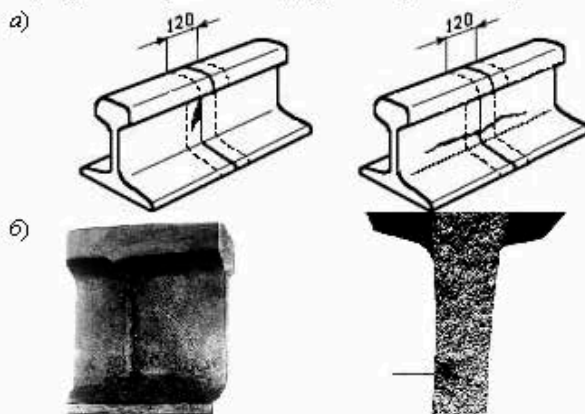


Рисунок 6.25 – Схематическое изображение дефекта 56.3-4 (а) и его вид (б) (вид поверхности трещины после вскрытия дефекта 56.3; стрелкой показано расположение дефекта сварки и развившейся от него поперечной трещины усталости (глубиной 70 мм), остальное – зона хрупкоголома)

Трещины в шейке в зоне сварного стыка из-за нарушений технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, приведшие к отказу рельса **до пропуска гарантийного тоннажа** (рисунки 6.25, 6.26).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировое обозначение) – в сварном стыке (57.3-4).

Причины появления и развития (аналогичны представленным для предыдущего дефекта).

Трещины по болтовым отверстиям сварных стыков, сваренных алюминотермитным способом, возникают из-за неудовлетворительной обработки поверхностей отверстий (отсутствия фасок, наличия заусенцев, задиров от сверления на цилиндрической поверхности), внутренних дефектов в шейке рельсов вблизи концов рельсов, внутренних дефектов термитного шва.

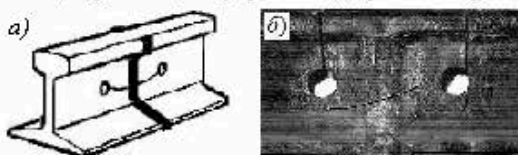


Рисунок 6.26 – Схематическое изображение дефекта 57.3-4 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития, способы выявления, указания по эксплуатации аналогичны представленным для предыдущего дефекта.

Трещины и выколы в подошве из-за нарушения технологии изготовления рельсов (рисунок 6.27).

Расположение дефекта по длине рельсов (ходовое обозначение):

- в стыке (60.1);
- вне стыка (60.2).

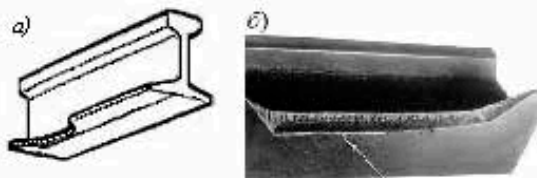


Рисунок 6.27 – Схематическое изображение дефекта 60.1-2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

В процессе изготовления рельсов из-за недостатков или нарушения технологии производства на их подошве могут образоваться дефекты (показано на рисунке 6.27) в виде волосовин, закатов и другие, которые в процессе эксплуатации могут привести к образованию трещин, а затем к выколу части подошвы или излому рельса (дефект 70.1-2).

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ-дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельс с трещиной является остродефектным и подлежит замене без промедления.

Следует предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельсов.

Местные выработки или местная коррозия подошвы рельса в местах контакта с элементами скреплений из-за нарушений норм текущего содержания пути (рисунок 6.28).

Расположение дефекта по длине рельсов (ходовое обозначение):

- в стыке (64.1);
- вне стыка (64.2).



Рисунок 6.28 – Схематическое изображение дефекта 64.1-2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Местные выработки или местная коррозия подошвы рельсов в местах контакта подошвы с ребрами подкладок, упорными скобами, клеммами, костылями в результате износа и (или) коррозии.

Способы выявления: внешний осмотр, проверка жесткой линейкой, штангенциркулем с глубиномером; дефектоскопирование для того, чтобы убедиться в отсутствии трещин в подошве рельса.

Указания по эксплуатации.

Рельсы с местными выработками сбоку или сверху подошвы глубиной более 5,0 мм в местах ее контакта с элементами скрепления считаются дефектными и подлежат замене в плановом порядке.

Рельсы типа Р50 с глубиной выработки $> 6,0$ мм заменяют в первоочередном порядке, до их замены скорость движения по ним устанавливается ≤ 40 км/ч.

По дефектным рельсам типов Р65 и Р75 в зависимости от глубины выработки h_n скорость движения поездов до плановой замены не должна превышать:

- 120 км/ч при $5,0 < h_n \leq 6,0$ мм,
- 100 км/ч при $6,0 < h_n \leq 7,0$ мм,
- 70 км/ч при $7,0 < h_n \leq 8,0$ мм (замена в первоочередном порядке);
- 25 км/ч при $8,0 < h_n$

Рельсы типов Р75 и Р65 с глубиной выработки $> 7,0$ мм заменяют в первоочередном порядке.

Рельсы считаются дефектными и подлежат замене в плановом порядке при местной (неравномерной) коррозии подошвы у её края на глубину более:

- 5,0 мм для рельсов типа Р75;
- 4,0 мм для рельсов типа Р65;
- 3,0 мм для рельсов типа Р50.

До проведения плановой замены дефектных рельсов в зависимости от глубины местной коррозии h_k от кромки подошвы скорость движения поездов по ним не должна превышать:

- 100 км/ч при $5,0 < h_k \leq 6,0$ мм для рельсов типа Р75;
при $4,0 < h_k \leq 5,0$ мм для рельсов типа Р65;
при $3,0 < h_k \leq 4,0$ мм для рельсов типа Р50;
- 70 км/ч при $6,0 < h_k \leq 8,0$ мм для рельсов типа Р75;
при $5,0 < h_k \leq 7,0$ мм для рельсов типа Р65;
при $4,0 < h_k \leq 6,0$ мм для рельсов типа Р50.

Считаются остродефектными (ОДР) и подлежат замене без промедления рельсы, у которых местная коррозия от кромки подошвы имеет глубину более:

- 8,0 мм для рельсов типа Р75;
- 7,0 мм для рельсов типа Р65;
- 6,0 мм для рельсов типа Р50.

В случае обнаружения поперечной трещины от коррозии края подошвы рельсы считаются остродефектными и подлежат замене без промедления.

Трещины и выколы в подошве из-за ударов и других механических повреждений (рисунок 6.29).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировочное обозначение):

- в стыке (65.1);
- вне стыка (65.2).



Рисунок 6.29 – Схематическое изображение дефекта 65.1-2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Вследствие механических повреждений подошвы возникает концентрация напряжений, что может привести к образованию трещин в подошве, выколу части подошвы или излому рельса.

Способы выявления: внешний осмотр, дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельс с трещиной в подошве является остродефектным и подлежит замене без промедления.

Трещины в подошве в зоне сварного стыка из-за нарушений технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, а также **поперечные усталостные трещины** из-за поджогов в местах контакта с прижимными электродами-губками контактной сварочной машины, приведшие к отказу рельса **после пропуска гарантийного тоннажа** (рисунок 6.30).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодировочное обозначение) – в сварном стыке (66.3-4).

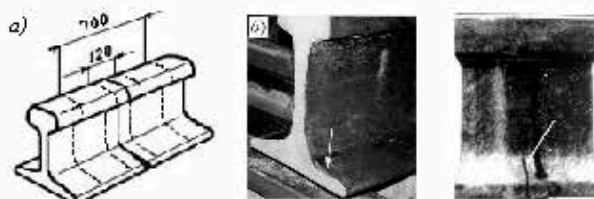


Рисунок 6.30 – Схематическое изображение дефектов 66.3-4 (а)

и их вид после вскрытия дефекта (б)

(стрелкой показан дефект 66.4 – трещина от раковины в сварном шве)

Причины появления и развития.

Наличие непроваров, трещин и других дефектов из-за нарушения режима сварки могут привести к образованию поперечных трещин в подошве в зоне сварного стыка. Причиной зарождения усталостных трещин в подошве

на расстоянии 700 мм (симметрично по 350 мм по обе стороны от сварного стыка) могут являться поджоги от воздействия электрической дуги, возникающей при плохом контакте между поверхностью подошвы и прижимными губками сварочной машины. При своем развитии трещина может привести к полному излому рельса (дефект 77.3-4).

Способы выявления: внешний осмотр; контроль сварных стыков в соответствии с действующей нормативной документацией по НК сварных стыков рельсов.

Указания по эксплуатации.

Рельс с трещиной в подошве является остродефектным и подлежит замене без промедления.

Предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию предприятию, производившему сварку рельса.

Трещины в подошве в зоне сварного стыка из-за нарушений технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, а также **поперечные усталостные трещины** из-за поджогов в местах контакта с прижимными электродами-губками контактной сварочной машины, приведшие к отказу рельса **до пропуска гарантийного тоннажа** (см. рисунок 6.30).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение) – в сварном стыке (67.3-4).

Причины появления и развития, способы выявления, указания по эксплуатации аналогичны представленным для предыдущего дефекта.

Поперечные коррозионно-усталостные трещины в подошве рельса (рисунок 6.31).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (69.1);
- вне стыка (69.2).

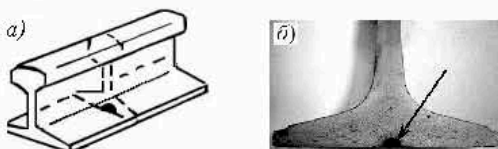


Рисунок 6.31 – Схематическое изображение дефектов 69.1-2 (а) и вид поверхностей излома после вскрытия дефектов (б)

Причины появления и развития.

В результате коррозионной усталости, возникающей при длительном увлажнении нижней поверхности подошвы в зоне контакта с подрельсовой прокладкой в сочетании с высоким уровнем рабочих напряжений от изгиба и кручения, а также высоким уровнем растягивающих остаточных напряжений в подошве рельса образуются поперечные трещины коррозионной усталости. Форма трещин – полукруглая, глубина от 1,0 до 10,0 мм. При своём

развитии после достижения критического размера трещина может привести к полному излому рельса (дефект 79.1-2).

Способ выявления – дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельс с поперечной коррозионно-усталостной трещиной в подошве является остродефектным и подлежит замене без промедления. Необходима более тщательная проверка других рельсов на данном участке.

Поперечные изломы из-за трещин, образовавшихся вследствие пороков изготовления рельсов (рисунок 6.32).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (70.1-2/20.1-2);
- вне стыка (70.1-2/60.1-2).

Причины появления и развития.

Своевременно не обнаруженные трещины дефектов 20.1-2, 60.1-2 могут привести к излому рельса. Характерный вид излома из-за дефекта 60.1-2 – ласточкин хвост.

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ- или магнитный контроль; срабатывание сигнала светофора (ложная занятость).

Указания по эксплуатации.

Рельс является остродефектным и подлежит замене без промедления.

Следует предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельса.

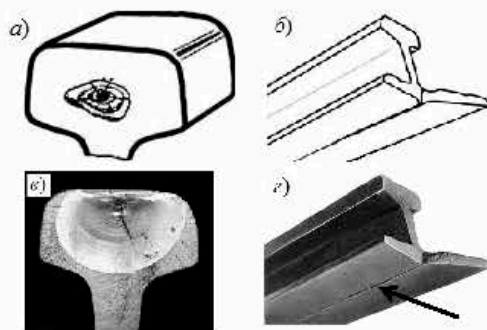


Рисунок 6.32 – Схематическое изображение дефектов 70.1-2 (а, б) и их вид (в, г): б, г – излом рельса в эксплуатации из-за поперечной усталостной трещины (дефект 70.2/20.2), возникшей от металлургического дефекта (флокена); стрелкой показан поверхностный дефект металлургического происхождения (дефект 70.2/60.2)

Поперечные изломы из-за поперечной трещины, образовавшейся от внутренней или наружной продольной трещины контактной усталости, или продольной горизонтальной или вертикальной трещины в головке **после пропуска гарантийного тоннажа** (рисунок 6.33).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодирование):

- в стыке (71.1-2/21.1-2);
- вне стыка (71.1-2/31.1-2).

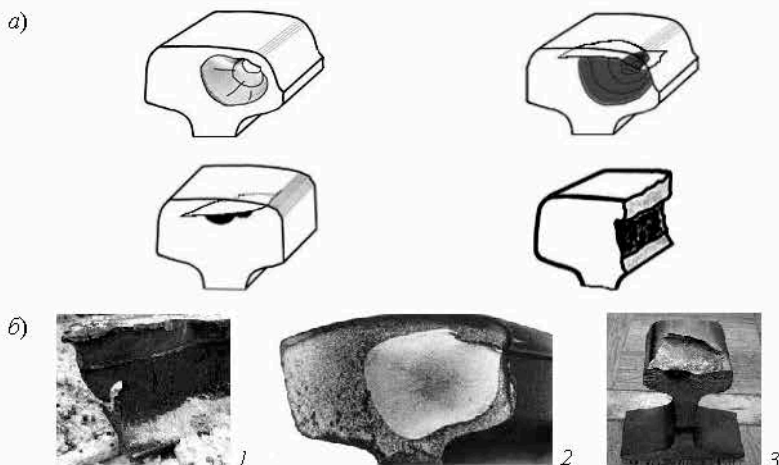


Рисунок 6.33 – Схематическое изображение дефектов 71.1-2 и их вид (б):
1 – дефект 71.1/31.1; 2, 3 – дефект 71.2/21.2

Причины появления и развития.

При своем развитии поперечные трещины контактной усталости, а также горизонтальные и вертикальные продольные трещины (дефекты 21.1-2, 31.1-2) могут привести к излому всего сечения рельса. При понижении температуры эксплуатации вероятность излома возрастает.

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ- или магнитный контроль; срабатывание сигнала светофора (ложная занятость).

Указания по эксплуатации.

Рельс является остродефектным и подлежит замене без промедления.

Следует усилить дефектоскопный контроль за рельсами на примыкающих участках пути. Произвести профильную шлифовку головок рельсов согласно действующим техническим указаниям.

В обязательном порядке следует предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию металлургическому комбинату – изготовителю рельсов.

Поперечные изломы из-за поперечной трещины, образовавшейся от внутренней или наружной продольной трещины контактной усталости, или продольной горизонтальной или вертикальной трещины в головке до пуска гарантийного тоннажа (см. рисунок 6.33).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (72.1/22.1);
- вне стыка (72.2/22.2).

Причины появления и развития.

Своевременно не обнаруженные трещины (дефекты 22.1-2) могут привести к излому рельса.

Способы выявления и указания по эксплуатации аналогичны представленным для предыдущего дефекта.

Изломы из-за образования и развития трещин в шейке от отверстий и в месте перехода шейки в головку (рисунок 6.34).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение) – в стыке (73.1/33.1, 73.1/53.1).

