

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(Наименование института полностью)

Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
(наименование)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

Инжиниринг перспективных материалов и диагностика поведения
материалов в изделиях

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Металлографическая экспертиза – как эффективный инструмент
обеспечения качества производства и эксплуатации изделий»

Студент

А.В. Климанов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

д.ф.-м.н., профессор Д.Л. Мерсон

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

Содержание

Введение	4
1. Жизненный цикл продукции	9
1.1 Добыча сырья.....	9
1.2 Входной контроль сырья и литейных материалов	11
1.3 Контрольные образцы продукции	12
1.4 Пооперационный контроль изготовления металлических изделий .	14
1.5 Технический контроль оснастки оборудования	20
1.6 Контроль режима термической обработки	23
1.7 Контроль методом выявления макроструктуры.	24
1.8 Проверка качества готовых изделий	26
Классификация методов приёмочного контроля.....	28
1.9 Сборка	30
1.10 Эксплуатация детали	32
2. Оборудование исследовательского института прогрессивных технологий	36
2.1 Пробоподготовка на оборудовании НИО-2 (на примере исследования трубы радиационного змеевика.....	36
2.2 Статические испытания образцов на растяжение	37
2.3 Испытания образцов на ударную вязкость.....	41
2.4 Фрактографическое исследование изломов ударных образцов	42
2.5 Исследования микроструктуры	44
2.6 Исследование с помощью бинокулярного металлографического микроскопа	49
2.7 Исследование с помощью растровой электронной микроскопии	51
3. Классификация разрушений исходя из направления причин возникновения	53
3.1 Ошибки при проектировании изделия	54
3.2 Ненадлежащее качество материала и нарушения технологии изготовления или сборки	62

3.3 Разрушения в процессе эксплуатации	71
4 Разработка альтернативного метода, применимого ко всем типам разрушений рассматриваемых заключений.....	84
4.1 Формирование этапов экспертного анализа	84
4.2 Схема универсального подхода к экспертизе общего характера.....	90
4.3 Анализ сокращения трудоёмкости методом сетевого моделирования графика работ	93
4.4 Оценка универсальности схемы	96
4.5 Применение разработанного алгоритма к экспертизе.....	97
4.5.1 Внешний осмотр фрагментов проушины хомута	98
4.5.2 Изучение нормативных документов и сопроводительной документации	99
4.5.3 Оценка качества материала.....	99
4.5.3.1 Химический анализ.....	99
4.5.3.2 Механические испытания.....	100
4.5.3.3 Фрактографический анализ излома	101
4.5.3.4 Металлографический анализ металла.....	104
4.5.3.4.1 Макроскопический анализ.....	104
4.5.3.4.2 Микроскопический анализ	106
4.5.4 Комплексный анализ полученных результатов	106
Заключение	108
Список используемых источников.....	109

Введение

Современные технологии и мощное оборудование позволили развитым странам достичь значительного прогресса промышленности. Сюда можно отнести сотни тысяч производств, строения гражданского комплекса и объекты военного назначения, ракетно- космические системы, гигантская по протяженности транспортная сеть нефте- и газопроводов. Возникновение неисправностей в пределах таких стратегически важных объектов могут повлечь очень серьёзные последствия, вплоть до трагедий: экологические катастрофы, стихийные бедствия, крупные аварии и огромные человеческие жертвы.

Поломка колёсной пары или же рельса, способны привести к крушению всего состава и колоссальному ущербу. 9 января 2012 года в Науенской волости страны Латвия сошёл с рельс и опрокинулся товарный состав из 16 цистерн, перевозивших химическую жидкость. В результате произошла утечка токсичных веществ в грунт и почву. Площадь поражения составила порядка 4 тысяч квадратных метров. В процессе расследования было установлено, что причиной стал дефект металла железнодорожного полотна. На месте аварии был обнаружен выломанный полутораметровый фрагмент рельса [1].

30 января 2012 года в Приамурье произошла другая, не менее крупная трагедия: крушение поезда, перевозившего нефть. 17 вагонов сошли с рельс, в результате разлилось около 200 тонн нефтепродуктов и произошло воспламенение более 600 квадратных метров, локализовать которое удалось лишь спустя сутки. Экспертиза установила, что причиной крушения стал излом боковой рамы грузовой тележки [2].

Излом боковой рамы – одна из самых распространённых причин аварий на железных дорогах. За 10 лет начиная с 2006 года произошло порядка 150 случаев, по вине излома рамы. Причиной образования излома явилась

усталостный трещина, зарождение которой обусловлено наличием внутренних литейных дефектов [3,4,5].

Существует иная, не менее серьёзная проблема - аварийность участков нефте- и газопроводов, по причине их изношенности и длительного нахождения в агрессивных средах почв различной химической природы.

В ряде источников приведена статистика, согласно которой более 130 тысяч километров – это около 60% всей протяженности магистрального полотна нефтегазопроводов России, эксплуатируется более 30 лет. Министерство энергетики России выявило, что порядка 90% всех прорывов происходит по вине коррозии труб, и, как известно, первыми корродируют сварочные швы. Ввиду этого, весьма актуальна разработка информационно-аналитических систем, направленных на повышение качества производимых ремонтно- сварочных работ, прогнозирование ресурса времени эксплуатации и работоспособности магистрали. Особо важно качество сварочных работ, производимых на трубопроводах, именно это является гарантом надёжности, безопасности и долговечности [6,7,8].

Низкое качество сварного шва нередко приводит к трагическим последствиям и весомым убыткам. Летом 2019 в Якутии произошла разгерметизация подземного нефтепровода компании «Восточная Сибирь» вследствие корродирования сварного соединения. В результате аварии в грунт попало колоссальное количество нефтепродуктов. Концентрация маслянистой жидкости в почве была настолько высока, что она проступила на поверхности земли огромными лужами. В регионе был объявлен режим чрезвычайной ситуации локального масштаба.

В 2004 году в спортивном зале школы посёлка Краснополье Могилёвской области Белоруссии обрушились перекрытия. Конструкция имела дефект сварного соединения и не выдержала нагрузки на крышу мокрого снега. Трагедия унесла жизни 7 человек.

Установлено, что выпуск некачественной продукции ежегодно отнимает у страны 10% от её дохода. Число крупных катастроф и неполадок

повсеместно растёт. Выявлено, что потери США только по усталостным дефектам превышают 100 миллиардов долларов, а по коррозии – все 200. Для России это число будет ещё значительно выше, поскольку стоит учесть не только дефекты производимых объёмов, но и то, что часть оборудования не внедряется сразу в производство, а ржавеет какое-то время на складах и требует дополнительных вложений по обработке, хранению, ремонту, а также требует чёткого учёта и на всё это также необходимо финансирование.

Трудно представить современное общество без технологий: вряд ли мы сможем отказаться от АЭС, смартфонов, от идеи покорять космос и от многих других вещей, делающих нашу жизнь комфортной, но мы можем снизить риски безопасности здоровья и снизить убытки по предотвращению последствий катастроф, применяя контроль качества.

Металлографическая экспертиза требует учитывать все этапы жизни объекта экспертизы: проектирование, качество сырья, технологию изготовления и условия эксплуатации, т.е. является комплексным исследованием, состоящим из множества этапов, систематизация которого может позволить значительно сократить затраты времени и бюджета. Результаты металлографических экспертиз (МЭ) позволяют установить причины разрушения металлических деталей и конструкций и на этой основе выработать комплекс мероприятий для недопущения их в будущем, что повышает качество выпускаемой продукции, а, следовательно, конкурентоспособность производителя.

В силу указанной многогранности и особой ответственности выводов по итогам проведения МЭ, к числу первостепенной важности относятся правильность процедур проведения и грамотная организация цепочки мероприятий металлографической экспертизы.

В основу настоящей работы лёг анализ металлографических исследований (экспертиз) Научно-исследовательского института прогрессивных технологий (НИИПТ), созданного при Тольяттинском государственном университете. НИИПТ является аккредитованной

организацией, оснащён современным высокоточным оборудованием, а его работники являются аттестованными специалистами, что в совокупности обеспечивает высокое качество выдаваемых им заключений по результатам проведения МЭ, которые неоднократно представлялись в судах, как неоспоримый аргумент.

В общей сложности было проработано более 20 крупных экспертиз и установлено, что подход к определению набора испытаний и исследований для каждой конкретной МЭ основан на рекомендациях общего характера с достаточно разветвлённой и сложной структурой. Это зачастую приводит к затягиванию экспертизы и выполнению избыточных испытаний.

При анализе работы НИИПТ над металлографическими заключениями была отмечена высокая загруженность научных сотрудников лабораторий, а также дорогостоящего оборудования. Это связано как с большим количеством заявок, поступивших на экспертизу, так и с большими объемами работ, выполняемыми в рамках научно-исследовательских проектов и работ. Кроме того, выявилась проблема высоких затрат на содержание импортного оборудования и приобретение расходных материалов, сокращение которых также можно отнести к числу первостепенных задач.

Отмеченные выше факторы в явном виде свидетельствуют об актуальности работы по систематизации этапов металлографической экспертизы с целью снижения её трудоёмкости и затрат.

Целью работы является снижение трудоёмкости и затрат на металлографическую экспертизу за счёт применения универсального алгоритма её проведения.

Поставлены задачи:

- Провести анализ металлографических заключений НИИПТ;
- Выявить типизацию причин разрушения;
- Определить цепочку испытаний и исследований по каждому из заключений;

— Разработать универсальный алгоритм, применимый ко всем типам причин разрушений;

— Обобщить результаты и сделать выводы.

Научная новизна исследования заключается в разработке нового универсального технологического алгоритма проведения металлографической экспертизы, применение которого позволяет без снижения общего качества снизить сроки и затраты на проведение МЭ. Достоверность снижения трудоёмкости и экономических затрат на проведение экспертизы доказана методом оптимизации сетевого моделирования – что составляет дополнительную научную новизну локального масштаба. Установлено, что приведённый в работе алгоритм металлографической экспертизы позволяет сократить время анализа как минимум на 6%.

Практическая значимость: на примере разрушения автосцепного устройства головной секции электровоза установлена применимость разработанного технологического алгоритма. Установлена статистика распределения разрушений с точки зрения их первопричин.

Работа посвящена рассмотрению наиболее частых причин возникновения разрушения, составлению универсального поэтапного подхода к материаловедческой экспертизе, отработке на практике в конкретных условиях известных мероприятия по устранению различного рода дефектов, в целях повышения качества детали.

Работа состоит из введения, четырёх глав, выводов и списка литературы.

1. Жизненный цикл продукции

Материаловедческая экспертиза, охватывающая все этапы жизни детали, начиная от входного контроля качества сырья для производства детали, включающая мониторинг состояния оснастки оборудования и заканчивая анализом причины разрушения может стать одним из путей решения проблемы качества выпускаемой продукции, обусловленного постоянно растущими требованиями к изделию от заказчиков продукции, в совокупности с проблемой модернизации и ремонта оборудования по производству деталей и компонентов.[9]

Качество выпускаемой продукции напрямую влияет на размеры её реализации, а, следовательно, увеличивает конкурентоспособность компании-производителя, также отражается на себестоимости изделия. Выпуск более качественной продукции влечёт за собой обновление оснастки, доработку моделей, чертежей, использование более дорогостоящего сырья, зачастую, снижение оборотов выпуска, чтобы увеличился уровень качества, также немаловажную роль играет профессионализм сотрудников, их необходимо отправлять на обучение и повышение квалификации.[10]

Экспертный контроль позволяет снизить издержки на статистически часто повторяемые дефекты, выявляя недоработки в конструкторской документации, отслеживать нарушения в сборке деталей, а также предотвращать разрушения возникшие в процессе эксплуатации. В связи с этим так важно проводить экспертный анализ каждого цикла жизни детали.

1.1 Добыча сырья

Процесс производства чугуна и стали начинается с добычи сырья, которое затем должно быть тщательно обработано, чтобы обеспечить качество готовой продукции, соответствующее требованиям. Существует более 3500 марок стали с различными физическими, химическими и механическими

свойствами. Легирование металлами, такими как никель, хром и вольфрам, дает широкий спектр сталей с особыми свойствами.

Сталь представляет собой сплав, состоящий в основном из железа и менее 2% углерода. Следовательно, железная руда необходима для производства стали, что, в свою очередь, нужно для поддержания промышленности и экономики. 98% добываемой железной руды используется для производства стали.

Поскольку железо встречается только в виде оксидов железа в земной коре, руды должны быть преобразованы или «восстановлены» с использованием углерода. Основным источником этого углерода является коксующийся уголь. Уголь является ключевым сырьем для производства стали и используется, в основном, в качестве твердого топлива для производства электроэнергии и тепла при сжигании. Кокс, полученный науглероживанием угля (т. е. нагревания в при высоких температурах без доступа кислорода), является основным восстановителем железной руды. Кокс восстанавливает железную руду до расплавленного железа, насыщенного углеродом, называемого чугуном.

Агломерат является основным сырьем для производства чугуна в доменной печи. Производство высококачественного агломерата имеет решающее значение для обеспечения постоянной и стабильной производительности печи при низком расходе восстановителей. Качество агломерата начинается с правильного подбора и смешивания сырья. Неоднородность сырьевой смеси может повлиять на прогреваемость и вызвать увеличение расхода топлива.

Природная руда — это загрязненный материал, перерабатывать который в чистом виде нецелесообразно. Поэтому применяют обогащение руды. Обогащением руды называется процесс разделения руды на две фракции: фракция; минералов с высоким содержанием металлов пригодная для металлургических процессов и пустая порода. Обогащение руды позволяет добиться высокой эффективности металлургического процесса.[11]

1.2 Входной контроль сырья и литейных материалов

Входной контроль или верификация закупленной продукции – один из элементов контроля качества предприятия, заключающийся в экспертизе соответствия материалов, поступающих на производство установленным требованиям (стандартам, техническим условиям и т.д.).[12] Компания-поставщик при продаже материалов обязана предоставить покупателю с товаром при его приёмке сопроводительные документы, включающие в себя нормативный документ качества (технические условия, согласно которым произведён товар), а также сертификат соответствия качеству — документ о проведении экспертизы, которая подтверждает соответствие товара заявленным требованиям.[13] Входному контролю должны подвергаться все материалы, ввозимые на производство от поставщика, изготовленные вне предприятия. Однако, данный вид экспертизы может быть упразднён по решению руководства предприятия – так поступают многие фирмы иностранного менталитета, поскольку, по их мнению, она не всегда экономически целесообразна, и доверять поставщику – важный элемент деловой культуры производства. Бывали случаи, когда данная лояльность сказывалась на качестве материалов и дальнейшем партнёрстве компаний.

План входного контроля осуществляется согласно требованиям нормативной документации с соблюдением правил приёмки и отбора проб.[14] Как правило, входящей на металлургическое предприятие является продукция для компонентов формовочных смесей, различные противопопригарные покрытия, компоненты сварочных флюсов, жидкое стекло, спирт, карбюризаторы, металлический лом, шихтовые материалы, бабитовые вкладыши, и многие другие литейные материалы. Формовочные смеси изготавливают на основе трёх компонентов: песок формовочный, фенол-формальдегидная смола и катализатор (отвердитель) к данной смоле.