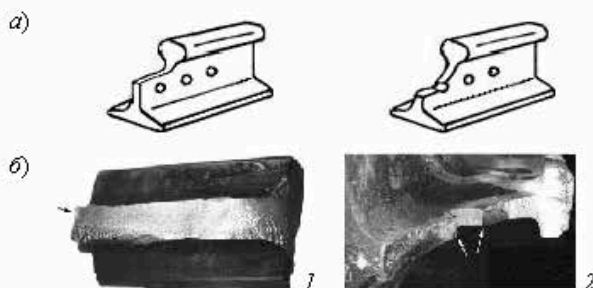


Рисунок 6.34 – Схематическое изображение дефектов 73.1 (а) и их вид (б): 1 – излом рельса в эксплуатации от усталостной трещины, возникшей от торца рельса (очаг указан стрелкой) (дефект 73.1/33.1); 2 – излом рельса в эксплуатации по первому болтовому отверстию от усталостных трещин (показаны стрелками), возникших на кромках болтового отверстия (дефект 73.1/53.1).

Причины появления и развития.

Своевременно не обнаруженные трещины (дефекты 33.1 и 53.1) могут привести к излому рельса. При понижении температуры эксплуатации вероятность излома возрастает.

Способы выявления: внешний осмотр со снятием стыковых накладок, ультразвуковой или магнитный контроль.

Указания по эксплуатации.

Рельс является острodefектным и подлежит замене без промедления. Принять меры по улучшению состояния стыков (регулировка зазоров, ликвидация выплесков, выправка концов рельсов, подтягивание стыковых болтов, замена вышедших из строя элементов креплений в стыках, наплавка концов рельсов и др.).

Следует предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию металлургическому комбинату или другому предприятию-изготовителю некачественных отверстий в рельсе.

Поперечные изломы из-за образования поперечной трещины в головке вследствие боксования и юза. Поперечные изломы из-за усталостной трещины, образовавшейся от местной выработки подошвы рельса в месте контакта с элементами скреплений или местной коррозии (рисунок 6.35).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (74.1-2/24.1-2);
- вне стыка (74.1-2/64.1-2).

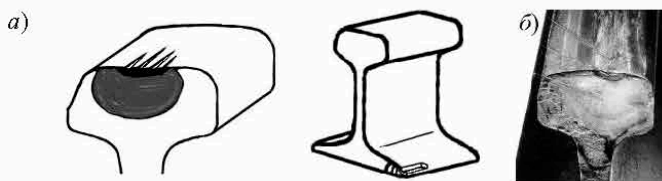


Рисунок 6.35 – Схематическое изображение дефектов 74.1-2 (а) и их вид (б):

Излом рельса в эксплуатации из-за поперечной усталостной трещины, возникшей от термомеханического повреждения рельса (дефект 74.2/24.2)

Причины появления и развития.

Своевременно не обнаруженные трещины (дефекты 24.1-2 и 64.1-2) могут привести к излому всего рельса. При понижении температуры эксплуатации вероятность излома возрастает.

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ- или магнитный контроль; срабатывания сигнала светофора (ложная занятость).

Указания по эксплуатации.

Рельс является остродефектным и подлежит замене без промедления.

Необходимо в период трех месяцев вести более частое наблюдение за остальными рельсами на участке, где прошел подвижной состав с неисправными колесами, даже если никаких внешних признаков повреждения рельсов не обнаружено. После прохода подвижного состава с колесами, имевшими ползуны или выбоины, провести в течение суток внеочередную проверку рельсов данного участка съёмными дефектоскопами. Следует предъявить рекламацию вагонному или локомотивному депо.

Изломы из-за образования трещины в головке, шейке или подошве вследствие ненормативного механического воздействия на рельс (рисунок 6.36).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодовое обозначение):

- в стыке (75.1);
- вне стыка (75.2)

Причины появления и развития.

В результате механических повреждений может произойти излом всего рельса.

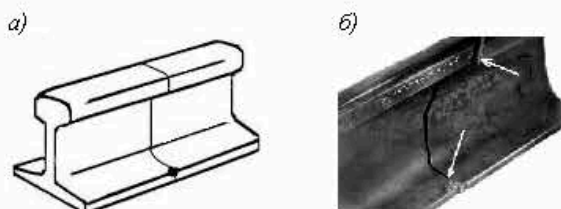


Рисунок 6.36 – Схематическое изображение дефекта 75.1-2 (а) и его вид (б)

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ-дефектоскопия, магнитный контроль, срабатывания сигнала светофора (ложная занятость).

Указания по эксплуатации.

Рельс является остродефектным и подлежит замене.

Поперечные изломы из-за трещин, возникших в головке, шейке или подошве из-за нарушений технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, **после пропуска гарантийного тоннажа** (рисунок 6.37).

Расположение дефекта по длине рельсов (ходовое обозначение) – в сварном стыке (76.3-4/26.3-4, 76.3-4/56.3-4, 76.3-4/66.3-4).

Причины появления и развития.

Своевременно не обнаруженные трещины в месте сварного стыка в головке (дефект 26.3-4), в шейке (дефект 56.3-4) и в подошве (дефект 66.3-4) могут приводить к полному излому всего сечения рельса. Полные изломы рельсов на расстоянии 700 мм (симметрично по 350 мм по обе стороны от сварного шва) могут происходить также при наличии усталостных поперечных трещин из-за поджогов от воздействия электрической дуги, возникающей при плохом контакте между поверхностью подошвы и прижимными губками сварочной машины. При понижении температуры эксплуатации вероятность излома возрастает.

Способы выявления: внешний осмотр сварного шва, УЗ- или магнитный контроль; срабатывания сигнала светофора (ложная занятость).

Указания по эксплуатации.

Рельс является остродефектным и подлежит замене без промедления. Следует предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию предприятию, производившему сварку рельсов.

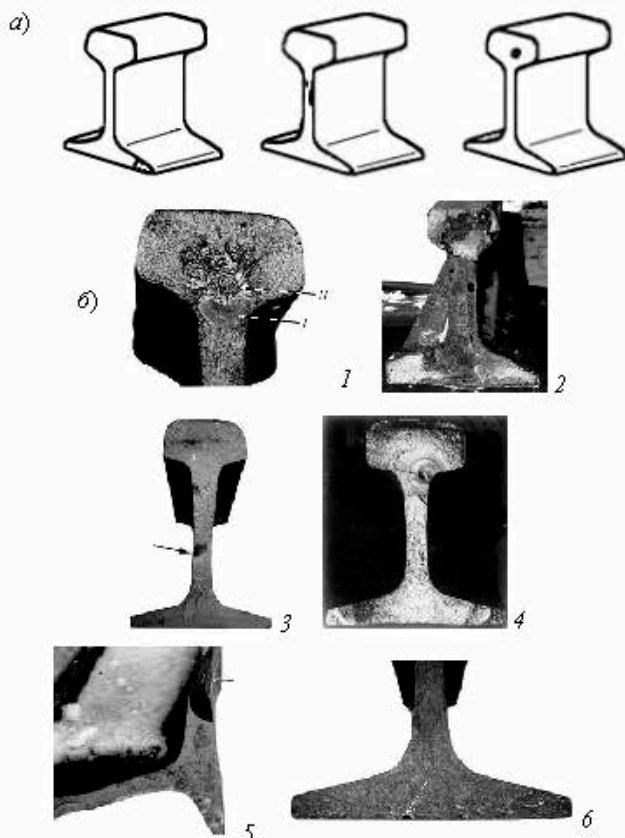


Рисунок 6.37 – Схематическое изображение дефектов 76.3-4 (а) и их вид (б):
 1 – излом рельса в эксплуатации от усталостной трещины (I), возникшей от дефекта сварки в сварном шве (пористость, II) в головке (дефект 76.3/26.3);
 2 – излом рельса в эксплуатации по сварному шву с дефектами в головке и шейке (алюминотермитная сварка) (дефект 76.4);
 3 – излом рельса в эксплуатации от усталостной трещины, возникшей от дефекта сварки в сварном шве в шейке (показан стрелкой) (дефект 76.3/56.3);
 4 – излом рельса в эксплуатации от усталостной трещины, возникшей от внутреннего дефекта сварки (раковины) в сварном шве под головкой (дефект 76.3/56.3);
 5 – излом рельса в эксплуатации в зоне сварного стыка от усталостной трещины (а), возникшей от дефекта сварки (прижог подошвы рельса, показан стрелкой);
 6 – хрупкий (б) от дефекта сварки (раковина в подошве рельса, показана стрелкой) (дефект 76.3/66.3).

Поперечные изломы из-за трещин, возникших в головке, шейке или подошве из-за нарушений технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, **до пропуска гарантийного тоннажа** (см. рисунок 6.37)

Расположение дефекта по длине рельсов (кодирование) – в сварном стыке (77.3-4/27.3-4, 77.3-4/57.3-4, 77.3-4/67.3-4).

Причины появления и развития.

Наличие грубых пороков в сварных швах в головке (дефект 27.3-4), в шейке (дефект 57.3-4) и в подошве (дефект 67.3-4) или своевременно не обнаруженных трещин в месте сварного стыка может приводить к полному излому всего сечения рельса. Полные изломы рельсов на расстоянии 700 мм (симметрично по 350 мм по обе стороны от сварного шва) могут происходить также при наличии усталостных поперечных трещин из-за поджогов от воздействия электрической дуги, возникающей при плохом контакте между поверхностью подошвы и прижимными губками сварочной машины. При понижении температуры эксплуатации вероятность излома возрастает.

Причины появления и развития, способы выявления, указания по эксплуатации аналогичны представленным для предыдущего дефекта.

Поперечные изломы из-за коррозионно-усталостных трещин в подошве рельса (рисунок 6.38).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодирование):

- в стыке (79.1/69.1);
- вне стыка (79.2/69.2).



Рисунок 6.38 – Схематическое изображение дефекта 79.1-2 (а) и его вид (дефект 79.2/69.2) (б)

Причины появления и развития.

Коррозионно-усталостные поперечные трещины в подошве рельсов (дефект 69.1-2), которые были пропущены или не могли быть обнаружены при дефектоскопировании, могут привести к полному разрушению всего сечения.

Образованию излома от небольших по размеру трещин коррозионной усталости способствует высокий уровень рабочих напряжений от изгиба и кручения, высокий уровень растягивающих остаточных напряжений в центральной части подошвы и понижение температуры эксплуатации.

Способы выявления: внешний осмотр, УЗ-дефектоскопия или магнитный контроль; срабатывания сигнала светофора (ложная занятость).

Указания по эксплуатации.

Рельс является остродефектным и подлежит замене без промедления.

Нарушение прямолинейности рельса, допущенное при выгрузке с подвижного состава, ударах и т. п. (рисунок 6.39).

Расположение дефекта по длине рельсов (ходовое обозначение):

- в стыке (85.1);
- вне стыка (85.2).

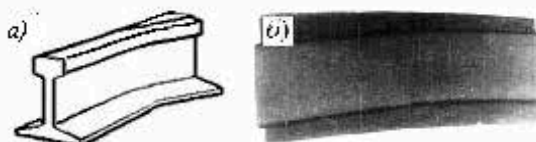


Рисунок 6.39 – Схематическое изображение дефекта 85.1-2 (а) и его вид (б)

Причины появления и развития.

Изгибы рельсов с размерами, превышающими установленные пределы [40], могут образоваться в результате небрежной погрузки, выгрузки, складирования и перевозки, а также могут быть пропущены при контроле на заводе – изготовителе.

Способы выявления: внешний осмотр, проверка измерительными приборами.

Указания по эксплуатации.

Рельсы, лежащие в пути и имеющие изгибы, которые превышают допустимые горизонтальные неровности для данной категории пути и не могут быть выправлены непосредственно в пути, считаются дефектными и подлежат замене в плановом порядке. Допускается перекладка таких рельсов на участки пути других категорий (с меньшими установленными скоростями).

Если нарушение прямолинейности произошло по вине изготовителя рельсов, то следует предъявить рекламацию предприятию-изготовителю рельсов в соответствии с гарантийными обязательствами.

Нарушение прямолинейности рельса, допущенное при сварке (рисунок 6.40).

Расположение дефекта по длине рельсов (ходовое обозначение) – в сварном стыке (86.3-4).

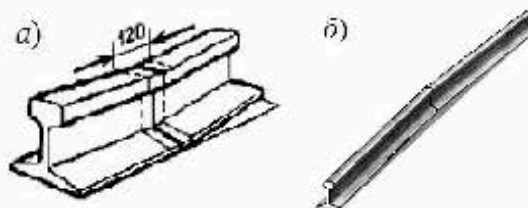


Рисунок 6.40 – Схематическое изображение дефекта 86.3-4 (а) и их вид (б)

Причины появления и развития.

Использование для сварки рельсов с невыпрямленными концами, неправильная стыковка или изгиб рельсов в горячем состоянии после сварки могут приводить к нарушениям прямолинейности, превышающим требования технических условий на сварные рельсы.

Способы выявления: внешний осмотр, проверка измерительными приборами.

Указания по эксплуатации.

Рельс, имеющий нарушение прямолинейности в зоне сварки, превышающее допустимые величины для данной категории пути, которое не может быть выправлено непосредственно в пути, считают дефектным. Такой рельс необходимо заменить в плановом порядке или переложить на участок пути с меньшими установленными скоростями, или вырезать дефектное место и сварить новую вставку.

Предъявить в соответствии с гарантийными обязательствами рекламацию предприятию, которое производило сварку рельсов.

Другие (кроме перечисленных выше) **дефекты и повреждения рельсов, оставленных в пути**, опасность эксплуатации которых может быть оценена по ближайшему типоразмеру дефекта, в том числе общая равномерная коррозия рельсов (98.0). Наличие сварного стыка на расстоянии от 750 до 3000 мм от торца рельса или друг от друга на расстоянии <3000 мм (выполненного электроконтактной или алюминотермитной сваркой).

Расположение дефекта по длине рельсов (кодированное обозначение):

- по всей длине рельса (98.0);
- в стыке (98.1);
- вне стыка (98.2-3-4).

Причины появления и развития.

К этому виду относятся дефекты и повреждения рельсов, не перечисленные выше, явившиеся причиной признания рельсов дефектными.

Причины появления и развития дефектов должны быть дополнительно исследованы после окончания эксплуатации указанных дефектных рельсов.

Способы выявления: внешний осмотр, проверка или контроль линейных размеров линейкой, штангенциркулем с глубиномером, измерительными приборами; дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Рельс относят к дефектным по признакам, которые в наибольшей степени соответствуют одному из включенных в каталог дефектов рельсов [36, 41], и поступают с таким рельсом исходя из указаний по его эксплуатации.

Являются дефектными и подлежат замене в плановом порядке рельсы, пораженные общей равномерной коррозией на глубину:

- более 2,0 мм для рельсов типа Р50;

- 3,0 мм для рельсов типа Р65;
- 4,0 мм для рельсов типа Р75.

При обнаружении трещин в местах коррозии рельс считается остродефектным и подлежит замене без промедления.

Проверить остальные рельсы на участке пути с аналогичными условиями эксплуатации.

При наличии сварного стыка на расстоянии от 750 до 3000 мм от торца рельса или друг от друга на расстоянии <3000 мм (выполненного электроконтактной или алюминотермитной сваркой) рельс считается дефектным, подлежит учету и наблюдению, а при выполнении работ по окончательному восстановлению плети или смене рельс подлежит изъятию.

Другие (кроме перечисленных выше) дефекты остродефектных рельсов, изъятых из пути.

Наличие в зоне болтового стыка: сварного стыка, лишнего болтового или технологического отверстия, наличие вдавленных маркировочных знаков. При наличии торцов рельсов и болтовых отверстий, выполненных газопламенным способом, присваивать код дефекта 99.1. При наличии в зоне сварного стыка болтового или технологического отверстия присваивать код 99.3-4. Поперечные изломы рельса без видимых дефектов и усталостных трещин в изломе:

- в стыке (99.1);
- вне стыка (99.2);
- в стыке, сваренном контактной сваркой (99.3);
- в стыке, сваренном алюминотермитной сваркой (99.4).

Причины появления и развития.

К этому виду относятся изломы и повреждения рельсов, не перечисленные выше, явившиеся причиной признания рельсов остродефектными.

Способы выявления: внешний осмотр, контроль линейных размеров линейкой с набором щупов, штангенциркулем с глубиномером, проверка измерительными приборами; дефектоскопирование.

Указания по эксплуатации.

Остродефектные рельсы подлежат изъятию из пути без промедления. При обнаружении в зоне болтового стыка: сварного стыка, лишнего болтового или технологического отверстия, наличие вдавленных маркировочных знаков, торцов рельсов и болтовых отверстий, выполненных газопламенным способом, доломанных (неопиленных) присваивать код дефекта 99.1, считать остродефектным и подлежащим замене без промедления. При наличии в зоне сварного стыка болтового или технологического отверстия, вдавленных маркировочных знаков присваивать код дефекта 99.3-4, считать остродефектным и подлежащим замене без промедления.

6.4 Маркировка дефектных и острodefектных рельсов

Острodefектные и дефектные рельсы, выявленные при дефектоскопическом или другом контроле, маркируются непосредственно после обнаружения дефекта следующим образом:

- на шейке с внутренней стороны колеи на расстоянии ≈ 1 м от левого по ходу километров стыка (зазора) светлой масляной краской наносят: для острodefектных рельсов – два, а для дефектных рельсов – один косой крест;
- на шейке рядом с дефектом с той стороны, с которой виден дефект (или всегда с внутренней стороны колеи, если дефект обнаружен дефектоскопными средствами), маркировка повторяется с указанием кода дефекта.

Если дефект распространен по всей длине рельса (например, износ), то в середине рельса указывают номер кода этого дефекта с черточками «–» соответственно перед и после кода (–44.0–).

Если дефект расположен на левом конце в пределах стыка, то код дефекта ставят рядом с первой маркировкой и вторую маркировку не делают.

При расположении дефекта на правом конце рельса в пределах стыка, дополнительно к первой маркировке повторяют ее на правом конце с указанием кода дефекта.

При взятии дефекта в накладки маркировку дефекта (с добавленной буквой «Н») ставят справа от наклейки.

При обнаружении дефекта, по которому рельс признают острodefектным, маркировку наносят на рельс сразу же после обнаружения дефекта.

Контрольные вопросы

- 1 На какие виды делятся поврежденные рельсы? Охарактеризуйте их.
- 2 Назовите термины, используемые в НТД по контролю рельсов.
- 3 Опишите структуру кодового обозначения дефектов рельсов.
- 4 Как определяется группа дефектов и место их появления по элементам сечения рельса (головка, шейка, подошва, всё сечение).
- 5 Как обозначается тип дефекта рельсов, определяемый основной причиной его зарождения и развития?
- 6 Каким принимается цифровое обозначение места расположения дефекта?

7 ДЕФЕКТЫ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Конструкционные пластмассы – это материалы на основе природных или синтетических полимеров, применяемые в конструкциях (в отличие от пластмасс технологического назначения, например, ионообменных смол).

Полимер (от греч *polis* – многий, многочисленный и *meros* – доля, часть) – вещество, молекулы которого состоят из большого числа повторяющихся звеньев.

Наиболее распространенные типы пластмасс – это реактопласты, переработка которых в изделия сопровождается необратимой химической реакцией, приводящей к образованию неплавких и нерастворимых материалов (примером их являются эпоксидные смолы), и термопласты, которые после формирования изделия сохраняют способность к повторной переработке при повышенной температуре.

Различают ненаполненные пластмассы (органические стекла, пленки) и наполненные, в которые введены другие вещества с целью изменения свойств: повышения прочности, теплостойкости, уменьшения плотности. Пенопласт, поролон являются пластмассами с воздушным наполнением.

Пластмассы выпускают либо в виде полуфабрикатов (гранул, порошка, литьевой массы), либо отформованными в заготовки (листы, стержни, трубы, пленки). Основные методы изготовления изделий из полуфабрикатов – прессование в форму гранул или порошка, нагретых до пластичного состояния, литье в форму, литье под давлением, выдувание (для полых изделий) и т. п. Из заготовок изделия получают путем обработки давлением, резанием. Соединяют пластмассы чаще всего сваркой (термопласты), склейкой между собой и с другими материалами, применяют также резьбовые соединения и напрессовку.

Развитие современной техники требует новых конструкционных материалов, превосходящих по своим прочностным, упругим и другим свойствам традиционные. К числу наиболее интересных и перспективных материалов относятся полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые всё чаще применяют в современном машиностроении, особенно в тех случаях, когда ни один другой материал не отвечает требованиям новой техники.

В настоящее время ПКМ и материалы на их основе серьезно потеснили конструкционные материалы, такие как железобетон, металл, дерево. Поли-

мерные композиционные материалы эффективно конкурируют с такими конструкционными материалами, как алюминий, титан, сталь.

Композиционные материалы (КМ) – это многокомпонентные материалы [43], состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или др. основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов, тонкодисперсных частиц и др. По структуре наполнителя КМ подразделяют на волокнистые (армированы волокнами и нитевидными кристаллами), слоистые (армированы пленками, пластинками, слоистыми наполнителями), дисперсноармированные или дисперсноупрочненные (с наполнителем в виде тонкодисперсных частиц). Матрица в КМ обеспечивает монолитность материала, передачу и распределение напряжения в наполнителе, определяет тепло-, влаго-, огне- и химическую стойкость. По природе матричного материала различают полимерные, металлические, углеродные, керамические и другие композиты. Путем подбора состава и свойств наполнителя и матрицы (связующего), их соотношения, ориентации наполнителя можно получить материалы с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических свойств, таких как прочность, жесткость, уровень рабочих температур. Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам, по усталостной прочности, термостойкости, виброустойчивости, шумопоглощению, ударной вязкости и другим свойствам и в то же время они легче. Созданы композиты с ударной прочностью и ударным модулем упругости в 2–5 раз большими, чем у обычных конструкционных сплавов.

Композиционные материалы широко применяются в авиации, ракето-, автомобиле-, машиностроении, металлургии, в химической и нефтехимической промышленности, медицине, ядерной энергетике, для изготовления спортивного снаряжения.

Особенность КМ состоит в том, что они не являются монолитным материалом в классическом смысле слова, как, например, металлы. Композиционные материалы – это фактически конструкция, создаваемая в процессе изготовления изделия.

Все дефекты КМ разделены на два больших класса: производственные дефекты, которые появляются в конструкциях либо в процессе их изготовления, либо в процессе изготовления составляющих материалов компонента, и эксплуатационные повреждения, возникающие в процессе эксплуатации.

Дефекты КМ могут быть разделены на три группы: микро-, мини- и макродефекты [42].

Микродефекты – это дефекты армирующих волокон (микротрещины, микровключения, микропустоты, отклонения от формы, изломы и др.), дефекты матрицы в промежутках между элементарными волокнами (микропоры, микротрещины, микровключения и др.), дефекты на поверхности раздела волокно – матрица и др.

Минидефекты – это крутка, искривления, разориентация волокон, мелкие риски, царапины, вмятины, обрыв отдельных нитей, жгутов или групп элементарных волокон.

Макродефекты – это трещины, пересекающие слои вглубь (надрезы), раковины, вмятины на поверхности КМ, дефекты ударного характера, растрескивания, расслоения, выпучивания, непроклеи, воздушные макровключения и др.

В процессе полимеризации композитов при их изготовлении из-за внутренних напряжений, неравномерного распределения связующего и других технологических факторов могут возникать расслоения, отслоения отдельных слоев, рыхлость, трещины и др. Также возможны обрывы нитей, жгутов арматуры и т. п. Основные типы дефектов, причины возникновения и их влияние на механические характеристики изделий из композитов изложены в работах [43, 44].

В отличие от металлов дефекты в КМ в процессе эксплуатации могут быстро увеличиваться, что приводит к снижению надежности конструкции. Через поверхностную трещину матрицы влага проникает внутрь композита и разрывает его, снижает его модуль упругости. Частый дефект в виде расслоения приводит к снижению прочности на сжатие, обрыву волокон, уменьшает усилие на разрыв.

Композиционные материалы – весьма сложные объекты для контроля, т. к. характеризуются существенной неоднородностью структуры, анизотропией свойств, большим разнообразием типов армирования (однонаправленный, продольно-поперечный, комбинированный и др.), специфическими физическими свойствами: высокими электроизоляционными качествами, низкой теплопроводностью, звукоизоляцией, большим разбросом физико-механических характеристик, малыми значениями плотности ($0,02\text{--}2,00\text{ г/см}^3$). Для композитов у одних и тех же физических методов дефектоскопии отношение сигнал/шум меньше, чем для однородных структур (металлов). Поэтому для одних и тех же методов НК чувствительность и разрешающая способность применительно к композитам соответственно ниже, чем для металлов [37]. С подобной проблемой сталкиваются при УЗ-контроле крупнозернистых структур, таких как чугун и некоторые виды нержавеющей стали.

Композиционные материалы, или композиты, имеют металлическую, а чаще неметаллическую основу (ее также называют матрицей, связующим) с заданным расположением в ней упрочнителей или армирующих усиливающих элементов. Прообразом современных композитов являются железобетон, армированные резиновые изделия. Упомянутые ранее пластмассы с

* *Армирование* (от лат. *армо* – вооружаю, снабжаю) – усиление менее прочного материала за счет включения более прочного

наполнителем из более прочного материала являются типичными современными композитами.

Композиты различают по составу материала матрицы и упрочнителя. В качестве матрицы в композитах на основе пластмасс используют различные полимеры (обычно синтетические смолы), а в качестве наполнителя – хлопчатобумажные ткани (текстолит), стекло или минералы (стеклопласты, асбопласты), углеродные волокна (углепласты) и т. д. Композиты различают также по форме наполнителя: волокниты – упрочненные волокнами или нитевидными кристаллами; дисперсионно упрочненные, в которых наполнитель имеет вид порошка или дисперсных частиц; слоистые – состоящие из слоев разнородных материалов.

Композиты последнего типа называют также многослойными конструкциями. Они состоят из двух или более слоев металлов, пластмасс, керамики. Широко применяются многослойные композиты, внешние слои которых (обшивка) состоят из металла или армированного пластика, а внутренние – из легкого заполнителя – пенопласта, структуры типа пчелиных сот (из металлической фольги, пластика, бумаги).

Композитные материалы выпускают либо в виде заготовок (листов, труб), либо в виде готовых изделий. Для их получения используют такие операции, как прессование массы из связующего и наполнителя, намотку на оправку упрочнителя, пропитанного связующим, прессование слоев различного состава, склейку обшивки с легким заполнителем, изготовление каркаса из обшивок или упрочнителя с последующим заполнением этой конструкции связующим под давлением и другие способы. Соединяют композиты между собой и с другими материалами клейкой.

Возникновение дефектов в ПКМ во многом определяется вязкостью связующего, степенью пропитки армирующего материала, температурой технологического оборудования, температурой входящего армирующего материала, скоростью протягивания арматуры, ее напряжением, давлением обжатия армирующего материала, сушкой армирующего материала, липкостью, содержанием летучих и растворимых веществ, плотностью полуфабриката, скоплением связующего армирующего наполнителя и способом его укладки.

Различают методы открытого и закрытого формирования композитов. Характерными дефектами для методов открытого формирования являются пористость, расслоения, участки неполного отверждения, изменение толщины, низкое значение физико-механических свойств, неравномерное распределение связующего наполнителя, складки. Для закрытого формирования характерными дефектами являются трещины, расслоения, локальная пористость, неравномерное распределение связующего наполнителя и участки его локальной ориентации, нарушения ориентации наполнителя, внутренние остаточные напряжения, обрывы нитей и волокон.

При изготовлении композитных материалов существует много факторов, которые могут приводить к образованию дефектов различных типов или слабых мест [43]. К счастью, большинство таких дефектов образуется нечасто, может быть легко предотвращено или не сильно влияют на работоспособность изделия. К дефектам, обычно представляющим наибольший интерес, относятся расслоения и пустоты. Это – несплошности в структуре, которые, в зависимости от местоположения, могут резко уменьшить прочность.

К основным дефектам ПКМ можно отнести:

- трещины;
- поры;
- включения;
- расслоения;
- пустоты (несплошности);
- нарушение ориентации волокон;
- обрывы армирующих элементов.

Рассмотрим подробнее некоторые дефекты, встречающиеся в ПКМ.

Расслоение – разделение слоев в пределах ламината в результате образования газовых карманов или загрязнений. Расслаивание вызывается ненадлежащей подготовкой поверхности, включением чужеродного материала, или повреждающим воздействием во время транспортировки или обработки (рисунок 7.1).

Пустоты – небольшие группы воздушных или газовых микропузырей, стремящихся расположиться вдоль границ слоев. Пустоты (рисунок 7.2) обычно образуются по двум причинам:

– несовпадения в наборе используемых инструментов во время цикла отверждения, приводящие к неравномерному распределению давления по поверхности детали и образованию промежутков, которые не может заполнить смола;

– объединенное действие смолы с высоким содержанием летучих и короткого цикла затвердевания, если летучий компонент не был удален до того, как смола начала отверждаться, сформируются пустоты. Иногда пустоты формируются из-за того, что смолой адсорбируется влага. Надлежащее хранение и контроль за процессом предотвратят появление дефекта).

Пористость – объединение воздушных и газовых микропузырей в локальной области в пределах объема материала (см. рисунок 7.2).

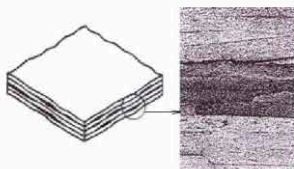


Рисунок 7.1 – Расслоение

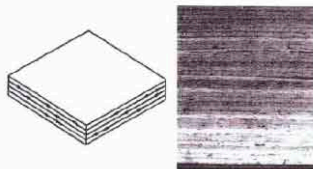


Рисунок 7.2 – Пустоты и пористость

Вызывается прерванным течением смолы во время затвердевания, локальным чрезмерным нагревом или загрязнением смолы. Механические свойства должны деградировать при относительно высокой доле пористости, но влияние пористости оказывается минимальным, если ее доля составляет меньше чем 3 %.

Включения – инородный материал, случайно попавший в пакетную заготовку, такой как поддерживающая бумага, лента и другие загрязнители (рисунок 7.3).