На анализ направляют пробы смол и отвердителей (конкретная марка смолы в сочетании с конкретным отвердителем) в прозрачных пластиковых

бутылках, объёмом 1л, данная тара должна быть промаркирована (указанно наименование исследуемой жидкости, нормативный документ, согласно которому производится контроль качества, номер партии и дата изготовления), а также пробы песка, отобранные в соответствии с ГОСТ в полиэтиленовых пакетах, масса 1 пробы должна быть не менее 1кг, тара промаркирована. Вместе с пробами в лабораторию предоставляются сопроводительные документы: заявка на проведение испытаний, (обязательно оформленная согласно утверждённым формам) и сертификат качества (документ от изготовителя, подтверждающий соответствие предоставленного на предприятие материала заявленным техническим условиям (ТУ)).

Согласно указанным нормативным документам, осуществляются испытания, по итогам которых выдаётся заключение, подтверждающее соответствие качества заявленным НД, или опровергающее его. В случае, если качество не будет соответствовать указанному в ТУ или ГОСТ на данный материал, бюро технического контроля предприятия возвращает партию поставщику с возмещением затраченных на неё денежных средств.

1.3 Контрольные образцы продукции

Контрольным образцом называется единица готовой продукции, отобранная в утверждённом порядке, и выбранная за эталон производимого изделия. Разработка контрольного образца – сложный процесс, которым занимаются инженера-технологи металлургических отделов предприятия, совместно с инженерами –конструкторами. Прежде всего конструктор проектируют чертёж и 3-D модель, которые затем передают инженерам-технологам, те в свою очередь подбирают оптимальную марку материала, оценивают возможность производства данной детали, если данная перспектива подтверждается, то технологи передают всю собранную информацию по планированию производства конструкторам своего отдела. Конструктор металлургического отдела совместно с металлургами

разрабатывает форму и оснастку для отливки детали, карту технологического процесса, проводит испытание аттестованными методами, отливает контрольный образец заявленного качества, налаживает работу без сбоев, после чего, запускает линию по массовому производству изделия данного вида.

Контрольный образец – важный инструмент контроля качества готовой и отбраковки некачественной продукции в производственном процессе

Карта технологического процесса – документ, включающий в себя описание всех технологических процессов изготовления детали, пооперационно, включая операции по ремонту и эксплуатационным моментам данного изделия. Данный нормативный документ, как правило, включает в себя две основные части. В первой части содержится информация о параметрах изготовления, о нормах механической обработки изделия, о режущем инструменте, о методе испытаний на соответствие качества, а также об используемом для оценки качества мерительном инструменте. Во второй части технологической карты представлены сведения о требуемом при изготовлении количестве рабочего персонала, о его квалификации, нормоконтроль рабочего времени и расхода реактивов на определение соответствия качества.[15]

Выбор марки материала – процесс совокупного анализа экономических, эстетических и технических условий работы изделия на стадии проектирования. При выборе материала во внимание берут совокупность факторов эксплуатации, таких как:

- характер среды эксплуатации (сюда относится температура эксплуатации и химическая активность среды эксплуатации (агрессивность среды влияет на коррозионные свойства);
- вид нагружения детали (определяется устойчивость материала к динамическим нагрузкам, вибрации и т.д);
- в каком напряжённом состоянии будет деталь (состояния растяжения, сжатия, степень нагружения);

— способ сопряжения с другими деталями при монтаже (от этого зависит уровень внутренних напряжений в металле);

и многие другие, индивидуально для каждого отдельного случая.[16]

Пресс-форма – сложное по устройству приспособление для изготовления деталей различных конфигураций из материалов литьём под давлением. Изготовление пресс-формы осуществляется по 3D модели, сделанной на основании чертежа детали с учётом полей допуска и температурного расширения. На этапе проектирования в пресс-форму закладываются элементы литниковой системы (система подачи материала) и системы крепления.[17]

1.4 Пооперационный контроль изготовления металлических изделий

Пооперационный контроль – вид контроля, который включает в себя все виды операций проводим над изделием. Пооперационный контроль можно условно разделить на следующие операции: контроль сырья из которого, впоследствии, изготавливают металл, химический анализ расплава металла, формообразование детали, термообработка, механическая обработка изделия, контроль готового изделия.

В процессе производства стали делают анализ ковшевой пробы, в основном для оценки химического состава стали. В последнее время методы быстрого определения характеристик включения (размера и состава) продвинулись до уровня, на котором они могут быть реализованы в управлении технологическими процессами. Включения в стали могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие в зависимости от их характеристик (размера, количества, состава и морфологии). Таким образом, определяя характеристики включения в процессе производства стали, можно управлять характеристиками включения для повышения качества стали.

Контроль химического состава по ходу плавки - обязательный элемент системы контроля качества при ведении металлургических процессов, связанных с расплавлением металлов и сплавов. Технологический процесс плавки требует постоянного контроля химического состава металла и шлака, и быстрого получения необходимой информации для его корректировки.

Анализ химического состава по ходу плавки необходимая операция металлургического производства, поскольку позволяет стабилизировать технологический процесс контролировать ход плавки, позволяет добиться получения сплава заданных химических параметров, обеспечивает непрерывность процесса.

Спектральный химический анализ обеспечивают контроль химического состава непосредственно в цехах во время плавки. Выбор метода анализа зависит от металлургических продуктов и технологического процесса. Для определения состава металлов и сплавов в настоящее время применяются атомно-эмиссионные спектрометры.

Следующей операцией в процессе создания готового металлического изделия является формообразование. Формообразованием называется совокупность всевозможных металлургических методов, направленных на придание заготовке форм и габаритов готового изделия. К формообразованию относят литьё, прессование, прокат, волочение и другие способы придания формы изделию.

В процессе придания формы важно не допускать нарушения технологии изготовления и придерживаться ряда контрольных мер, поскольку именно от данной технологической операции напрямую зависит не только внешний вид изделия, но и все его качества.

Одним из наиболее распространённых методов придания формы является литьё. Литьё имеет ряд преимуществ над другими методами, таких как: наименьший коэффициент потерь металла, высокая весовая точность, неограниченность изготовления по габаритам и массе, применимость к

металлам не поддающимся иным видам формообразования (например, труднообрабатываемых резанием и неподатливым к деформированию).

Нарушение технологической дисциплины приводит к появлению дефектов литья. Различают дефекты несоответствия геометрии, к ним относят недоливы, неспаи, коробления и другие; нарушения сплошности металла (раковины, трещины, свищи, и т.д.); несоответствие требуемой структуре металла (отбел, отсер, ликвация и т.д.). Все дефекты можно разделить на исправимы и неисправимые.[18] Неисправимые дефекты исправлять нерентабельно, в связи с этим отливки с данным видом дефекта бракуют и отправляют на переплав. Исправимые дефекты как правило некрупные, поэтому их исправляют последующей механической обработкой (например, наплавкой или заваркой).

Интеграция новых технологических процессов, а также дополнительный контроль и улучшение условий труда являются ключом к повышению качества, надёжности и эффективности создания отливок максимально приближенных к форме готового изделия.

Последующим этапом изготовления изделия является механическая обработка заготовки, в ходе которой путем механического воздействия с использованием различных станков (фрезерных, токарных, и т. д.) в соответствии с картой технологической операции изделию придается завершённый вид. Механическая обработка — это завершающая часть изготовления изделия, которая не оказывает воздействия на физико-механические свойства детали, но от неё зависит окончательный внешний вид.

Механическую обработку можно разделить на обработку резанием для изготовления внутренних и наружных цилиндрических поверхностей, обработку поверхностей с помощью фрезеровки и шлифования.

Контролю в процессе производства детали уделяется отдельное пристальное внимание. Здесь важно понимать, что металлургия- это очень затратная промышленность: по счетам за электроэнергию, по ценам на закупку сырья, да и в целом. поэтому очень важно отбраковывать некачественные

изделия перед началом каждой новой операции, поскольку это влечёт дополнительные убытки. Для того, чтобы идентифицировать дефект и изолировать некачественную продукцию от пригодной, не нарушая при этом её целостности, существуют специальные методы, которые называются неразрушающими методами контроля.

Наиболее жёсткий контроль и высокие затраты по его обеспечению производится для деталей авиа и ракетостроения. В этом случае, на неразрушающие исследования приходится порядка 25-30% всей стоимости изделия. Эксплуатация в агрессивных условиях знакопеременных ударных нагрузок, вибраций, перепадов температур вносят особые требования к прочности и надёжности

В основу классификации неразрушающих методов контроля лёг характер воздействия детектора на объект. Различают несколько видов неразрушающего контроля:

- магнитный метод. Заключается в регистрации магнитных полей рассеивания вблизи дефектной области детали. Чаще всего исследуют зависимость напряженности магнитного поля с применением катушки индуктивности (индицирование). Также распространено использование преобразователей Холла, и магнитопорошковый метод анализа;
- вихретоковый метод основан на взаимодействии вихревого электромагнитного преобразователя с электромагнитным вихревым полем токов. Применяется для проводников;
- электрический метод исследует взаимодействие электрического поля с объектом. Определяющими параметрами при этом является величина электрического поля и потенциал. Данным методом анализируют как проводящие материалы, так и диэлектрики;
- радиоволновый метод - заключается в регистрации интенсивности, частоты и времени распространения электромагнитной волны в материале (обычно применяется для полупроводников и диэлектриков;

- тепловой метод- метод регистрации тепловых полей объекта, применим к любым материалам любых габаритов;
- визуально- оптический метод. Исследования изменении интенсивности света, падающего на образец;
- капиллярные методы контроля. Суть метода заключается в проявлении капиллярного эффекта. На внутреннюю поверхность детали наносят меловой слой, после чего сторону, обратную меловой смачивают веществом с высокой проникающей способностью (керосин), производится визуальный осмотр мела, в случае наличия несплошностей в области дефекта будет жирное пятно;
- метод акустической эмиссии- возникает вовсе не в результате пропускания ультразвука, а в результате релаксации напряжений в материале, а точнее в результате динамических процессов развития дефектной структуры материалов, т.е., когда в материале развиваются дефекты, он излучает упругие колебания. При наличии дефектов возникнут упругие колебания вследствие перестройки кристаллической решётки в близдефектной области.

В связи с бурным ростом промышленности в последние годы зачастую на производствах можно видеть новые методы и технологии производственного процесса. Высокие требования потребителя мотивируют компании внедрять автомеханизированные адаптируемые производственные линии.[19]

Достижение качества для так называемых «умных фабрик» является основополагающим. В связи с этим на данных производствах используются самые современные цифровые технологии и аналитике. В производственный процесс активно внедряется индивидуально разработанные приложения и методы искусственного интеллекта для анализа и отбраковки дефектной продукции.

Q. Xia и др. используют искусственное зрение и роботов для поддержки качества процессов с обнаружением неисправностей, посредством реализации

гибридной модели, которая включает автоматизированные секции, совместно участвующие в оценке SMCMM, соразмерные измерения, критерии и уровни, которые позволяют определить целесообразность применения модели в производственной компании.[20] Аналогичным образом, в реализовано искусственное зрение в реальном времени с классическими алгоритмами, которые обрабатывали изображения краев профилей на производственной линии экструзии резиновых уплотнителей и впоследствии определяли качество исследуемого продукта с учетом точности размеров.[21] В была использована комбинация машинного зрения и подхода к распознаванию образов с использованием сямских сетей, что позволило выявить дефекты в стали в режиме реального времени и может осуществлять неразрушающий контроль изделия.[22]

Нейронные сети. Для идеального прогнозирования качества деталей применяется целостный подход, который упрощает и автоматизирует необходимые этапы обработки данных.[23] Это было сделано с использованием ИНС и других методов; для применения адаптивной модели в производственных процессах в режиме реального времени. Впоследствии, был представлен конкретный пример, где нейронные сети были применены для выявления различных закономерностей в размерах исследуемых профилей и их классификации, что позволило снизить затраты.[24]

Существуют технологии, которые могут способствовать улучшению контроля в процессе литья под давлением. производственном процессе, используемом для литья электромеханических деталей; это было достигнуто с помощью интеграции методов и использования алгоритмов распознавания специфических характеристик.[25]

Технологии улучшают автоматизированные производственные процессы, делают их более эффективными, повышают их показатели производительности, способствуют оптимизации времени, снижению затрат и, следовательно, усилению контроля и обеспечения качества.[26]

1.5 Технологический контроль оснастки оборудования.

Технической оснасткой называется множество приспособлений и инструмента, предназначенного для выполнения операций сборки детали, фиксации заготовок, приданию изделию заданных параметров.

Оснащение любого современного предприятия непременно имеет множество оборудования и широкий спектр её оснастки. От оснастки и своевременной замены оснащения зависит качество продукции, уровень брака и обороты производства продукции. Оснащение позволяет сократить ручной труд, снизив тем самым время производства и трудоёмкость, а также увеличить надёжность и повысить точность.

Ассортимент оснащения определяется картой технологического процесса, оснащение должно соответствовать всем видам проводимых работ и позволять максимально использовать технологические возможности оборудования. Установка технологического оборудования должна учитывать удобство месторасположения для минимизации затрат на перемещения при работе, обеспечить безопасность и комфорт эксплуатации для сотрудников.

Если рассмотреть оборудование и оснастку каждого отдельного предприятия- у каждого она будет индивидуальна, однако, есть основной минимум приборов и оснащения к нему, который присущ каждому металлургическому предприятию:

— токарные станки и необходимое оснащение- оборудование, играющее важную роль в работе предприятий по металлообработке. Для изготовления 1 детали используется порядка 10 различных приспособлений, таких как: патрон токарный, струбины, фрезы, резцы и т.д. Благодаря данному оснащению удаётся осуществить токарную работу безопасно и с высокой точностью.

— технологическая оснастка ЧПУ (станок с числовым программным управлением - робот, которому при работе не требуется человеческое вмешательство). К станкам данного типа предъявляются особые

повышенные требования. Объясняется это более точным производством и крупными оборотами производительности. В программное обеспечение аппарата внесены карты перемещения в строго определённых координатах. Поэтому требуется фиксация прибора с предельно допустимой точностью. В ходе самой обработки большое количество времени затрачивается на установку и фиксацию обрабатываемой заготовки. Для минимизации потерь времени перспективно применять специальную фиксирующую оснастку с пневматическими приводами. Применение унифицированного оснащения также позволит снизить временные затраты.

— литейная оснастка. Изготовление форм подразумевает использование специализированных приспособлений, предусмотренных технологическим процессом литья. Основной из которых является формовой комплект. Формовочный комплект представляет собой совокупность приспособлений (опока, подмодельная плита, стержневой ящик и т.д.) позволяющих создать из формовочной смеси форму, содержащую в себе полость, равную внешнему объёму отливаемой детали. Все отверстия и выемки формируются стержнями, монтаж которых производится непосредственно во время сборки формы.

Моделью называется искусственно созданный объект, несущий в себе параметры истинного объекта. Модель предназначена для создания отпечатка в литейной форме- рабочей полости формы. Расплав металла, залитый в литейную форму, образует отливку металла. Модель может быть изготовлена из материалов различного характера: полимерных материалов, гипса, дерева, алюминия и т.д. Определяющими параметрами при выборе материала служат: простота обработки, лёгкость материала по массе, долговечность, уровень точности, чистота рабочей поверхности.

Опока- довольно прочная металлическая рама, предназначенная для создания литейных полуформ, путём формования песчано - смоляных смесей. Конфигурация опок различна: существуют сплошные литые опоки, разъёмные

и сварные. В опочных стенках предусмотрены отверстия, предназначенные для снижения веса и выпуска газа из формовочной смеси. Конструкция фиксируется штырями и центрирующими отверстиями, расположенными в приливах.