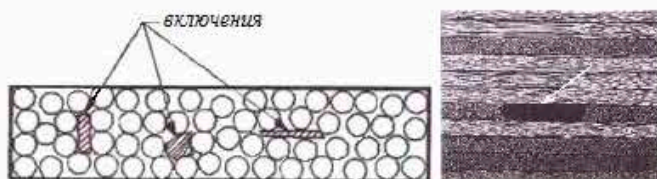


Рисунок 7.3 – Включения

Изменения доли матричного материала – области, обогащенные смолой или с недостатком смолы, которые могут образоваться, когда ламинат уплотнен ненадлежащим образом или течением ненадлежащим образом управляют во время затвердевания (рисунок 7.4).

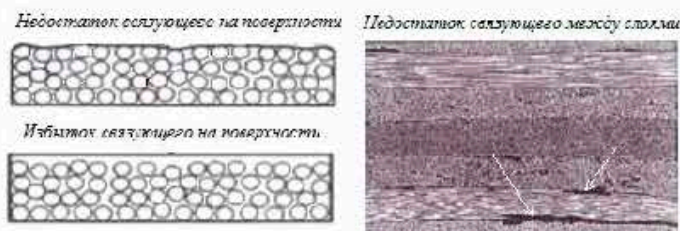


Рисунок 7.4 – Изменение объема (доли) связующего (смолы)

Изменения доли волокна – резкие изменения в ориентации волокон, появляющихся в виде морщин, искривлений, изменения расстояний и т. д., которые возникают при укладке или затвердевании (рисунок 7.5).

Просветы при соединениях встык – промежутки между лентами или тканью, которые вызваны отсутствием опыта укладки (рисунок 7.6).

Просветы при соединении встык сотовых элементов – открытые места между смежными сотовыми элементами или между сотовым элементом и прилегающим слоем, вызванные отсутствием опыта укладки (рисунок 7.7).

Непроклеи – отсутствие связи в месте соединения между двумя различными элементами детали из-за загрязнения поверхности; плохая подгонка частей детали (рисунок 7.8).

Поверхностная царапина – узкая щель, вызванная случайным воздействием чего-то грубого или заостренного; может приводить к поломке волокон (рисунок 7.9).

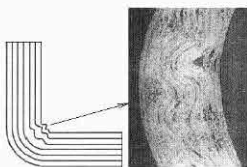


Рисунок 7.5 – Изменение объема (доли), укладки и ориентация волокна

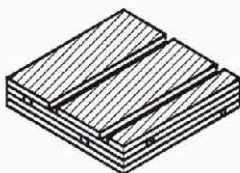


Рисунок 7.6 – Просветы на стыках

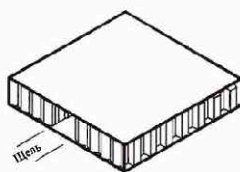


Рисунок 7.7 – Просветы на стыке сотовых элементов

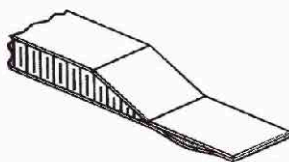


Рисунок 7.8 – Непроклей

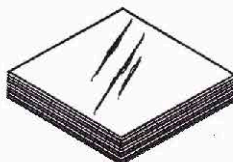


Рисунок 7.9 – Царапины на поверхностном слое

Поверхностная утяжина – искажение поверхности, вызванное инородным материалом, приводящее к деформированным, но не поломанным волокнам (рисунок 7.10).

Изношенный или *сожженный материал* – вызванный чрезвычайной высокой температурой во время отверждения или отмеченный значимым изменением цвета материала (рисунок 7.11).

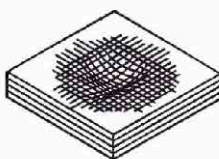


Рисунок 7.10 – Утяжина на поверхности

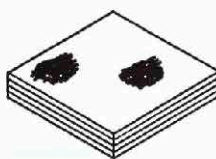


Рисунок 7.11 – Изношенный или прожженный материал

Сломанные волокна – прерванные или смещенные волокна в ламинате (рисунок 7.12).

Неправильный учет количества слоев – лишнее или недостаточное количество слоев в ламинате (различное число слоев может дать одинаковую толщину ламината, рисунок 7.13).

Нарушенная последовательность выкладки слоев – ошибка в последовательности выкладки слоев, собранных в ламинате (рисунок 7.14).

Нарушенная последовательность в укладке слоя или его ориентация в композитном ламинате (рисунок 7.15). Допускается отклонение в любом направлении без заметного влияния на прочность. Однако проблема иногда возникает, когда слои, совершенно не требующие указанного выравнивания, например, 45° или 90° оказываются там, где требуется 0° .

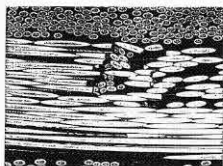


Рисунок 7.12 – Разрушенные волокна

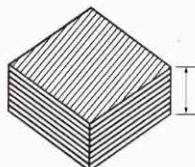


Рисунок 7.13 – Неточный учет количества слоев

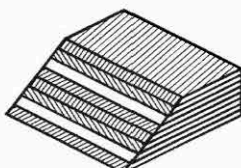


Рисунок 7.14 – Нарушенная последовательность выкладки слоев

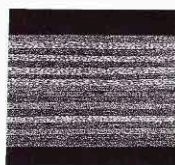


Рисунок 7.15 – Нарушенная последовательность в укладке слоя

Контроль качества композитных материалов является важнейшей составляющей производства ввиду того, что эксплуатационные дефекты композитов быстро увеличиваются, снижая надёжность конструкций. Основная проблема контроля композитных материалов связана с их многокомпонентностью, неоднородностью структуры и специфическими физическими свойствами, что затрудняет объективную оценку различных дефектов

Керамика (от греч. *keramos* – глина) – камневидные материалы неорганического происхождения, получаемые спеканием (обжигом) смешанных с жидкостью (пластифицированных) порошков или пластмасс. Изделия из керамики обладают высокой термостойкостью, твердостью, износоустойчивостью и широко применяются в электро- и радиопромышленности, строительстве, а в последнее время – в машиностроении.

Дефекты керамики возникают вследствие нарушения технологии изготовления изделий из керамической массы. Различают дефекты, связанные с искажением размеров и формы изделия (коробление, деформации); с изменением структуры материала (трещины, прыщи, посечки и свищи); дефекты поверхности (пузыри, мушки, выплавки, вскипы, наколы, металлический блеск).

Трещины возникают из-за недостаточной обработки керамической массы, неодинаковой плотности различных мест полуфабриката, резкого изменения температуры во время наибольшей усадки или в процессе охлаждения, неправильной укладки изделий и т. п.

Дефекты керамики, полученной методом спекания и горячего прессования, – пористость, коррозионное растрескивание, поверхностные и приповерхностные трещины. Возможно нарушение связей между кристаллитами, инородные включения, аномалии в размерах кристаллов, оксидные фазы, наличие зон аномальных механических деформаций и напряжений в связях между кристаллитами, зон, свободных от твердых фаз (пор), а также зон предельных механических напряжений, переходящих в разрыв связей композиционной структуры (трещины); аномалии в размерах. Существенным дефектом в структуре керамики является существование больших аномальных зон с минимальной энергией связи.

Стекло – однородное твердое аморфное вещество, получаемое при затвердевании расплава оксидов. Независимо от химического состава и температурной области затвердевания при переохлаждении расплава оно приобретает в результате постепенного повышения вязкости механические свойства твердых тел. Переход расплава в стеклообразное состояние обратим и происходит без появления новой фазы.

Дефекты стекла – нарушения физической однородности и сплошности стекла – могут быть структурными, технологическими, эксплуатационными. К ним относятся разрывы, субмикротрещины и микротрещины, технологические пузыри размерами от 0,8 до 3,0 мм, газовые включения до 0,8 мм, инородные включения, неровности поверхности. В процессе эксплуатации возможны физико-механические повреждения, коррозия, помутнения, точечные каверны, микротрещины, царапины, сколы.

Бетон (от франц. *beton*, от лат. *bitumen* – горная смола) получают после затвердевания смеси из вяжущего вещества, воды, заполнителя и некоторых добавок. В качестве вяжущего применяют цемент, гипс, силикаты и другие вещества, в качестве заполнителя чаще всего песок, гравий.

Железобетон – это сочетание монолитно соединенных бетона и стальной арматуры (упрочнителя). Бетон хорошо воспринимает сжимающие, а арматура – растягивающие нагрузки.

Железобетонные изделия выпускают в виде блоков (панелей), соединяемых между собой при строительстве. Применяют также способ заполнения жидким бетоном формы (опалубки) из дерева, пластмассы, металла, в которую уложена арматура. При твердении блоков или монолитных конструкций их иногда подвергают обработке паром при температуре 100–200 °С.

В пластмассе, керамике, бетоне могут возникать дефекты типа раковин и пузырей. Они образуются в результате неплотной набивки формы при прессовке и литье, при выделении газов в результате химической реакции. В этих материалах также встречаются включения в виде посторонних веществ. Трещины в пластмассе и композитах возникают под действием внешних и внутренних напряжений при термическом воздействии, прессовании заготовок в готовые изделия. В керамике трещины возникают при не-

правильном режиме обжига. Возможный тип дефекта – нарушение химического состава, ослабление механических свойств в результате нарушений технологии изготовления.

Бетон контролируют на внутренние дефекты типа раковин только в ответственных конструкциях. Применяют γ -графический и УЗ-методы (теневой и эхо-методы). Важным показателем качества бетона является его плотность. Для ее контроля применяют радиометрию. Измеряют интенсивность прошедшего излучения с использованием предварительной градуировки. Прочность бетона определяют по ее корреляционной связи со скоростью распространения УЗ-волн.

Основной тип дефекта в слоистых пластиках, композитах – расслоения, возникающие в результате перерывов в литье или при сборке пакетов из разнородных материалов, загрязнений соединяемых поверхностей. Дефектом являются также зоны пониженного или повышенного содержания связующего. В армированных материалах, композитах, железобетоне возможно несоединение связующего с арматурой, неправильное размещение арматуры. Для листовых материалов, оболочек из пластиков, композитов требуется измерение толщины слоев и изделия в целом.

Дефектами *полупроводниковых материалов* являются изменение параметров зонной структуры и основных параметров примесных центров, нарушения кристаллической структуры, изменение чистоты материала, наличие электрически активных и неактивных примесей, неоднородность распределения примесей по объему материала и устройства, механические напряжения, изменение параметров переходных областей в *p-n* гомо- и гетеропереходах.

К дефектам изделий из *любых материалов* относятся отклонения размеров и геометрических форм основных и свободных поверхностей (непрямолинейность, непараллельность, несоосность, неперпендикулярность, эксцентричность, шероховатость), изменение толщины покрытия, влажность указанных зон и неравномерность распределения структурных элементов.

Для проверки пластмасс, композитов, керамики, стекла, бетона, резины, которые используют в ответственных конструкциях, применяют методы НК.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение термину полимер
- 2 Что такое композиционный материал?
- 3 На какие классы и группы могут быть разделены дефекты КМ?
- 4 Какие типы КМ вы знаете?
- 5 Перечислите основные дефекты ПКМ.
- 6 Что такое керамика? Назовите ее дефекты.
- 7 Назовите основной тип дефектов в слоистых пластиках и методы их выявления.

8 НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

В основу классификации видов и методов НК положены процессы взаимодействия физического поля или вещества с объектом контроля. С точки зрения явлений, на которых они основаны, выделяют девять видов НК: акустический, вихретоковый, магнитный, оптический, проникающими веществами, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический [19].

Методы НК каждого вида классифицируют по следующим признакам:

- а) характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;
- б) первичным информативным параметрам;
- в) способам получения первичной информации.

В наименовании метода должны присутствовать классификационные признаки, свойственные данному методу НК.

Под *характером взаимодействия физического поля или вещества с контролируемым объектом* подразумевается непосредственное взаимодействие поля или вещества с контролируемым объектом, но не с проникающим веществом.

Взаимодействие должно быть таким, чтобы контролируемый признак объекта вызывал определенные изменения поля или состояние вещества. Например, наличие несплошности вызывает изменение прошедшего через нее излучения или проникновение в нее пробного вещества. В некоторых случаях используемое для контроля физическое поле возникает под действием других физических эффектов, связанных с контролируемым признаком. Например, электродвижущая сила, возникающая при нагреве разнородных материалов, позволяет контролировать химический состав материалов (термоэлектрический эффект).

Под *первичным информативным параметром* подразумевается одна из основных характеристик физического поля или проникающего вещества, регистрируемая после взаимодействия этого поля или вещества с контролируемым объектом.

Под *первичной информацией* подразумевается совокупность характеристик физического поля или проникающего вещества, регистрируемая после взаимодействия этого поля или вещества с контролируемым объектом. Из-

мерение и регистрацию какого-либо информационного параметра осуществляют с использованием конкретного типа датчика или вещества.

Магнитный неразрушающий контроль – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом. Его применяют для контроля объектов из ферромагнитных материалов. Свойства, которые требуется контролировать (химический состав, структура, наличие несплошностей и др.), обычно связаны с параметрами процесса намагничивания и петель гистерезиса.

Один из наиболее распространенных методов НК – *магнитопорошковый метод* (МПК). При этом на предварительно намагниченную поверхность контролируемого объекта или в процессе намагничивания наносят специальный порошок либо суспензию в виде мелкодисперсной взвеси магнитных частиц в жидкости. После этого при помощи ручного электромагнита, постоянного магнита или другого намагничивающего устройства создаётся магнитное поле. В области расположения дефекта возникает магнитное поле рассеяния, где оседают магнитные частицы. Полученный индикаторный рисунок подлежит рассмотрению и расшифровке либо невооружённым глазом при обычном освещении, либо с использованием УФ-ламп. После этого изделие размагничивают.

Магнитопорошковый метод НК применяется для изделий из ферромагнитных материалов и эффективен для выявления поверхностных и приповерхностных дефектов:

- усталостных, закалочных, шлифовочных, ковочных и иных трещин;
- волосовин;
- неметаллических включений;
- флокенов;
- несплавлений и прочих несплошностей.

Недостаток МПК в том, что он не позволяет определить глубину и раскрытие обнаруженных трещин. Этот метод не предназначен для измерения размеров и установления характера дефектов, он сугубо индикаторный.

Феррозондовый метод НК (ФЗК) основан на измерении феррозондовым преобразователем магнитных *полей рассеяния*, созданных дефектом в предварительно намагниченном изделии.

Магнитографический метод основан на регистрации и записи магнитных полей рассеяния с использованием в качестве индикатора ферромагнитной ленты, последующем считывании, и расшифровке этой записи. Информация о результатах контроля считывается с помощью магнитографического дефектоскопа: возникающий на экране электрический сигнал пропорционален величине остаточного магнитного потока полей рассеяния дефектов, записанных на ленте.

Электрический неразрушающий контроль – вид НК, основанный на анализе параметров электрического поля или электрического тока, взаимо-

действующих с контролируемым объектом или возникающими в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия.

Вихретоковый неразрушающий контроль (ВТК) – вид НК, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте.

Интенсивность и распределение вихревых токов в объекте зависят от его размеров, электрических и магнитных свойств материала, от наличия в материале нарушений сплошности, взаимного расположения преобразователя и ОК, т. е. от многих параметров.

Регистрация этих параметров позволяет:

- обнаруживать даже микроскопические дефекты;
- измерять толщину тонкостенного трубного и листового проката;
- оценивать качество термообработки;
- определять глубину поверхностных трещин и пр.

Вихретоковый метод может применяться лишь для НК электропроводящих материалов и подходит для выявления дефектов, расположенных на малой глубине. Достоинством является то, что все измерения выполняются бесконтактным способом, легко поддаются автоматизации и не занимают много времени.

Радиоволновой неразрушающий контроль – вид НК, основанный на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом.

Обычно применяют волны сверхвысокой частоты (СВЧ) диапазона длиной 1–100 мм и контролируют изделия из материалов, где радиоволны затухают слабо: диэлектрики (пластмассы, керамика, стекловолокно), магнитодиэлектрики (ферриты), полупроводники, тонкостенные металлические объекты.

Тепловой неразрушающий контроль (ТНК) – вид НК, основанный на анализе параметров теплового поля контролируемого объекта (ИК-излучение), вызванных дефектами. ИК-излучение преобразуется в видимый спектр для последующего анализа. Пример такого подхода – тепловизионная съёмка. Применение тепловизоров, измерителей точки росы, пирометров и прочих приборов для термографических обследований позволяет оценивать качество теплоизоляции, выполнять энергоаудит зданий и сооружений, проводить строительную экспертизу и пр. Термография как вид обследования – эффективный способ проверки промышленных машин и оборудования на предмет наличия перегреваемых узлов. Тем самым можно определить степень их износа и определить вероятность выхода из строя.

Этот вид контроля применим к объектам из любых материалов. Измеряемым информационным параметром служит температура или тепловой поток.

Оптический неразрушающий контроль – вид НК, основанный на регистрации параметров оптического излучения после взаимодействия с контролируемым объектом или собственного оптического излучения исследуемого объекта.

Оптические методы имеют очень широкое применение благодаря большому разнообразию способов получения первичной информации. Возможность их применения для наружного контроля не зависит от материала объекта. Самым простым методом является органолептический визуальный контроль, с помощью которого находят видимые дефекты, отклонения от заданных формы, цвета и т. д.

Визуальный и измерительный контроль – технически самый простой метод НК с минимальными трудозатратами, один из основных в группе оптических методов. Осмотр объекта – базовый этап, предшествующий другим видам диагностики. Основной металл и сварные соединения проверяют на предмет наличия ржавчины, прожогов, вмятин, заусенцев, наплывов. Дополнительно измеряют форму и размеры кромок, сборочных единиц под сварку, размеры прихваток, перекрытий деталей в нахлесточных соединениях и т. д.

Основными руководящими документами для этого метода являются РД 03-606-03 (отменён с 01.01.2021 г., но пока применяется в качестве методического источника) и ГОСТ Р ИСО 16737–2014 [45, 46].

Для проведения визуального и измерительного контроля используется обширный арсенал инструментов и принадлежностей – лупы, шаблоны сварщика, рулетки, угольники, штангенциркули, линейки и многое другое. Для большего удобства приспособления комплектуются в наборы.

Радиационный неразрушающий контроль – вид НК, основанный на анализе параметров проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом.

В наименовании видов контроля слово «радиационный» может быть заменено словом, обозначающим конкретный метод ионизирующего излучения (например, рентгеновский, нейтронный и т. д.).

Чаще всего под ним подразумевают радиографический контроль (РК). Ионизирующее излучение от источника (рентгеновского аппарата или γ -дефектоскопа) проходит через материал и поглощается плёнкой (запоминающей пластиной или плоскопанельным детектором). Радиография по праву считается одним из самых достоверных видов НК. На рентгеновских снимках можно чётко идентифицировать следующие типы дефектов:

- трещины;
- поры;
- вольфрамовые и шлаковые включения;
- подрезы;
- превышение проплава;
- выпуклость и вогнутость сварных соединений.

Рентген сварных швов – неотъемлемый этап строительства магистральных и технологических трубопроводов, сосудов под давлением, арматуры и пр. Результаты радиографии могут подтвердить или опровергнуть предположения о наличии дефектов, ранее выявленных при помощи УЗ-контроля.

Однако радиационный метод НК имеет свои ограничения. Во-первых, он очень требователен к правильному подбору и качеству расходных материалов – плёнок, экранов, реагентов. Во-вторых, большую роль играют квалификация и опыт персонала – способность правильно рассчитать дозу излучения, время экспозиции, навыки фотохимической обработки и пр. Снимки должны обладать заданной оптической плотностью, удовлетворять требованиям контрастности и резкости. В-третьих, достаточно велика стоимость оборудования – рентгеновских аппаратов, кроулеров, проявочных, сушильных машин и пр. Кроме того, РК не способен выявлять:

- трещины и непровары с раскрытием $<0,1$ мм (при радиационной толщине в пределах 40 мм), 0,2 мм (при радиационной толщине 40–100 мм) либо 0,3 мм (при толщине в диапазоне 100–150 мм);
- дефекты, протяжённость которых в направлении излучения меньше, чем удвоенное значение абсолютной чувствительности контроля;
- трещины и непровары с плоскостью раскрытия, отличной от направления просвечивания.

Нередко дефекты на снимках можно спутать с изображением посторонних элементов – углов, деталей, участков с перепадом толщины и пр. Ещё один недостаток рентгеновских методов – потенциальная опасность для здоровья. Для работы с источниками ионизирующего излучения необходимо иметь разрешительные документы соответствующих органов.

Акустический неразрушающий контроль – вид НК, основанный на анализе параметров упругих волн, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте.

При использовании возбуждаемых упругих волн ультразвукового диапазона частот (выше 20 кГц) допустимо применение термина «ультразвуковой» вместо термина «акустический».

Параметры упругих волн тесно связаны с такими свойствами материалов, как упругость, плотность, анизотропия (неравномерность свойств по различным направлениям) и др.

Ультразвуковая дефектоскопия, пожалуй, самый универсальный метод, обязательный для применения на самых разных опасных производственных объектах. Применяется практически всюду, начиная от диагностики железнодорожных путей и заканчивая литейным производством.

Ультразвуковая дефектоскопия обладает рядом достоинств:

- позволяет обнаруживать наиболее критичные дефекты;

- безопасна для оператора – в отличие от капиллярного или радиационного контроля;

- подходит для контроля как металлических, так и для неметаллических материалов;

- может применяться как на производственных предприятиях, так и на полевых объектах, где предъявляются высокие требования к производительности;

- обеспечивает наглядность контроля (у новейших дефектоскопов есть функции построения В-, С-сканов, профилей дна изделия и пр.).

Ультразвуковой контроль как вид НК объединяет множество направлений – традиционный контроль теньвым, зеркальным, эхо-методом, TOFD, фазированные решётки, УЗ-толщинометрию, акустическую эмиссию и т. д.

В то же время УЗ-дефектоскопия имеет ограничения, заключающиеся в том, что она:

- требовательна к качеству поверхности, её шероховатости (нужно предварительно зачищать, удалять окалину, ржавчину, загрязнения, остатки лакокрасочных материалов);

- не очень эффективна для обследования металлов с крупнозернистой структурой;

- для точной классификации дефектов и оценки их фактических размеров требуются современные технические средства и высокая квалификация оператора.

Контроль проникающими веществами – вид НК, основанный на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта.

При визуальном осмотре поверхностных дефектов термин «проникающими веществами» может быть изменен на «капиллярный», а при выявлении сквозных дефектов – на «течеискание».

Данный вид НК считается одним из самых эффективных, простых и доступных методов для обнаружения поверхностных и сквозных дефектов.

Капиллярные методы контроля основаны на проникновении в дефекты контролируемого изделия специальных индикаторных пенетрантов, имеющих цветовой тон или люминесцирующих при воздействии УФ-излучения.

Методы капиллярного контроля подразделяются в зависимости от типа проникающего вещества:

- *метод проникающих растворов* – жидкостный метод капиллярного НК, основанный на использовании в качестве проникающего вещества жидкого индикаторного раствора.

- *метод фильтрующихся суспензий* – жидкостный метод капиллярного НК, основанный на использовании в качестве жидкого проникающего ве-

щества индикаторной суспензии, которая образует индикаторный рисунок из отфильтрованных частиц дисперсной фазы. Разновидности метода: цветной, люминесцентный и люминесцентно-цветной.

В зависимости от способа выявления индикаторного рисунка методы капиллярного контроля подразделяют:

- *на яркостный (ахроматический)*, основанный на регистрации контраста в видимом излучении ахроматического рисунка на фоне поверхности ОК;
- *цветной*, основанный на регистрации контраста в видимом излучении цветного индикаторного рисунка на фоне поверхности ОК;
- *люминесцентный*, основанный на регистрации контраста люминесцирующего в длинноволновом УФ-излучении видимого индикаторного рисунка на фоне поверхности ОК;
- *люминесцентно-цветной*, основанный на регистрации контраста цветного или люминесцирующего индикаторного рисунка на фоне поверхности ОК в видимом или длинноволновом УФ-излучении.

Для выявления дефектов, не обнаруживаемых выше перечисленными методами, используют газосорбционный радиоизотопный метод контроля. В качестве вещества, заполняющего поверхностные дефекты, в этом случае применяют не жидкие пенетранты, а газообразный β -радиоактивный газ. Излучение газа, сорбированного поверхностными дефектами, можно зарегистрировать на рентгеновской пленке или люминесцирующими преобразователями излучения. Контроль дефектов этим методом включает обезгаживание изделия в вакуумной камере, наполнение камеры β -излучающим газом, удаление изделия из камеры, получение изображения на рентгеновской пленке или выявление дефектов с помощью люминесцирующих преобразователей.

Методы течеискания весьма разнообразны и существенно различаются по чувствительности, избирательной реакции на пробное вещество, принципам обнаружения утечки этого вещества, по виду используемых при реализации метода пробных веществ и т. д.

Методы течеискания предназначены для оценки степени негерметичности объекта контроля и его основных частей, а также для локализации течей как в основном материале, так и в соединениях различного типа (сварных, паяных, резьбных и т. п.). Методы течеискания применяют при изготовлении, эксплуатации и ремонте герметизированных объектов.

ГОСТ 24054–80 [47] устанавливает классификацию методов течеискания по первичному информативному параметру, способу получения первичной информации и способу реализации методов.

По первичному информативному параметру методы течеискания подразделяют на **газовые** и **жидкостные**, т. е. первичным признаком

классификации является агрегатное состояние контрольного (пробного) вещества, проникающего через течь (газ или жидкость).

По способу получения первичной информации при обнаружении пробного вещества, проникающего через течь, т. е. принципиальной основе метода течеискания различают:

- *масс-спектрометрический метод* – регистрация проникшего через течи пробного газа путем разделения ионов различных газов по отношению их массы к заряду в электрическом и магнитном полях;

- *галогенный метод* – регистрация проникшего через течи пробного вещества по увеличению эмиссии положительных ионов с накаливаемой металлической (платиновой) поверхности при попадании на нее галогеносодержащих веществ;

- *электрозахватный метод* – регистрация проникшего через течи электроотрицательного пробного газа по изменению электропроводимости разрядного промежутка детектора;

- *плазменный метод* – регистрация проникшего через течи электроотрицательного пробного газа по изменению частоты срывов колебаний высокочастотного генератора;

- *пузырьковый метод* – регистрация пузырьков пробного газа, проникшего через течи, в жидкости или индикаторном покрытии;

- *манометрический метод* – регистрация изменения давления, обусловленного утечкой пробного газа через течи;

- *вакуумметрический метод* – регистрация изменения давления, обусловленного натеканием пробного газа или пробной жидкости через течи;

- *химический метод* – регистрация проникшего через течи пробного газа или жидкости по эффекту цветных химических реакций с индикаторным покрытием;

- *инфракрасный метод* – регистрация проникшего через течи пробного газа путем избирательного поглощения инфракрасного излучения пробным газом;

- *катарометрический метод* – регистрация проникшего через течи пробного газа за счет отличия его теплопроводности от теплопроводности воздуха;

- *звукорезонансный метод* – регистрация проникшего через течи пробного газа за счет отличия в нем скорости звука и коэффициента затухания амплитуды звуковой волны от воздуха;

- *радиоактивный метод* – регистрация проникшего через течи радиоактивного пробного газа или жидкости по интенсивности его излучения;

- *искровой метод* – регистрация мест течи по изменению цвета свечения безэлектродного высокочастотного разряда;

- *акустический метод* – регистрация акустических волн, возбуждаемых пря истечении газов через течи;

– *фотоионизационный метод* – регистрация паров органических пробной среды, проникших через течи, путем ионизации молекул пробной среды под воздействием ультрафиолетового излучения;

– *метод полупроводниковых твердотельных сенсоров* – регистрация проникшего через течи пробного вещества по изменению одной из характеристик (проводимости, порогового напряжения и т. п.) полупроводника, легированного различными соединениями;

– *люминесцентный метод* – регистрация контраста люминесцирующего следа, образуемого пробным веществом (жидкостью) в месте течи на фоне поверхности контролируемого объекта при ультрафиолетовом облучении поверхности;

– *яркостный (ахроматический) метод* – регистрация контраста ахроматического следа, образуемого в местах течей контрольной средой (пробной жидкостью) на фоне поверхности контролируемого объекта в видимом свете;

– *цветной (хроматический) метод* – регистрация проникающей через течи контрольной среды (пробной жидкости) по изменению цвета индикаторного покрытия за счет его растворения.

По способу реализации в производстве широко применяются следующие методы течеискания: вакуумных (гелиевых) камер, обдува, шупа, бескамерный, камерный, опрессовки с погружением в жидкость (с пенным индикатором), вакуумно-пузырьковый и др.

В процессе развития техники бездефектность материала всегда была важнейшим фактором. Даже при использовании наилучших материалов, наиболее совершенных конструкций и технологических процессов в получаемых изделиях могут существовать дефекты.

Однако цель неразрушающих испытаний не сводится только к обнаружению дефектов. Сфера их применения гораздо шире: неразрушающие испытания используют для контроля свойств и оценки надежности материала изделия.

Таким образом, неразрушающие испытания служат инструментом для улучшения методов конструирования и технологических процессов. С помощью неразрушающих испытаний можно определить, где и каким образом возникают дефекты, чтобы затем устранить причину их возникновения.

Методы НК применяют для проверки металлов, пластмасс, керамики, стекла и пр., которые используют в ответственных конструкциях [43].

В последнее время методы НК всё более активно начинают применяться в производстве и эксплуатации изделий из КМ.

При этом к НК предъявляются следующие требования:

– возможность осуществления эффективного контроля на различных стадиях изготовления, в эксплуатации и при ремонте изделий;

– возможность контроля качества продукции по большинству заданных параметров;

- согласованность времени, затрачиваемого на контроль, со временем работы другого технологического оборудования;
- высокая достоверность результатов контроля;
- возможность механизации и автоматизации контроля технологических процессов, а также управления ими с использованием сигналов, выдаваемых средствами НК;
- высокая надежность дефектоскопической аппаратуры и возможность использования ее в различных условиях;
- простота методики контроля, техническая доступность средств контроля в условиях производства, ремонта и эксплуатации.