От точности изготовления моделей зависит точность формы отливок. Новые модели и формы должны быть изготовлены с такой точностью, чтобы уложиться в существующее поле допуска и не допустить брака по размерам. Существует ряд государственных стандартов, регламентирующих размерную точность отливок, в зависимости от материала, например, из серого чугуна.[27]

Как известно, завершением процесса литья является выбивка и очистка формовочной оснастки. Выбивкой называется процесс извлечения отверждённых и достаточно остывших отливок от форм. Последующими операциями извлекаются стержни, зачищается поверхность, удаляются заливы и неровности, возникшие при отбивке литников и отрезке прибылей.

Выбивка производится воздействием пневматических вибрационных машин (нокаутов), траверс и решёток. Удаление стержней осуществляется вибрацией или напором водной струи. Зачистка поверхности отливки производится в барабанах, с помощью пескоструйных и дробеструйных аппаратов.

Шлифовальные станки и зубила - основные инструменты для удаления заусенцев и неровностей с поверхности отливки. Для заточки зубил обрубки применяется определённый угол заточки, в зависимости от марки обрабатываемого материала. Для чугунов и бронз заточка осуществляется под углом 75 градусов, среднетвёрдые стали - 70 градусов, мягкие стали - 60 градусов, латуни - 45 градусов, алюминий - 35. Шлифовальные круги, используемые для очистки отливки от заусенцев, могут быть изготовлены из чугуна, бронзы, алунда или корунда. Скорость вращения шлифовальных кругов 25м/с.

Сопла пескоструйных и дробеструйных машин, чаще всего,

изготавливают из белого легированного или нелегированного чугуна, из победита, из карбидов бора и вольфрама.

В системе планово- предупредительного ремонта важную роль играет планирование потребности необходимого количества технологической оснастки, которая составляет существенную долю издержек предприятия и является основой производства, экономического успеха и технического развития. Поэтому технологическая оснастка всегда должна быть в исправном состоянии и готова к работе.

Наличие в производстве запасов инструмента, с учётом его стоимости и расхода, делает проблему учета, контроля и анализа эффективности использования технологической оснастки одной из наиболее важных в организации работы предприятия.[28]

1.6 Контроль режима термической обработки.

Термической обработкой называют совокупность технологических операций по нагреву, выдержке и охлаждению металла, с целью придания ему определённых свойств. Определение температурно- временных рамок осуществляется по диаграмме состояния- графику зависимости структурных составляющих, фаз и превращений в зависимости от температуры нагрева. Утверждением температурного режима термической обработки занимается инженер- термист.

Температурный режим нагрева и охлаждения обозначен в технологической карте процесса и должен фиксироваться по специальным температурным приборам - пирометрам. Пирометр- прибор, состоящий из сопряжённых гальнометра и термопары и позволяющий с расстояния производить определение температуры объекта, не приближаясь к нему. В условиях работы с раскалённым металлом это очень актуально.

После проведения термообработки проводят металлографический контроль микроструктуры материала, определяется соответствие структурных

составляющих и наличие неметаллических включений. Металлография определяет качество проведения термической обработки (соответствие структуры, отсутствие перегрева), определяет точность соблюдения режима охлаждения от времени и среды.

Следующим этапом производится определение соответствия металла по твёрдости. Измерение твёрдости — это процесс воздействия на одно тело выдавливанием другого, более твёрдого тела (индентора) при этом регистрируется диаметр отпечатка индентора, который и определяет твёрдость. Чаще всего замеры твёрдости осуществляются по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу или Шору. Все эти методы отличаются наконечниками индентора и измеряемыми материалами. По Бринеллю твёрдость определяется вдавливанием стального шарика, диаметром 5-10мм [ГОСТ 9012-59] [ISO410-82], [ISO6506-81], применим для низкозакалённой стали и цветных металлов; у Роквелла используется алмазный конус [ГОСТ 9377-81] для сталей и цветных металлов, у Виккерса - алмазная пирамидка с квадратным основанием, с его помощью чаще всего определяют поверхностную твёрдость [ГОСТ 2999-75] [ISO 6507], по Шору вдавливается закалённый стальной стержень [ISO868] применим для нетвёрдых полимерных материалов [29-36].

1.7 Контроль методом выявления макроструктуры

Травлением называется процесс растворения поверхности металла кислотой с практической целью. Химическое травление позволяет выявлять поверхностные дефекты изделия, скрытые под тонким слоем металла, или оксидный плёнкой, изучить макроструктуру изделия.

Травление применяется для зачистки поверхности детали с целью повышения её адгезия. Данную технологическую операцию осуществляют перед нанесением на изделие защитных покрытий, покрытий различного иного вида, или в качестве операции, предшествующей соединению одной поверхности с другой поверхностью.

Метод травления используют для нанесения на поверхность металла рисунка (гравировки). Метод применим для создания на металлической поверхности тонких каналов и сложных изображений. Регулирование глубины протравливания контролируется с точностью до микрон, что перспективно для изготовления деталей с малыми параметрами и сложными конструктивными элементами.

В промышленности применяют травление для зачистки металлов от окалин и оксидных плен. В авиастроении применяют травления для снятия верхнего слоя и создания более тонких, а, следовательно, более лёгких конструкций. Существует 3 основных вида травления:

- электролитическое (гальваническое), различают катодное и анодное;
- химическое;
- плазменное.

Гальванический метод обработки металла используется для зачистки поверхностей, гравирования и создания пазов. Металлическую деталь погружают в раствор электролита и подключают в качестве катода (отрицательного электрода) или анода (положительного) через потенциостат к сети. Различают анодное и катодное травление.

При катодном травлении в качестве положительного электрода (анода) используют, например, свинец. Электролит может представлять собой раствор соляной или серной кислоты, или водный раствор щелочных металлов. При катодном травлении поверхность образца активно подвержена воздействию водорода, что может вызвать водородное охрупчивание, поэтому малые в сечении детали не подвергают данному виду травления.

Анодная электрохимическая очистка- один из самых распространённых методов очистки металлических поверхностей. На катод устанавливается свинец, медь или другой металл. Электрод погружают в раствор электролита и запускают процесс электроосаждения, в результате на аноде осуществляется активное растворение металлической поверхности. Стоит заранее учесть время травления, поскольку существует риск уменьшения толщины изделия и

перетравливания [37].

Метод химического травления применяется для удаления с поверхности металла окислов, оксидных плёнок, окалин и следов коррозии. Для изделий, изготовленных из чёрных металлов, титана и его сплавов, нержавеющей и жаропрочных сталей и алюминия. Травление производится серным, соляным либо азотным раствором кислоты, или водным раствором солей щелочных металлов. Время травления может составлять от 1 до 120 минут. При травлении кислота сквозь поры и микронесплошности проникает в подповерхностный слой, происходит химическая реакция с активным выделением водорода, который вскрывает и растворяет оксидный слой.

Плазменное травление подразумевает облучение поверхности ускоренными ионами инертных газов. Ионы вступают в химическое взаимодействие с металлом и своего рода «растворяют» металл, частицы которого затем выводятся из камеры плазмохимического травления вакуумными насосами. Недостатком метода является боковое смещение пазов детали.

1.8 Проверка качества готовых изделий

Комплекс мероприятий, направленных на проверку соответствия требованиям в процессе изготовления деталей и по его завершению называют приёмочным контролем. Ключевой задачей данной операции является недопуск некачественной продукции потребителю, в связи с чем ведётся отбраковка партий товара, имеющего уровень дефектной продукции выше допустимой нормы, установленной технической документацией. Реализация проверки осуществляется по плану контроля - своду технологических положений о порядке отбора образцов контроля и числе проконтролированных единиц изделий, после которого выписывается заключение о пригодности партии к поставке потребителю, или о её отбраковке.

Существует 3 основных принципа построения плана приёмочного контроля:

— Осуществляется анализ условий эксплуатации, исходя из которого вычисляется допустимый предел объёма дефектной продукции в партии q ($q=M/N$, где M - объём дефектной продукции к общему объёму партии N) Данный расчёт должен учитывать, чтобы при любом уровне качества сырья на входном контроле, до приёмочного контроля дошло изделие качества приемлемого для потребителя. Несовершенство данного принципа заключается в том, что он не учитывает уровень качества исходного сырья.

— Особенностью второго подхода является то, что объём выборки образца на контроль качества определяется исходя из эффективности, с учётом того, что дальнейшая выборка не окажет существенного влияния на показатель уровня брака. Данный метод требует дополнительных сложных математических расчётов, дающих представление о сорте пригодности исходного материала по закону распределения.

Чаще всего для вычисления математической функции распределения дефектной продукции в партии, первая аппроксимация значений рассчитывается по биномиальному распределению. Наряду с этим, стоит понимать, что данный расчёт рассматривает только теоретическую модель производства, представляя работу как идеально отлаженный комплекс операций без сбоев (труднодостижимый в практике), а вероятность наличия дефектов одинакова для всех деталей данной партии.

Недостатком данного метода контроля является отсутствие универсальности расчётов, недостоверность результатов при возникновении технологических сбоев производства.

— Третий принцип требует чёткой финансовой обоснованности контрольного плана. Анализируются характеристики изделия в процессе эксплуатации, производится учёт затрат на их производство, включая затраты по контролю продукции и убытки по дефектным изделиям.

Выявляется совокупность вариантов выбора максимально прибыльного метода отбора по сравнению со сплошным контролем изделий и бесконтрольным выпуском.

Анализ затрат каждого этапа контроля позволяет грамотно выстроить гибкую систему испытаний качества. Расчёт стоимостных факторов может вызвать определённые затруднения:

- забраковав партию, производитель несёт убытки по изготовлению этой нереализованной партии и по её ликвидации или расходы на реализацию сплошного контроля качества (если того предписывает отдел технического контроля);
- приняв партию товара, производитель приобретает содержащиеся в ней бракованные единицы изделий, запуск которых в производство приведёт к ущербу, оценить который экономически будет сложно.

Ограниченность данного метода заключается в отсутствии универсальной методики расчёта, применимой для любого случая, поскольку финансовые затраты будут индивидуальны для каждого определённого примера.

Крайние два принципа наиболее удобны и применимы, поскольку позволяют учесть нестабильность производства, а также затраты как производителя, так и потребителя, однако, существуют трудности, связанные с решением ряда математических вычислений и организационных задач.

Классификация методов приёмочного контроля

В производстве наиболее применимы 3 вида приёмочного контроля:

- одноступенчатый - метод контроля, при котором испытанию на определение соответствия требованиям подвергается 1 образец от партии (единичная выборка) и на основании заключения о пригодности/непригодности единственного случайно выбранного образца принимается решение о браковке партии;

— многоступенчатый метод - контроль базируется на испытании k ($k \geq 2$) не менее двух образцов, причём обозначено максимально допустимое число выборок. Самый распространённый метод выборки отечественного контроля;

— последовательный - метод, при котором решение о пригодности партии принимается на основании заключений контроля каждого последующего изделия, причём, максимальное число контролируемых образцов не оговаривается;

Все три подхода имеют свои положительные и отрицательные моменты. Одноступенчатый контроль наиболее легкорезализуемый метод, объём выборки здесь неизменный и обозначен заранее. Осуществить остальные планы значительно сложнее, поскольку нужны дополнительные расчёты и квалифицированный персонал.

Принцип деления по результатам испытания лёг в основу дальнейшей классификации.

Среди статистических методов в зависимости от подхода к испытанию, выделяют два фундаментальных:

— метод контроля по альтернативным признакам - предполагает минимум расчётов, лёгок в реализации на производстве, но, поскольку, использует лишь малую часть наблюдений, то требует большого числа дополнительных замеров, что нередко затруднительно.

— контроль по количественному признаку - определённое число изделий подвергается замеру контролируемого параметра, вычисляется среднее арифметическое и производят его оценку относительно верхней и нижней предельно допустимой границе (с учётом допусков).

По завершению контроля качества, забракованные контролёрами партии имеют 2 пути следования, когда забракованная партия признаётся непригодной и отправляется на переработку или забракованная партия подлежит разбраковке по средствам последовательного метода контроля и замене некачественной продукции на пригодную.

1.9 Сборка

Сборка – это процесс объединения отдельных компонентов в готовое изделие на этапе производства. Процедуру сборки можно подразделить на одноуровневую спецификацию, многоуровневую спецификацию или спецификацию верхнего уровня. Сборочные процессы могут состоять из механических, электрических или программных компонентов. Сборка может происходить, как вручную, так и автоматизировано. Зачастую на больших предприятиях сборка осуществляется на сборочных линиях.

Сборочная линия — это распространенные методы сборки сложных предметов, таких как автомобили и другое транспортное оборудование, бытовая техника и электронные товары, это производственный процесс (часто называемый последовательной сборкой), в котором детали (обычно взаимозаменяемые детали) добавляются по мере того, как сборочный конвейер перемещается с одной рабочей станции на другую, где детали добавляются последовательно до тех пор, пока не будет произведена окончательная сборка. За счет механического перемещения деталей на сборочные работы и перемещения полуфабрикатов с одной рабочей станции на другую можно собрать готовый продукт быстрее и с меньшими трудозатратами, чем если бы рабочие переносили детали на стационарную деталь для сборки. На рисунке 1 изображена сборочная линия АвтоВАЗ.

Сборочные линии предназначены для последовательной организации рабочих, инструментов, машин и деталей. Движение рабочих сведено к минимуму. Все детали или узлы перемещаются либо с помощью конвейеров, либо с помощью моторизованных транспортных средств, таких как вилочные погрузчики, либо самотеком, без ручной транспортировки. Подъем тяжелых грузов осуществляется с помощью таких машин, как мостовые краны или вилочные погрузчики. Каждый рабочий обычно выполняет одну простую операцию, если не применяются стратегии ротации рабочих мест.

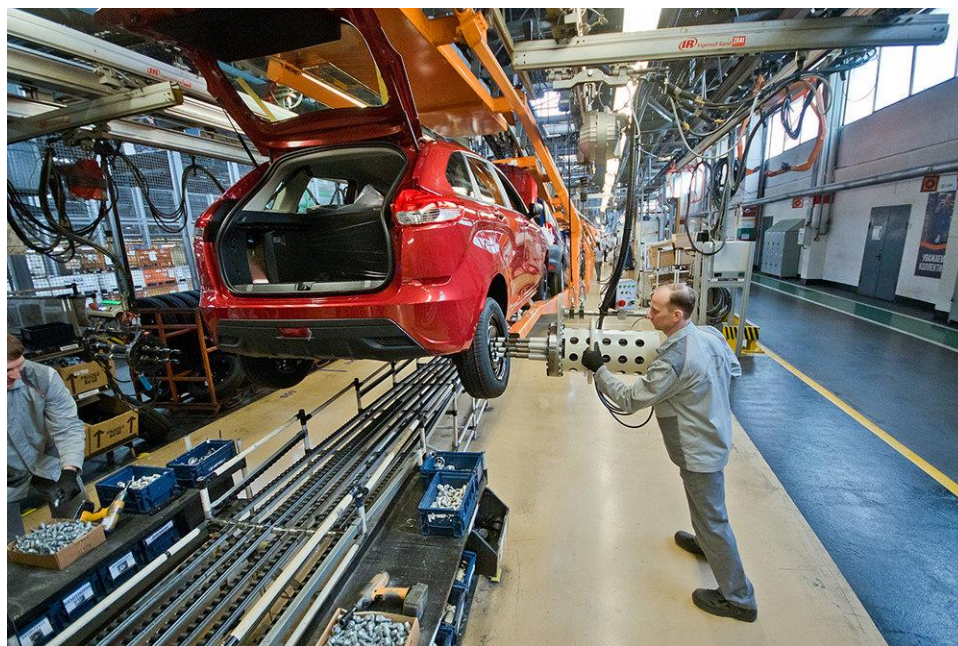


Рисунок 1 – Сборочная линия АвтоВАЗ.