Выбор того или иного метода НК определяется следующими факторами:

- агрегатным состоянием контролируемой среды (газообразное, жидкое, твердое);
- физическим состоянием контролируемой среды (диэлектрик, полупроводник, магнетик, парамагнетик и пр.);
- видом структуры контролируемой среды (аморфная, монокристаллическая, поликристаллическая, крупноструктурная неоднородная, изотропная или анизотропная и т. д.);
- способностью взаимодействовать с проходящим излучением (слабое или сильное поглощение, слабое или сильное рассеяние и т. д.);
- методологией контроля (в вакууме, в жидкости, при высокой температуре, под большим давлением и т. д.);
- размером, конфигурацией и конструктивными особенностями объекта контроля (мало-, средне-, крупногабаритный, простой или сложной формы, одно- или многослойная и т. д.);
- видом решаемой задачи (дефектоскопия, толщинометрия, диагностика прочности, контроль кинетики отвержения, контроль напряженно деформированного состояния, контроль содержания компонентов и др.).

Композиционные материалы – весьма сложный объект контроля, т. к. характеризуются существенной неоднородностью структуры, анизотропией свойств, большим разнообразием типов армирования (однаправленный, продольно-поперечный, комбинированный и др.), специфическими физическими свойствами: высокими электроизоляционными качествами, низкой теплопроводностью, звукоизоляцией, большим разбросом физико-механических характеристик, малыми значениями плотности ($0,02\text{--}2,00\text{ г/см}^3$).

Большинство видов КМ в зависимости от используемого вида наполнителя относятся к диэлектрикам или плохим проводникам. Практически все композиты являются немагнитными материалами, поэтому методы контроля, используемые при дефектоскопии изделий из металла, например, магнитные и вихретоковый, в большинстве случаев не подходят для дефек-

тоскопии изделий из композиционных материалов. Однако эти методы могут быть применены для толщинометрии таких изделий. Не эффективны для контроля композитов также высокочастотные УЗ-методы, так как УЗ-волны с частотой выше 1 МГц либо невозможно ввести в контролируемую среду из-за их сильного поглощения и рассеяния и существенной шероховатости поверхности, либо они значительно ограничивают диапазон контролируемых значений толщины.

Радиационные методы более эффективны для контроля плотности или толщины композитов, чем для дефектоскопии, т. к. чувствительность дефектоскопии композитов данными методами при одинаковой энергии излучения в 3–4 раза ниже чувствительности дефектоскопии стали. Следует также отметить, что для этого метода контроля композиты могут находиться как в твердом, так и в пастообразном (полуфабрикат), жидком или геле-образном (связующее) состояниях.

Основные методы, которые применяются при НК изделий из КМ, представлены в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Методы НК контроля изделий из КМ [48]

Область применения	Методы контроля КМ	Информационный параметр	Производительность контроля, м ² /ч	Размеры выявляемых дефектов (min), мм	
				Раскрытие	Протяженность
Нарушение сплошности	Активный тепловой контроль	Температура, тепловое поле	0,6	0,15	10
Трещина (раскрытый дефект)	УЗ-контроль поверхностными волнами	Время прохождения УЗ-сигнала между приемным и передающим УЗ-преобразователями	2,1	0,10	15
Нераскрытые трещины (несплавление)	Метод УЗ-термографии	Акустическое излучение и температурное поле	0,6	0,001	5–7
Различные дефекты и трещины	Радиография Радиоскопия Радиометрия	Интенсивность рентгеновского излучения, преобразованного в оптическое	4–5	0,15	3
Трещины	Радиоволновой	Характеристики излучения	0,5	0,10	15

Окончание таблицы 8.1

Область применения	Методы контроля КМ	Информационный параметр	Производительность контроля, м ² /ч	Размеры выявляемых дефектов (min), мм	
				Раскрытие	Протяженность
Инородные включения, несплошности	Рентгенотелевизионный	Сравнение рентгеновского и видеоизображений	7	0,20	0,2
Несплошности многослойных конструкций типа тел вращения	Тангенциальное просвечивание	Изменение размеров и глубины расположения	3	0,20	10

Основные критерии, обуславливающие выбор данных методов НК:

- безопасность для обслуживающего персонала, чувствительность контроля;
- точность и воспроизводимость результатов контроля;
- возможность механизации и автоматизации контроля;
- обеспечение высокой производительности контроля;
- сравнительная простота методики контроля;
- информационная способность и универсальность контроля;
- наличие и возможность использования серийной аппаратуры;
- сравнительно невысокая стоимость контроля;
- возможность использования обслуживающего персонала невысокой квалификации.

Указанные методы контроля можно использовать как индивидуально, так и в комплексе. Следует учитывать, что увеличение количества используемых методов наряду с повышением чувствительности и информативности контроля приводит также к повышению стоимости и снижению производительности контроля. С повышением требований к контролю число методов в комплексе может возрастать.

При комплексном контроле решается ряд задач.

1 Определяется оптимальный комплекс физических параметров, по которому оцениваются прочность и другие физико-механические характеристики композита и изделий на их основе.

2 Разрабатывается и осуществляется оптимальный комплекс методов и средств контроля дефектов структуры.

3 Дается интегральная оценка работоспособности изделия по комплексу параметров, определенных неразрушающими методами.

Обеспечение своевременного выявления структурных дефектов, снижающих требуемые физико-механические характеристики, является одной из наиболее актуальных проблем достижения высокого качества изготавливаемых конструкций. Решение этой проблемы возможно лишь при условии оптимального выбора и применения наиболее эффективных методов и средств контроля качества.

Для выбора эффективных методов контроля качества необходимо учитывать физико-механические свойства материалов, характерные особенности внутренней структуры и структурных дефектов, геометрические параметры изделий (форму, размеры, перепады толщины), состояние поверхности изделия, условия проведения контроля, особенности технологии изготовления изделий.

Учитывая, что изготовление конструкций происходит в несколько этапов, на каждом из которых возможно образование дефектов, характерных для данной технологической стадии, необходимо проведение контроля качества на всех этапах с целью своевременного устранения, если это возможно, обнаруженных дефектов, либо исключение дальнейшего применения в технологической цепочке дефектного материала. Так, если при изготовлении силового каркаса необходимо контролировать нарушения заданной схемы армирования, то при заполнении каркаса матрицей требуется исследовать распределение плотности материала в объеме заготовки. После механической обработки полученной заготовки может возникнуть необходимость определять отклонения от заданных геометрических размеров конструкций, в особенности, если она сложной конфигурации и изготовлена из материала с заданной неоднородностью плотности. Следует особо подчеркнуть, что образованные на ранних стадиях технологического процесса дефекты, например пропуски армирующих элементов, обнаружить в готовом изделии иногда практически невозможно.

При выборе методов и средств НК необходимо учитывать предъявляемые к ним требования.

Так, при серийном производстве требуются методы, обладающие достаточной чувствительностью для выявления только недопустимых дефектов (в соответствии с техническими требованиями на материал), ранее выявленных и классифицированных. Они должны быть доступны, просты и высокопроизводительны.

В процессе отработки технологии требуются методы контроля (в некоторых случаях даже комплексы методов), позволяющие получить полную информацию о состоянии внутренней структуры материала и любых ее отклонениях от расчетных параметров, определить причины их возникновения, а также степень влияния на физико-механические и теплофизи-

ческие свойства. Для этого применяют передовые методы различной сложности. В особых случаях необходимо разрабатывать новые методы, позволяющие решить поставленные задачи.

Важнейшими характеристиками технических возможностей методов НК являются чувствительность и разрешающая способность, достоверность результатов контроля, надежность аппаратуры, требования по технике безопасности и к квалификации специалистов по НК.

Чувствительность метода определяется наименьшими размерами выявляемых дефектов:

- для поверхностных дефектов – шириной раскрытия у выхода на поверхность, протяженностью в глубину материала и по поверхности детали;
- для объемных дефектов – размерами дефекта с указанием глубины залегания.

Сравнительные данные по чувствительности некоторых методов НК приведены в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Чувствительность некоторых методов НК

Метод	Минимальные размеры выявляемых несплошностей, мкм		
	ширина раскрытия	глубина	протяжённость
Визуально-оптический	5–100	10–30	100
Капиллярный:			
– цветной	1–2	10–30	100–300
– люминесцентный	1–2	10–50	100–300
Магнитопорошковый	1	150–200	30
Вихретоковый	0,5–1,0	–	600–2000
Ультразвуковой	1–30	2–3 % от толщины изделия	–
Радиографический	100	1,5–3 % от толщины изделия	–

Достоверность результатов контроля в свою очередь определяется чувствительностью методов НК, выявляемостью и повторяемостью результатов и основана на тщательной калибровке.

Аналитический вид кривой выявляемости дефектов описывается зависимостью [49]:

$$W = 1 - \exp \lambda(x - x_0), \quad (8.1)$$

где x_0 – граничный наименьший размер выявляемого дефекта, который зависит от чувствительности метода контроля; λ – постоянная.

Вероятность пропуска дефекта с учетом ошибок оператора определяется как

$$P = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \exp(-\gamma a), \quad (8.2)$$

ε и γ – постоянные, $\varepsilon = 0,005$ (экспериментально полученная величина).

Смысл постоянной ε : предполагается, что при любом качестве контроля всегда имеется вероятность пропуска дефекта по вине оператора. Значение $\varepsilon = 0,005$ установлено на основе опроса большого числа экспертов-дефектоскопистов [50].

Разрешающая способность дефектоскопа определяется наименьшим расстоянием между двумя соседними минимальными дефектами, для которых возможна их раздельная регистрация. Измеряется она в единицах длины или числом линий на 1 мм. Предусматривается в технических требованиях на оптические приборы и радиационные дефектоскопы. Для ультразвуковых и вихретоковых дефектоскопов может оговариваться лишь при необходимости, для магнитных методов не указывается.

Достоверность результатов контроля определяется вероятностью пропуска деталей с явными дефектами или необоснованной браковкой годных деталей.

Применение того или иного метода в каждом конкретном случае характеризуется вероятностью выявления дефектов. На вероятность выявления дефектов влияют чувствительность метода, а также условия проведения процедуры контроля. Определение вероятности выявления дефектов является достаточно сложной задачей, которая еще более усложняется, если для повышения достоверности определения дефектов приходится комбинировать методы контроля. Комбинирование методов подразумевает не только использование нескольких методов, но и чередование их в определенной последовательности (технологии).

Вместе с тем стоимость применения метода контроля или их совокупности должна быть по возможности ниже. Таким образом, выбор стратегии применения методов контроля основывается на стремлении, с одной стороны, повысить вероятность выявления дефектов и, с другой стороны, снизить различные технико-экономические затраты на проведение контроля.

Требования по технике безопасности при применении различных методов значительно различаются. Например, МПК, УЗК и ВТК не требуют специальных мер защиты. При капиллярном контроле необходима защита от жидкостей, паров и органических растворителей, а также УФ-облучения, а при радиационном – от воздействия ионизирующих излучений и образующихся в воздухе вредных для организма человека газов – озона и оксидов азота.

Опишем особенности применения как методов НК, упомянутых в таблице 8.1, так и некоторых других применительно к КМ.

Большинство видов КМ в зависимости от используемого вида наполнителя относятся к диэлектрикам или плохим проводникам. Практически все КМ являются немагнитными материалами, поэтому многие методы НК, используемые при НК металлов, не подходят для контроля изделий из КМ [49].

Тепловой контроль нашел применение в производстве печатного монтажа. Плата подключается к источнику питания и работает в предусмотренном для нее режиме. Регистрация дефектов осуществляется по изменению теплового поля, образующегося при прохождении электрического тока по соединениям. Метод обладает высокой чувствительностью, $\approx 1^\circ\text{C}$. Еще более высокие результаты получают при сканировании поверхности по отдельным линиям. В этом случае можно получить информацию о тепловом поле в виде записи на бумагу последовательных амплитудных профилей по линиям сканирования или наблюдать тепловые профили на экране монитора. Качество соединений оценивают сравнением с эталоном.

Термография является одним из перспективных направлений НК конструкций из КМ. В основу этого метода положен анализ признаков наличия дефектов по изменениям температурных полей с использованием ИК-техники (тепловизор или пирометр). Термография фиксирует изменения температуры с погрешностью $\pm 0,01^\circ\text{C}$.

Поэтому даже при механическом нагружении фиксируются места концентрации энергии, где может происходить пластическая деформация с выделением тепла. Зафиксировав температурное поле на поверхности, можно определить местоположение концентратора энергии относительно поверхности изделия. Решив обратную задачу нестационарной теплопроводности, можно определить местоположение и размер дефекта.

Активный тепловой метод применяют для дефектоскопии заготовок и изделий из стеклопластика, текстолита, фторопласта и многослойных конструкций. Особенно эффективен вариант с точечным источником излучения и сканирующим ИК-приемником. В стеклопластике на глубине 5–10 мм этим способом обнаруживают дефекты площадью $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и раскрытием в лучевом направлении 0,1–1,0 мм².

Весьма эффективно применение различных *акустических методов*. Внутренние дефекты изделий несложной формы (листы, тела вращения) контролируют теневым методом. Для уменьшения затухания применяют пониженные частоты ($f \leq 200 \text{ кГц}$), импульсный эхо-метод на пониженных частотах применяют для контроля многих стеклопластиков.

Как уже отмечалось выше, для контроля КМ высокочастотные УЗ-методы неэффективны, т. к. УЗ-колебания с $f > 1 \dots 5 \text{ МГц}$ сильно ослабляются и рассеиваются матрицей, волокнами, различными включениями. Это существенно ограничивает диапазон контролируемых толщин КМ.

Специально для контроля пластмасс и многослойных конструкций на дефекты типа расслоений разработан целый комплекс низкочастотных акустических методов: импедансный, велосимметрический, свободных колебаний, акустико-топографический и др., которые позволяют контролировать практически все типы многослойных конструкций, в том числе с сотовым заполнением (рисунок 8.1).

Основная область применения этих низкочастотных методов – обнаружение зон нарушения соединений в многослойных клееных конструкциях из полимерных КМ на основе углеродных, борных, стеклянных, органических волокон (угле-, боро-, стекло-, органопластиков и т. п.).

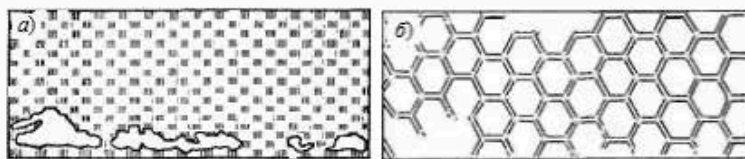


Рисунок 8.1 – Дефекты типа непрочлея в сотовой панели, выявленные различными методами НК:

а – импедансный; ($\times 0,5$); б – акустико-топографический ($\times 1$)

Этими методами УЗ-контроля могут быть выявлены дефекты в неметаллических покрытиях зоны нарушения клеевого соединения между покрытием и каркасом объекта.

Достоинством этих методов, позволяющим широко внедрить их в различных отраслях промышленности, является возможность контроля большой номенклатуры конструкций с различным сочетанием металлических и неметаллических материалов, простота реализации, портативность используемых технических средств.

Импедансный метод основан на различии механического импеданса дефектных и доброкачественных участков контролируемого изделия. Механическим импедансом Z называется комплексное отношение силы F , действующей на поверхности механической системы к средней колебательной скорости V на этой поверхности в направлении силы: $Z = F/V$. Изменение механического импеданса регистрируется преобразователем импедансного дефектоскопа.

Основная область применения метода – выявление дефектов клеевых и паяных соединений с обшивкой (до 3 мм для алюминиевых сплавов и до 1,7 мм для сталей) и элементами жесткости (лонжероном, нервюрой) или заполнителем (пенопластом, сотами и др.), а также дефектов типа расслоения и непрочлея в неметаллических покрытиях или изделиях из слоистых пластиков, при глубине залегания до 15–20 мм.

Локальный метод свободных колебаний (МСК) основан на возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в контролируемом объекте и анализе параметров этих колебаний. Если используются колебания контролируемого объекта как единого целого, то это интегральный вариант МСК, если колеблется только часть контролируемого объекта – то это локальный вариант МСК. Локальный метод требует сканирования всей поверхности контролируемого изделия.

Метод основан на возбуждении ряда частот при коротком ударе контролируемого объекта, причем чем короче импульс удара, тем шире полоса возбужденных частот. Основной способ возбуждения – электромеханический, хотя известны и некоторые другие, например, пьезоэлектрический, электромагнитно-акустический, газодинамический, оптический.

Для приема колебаний используется микрофон или пьезоприемник. Микрофон имеет более гладкую АЧХ, но более чувствителен к внешним акустическим помехам. Пьезоприемник подвержен фрикционным шумам. Информативным параметром в МСК служит спектр сигнала.

Этот метод широко используется для определения расслоений и воздушных полостей, непроклеев, расслоений, характеризующихся наличием заполненного газом промежутка. Зоны с нарушением сцепления слоев, не имеющие такого промежутка, низкочастотными акустическими методами не выявляются.

С помощью МСК выявляются дефекты в многослойных конструкциях и изделиях из пластика. МСК позволяет контролировать изделия из материалов с малыми модулями Юнга и высоким коэффициентом затухания упругих колебаний (резина, пенопласт и т. п.) и обнаруживать дефекты на большой глубине залегания (до 300 мм в пластике).

Велосиметрический метод объединяет способы контроля, использующие влияние дефекта на скорость распространения упругих волн в изделии и длину их пути между излучателем и приемником колебаний. Для этого метода характерно применение антисимметричных волн частотами 20–60 кГц и сухого точечного контакта преобразователей с контролируемыми изделиями. Дефекты регистрируются по изменению фазы непрерывной или импульсной волны, или временем распространения акустического импульса. Эти параметры не зависят от силы прижатия преобразователя к изделию, состояния акустического контакта и других меняющихся факторов, поэтому метод отличается повышенной стабильностью показаний.

Велосиметрический метод применяют для обнаружения дефектов (преимущественно расслоений) в изделиях из слоистых пластиков и неметаллических покрытиях, зон нарушения соединений между элементами многослойных конструкций, выполненных из неметаллических и металлических материалов. Метод позволяет обнаружить указанные дефекты площадью более 2–15 см² на глубине до 25 мм, с увеличением глубины залегания чувствительность падает.

Акустико-топографический метод основан на возбуждении в контролируемом изделии мощных колебаний качающейся частоты. При совпадении собственных частот отделенных дефектных зон с частотой возбуждения колебания этих зон усиливаются, и нанесенный на изделие порошок перемещается на границы дефектов, делая их видимыми. Альтернативный спо-

соб индикации увеличения амплитуды колебаний в зонах дефектов основан на использовании оптической голографии.

Этим методом хорошо выявляются дефекты паяных соединений в двух- и трехслойных конструкциях. Он эффективен для контроля дефектов, залегающих на глубине 3–5 мм.

Достоинства метода – высокая производительность, наглядность результатов, возможность контроля большого ассортимента слоистых материалов. Метод применяется для контроля конструкций с высокой добротностью, преимущественно металлических.

При бесконтактном УЗ-контроле для возбуждения волн часто используют мощные лазеры. Эта технология требует определенных мер безопасности при работе персонала и имеет ограниченное применение в полевых условиях.

Примером комплексного использования методов НК является выявление дефектов в конструкциях из композиционных материалов, используемых в авиационной промышленности средствами ИК-термографии и УЗ-контроля [51].

Наличие дефекта изменяет скорость распространения тепловой волны так, что при наблюдении за температурой на поверхности изделия, дефекты обнаруживаются в виде зон с отличающейся (относительно бездефектных областей) температурой. Глубоко расположенные дефекты наблюдаются с большей задержкой по времени и уменьшенным температурным контрастом.

Время от начала импульсного воздействия до обнаружения температурной аномалии пропорционально квадрату глубины залегания дефекта. Абсолютная величина температурного контраста изменяется во времени и примерно обратно пропорциональна кубу глубины расположения дефекта от поверхности облучения и контроля. Длительность наблюдения проявления дефекта от начала температурного переходного процесса пропорциональна квадрату глубины залегания дефекта и обратно пропорциональна коэффициенту α температуропроводности материала.

Признаки расслоений с характерным размером, сопоставимым с глубиной залегания, обнаруживаются сравнительно легко при обеспечении необходимого импульсного энергетического воздействия на поверхность объекта контроля, или при остывании предварительно нагретого объекта в атмосфере.

Проводились исследования как на углестеклопластиковых многослойных образцах толщиной 5–10 мм, в которых были выполнены искусственные дефекты, ориентированные параллельно поверхности, так и на фрагментах натуральных конструкций с естественными технологическими дефектами типа расслоений. Диаметр искусственных дефектов в указанных образцах составлял от 3 до 20 мм. Глубина залегания дефектов от 1 до 5 мм.

В опытах использован тепловизор серии ТН-9100 (фирма NEC, Япония), с температурным разрешением $\approx 0,05$ К. и УЗ импульсный дефектоскоп типа Masterscan 380 (фирма Sonatest, Великобритания).

Термограммы процесса остывания объекта (рисунок 8.2) получены в режиме отрицательного теплового воздействия (остывания предварительно равномерно нагретого фрагмента объекта в свободной атмосфере). Подобное тепловое воздействие наиболее близко моделирует тепловой переходный процесс в технологическом процессе изготовления изделий.

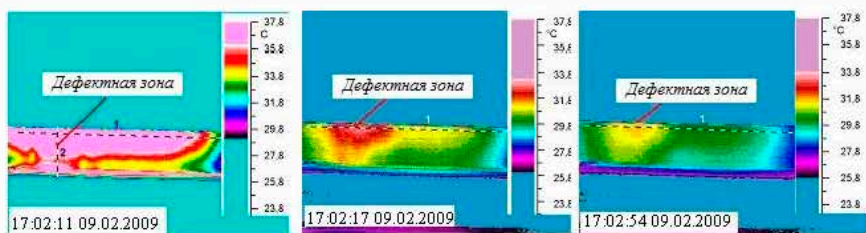


Рисунок 8.2 – Термограммы фрагмента конструкции из углестеклопластика. Область выявленного расслоения показана стрелкой.

Как видно из приведенных термограмм, дефекты надежно обнаруживаются без привлечения сложных методов обработки тепловых изображений. Из термограмм следует, что превышение температуры поверхности (в области максимального контраста) $\Delta T = 4$ °C, что более чем на порядок превышает предел температурного разрешения используемой тепловизионной системы.

Ультразвуковой контроль локализованных термографическим методом зон выполнялся дефектоскопом Masterscan 380, работающим в эхо-импульсном режиме на частоте 1 МГц, с применением прямого преобразователя раздельно-совмещенного типа.

Основной задачей УЗ-контроля являлось подтверждение результатов обнаружения дефектов термографическим методом, а также точное определение глубины залегания расслоений. Данный вид контроля предполагается использовать при осуществлении технологического процесса изготовления конструкций из многослойных композитных материалов.

Типичные изображения на экране дефектоскопа, полученные в бездефектной и дефектной зонах конструкции, приведены на рисунке 8.3.

Горизонтальные стробирующие сигналы 1 и 2, изображенные на экране дефектоскопа Masterscan 380 (рисунок 8.3), показывают области потенциального расположения дефекта (зона контроля) и донного эхо-сигнала для контроля качества акустического контакта.

Макрошлиф дефектного участка, выявленного термографическим и подтвержденного УЗ эхо-импульсным методами в конструкции из композиционного стеклопластикового материала, приведен на рисунке 8.4.

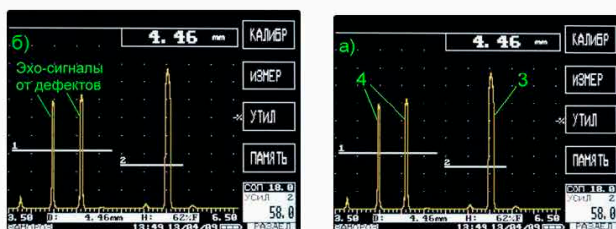


Рисунок 8.3 – Изображение на экране дефектоскопа Masterscan 380:
а – бездефектная зона изделия из углестеклопластика; б – дефектная зона изделия

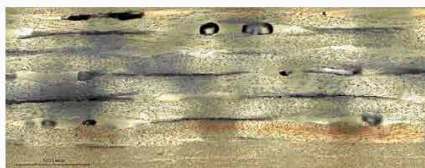


Рисунок 8.4 – Макрошлиф дефектного участка конструкции из стеклопластика, выявленного термографическим и УЗ-методами контроля

В результате исследований установлено, что эхо-импульсный УЗ-метод контроля прибором Masterscan 380 многослойных конструкций на основе стекло- и углепластиковых композитных материалов обеспечивает обнаружение более меньших по площади дефектов (расслоений, непрочных) в сравнении с тепловым и теневым УЗ-методами контроля. Как и тепловой, УЗ эхо-метод не требует двустороннего доступа к контролируемому объекту, что часто реализуется на практике.

Таким образом, полученные результаты показывают на перспективность применения комбинированного подхода к контролю, сочетающего возможности оперативного контроля значительных площадей объекта термографическим методом с последующим уточнением параметров выявленных дефектов (размера, глубины залегания и формы) УЗ эхо-импульсным методом.

Радиационный контроль – один из наиболее распространенных и понятных, широко применяется при контроле ответственных изделий из КМ. Радиационные методы контроля композитов особенно эффективны для выявления различных пустот, для выявления посторонних материалов различных включений, для структурных неоднородностей, таких как пропуски, обрывы армирующих элементов.

Однако, так же как и в случае металлов, дефекты, которые не приводят к значительным изменениям общей толщины КМ в направлении просвечи-

вания (трещины, расслоения, ориентированные перпендикулярно пучка излучению), не могут быть обнаружены. Контроль таких материалов может быть осуществлен капиллярно-радиационным методом, при котором контрастность элементов просвечиваемого объекта повышается введением жидкого рентгеноконтрастного пенетранта.

Для этих целей выпускается достаточно широкий спектр органических и неорганических пенетрантов с высоким коэффициентом поглощения рентгеновского излучения. Наиболее широко используемым из них является йодид цинка, который имеет высокую радиационную непрозрачность по сравнению с другими веществами.

Рентгеноконтрастный пенетрант наносится на поверхность контролируемого объекта, выдерживается 30 мин и затем удаляется с поверхности абсорбирующей тканью. В этом случае рентгеновское излучение, которое проходит через несплошность, заполненную таким пенетрантом, достаточно сильно поглощается, что позволяет обнаруживать повреждения, которые невозможно выявить обычным просвечиванием.

Естественно, применение этого метода предполагает наличие поверхностных или сквозных повреждений, обеспечивающих капиллярными силами доступ пенетранта в полости расслоений или трещин.

Рентгенографирование непрозрачных пластмасс позволяет обнаруживать раковины и трещины. Многослойные и волоконные композитные материалы контролируют, регистрируя пространственное распределение рассеянного в материале рентгеновского или γ -излучения. Этим способом измеряют толщину металлических слоев на пластике, определяют содержание основного и упрочняющего материалов в композитах, выявляют дефекты типа раковин в пластмассовых и композитных блоках и оценивают глубину залегания дефектов.

Радиографический контроль применяют для определения внутренних дефектов в ответственных паяных изделиях, трещин в шве или паяемом металле, локального отсутствия припоя, пор и инородных включений. Для радиографического метода контроля характерен разрыв во времени между просвечиванием объекта и анализом изображения по рентгеновской пленке, что является недостатком метода.

В радиационной дефектоскопии достижением последних лет является отказ от промежуточных носителей информации (пленок, многоразовых гибких «фосфорных» пластин и т. п.) и использование цифрового рентгенотелевизионного контроля. Здесь с помощью рентгено-оптических систем прошедшее через объект рентгеновское излучение преобразуется в оптическое, которое методами телевидения выводится на монитор [52].

Для этого используются сравнительно недорогие рентгенооптические сцинтилляционные кристаллы, оптическое изображение с которых считывается с помощью высокочувствительных малогабаритных ПЗС-камер. Широко используемые в них рентгеновские ПЗС-матрицы имеют линейные

размеры анализируемого изображения до 40 мм. Дискретный формат матрицы составляет 1300×1700 пикселей. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой здесь используется 12–14-разрядный ЦАП. Такие матрицы отличаются высокой разрешающей способностью (20–28 пар линий/мм), что в два раза выше, чем для рентгеновской пленки и в 3–4 раза выше, чем для сцинтилляционных рентгенооптических преобразователей. Выпускаются также матрицы разных размеров: от миниатюрных для медицины до очень больших размеров для промышленного НК.

Цифровая радиоскопия с подключением компьютера (ноутбука) обеспечивает мгновенное получение цифрового рентгеновского изображения, улучшение визуального восприятия изображений, измерение геометрических параметров контролируемых объектов по их изображениям.

Встроенная база данных обеспечивает ввод, хранение, выбор и отображение изображений, вывод результатов контроля, обеспечивает защищенный доступ, а также передачу данных по локальным и внешним сетям (интернет). Такой комплекс возможностей на основе рентгенотелевизионного контроля называется *флэш-радиографией* [53].

Возможности применения цифровой радиоскопии для анализа качества композитов представлены на рисунке 8.5. На исходном цифровом рентгеновском изображении волокна корда имеют низкую контрастность, ширина волокон составляет всего несколько пикселей (рисунок 8.5, а). В этом случае достаточно сложно исследовать структуру волокон. Использование набора специализированных цифровых фильтров обработки изображений позволяет существенно улучшить рентгеновское изображение волокон (рисунок 8.5, б). Предусмотрена возможность выделения изображений волокон корда, ориентированных в заданном направлении (рисунок 8.5, в, г).