Процесс сборки — это заключительная часть производственного цикла продукта. Именно на этом этапе выявляется большинство дефектов производства детали. На стадии производства деталей, а также при сварочных работах над конструкцией, возникают технологические неисправности — дефекты:

- структуры материала (наличие неметаллических включений, сегрегации примесей и т.д.),
- выплавки производства заготовок (несплошность металла, наличие включений, закаты, неспаи);
- мехобработки (задиры, заусенцы, прижоги, мелкие трещины при шлифовке, избыточная локальная деформация);
- сварки (наплывы, подрезы, трещины, структурная неоднородность, несплавление, пережог и т.д.);
- термообработки (обезуглероживание и окисление поверхности, избыточный остаточный аустенит, закалочные трещины и т. д.);
- поверхностной обработки (водородное охрупчивание, трещины, потеря механических характеристик и т.д.);

— сборки (несоосность, задиры, смещения, перетяжка и недотяжка болтовых соединений и т.д.).

Термомеханическое воздействие на деталь, возникающее в процессе сборки и сварки оказывает негативное воздействие, проявляющееся в изменении предела прочности, снижении коэффициента сопротивления хрупкому разрушению, низкой коррозионной стойкости и др. Основные эксплуатационные причины разрушений и неисправностей: дефекты; коррозия; износ; нарушение условий эксплуатации; наличие перегрузок и работа прибора в режиме отличном от штатного; неправильное техобслуживание и т. д.

1.10 Эксплуатация детали

Зачастую преждевременный выход из строя деталей связан не с дефектами производства и даже не с нарушениями конструирования, а с неправильными условиями эксплуатации приборов.

Прогрессивные машиностроительные производства, несомненно, имеют в своём оснащении разнообразное дорогостоящее оборудование, автоматизированные системы и комплексы. Со временем в процессе работы оборудование может утрачивать свои первоначальные характеристики, точность и производительность, прежде всего, из-за износа отдельных деталей. Чтобы избежать этого и обеспечить бесперебойную работу производства, необходимо производить своевременную диагностику оборудования, выполнение ремонтных работ и другие мероприятия элементов системы эксплуатации.

Эксплуатацией называется множество всех стадий существования оборудования с момента его приобретения до выхода из строя, включая все виды обслуживания, ремонта, хранения и транспортировки. Техническая эксплуатация подразумевает комплекс всех мероприятий по ремонту и обслуживанию, осуществляемый рабочим персоналом предприятия и

направленный на сохранение установленных технических показателей.

Техобслуживание и ремонт – совокупность операций по сохранению оборудования в исправном состоянии в ходе эксплуатации, а также на стадии хранения и транспортировки.

Принятие мер по техобслуживанию и ремонту можно подразделить на три категории: плановые, по событию и предписанные в связи с состоянием (рисунок 2).

По степени серьёзности проведения ремонтных работ выделяют:

- текущий ремонт (косметический) – когда возникла поломка какого-либо второстепенного узла, не базовой детали и устранение неисправности осуществляется заменой этой износившейся части;
- капитальный ремонт – работы по восстановлению работоспособности при наличии неисправности любого компонента прибора, в том числе и базовой детали [38].

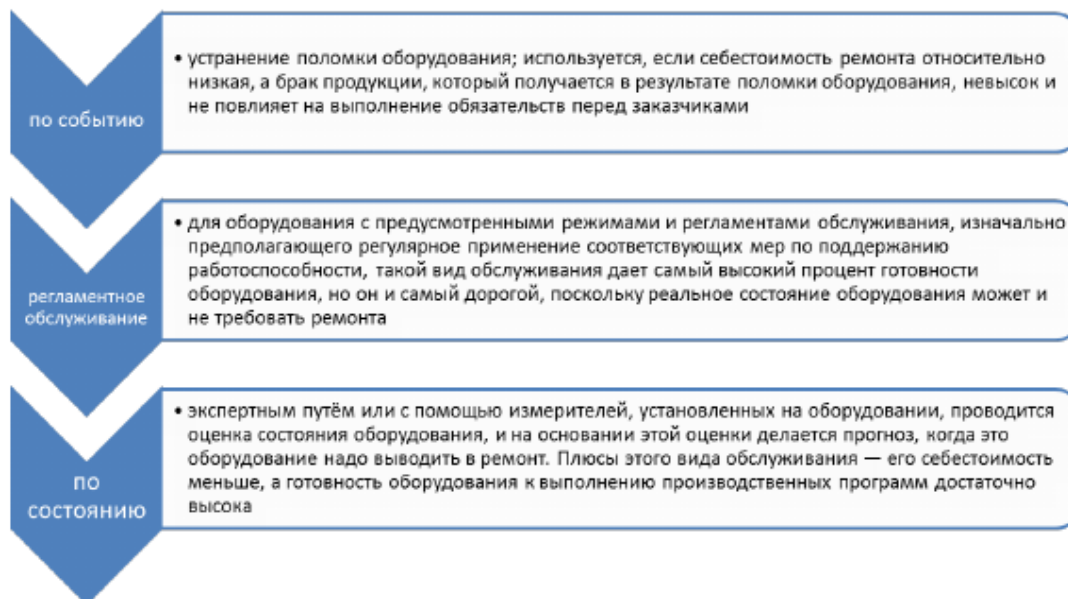


Рисунок 2 - Способ планирования мер по техобслуживанию и ремонту [38].

Организация комплекса ремонтных работ на предприятии осуществляется специальным подразделением, руководителем которого назначается главный механик. Данному подразделению подчиняются

ремонтные цеха, а на крупных производствах – энергетическое хозяйство.

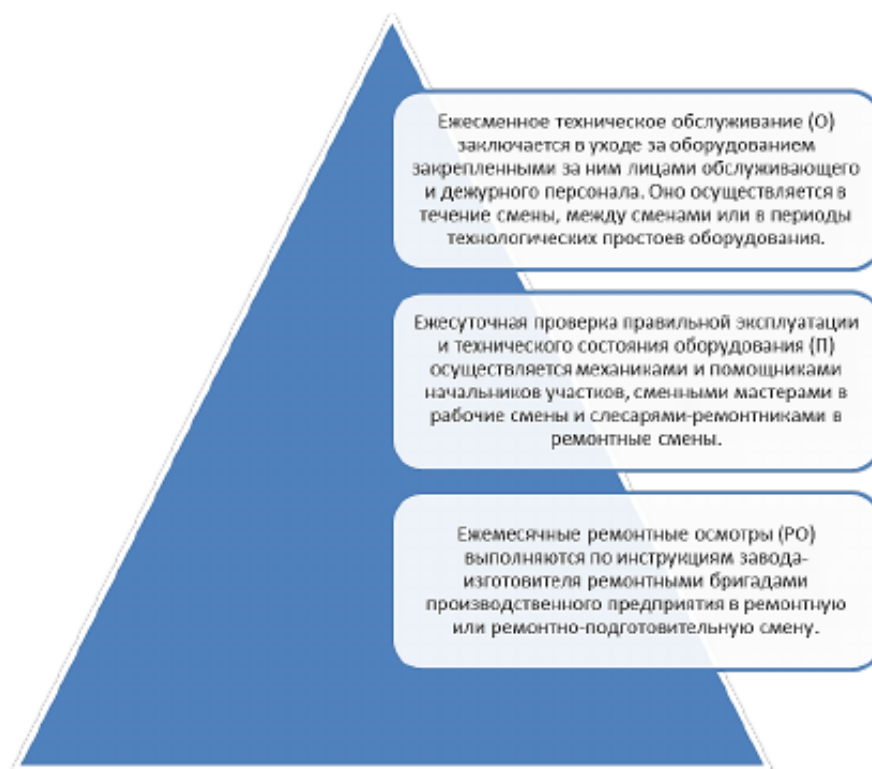


Рисунок 3 – Виды межремонтного обслуживания [38].

В промышленности осуществляются и комбинированное техобслуживание, которые совокупно применяют стандартный контроль, периодический и послеремонтный контроль. Такой метод позволяет добиться бесперебойной работы оборудования, продлить срок эксплуатации и снизить затраты на содержание.

Подробное описание комплекса мер межремонтного обслуживания приведены на рисунке 3

Наиболее прогрессивной на сегодняшний день метод контроля сохранности оборудования при эксплуатации – система гарантийного ремонта, которая заключается в осуществлении ремонтных работ с гарантией безотказности и сохранения его качества на протяжении установленного времени. Данная система эффективна за счёт чёткой организации техобслуживания в период между ремонтными работами, соблюдении всех

технологических параметров и режимов, прописанных в руководстве по эксплуатации, проведением ремонтных работ в соответствии с установленным порядком, а также прогрессивными методами проведения всех мер по ремонту. В подтверждение добросовестности проведения ремонтных работ, после их осуществления владельцу выдаётся гарантийный паспорт, удостоверяющий качество [38].

Выводы по разделу

На основании анализа литературных данных можно сделать следующие выводы:

Жизненный цикл продукции – это комплекс процессов видоизменения изделия в течение периода её создания и применения, начиная от конструирования чертежей и разработки технической документации до утилизации, включающие сборку и эксплуатацию.

Контроль этапов жизни изделия позволяет снизить издержки на изделие и даже предотвратить катастрофы.

На каждом из этапов создания изделия необходимо проверять соответствие требованиям и технологическому процессу.

Экспертный контроль позволяет снизить издержки на статистически часто повторяемые дефекты, выявляя недоработки в конструкторской документации, отслеживать нарушения в сборке деталей, а также предотвращать разрушения, возникшие в процессе эксплуатации.

2 Оборудование научно-исследовательского института прогрессивных технологий

2.1 Пробоподготовка на оборудовании НИО-2 (на примере исследования трубы радиационного змеевика)

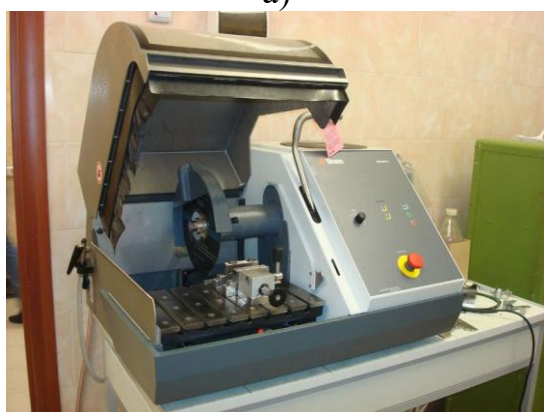
Разделку трубы змеевика на образцы осуществляли с помощью ленточнопильного станка JET HBS-916W (рисунок 4 а), а доводку заготовок образцов до требований чертежа – с помощью фрезерных (рисунок 4 б) и токарных (рисунок 4 в ,г) станков.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Оборудование для пробоподготовки: а – ленточная пила JET HBS-916W; б - вырезной станок Sodick AG400L LN2W; в - отрезной станок Discotom- Discotom-6; г – система для подготовки шлифов Tegra

Образцы вырезали из двух зон трубы змеевика: из «условно нормального» участка (ему была присвоена маркировка «3») и «условно ненормального» (на нем наблюдались не совсем явные признаки вздутия – маркировка «6»).

2.2 Статические испытания образцов на растяжение

Испытания образцов на растяжение (рисунок 5 а) диаметром рабочей части $\varnothing 4$ мм и базой 20 мм как при комнатной (рисунок 5б), так и при повышенных температурах (рисунок 5 в, г) проводили на гидравлической машине Instron марки 8802 (рисунок 6) со скоростью перемещения активного захвата 0,5 мм/мин, что эквивалентно скорости деформирования $4,17 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.



Рисунок 5 – Внешний вид образцов на растяжение: до испытания – а; после испытания при: 22 °С – б; при 930 °С – в; 1000 °С – г

Заданную температуру поддерживали с помощью штатного терморегулятора (рисунок 6 б) с обратной связью от термопары, установленной непосредственно на испытуемом образце.

По заданию Заказчика испытания образцов сопровождалась записью акустической эмиссии (АЭ). Перед испытаниями были проведены

исследования: прохождения калиброванного акустического сигнала через захваты и стыковочные элементы; амплитудно-частотной характеристики преобразователей АЭ и оценка шума различных источников испытательной машины.

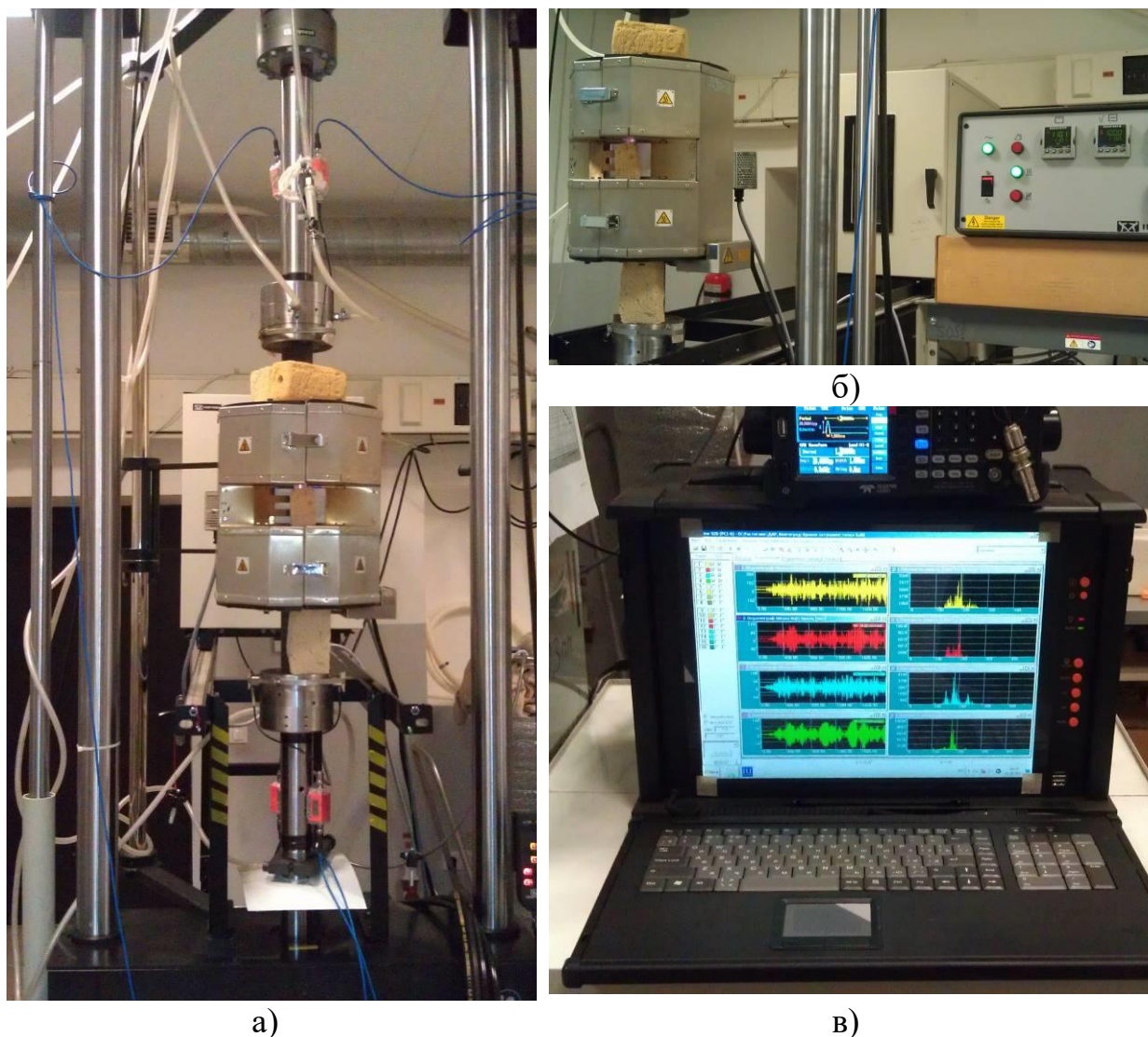


Рисунок 6 – Испытание образцов на растяжение на гидравлической машине Instron 8802 (а) со штатной системой поддержания заданной температуры (б) и системой регистрации акустической эмиссии A-Line 32D (в)

В испытаниях при комнатной температуре АЭ регистрировалась пятью преобразователям, четыре из которых были установлены на захватах, а пятый непосредственно на образец. При высокотемпературных испытаниях для регистрации АЭ использовались четыре преобразователя АЭ (только на

захватах, рисунок 6 а). Преобразователи АЭ устанавливались через консистентную контактную среду Mobil и закреплялись с помощью металлических хомутов. Акустический контакт между образцом и захватами обеспечивался частью высокотемпературной графитовой смазкой, которая оставалась после испарения легкокипящих фракций.

Регистрация АЭ для сравнения проводилась параллельно двумя видами преобразователей АЭ промышленной частоты (до 300 кГц) типа П113, первый производства Кишинев, второй производства Ростов. Соответственно на верхнем и нижнем захвате стояли по одному преобразователю АЭ первого и второго типа. Такое расположение преобразователей также дает возможность анализа локации источников АЭ, все исходные данные для этого измерялись. Сигналы со всех преобразователей АЭ усиливались на 26 дБ с помощью предварительных усилителей ПАЭФ-014 и записывались 16-ти канальной АЭ системой A-Line 32D (рисунок 6 в). Усиление сигналов основным усилителем АЭ системы не проводилось. Запись АЭ из-за высокой шумности испытательного оборудования для сравнения в одной серии испытаний проводилась в двух частотных диапазонах: 100-300 кГц и 30-500 кГц. Во всех испытаниях записывалась форма импульсов АЭ превышающих порог дискриминации, для возможности их просмотра и анализа. Порог дискриминации выставлялся каждый раз на 2-3 дБ выше уровня шума испытательной установки. Настройки АЭ аппаратуры сохранялись в каждом испытании в отдельный файл, поэтому также доступен для сравнения и анализа. Анализ зарегистрированных сигналов АЭ не проводился.

Диаграммы испытания на растяжение при комнатной температуре приведены на рисунке 7а, а при повышенных температурах на рисунке 7б, где индекс «3» или «б» указывает на принадлежность к месту вырезки), образец 930 °С (3) не был разрушен из-за вырыва резьбовой части образца из захвата. Вид образцов после испытаний показан на рисунке 5 б-г. В связи с тем, что согласно результатам всех исследований никакой существенной разницы в качестве металла трубы змеевика в условно «нормальной» и условно

«ненормальной» областях не обнаружено, три из шести образцов были испытаны в отличной от 1000 °С температуры: два при 930 °С и один при 950 °С.

Для удобства анализа результатов, их основные прочностные характеристики: условный предел текучести ($\sigma_{0.2}$) и временное сопротивление разрушению (σ_B) наложены на паспортные данные для материала Centralloy ET 45 Micro (рисунок 8а). Как следует из этого сравнения, в большинстве своем, прочностные характеристики металла трубы змеевика очень близки к паспортным данным Centralloy ET 45 Micro. Только при комнатной температуре значение условного предела текучести значительно превышает паспортные значения.

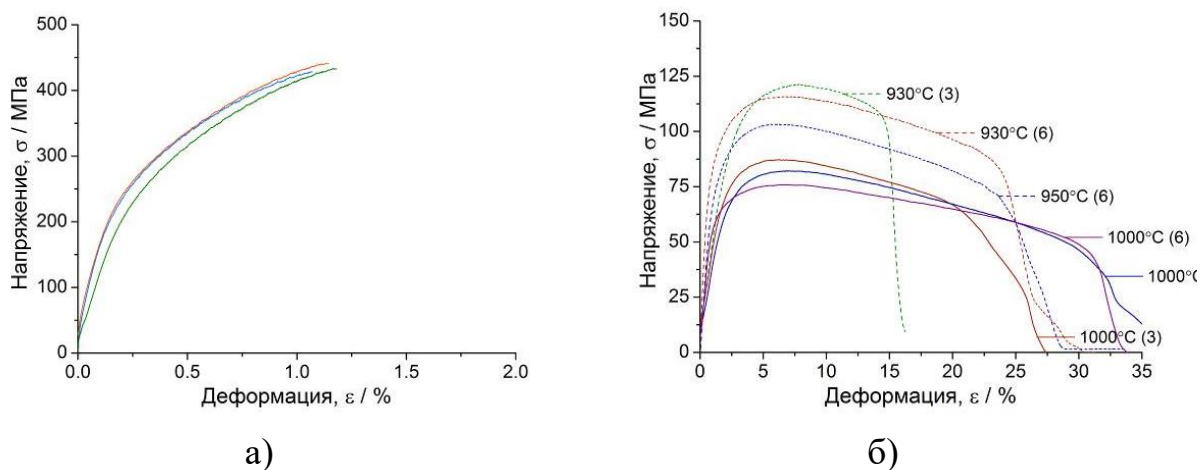


Рисунок 7 – Диаграммы растяжения при комнатной температуре (а); при повышенной температуре (б)

Аналогично, на рисунке 8б приведены данные сравнения результатов измерения относительного остаточного удлинения с паспортными данными. В отличие от прочностных свойств, пластические оказались намного ниже паспортных значений, а при комнатной температуре относительное удлинение не превысило 1,2 %, что в пять раз ниже паспортного (6%).

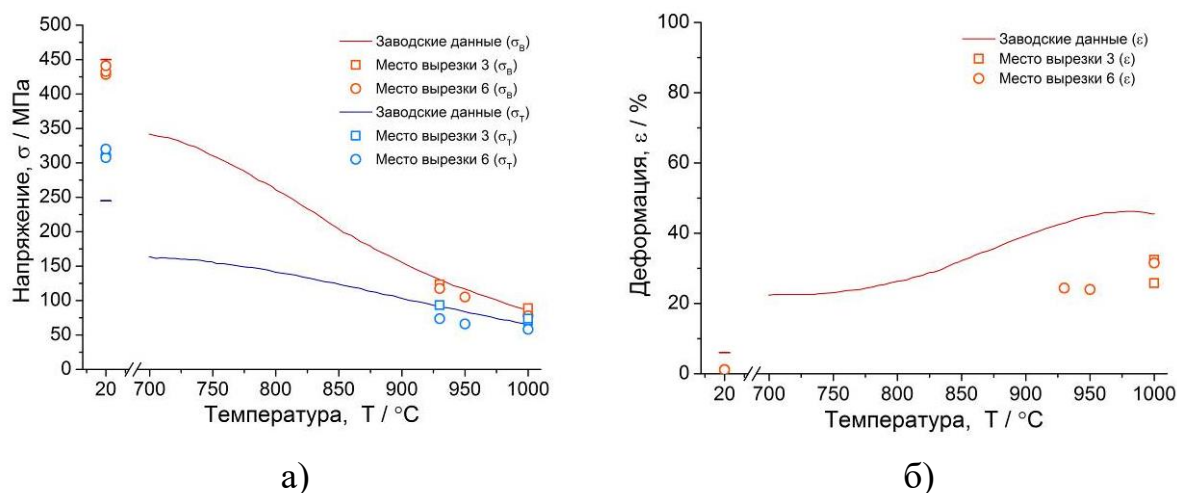


Рисунок 8 – Результаты измерения прочностных характеристик: в сравнении с паспортными данными (а); в сравнении с паспортными данными (б)

2.3 Испытания образцов на ударную вязкость

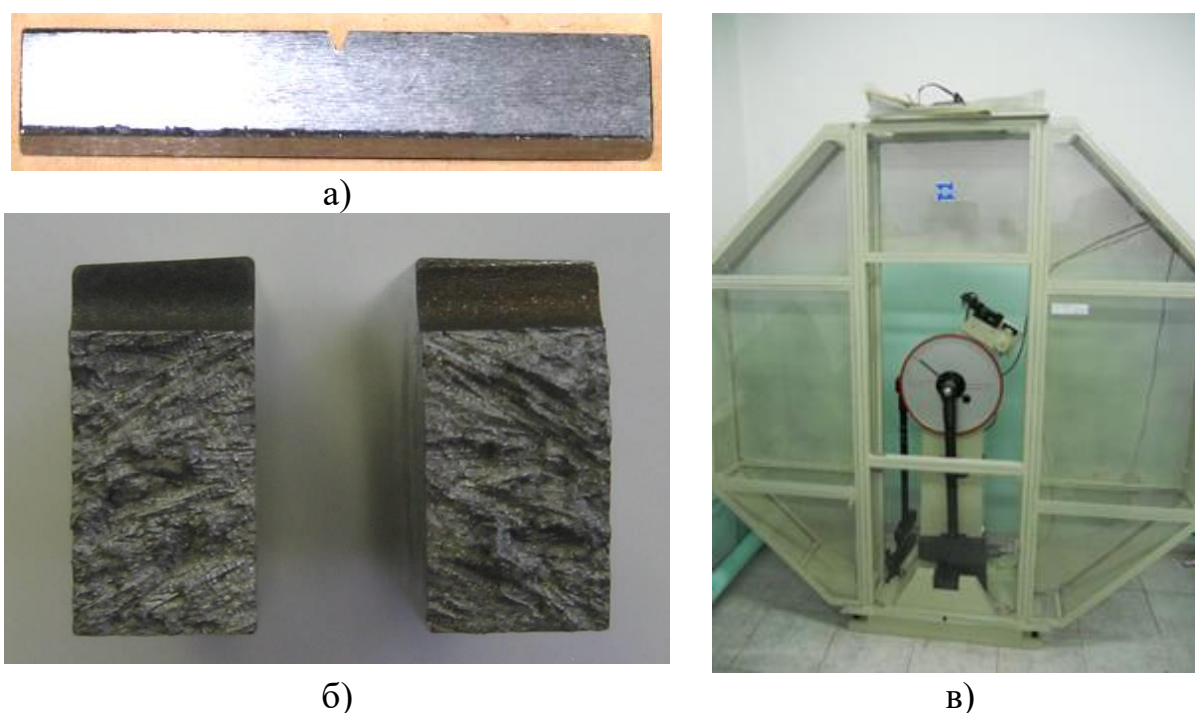


Рисунок 9 – Вид образца до испытаний (а); вид изломов после испытаний (б); маятниковый копер марки JB-W300 (в)

Испытания образцов на ударную вязкость KCU (рисунок 9) проводили по ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатных и повышенных температурах», при комнатной

шестоватую морфологию. Она обладает ярко выраженной полосчатостью, что хорошо видно при небольших увеличениях приведёны на рисунке 10а, при увеличении $\times 50$, стрелкой отмечен надрез и 10б - при увеличении $\times 100$.

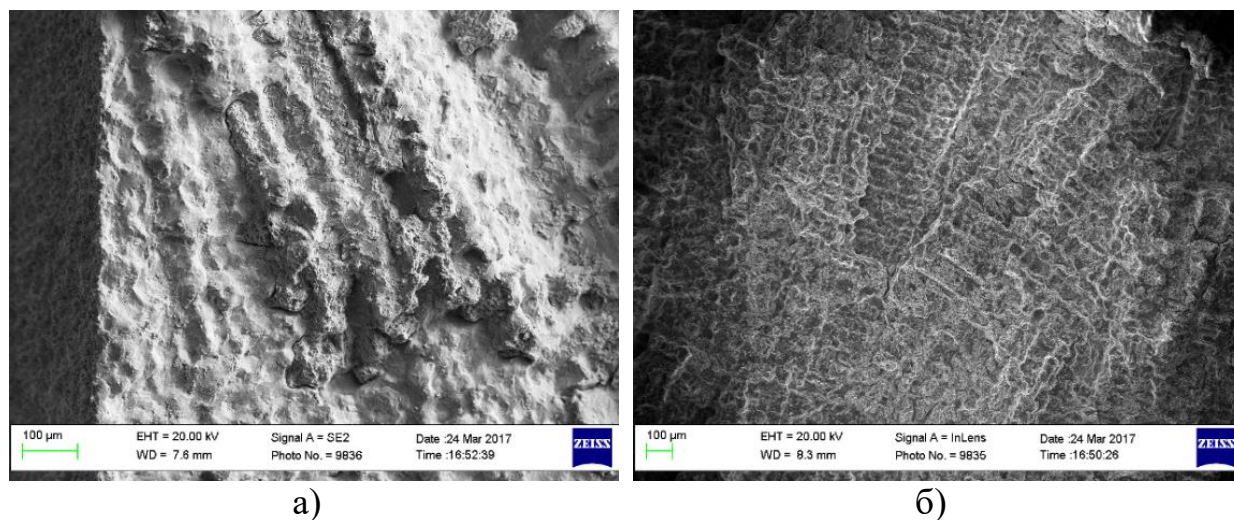


Рисунок 11 – Фрагмент излома образца №62 вблизи надреза. СЭМ.: при увеличении $\times 100$ (а); при увеличении $\times 50$ (б)

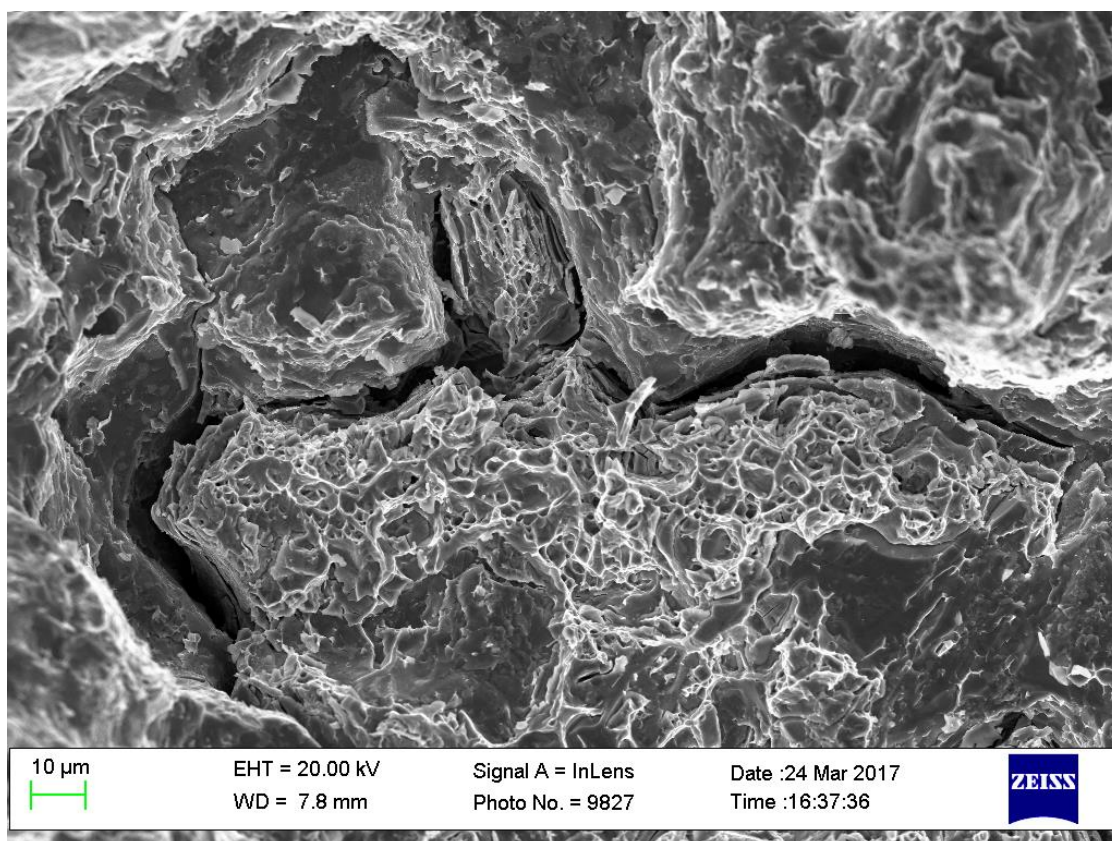


Рисунок 12 – Фрагмент излома образца №32

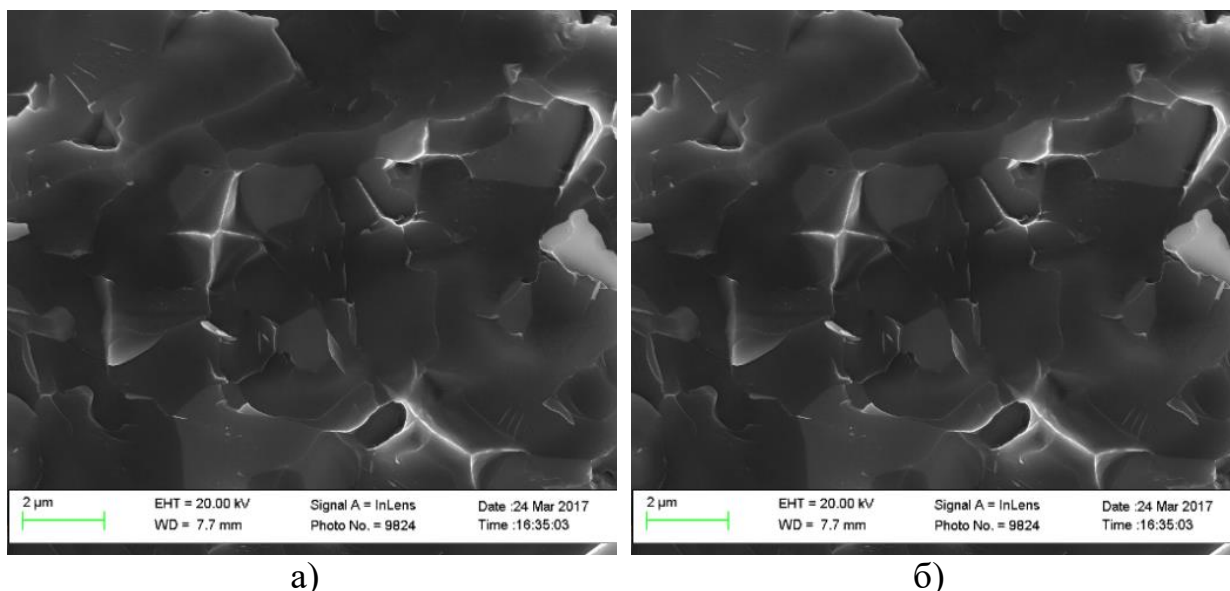


Рисунок 13 – Хрупкий сколоподобный участок в изломе образца №33 (а);
участок вязкого разрушения образца №33 (б)

Кроме того, на поверхности излома присутствуют участки, в которых полосы имеют разную ориентацию (рисунок 11б). Наиболее вероятно, такое строение излома обусловлено микроструктурой испытанного материала.

На снимках, полученных при более высоких увеличениях (рисунок 12 и 13б) видно, что излом имеет смешанный вязко-хрупкий характер: присутствуют как участки сколоподобного типа со слаборазвитой, относительно плоской поверхностью представлен на рисунке 12 и 13а (при увеличении $\times 6400$), так и области с ямочным волокнистым строением (рисунок 12, и 13б). Кроме того, можно отметить наличие вторичных трещин представлен на рисунке 12, который содержит участки хрупкого (стрелка под номером 1) и вязкого (стрелка под номером 2) разрушения, а также вторичные трещины (стрелка под номером 3). СЭМ. Увеличение $\times 560$.

2.5 Исследования микроструктуры

Панорамное изображение микроструктуры получали на микроскопе Axiovert 40 MAT ф. Carl Zeiss (Германия), оснащенного высокопроизводительной системой анализа металлографических

изображений Thixomet PRO, а исследование фазового состава микроструктуры – с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Sigma (Германия) (разрешающая способность электронной колонны при оптимальном WD 1,3 нм.), оснащенного аналитической системой ф. EDAX (США) с детектором Apollo и детектором обратнорассеянных электронов Hikari (рисунок14).



Рисунок 14 – Оборудование для исследования поверхности: сканирующий электронный микроскоп Carl Zeiss Sigma

На рисунке 15 приведены панорамные изображения микроструктуры поперечного сечения (по толщине трубы) на условно «нормальном» (рисунок 15а,б) и условно «ненормальном» (рисунок 15в,г) участках. Никаких особенностей в микроструктуре между этими двумя участками не обнаружено.

На рисунке 16 приведена иллюстрация фазового состава микроструктуры. Цветовая индикация фаз: Фаза 1 – синий – преимущественно Ni, Fe; Фаза 2 – красный – преимущественно Cr, Fe; Фаза 3 – желтый – преимущественно Nb.

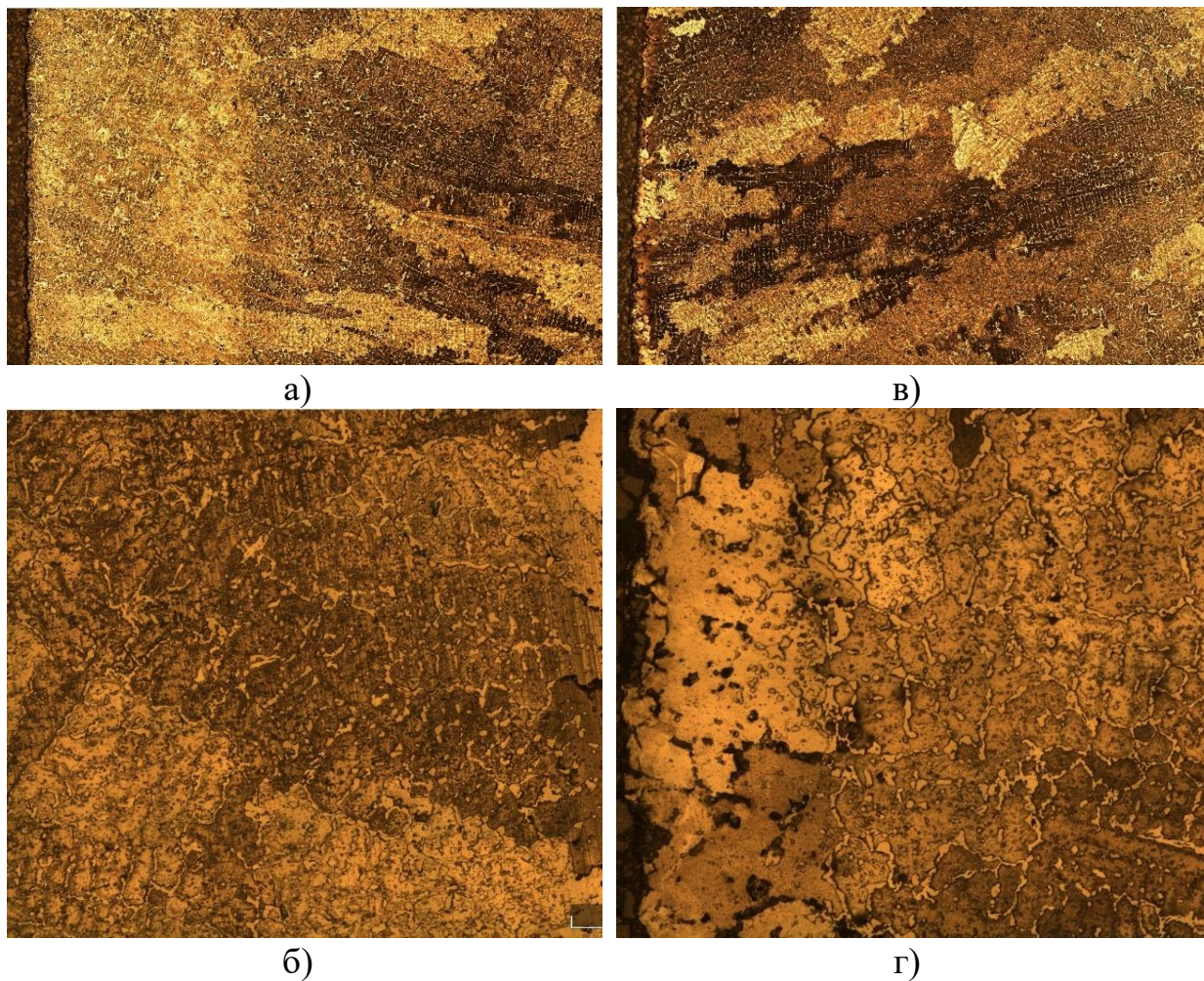


Рисунок 15 – Панорамные изображения микроструктуры поперечного сечения трубы на условно «нормальном» (а,б) и условно «ненормальном» (в,г) участках. а,в - $\times 100$; б,г - $\times 500$

Максимальное представительство (около 50%) занимает фаза на основе хрома с железом (на рисунке 16 обозначена красным цветом), около 45% занимает фаза на основе никеля с железом (синий цвет) и примерно 5% занимает фаза на основе ниобия (желтый цвет).

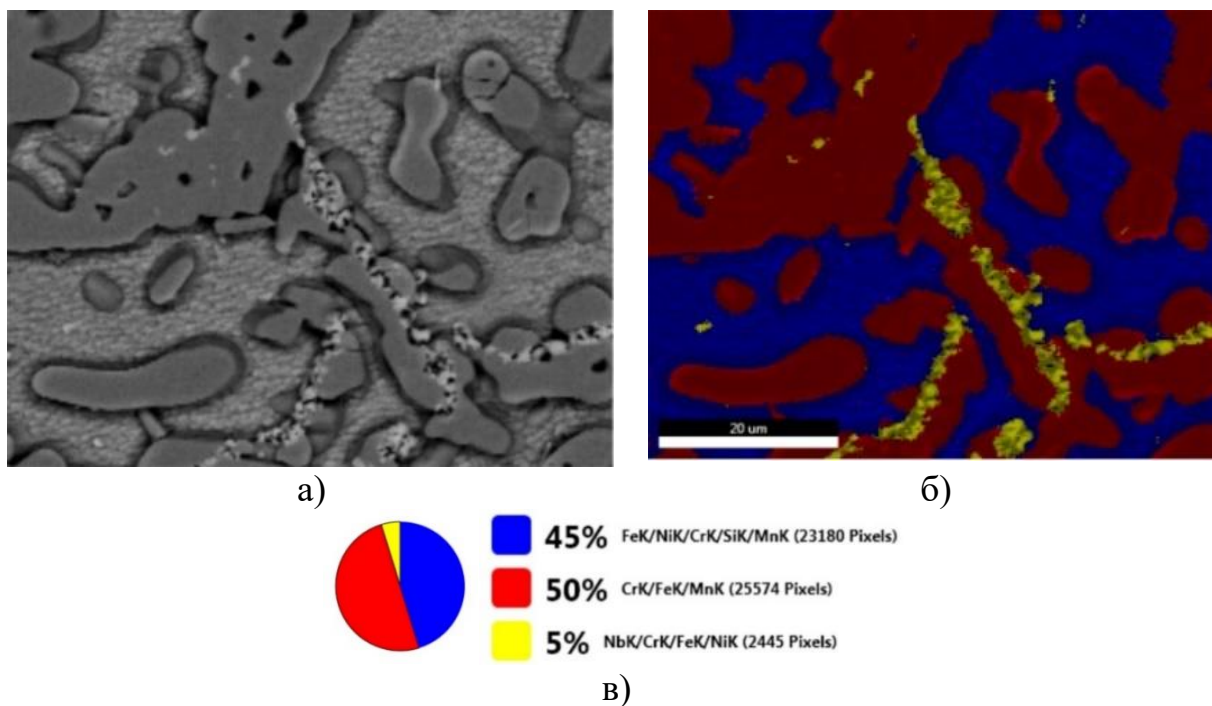


Рисунок 16 – Электронное изображение области сканирования (а); карта распределения обнаруженных химических элементов по фазам (б) и их процентное содержание (в)

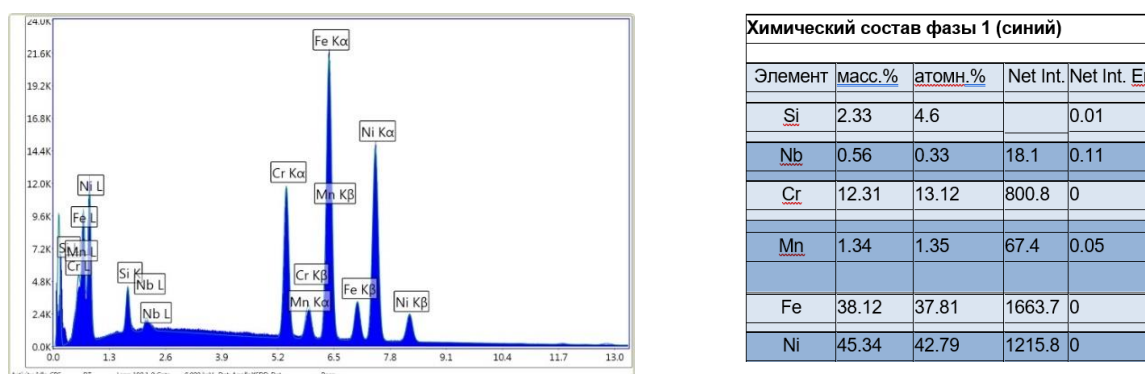
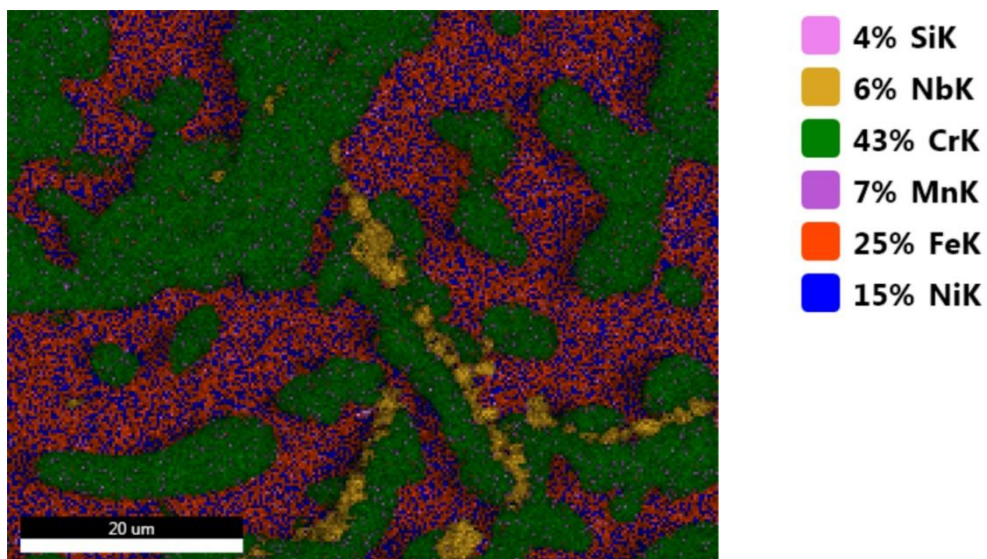
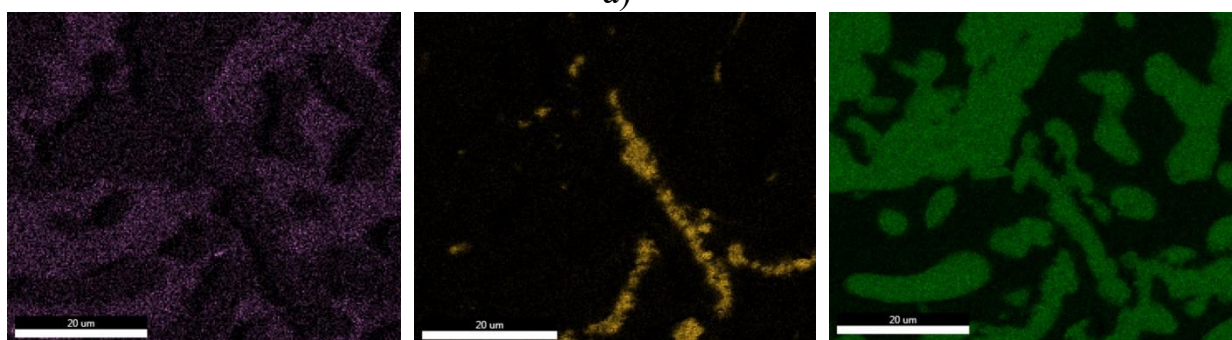


Рисунок 17 – Химический состав фазы, содержащей Ni и Fe (цветовая гамма соответствует рис. 16)

На рисунке 17, показан детальный химический состав, который можно рассмотреть для каждой, из указанных выше фаз, а на рисунке 18 карты распределения микроструктуры по отдельным элементам.



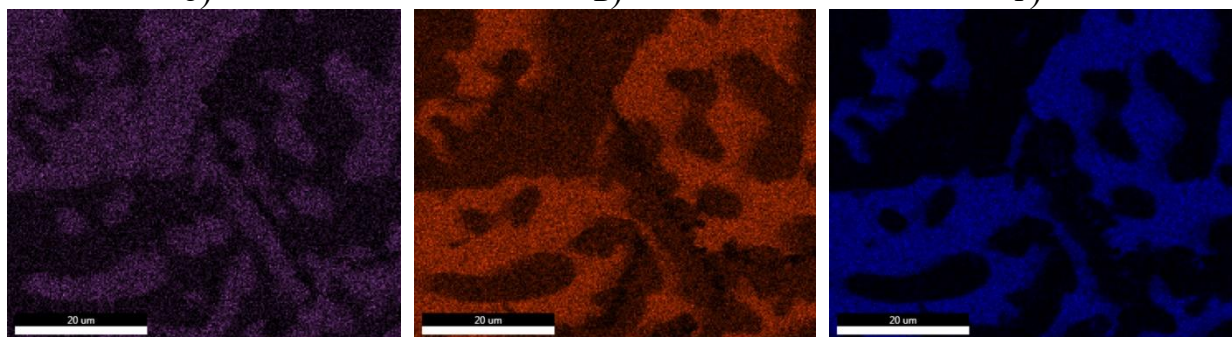
а)



б)

в)

г)



д)

е)

ж)

Рисунок 18 – Карты распределения химических элементов (цветовая индикация): а – общее распределение; б – кремний; в – ниобий; г – хром; д – марганец; е – железо; ж – никель

По этим данным трудно судить об изменении микроструктуры в процессе эксплуатации трубы змеевика, т.к. отсутствует информация о том, какова она была в изначальном виде.

2.6 Исследование с помощью бинокулярного металлографического микроскопа

С помощью бинокулярного металлографического микроскопа Stemi 2000 (Zeiss) был проведен осмотр гладких зон на поверхности излома кронштейна. Stemi-2000C, который изображен на рисунке 19, позволяет делать оценку структуры материалов, при небольших увеличениях объектов от 1-118 мм при небольших увеличениях, позволяет исследовать образец размером до 35мм. Угол обзора меньше обычного - 35° Stemi-2000C – лабораторный оптический микроскоп, имеющий тип построения по оптической системе грену. Данная схема подразумевает угол стереоскопичности между окулярами.



Рисунок 19 - Стереоскопический микроскоп Zeiss Stemi 2000

В ходе исследования было выявлено, что морфология поверхности в первой области исследования является сходной по морфологии поверхности второй области (рисунок 20 а, б, г, д): структура поверхности кажется гладкой лишь на первый взгляд, на самом же деле, состоит из множества разных по

высоте областей, а вот поверхность в третьей зоне наблюдения, как и предполагалось, действительно, гладкая и чётко разграниченная, что тоже немаловажно. Гладкая область является дефектом литья в виде внутренней окисной пленки. Т.к гладкая область находится внутри стенки и не распространяется на внешнюю поверхность кронштейна, это указывает на то, что гладкие зоны не могли стать причиной разрушения кронштейна.

Результаты исследования морфологии дефектной зоны представлены на рисунке 20. Данные снимки вносят некоторую ясность по морфологии поверхности разрушения, однако для определения природы разрушения зоны 1 и 2 этого недостаточно, поэтому необходимо использовать растровую электронную микроскопию.

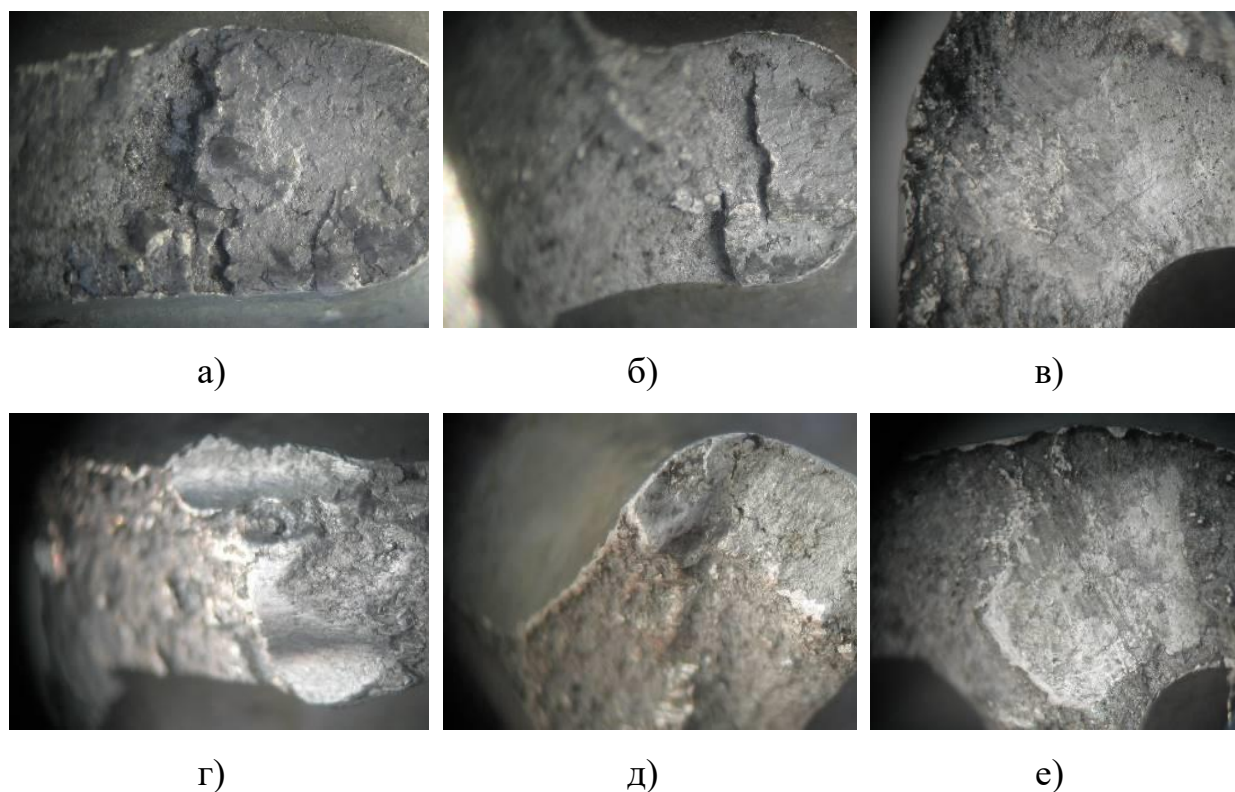


Рисунок 20 – Вид гладких участков на изломах кронштейна: а, б, в – нижняя часть излома; г, д, е – верхняя часть излома; а, г – область №1; б, д - область №2; в, е – область №3.

2.7 Исследование с помощью растровой электронной микроскопии

Технология исследования с помощью растровой электронной микроскопии даёт широкие возможности, от получения микроснимков, до исследования морфологии поверхности.

Электронно-микроскопическое исследование области 1 на нижней части кронштейна проводили с помощью растрового электронного микроскопа Zeiss Sigma. Внешний вид прибора изображен на рисунке 21. Результаты исследования представлены на рисунке 22.



Рисунок 21 - Растровый электронный микроскоп Zeiss Sigma

На поверхности очень чётко наблюдаются множественные волнообразные линии, распространяющиеся и вытянутые в направлении справа на лево (рисунок 22а). Две крупные волнообразные линии (выделенные кругом на рисунке 22а) представлены на рисунке 22 в при 400- кратном увеличении.

В результате исследования, с помощью растрового электронного микроскопа Zeiss Sigma, выяснилось что поверхность состоит из практически плоских участков, наплывающих друг на друга справа налево, причем эти участки сплошь покрыты ручьями – усталостными бороздками, следами

пластической деформации (рисунок 22г) указывающими направление пластического течения.

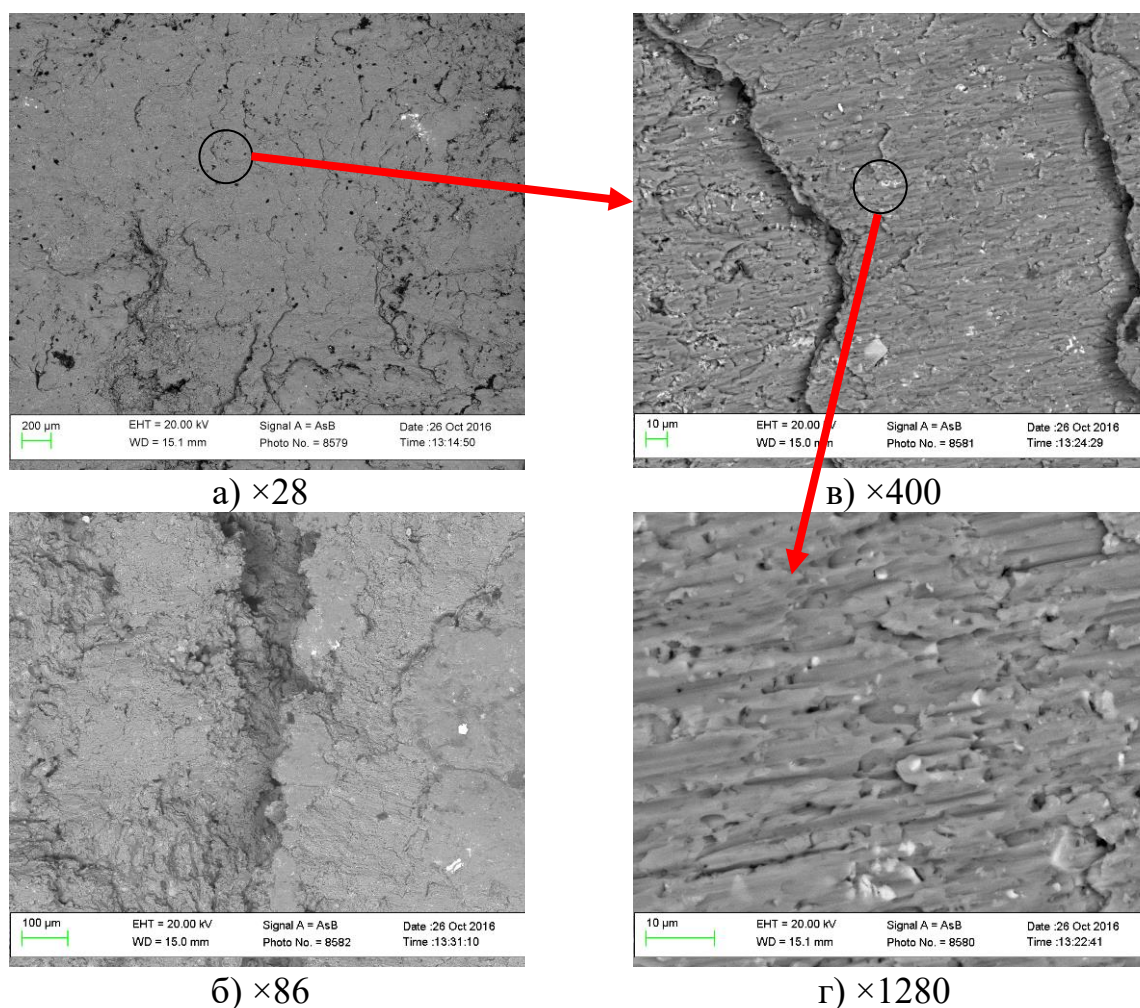


Рисунок 22 – Изображения поверхности излома в области 1, полученные с помощью РЭМ

Выводы по разделу

Данный раздел посвящён высокотехнологичному оснащению лабораторий НИПТ. Приведён пример пробоподготовки и методов исследования с помощью современного высокоточного оборудования на примере исследования причин разрушения трубы радиационного змеевика печи пиролиза.

3. Классификация разрушений исходя из общего анализа причин их возникновения

Аналізу подвергались конструктивные элементы разнообразных сфер промышленности: автомобилестроение, нефти-газодобывающей промышленности, медицины, железнодорожного транспорта, бытовые приборы и крупное техническое оборудование. В общей сложности было изучено более 20 экспертных заключений по определению факторов разрушения, которые позволили выявить основные источники выхода деталей из строя. Было выявлено три основных типа причин:

- Ошибки при проектировании изделия (конструкторские недоработки, неправильно выбранный материал или его заложенные характеристики);
- Нарушения технологии производства детали или сборки конструкции (применение некачественного материала, нарушения технологии: термической обработки, нанесения покрытий, механической обработки, и др., нарушения технологии сборки: неправильные моменты, затяжки, установка с перекосом и др.);
- Неправильные условия эксплуатации деталей (завышенные температурно-силовые режимы, неправильное функционирование системы смазки, коррозионно-активная среда, несвоевременное обслуживание и др.).

По рассмотренным в работе примерам определены некоторые общие закономерности:

- На долю поломок по вине конструкторов приходится 33,3%;
- Нарушение технологий производства и некачественный материал — причина поломок в 46,7% всех случаев;
- Нарушение требований эксплуатации — 20% неисправностей.

Говоря о всевозможных рассмотренных в работе случаях разрушения, можно отметить, что в процессе эксплуатации в зависимости от условий постоянно возникают новые случаи, которые могут не подчиняться

обнаруженным закономерностям при работе над алгоритмом, однако, выработав общую универсальную методологию анализа, можно прийти к объективному правильному выводу о причинах разрушения. Именно на этом базируется основная идея работы: структурирование подхода металлографической экспертизы в общей цепочке мероприятий по обеспечению качества выпускаемой продукции.

3.1 Ошибки при проектировании изделия

Конструкторская ошибка – одна из наиболее часто встречающихся причин возникновения поломок. Конструкторской ошибкой может быть, как ошибка, связанная с недостаточной квалификацией конструктора, так и ошибка из-за невнимательности. Стоит отметить, ошибки, совершенные на разных этапах, имеют различную значимость и последствия, при этом наибольшее затруднение вызывают ошибки на стадии разработки принципа работы машины, нежели ошибки исполнения конструктором. Ошибочно выбранный принцип работы машины вынуждает на повторное проектирование, а недоработки на стадии проектирования устраняются незначительной корректировкой.

На этапе предварительного проектирования выявляют потребителя изделия и закладывают в машину необходимые ему функциональные требования (скоростные режимы, дизайн, проходимость автомобиля и т.д.), прогнозируют условия эксплуатации, производят мониторинг патентной документации в поисках новых перспективных конструкционных решений, формируют чёткое представление о задачах создания и формируют варианты их решения.

Наилучшее решение избирается исходя из принципов соотношении цены и качества. Затруднения при выборе оптимального решения одной и той же поставленной задачи вызывает огромное количество важных технических показателей, сравнение которых, исходя из каждого подхода, длительный и

монотонный процесс.

Этап эскизного проектирования подразумевает подбор оптимальной конструкции выбранной вариации машины, создают техническое описание для детальной проработки варианта, разрабатывают документацию.

На этапе технического проектирования утверждается нормативная и конструкторская документация на выпуск опытной партии автомобилей. При этом, мониторинг новых оптимальных вариантов реализации конструктивных узлов конструкции не прекращается.

Рассматривая стадии предварительного, эскизного и технического конструирования, может создаться впечатление единообразия операций проектирования, но это не так, поскольку переходя от одного этапа к другому, осуществляется перманентная модернизация вариантов проектируемого изделия, что в итоге позволяет максимально достичь заявленные в технологии требования. Варианты исполнения при этом выражаются в чертежах, схемах, макетах и опытных образцах.

Всё вышесказанное можно подытожить на примере проектирования редуктора, для чего изначально надо иметь:

- входные данные (назначение, потребность, направление совершенствования и т.д.);
- конкретные данные - условия эксплуатации (характеристики среды, вибрации, виды нагружения и т.д.), определяющие характеристики (частоту и момент вращения, передаточное число и т.д.).

Закладываются требования к материалу и комплектации. Все наиболее важные характеристики машины (габариты деталей, масса, методы сопряжения деталей, смазывание и т.д.) могут варьироваться в зависимости от получаемого максимального коэффициента полезного действия, наибольшей экономической выгоды и т.д. [39].

Осуществляется испытание экспериментальных образцов_машины по предварительно разработанной стендовой программе испытаний, моделирующей условия эксплуатации, производя при этом мониторинг

показателей качества, посредством установленной специально с этой целью аппаратуры. По результатам испытаний выявляют конструктивные предложения по внесению правок в техническую документацию, с целью достижения оптимального формата разрабатываемой машины.

Выбор оптимального варианта на каждой стадии конструирования осуществляется с помощью специализированных компьютерных программ: системы автоматизированного проектирования (САПР) таких как Компас, CATIA, NX, SolidWorks и др. Применение подобных систем проектирования повышает технический уровень и качество производимых изделий, позволяет сократить время разработки и освоения в производстве.

САПР представляет собой систему сложного комплекса математических методов и средств вычисления, позволяющую перейти от отдельных расчётов к комплексному принятию проектных решений. Важным аспектом эффективности подобного рода системных приложений является возможность корректировки показателей на любом из этапов конструирования, при этом все расчёты выполняются программой автоматически.

В ходе реализации проекта проявляются особенности работы с различными материалами, которые вносят свою корректировку и могут вызывать значительные затруднения. Невозможно объять необъятное и заявлять разом обо всех материалах разом, но при производстве изделий из металла стоит руководствоваться следующими особенностями:

— разные металлы имеют свои уникальные свойства. Изделия из чёрных металлов и нержавеющей стали не будут себя проявлять одинаково в одних и тех же условиях. Также важно учитывать марку стали, которая применяется. Необходимо учитывать, что пищевая нержавеющая сталь, техническая нержавеющая сталь и пружинная будут иметь различные характеристики и демонстрировать разные механические характеристики. Это указывает на важность изучения свойств и характеристик применяемых материалов, поскольку использование подходящего материала позволит сэкономить деньги и время;

— тщательно продумать способ изготовления. Например, применение сварки там, где можно изогнуть конструкцию, полировку, в тех случаях, когда резоннее шлифовать. Ошибочно выбранный способ соединения или механической обработки влекут за собой серьёзные убытки. Внимание к изучению способов обработки заблаговременно до формирования чертежей позволяет добиваться качества без ущерба бюджету;

— учёт особенностей оборудования. К примеру, при применении изгибающих методов, нужно помнить, что часть габаритов детали теряется на радиус сгиба, это указывает на необходимость корректирования развёртки; при резке лазером требуются отступы между деталями на листе, в противном случае, их может повести и деталь забракуется; покраска не скрывает механические несовершенства, а наоборот, проявляет их, в связи с этим, необходимо предварительно подвергать деталь механической обработке. Подобных нюансов множество, поэтому требуется заблаговременная консультация со специалистом;

— перед передачей в производство отдельных деталей, требуется проверить сборочный чертёж, если этого не сделать, то может возникнуть несобираемость по причине малых допусков, это приведёт к тому, что потребуется перевыпуск, а значит, убытки.

Конструкторские недоработки выявляются металлографической экспертизой на стадии изучения нормативной документации, при наличии повторяемости, а также при изучении чертежа. Недоработка может выражаться неправильно проработанной конструкцией или неподходящим материалом, возможны некоторые неточности в вычислительных расчётах, неправильные размеры припусков и допусков.

Примером разрушения по причине конструкторской недоработки может служить поломка поводка подвески двигателя локомотива и предохранительных кронштейнов рамы и ТЭД (рисунок 23) приведших к

сходу шести колесных пар электровоза и 21 вагона с головы состава поезда.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 23 – Внешний вид поступивших на исследование фрагментов: нижней (а) и верхней (б) частей поводка маятниковой опоры ТЭД; левого (в) и правого (г) предохранительных кронштейнов тележки; левого (д) и правого (е) предохранительных кронштейнов (уха) ТЭД

— Разрушение трубы поводка подвески ТЭД произошло в районе концентратора напряжений в виде сварной заклепки, которая представлена на рисунке 26: 1 – сварная заклепка; 2 – цвета побежалости от сварки; 3 – место зарождения первичной трещины. Из-за ненадлежащего качества металла трубы, изготовленной с нарушениями технологических режимов. Об этом свидетельствуют: высокая разнотекстурность микроструктуры (рисунок 24) с очень низким средним баллом величины зерна (4), а также низкое значение ударной вязкости при минус 40 °С (менее 20 Дж/см²). Однако ГОСТ 8731-87 «Трубы стальные бесшовные горячедеформированные», по которому была изготовлена труба поводка, вообще не оговаривает требования к микроструктуре, а требования к ударной вязкости при минус 40 °С устанавливаются только по желанию потребителя.

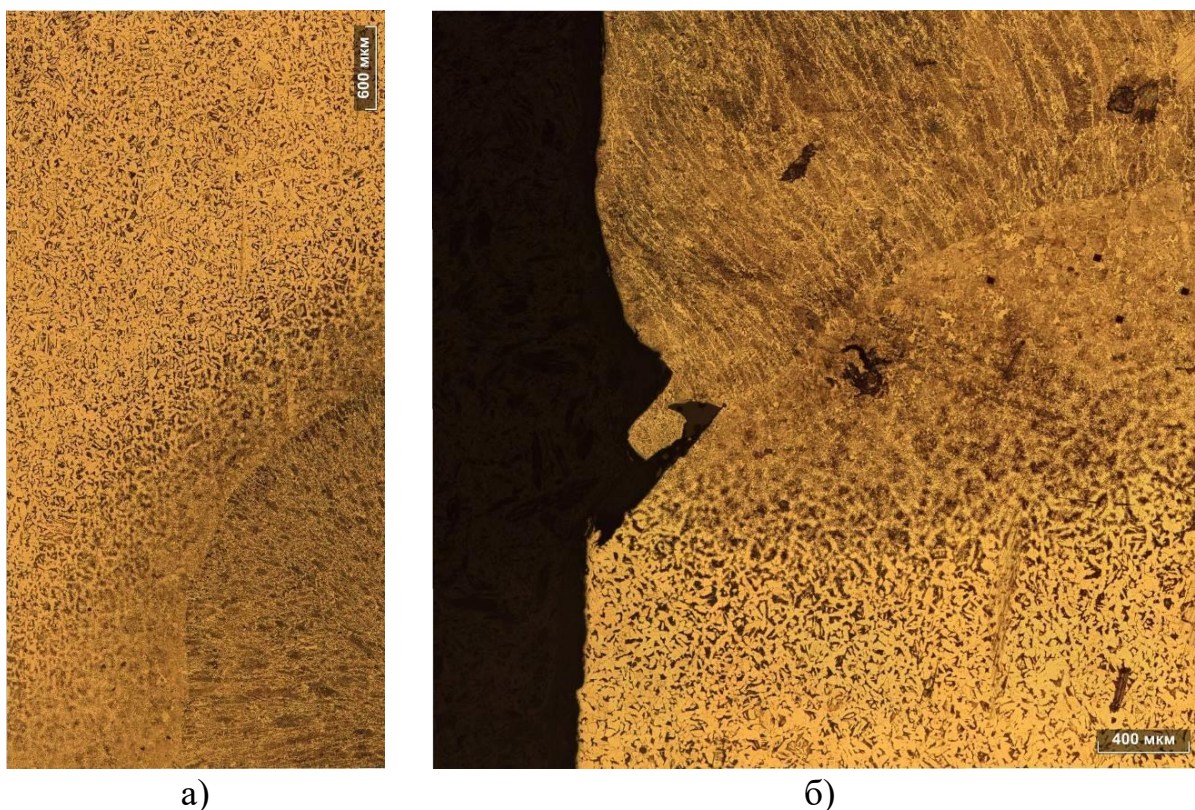


Рисунок 24 – Микроструктура сварного соединения в центральной области (а) и у края внешней поверхности трубы (б)

— Разрушение предохранительных кронштейнов произошло в результате действия повторно-ударных нагрузок, из-за подпрыгивания ТЭД на неровностях пути, ставшего возможным после разрушения трубы поводка.



Рисунок 25 – Схема развития разрушения трубы маятниковой опоры: а – общий вид излома; стрелки салатового цвета – первоначальное движение трещины; белые стрелки – направление развития усталостного разрушения; б – трещина в очаге разрушения; в и г – усталостные дорожки; д и е – окончательный долом сечения

Предохранительные кронштейны, как со стороны двигателя, так и со стороны тележки, не были рассчитаны на ударные нагрузки и при любом качестве металла рано или поздно обязательно бы разрушились.

— Процесс разрушения трубы поводка происходил по усталостному механизму (рисунок 25), а ее окончательный долом, судя по наличию грубой ржавчины, произошел относительно давно. Точно также, грубые следы коррозии на разрушенной поверхности одного из кронштейнов тележки, свидетельствуют о давнем сроке его разрушения, что хорошо согласуется с записями машинистов в Журнале ТУ о посторонних шумах от тележки в области 2-4 ТЭД.



Рисунок 26 – Внешний вид сварного соединения со стороны внутренней поверхности трубы маятниковой опоры

— Для исключения пропадания ТЭД на пути рекомендуется: (1) опорные поверхности предохранительных кронштейнов прорезинить

материалом с необходимыми характеристиками по прочности и истиранию, что позволит многократно снизить коэффициент динамичности (величину динамических напряжений) и (2) установить сигнальные линии, срабатывающие на обрыв трубы поводка.

Ещё одним характерным примером служит поломка корпуса амортизатора задней подвески в сборе. Проведенные металлографические исследования, включающие, внешний осмотр, фрактографию изломов, химический анализ дна резервуара и реконструкции разрушенных резервуаров амортизатора задней подвески в сборе, позволили заключить, что причиной их разрушения явилось нарушение технологии приварки проушины к дну резервуара, а точнее в несоблюдении технологии, обеспечивающей требования сборочного чертежа по перпендикулярности осей отверстия проушины и резервуара амортизатора (рисунок 27).

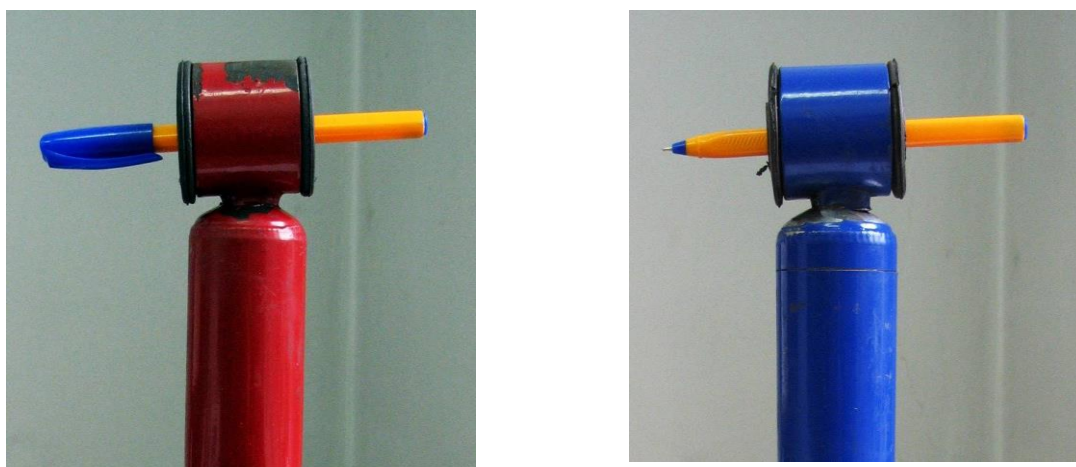


Рисунок 27 – Внешний вид резервуаров амортизатора в сборе после реконструкции

3.2 Ненадлежащее качество материала и нарушения технологии изготовления или сборки

Следующим этапом на пути к готовому изделию является его изготовление. Выпуск деталей и создание сварных конструкций нередко сопровождаются дефектами различного характера, которые могут быть

связаны с нарушением технологического процесса изготовления изделия или иметь иную природу. На качество изделия существенное влияние