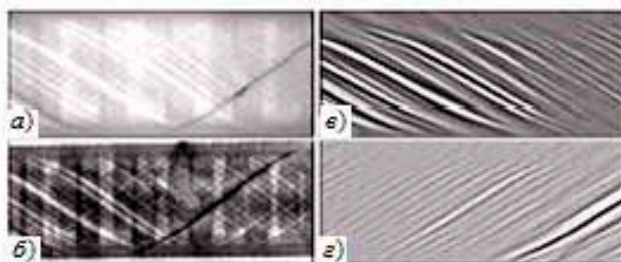


Рисунок 8.5 – Рентгеновское изображение образца КМ:
а – исходное; б – после цифрового контрастирования; в, г – выделение изображений волокон корда, ориентированных в заданном направлении

Если позволяет геометрия объекта, то очень эффективно использование компьютерной томографии, которая применяется практически для любых материалов и объектов. Эта достаточно дорогостоящая технология предо-

ставляет уникальные возможности для объемных исследований внутренней структуры объекта.

Практическое применение томографии для диагностики композитов усложняется большими габаритами контролируемых изделий, для которых необходимо получить 360–720 снимков при их круговом вращении на 360°. В случае, когда имеется возможность получить только 6, 12 или 24 проекции, то реализуется малоракурсная томография, когда недостающие экспозиции получают виртуально. Однако в этом случае погрешность реконструкции геометрических параметров резко возрастает.

В настоящее время развивается НК композитов с применением микрофокусной компьютерной томографии (МКТ), который позволяет достаточно точно и достоверно определить большинство дефектов, возникающих при производстве и эксплуатации. Она обеспечивает разрешающую способность до нескольких микрон [54, 55]. Это позволяет выявлять отдельные углеродные волокна и их обрывы в углепластике. Пример выявления обрыва кордов показан на рисунке 8.6.

В отличие от УЗ-сканирования, применение МКТ при контроле КМ позволяет контролировать объекты различной геометрии. Совмещение компьютерной томографии и УЗ-сканирования на некоторых образцах даёт расширенную картину наличия дефектов.

Принцип построения трехмерного объекта при контроле композитов методом МКТ основан на послойном характере исследования. На рисунке 8.7 представлен результат контроля КМ в виде 3D-модели в разрезе, содержащей включения и пустоты.



Рисунок 8.6 – Обрыв корда внутри композита на томограмме



Рисунок 8.7 – 3D-модель композита

На рисунке 8.8 представлены результаты контроля композитной арматуры с применением компьютерной томографии в виде отдельных срезов по плоскостям x , y , z , а также 3D-вида. На сканах видны трещины и расслоения.

Применение специальных программных средств для обработки результатов сканирования при контроле КМ позволяет помимо визуализации изображений производить анализ направления волокон. Пример такого анализа представлен на рисунке 8.9.

Контроль КМ посредством компьютерной томографии может применяться на всех этапах производства, в том числе на этапах отработки технологии, приёмки и обнаружения эксплуатационных дефектов. Одним из основных достоинств контроля композитов методом МКТ является высокая чувствительность, значительно превышающая традиционные рентгеноскопические исследования.

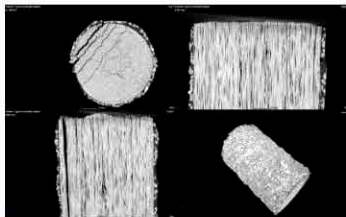


Рисунок 8.8 – Применение МКТ для контроля арматуры композита

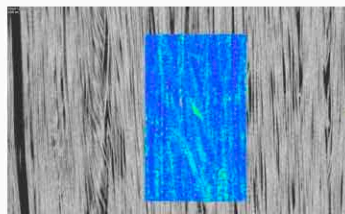


Рисунок 8.9 – Анализ направления волокон в композите

Контроль КМ с применением микрофокусной компьютерной томографии является практически универсальным методом, позволяющим определять дефекты различных материалов с точностью до нескольких микрон.

Нейтронную радиографию используют для контроля некоторых пластмасс и слоистых композитов. Избирательное ослабление и замедление нейтронов используют для контроля состава материалов, например, сильное рассеяние нейтронов на атомах водорода позволяет контролировать состав веществ на содержание этого элемента (нейтронная влагометрия).

Радиоволновый метод отражения и прохождения применяют для контроля листов и оболочек из различных диэлектрических материалов типа пластмасс, неметаллических композитов. Радиоволновый метод отражения применяют также для измерения толщины диэлектрических покрытий на металлической основе. Для дефектоскопии эффективен дифференциальный метод (сравнение двух соседних участков).

Электрические методы применяются для контроля качества печатного монтажа. С их помощью наряду с выявлением дефектов определяются сопротивления перехода. Для контроля диэлектрических КМ применяют *электроёмкостный метод*. По измерению диэлектрической постоянной и тангенса угла потерь определяют содержание в материале металлической арматуры, состав материала.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите виды НК в соответствии с ГОСТ 18353–73 [19].
- 2 Охарактеризуйте методы НК, применяемые для оценки качества изделий.
- 3 Назовите методы НК, применяемые для контроля качества КМ.
- 4 Что такое цифровая и компьютерная радиография?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из важнейших направлений повышения долговечности и надежности работы машин и механизмов является поиск таких конструкционных материалов, которые будут значительно превосходить свойствами нынешние. К числу наиболее распространенных материалов, которые человек использует для обеспечения своих жизненных потребностей, относятся металлы. Сегодня известны 80 металлов и свыше 2,5 тыс. сплавов на их основе. Таким образом, металлы и сегодня, и в ближайшем будущем останутся основой всей материальной культуры человечества.

Теоретическая прочность кристаллических тел (идеальных кристаллов) составляет $\approx 10^9$ Па, но в реальных сплавах из-за наличия дефектов прочность на порядок меньше. И в этом случае такая проблема, как повышение надежности машин, не может быть решена простым увеличением толщины стенок деталей, поскольку приведет к повышению материалоемкости всей конструкции и снижению других эксплуатационных характеристик.

Существующие классические конструкционные материалы исчерпали себя. Необходимы новые материалы с заранее заданными свойствами. Сегодня к ним можно отнести композиционные материалы, конструкционную керамику, сплавы высокой чистоты и т. д.

Одной из причин, сдерживающих более широкое применение новых материалов, является наличие технологических дефектов, оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики этих материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Материаловедение / П. А. Витязь [и др.] – Минск : ИВЦ Минфина, 2008. – 519 с.
- 2 **Попов, А. Н.** Основы материаловедения : учеб. пособие / А. Н. Попов, В. П. Казаченко. – Минск : Изд-во Гревцова, 2010. – 176 с.
- 3 ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 15467–70, ГОСТ 16431–70, ГОСТ 17341–71, ГОСТ 17102–71; введ. 01.06.1979 – М. : Госстандарт, 1979. – 26 с.
- 4 Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях : учеб.-справ. руковод. / В. А. Струк [и др.]. – Долгопрудный : Интеллект, 2010. – 536 с.
- 5 ГОСТ 19200–80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов – Взамен ГОСТ 19200–73; введ. 01.07.1981. – М. : Госстандарт, 1980. – 12 с.
- 6 ГОСТ 21014–88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. – Введ. 01.01.1990. – М. : Госстандарт, 1990. – 62 с.
- 7 ГОСТ 25331–82. Обработка электроэрозионная. Термины и определения. – Введ. 01.07.1983. – М. : Госстандарт, 1983. – 12 с.
- 8 **Горохов, В. А.** Материалы и их технологии : учеб. В 2 ч. Ч. 1. / В. А. Горохов, Н. В. Беляков, А. Г. Схиртладзе ; под ред. В. А. Горохова. – Минск : Новое знание; М. : ИНФРА-М, 2014. – 589 с.
- 9 ГОСТ 30242–97 Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначение и определения. – Введ. 23.04.1997. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1979. – 11 с.
- 10 ГОСТ Р ИСО 6520-1–2012. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Ч. 1. Сварка плавлением. – Введ. 22.11.2012. – М. : Стандартиформ, 2014. – 36 с.
- 11 Дефекты сварных соединений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://weldering.com/defekty-svarnyh-soedineniy>. – Дата доступа : 06.12.2020.
- 12 **Юхин, Н. А.** Дефекты сварных швов и соединений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://weldering.com/yuhin-defekty-svarnyh-shvov-soedineniy>. – Дата доступа : 06.12.2020.
- 13 **Юхин, Н. А.** Дефекты сварных швов и соединений : ил. пособие для уч-ся проф. учеб. заведений / Н. А. Юхин. – М. : СОУЭЛО, 2007. – 58 с.
- 14 **Калиниченко, Н. П.** Атлас дефектов сварных соединений и основного металла : учеб. пособие / Н. П. Калиниченко, М. А. Васильева, А. Ю. Радостев. – Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2011. – 71 с.
- 15 **Герасимова, Л. П.** Контроль качества сварных и паяных соединений : справ. изд. / Л. П. Герасимова. – М. : Интернет Инжиниринг, 2007. – 376 с.

16 Справочник по пайке / под ред. И. Е. Петрунина. – М. : Машиностроение, 2003. – 480 с.

17 ГОСТ 24715–81. Соединения паяные. Методы контроля качества. – Введ. 01.01.1983. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 12 с.

18 **Калининченко, Н. П.** Атлас дефектов паяных соединений : учеб. пособие / Н. П. Калининченко, М. О. Викторова. – Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2012. – 83 с.

19 ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Взамен ГОСТ 18353–73; введ. 01.07.1980. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 12 с.

20 ГОСТ 23479–79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования. – Введ. 01.01.80. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 12 с.

21 РД 03–606–03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю. Сер. 03. Вып. 39. – М. : Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003. – 104 с.

22 ГОСТ 26126–84. Контроль неразрушающий. Соединения паяные. Ультразвуковые методы контроля качества. – Введ. 01.07.1985. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.

23 ГОСТ 27947–88. Контроль неразрушающий. Рентгенотелевизионный метод. Общие требования. – Введ. 1.01.1990. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 4 с.

24 ГОСТ 17325–79. Пайка и лужение. Основные термины и определения. – Введ. 01.01.1981 – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 26 с.

25 ГОСТ 19249–73. Соединения паяные. Основные типы и параметры. – Введ. 01.01.1975. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 15 с.

26 ГОСТ 20485–75. Пайка. Методы определения затекания припоя в зазор. – Введ. 01.01.1976. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 5 с.

27 ГОСТ 23904–79. Пайка. Метод определения смачивания материалов припоями. – Введ. 01.07.1980. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 11 с.

28 ГОСТ 28830–90. Соединения паяные. Методы испытаний на растяжение и длительную прочность. – Введ. 01.01.1992 – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 30 с.

29 ГОСТ 24715–81. Соединения паяные. Методы контроля качества. – Введ. 01.01.1983. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 10 с.

30 **Калининченко, М. Л.** Технологические аспекты склеивания металлических элементов / М. Л. Калининченко, В. М. Александров // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 30 / глав. ред. В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 118–125.

31 ГОСТ Р ИСО 11003-2-2017. Клеи. Определение свойств конструкционных клеев. – Введ. 19.12.17– М. : Стандартинформ, 2018. – 14 с.

32 **Калининченко, М. Л.** Контроль качества клеевых соединений / М. Л. Калининченко, В. М. Александров // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. Вып. 30 / глав. ред. В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 110–118.

33 ГОСТ 14759–69. Клеи. Метод определения прочности при сдвиге. – Введ. 01.01.70. – М. : Госстандарт, 1970. – 12 с.

34 ГОСТ 14760–69. Клеи. Метод определения прочности при отрыве. – Введ. 01.01.70. – М. : Госстандарт, 1970. – 5 с.

35 Проблемы качества материалов. Эксплуатационные дефекты [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://helpiks.-org/6-61605.html>. – Дата доступа : 06.12.2020.

36 ГОСТ 27.002–89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 30.06.1990. – Минск : Госстандарт, 1989. – 33 с.

37 ГОСТ 21014–88 Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. – Введ. 01.01.1990. – М. : Госстандарт, 1990. – 62 с.

38 ГОСТ Р 22.2.08–96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Безопасность движения поездов. Термины и определения. – Введ. 30.06.1997. – М. : Госстандарт России, 1996. – 12 с.

39 ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ Р 51685–2000; введ. 01.07.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 101 с.

40 Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов : инструкция ОАО РЖД. – № 2499р. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.tdesant.ru/info/item/144>. – Дата доступа : 06.12.2020.

41 НТД/ЦП–1–93. Каталог дефектов рельсов : Классификация дефектов рельсов : утв. МПС РФ 22.03.1993 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://tdesant.ru/info/item/88>. – Дата доступа : 08.12.2020.

42 **Воробей, В. В.** Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций / В. В. Воробей, В. Б. Маркин. – Новосибирск : Наука, 2006. – 190 с.

43 **Барынин, В. А.** Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов / В. А. Барынин, О. Н. Будадин, А. А. Кульков. – М. : Спектр, 2013. – 242 с.

44 Типы дефектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://stydopedy.ru/1_101644_tipi-defektov-slabie-mesta.html/. – Дата доступа : 06.12.2020.

45 СТО 9701105632–003–2021. Инструкция по визуальному и измерительному контролю. – Взамен РД 03–606–03. – М. : Сварка и контроль, 2021. – 77 с.

46 ГОСТ Р ИСО 16737–2014. Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением. – Введ. 30.09.2014. – М. : Стандартинформ, 2015. – 15 с.

47 ГОСТ 24054–80. Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования. – Введ. 01.01.1987. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 8 с.

48 **Троицкий, В. А.** Неразрушающий контроль качества композиционных материалов / В. А. Троицкий, М. Н. Карманов, Н. В. Троицкая // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 3. – С. 29–33.

49 **Гетьман, А. Ф.** Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления / А. Ф. Гетьман, Ю. Н. Козин. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – 288 с.

50 **Corbly, D. M.** The accuracy and precision of ultrasonic shear wave Flow Measurements as a Function of stress on the Flow / D. M. Corbly, P. F. Packman, H. S. Pearson // Mater. Eval. – 1970. – Vol. 28, no. 15. – P. 103–110.

51 **Троицкий, В. А.** Пособие по радиографии сварных соединений / В. А. Троицкий. – Киев : Феникс, 2008. – 312 с.

52 **Завидей, В. И.** Комплексный подход к выявлению дефектов многослойных конструкций из композиционных материалов / В. И. Завидей, Ю. Г. Васенев, С. Л. Ступаченко [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.panatest.ru/static?al=articles/>. – Дата доступа : 24.06.2021.

53 **Троицкий, В. А.** Флеш-радиография / В. А. Троицкий // Территория NDT. – 2013. – № 4. – С. 44–49.

54 **Филонин, О. В.** Малоракурсная компьютерная томография в физическом эксперименте. В 3 ч. Ч. 1 [Электронный ресурс] / О. В. Филонин. – Режим доступа : <http://www.science63.ru/nauka/166-malorakurnaya-kompyuternaya-tomografiya-v-fizicheskom-eksperimente.html/>. – Дата доступа : 06.12.2020.

55 Контроль композитных материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://sovtest-ndt.ru/2017/03/02/kontrol-kompozitnyih-materialov/#post-comments/>. – Дата доступа : 06.12.2020.

Учебное издание

ХОЛОДИЛОВ Олег Викторович

ДЕФЕКТЫ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие

Редактор *А. А. Павлюченкова*

Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Корректор

Подписано в печать 2022 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж экз.

Зак. . Изд. № .

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский государственный университет транспорта.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014.

№ 2/104 от 01.04.2014.

№ 3/1583 от 14.11.2017.

Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель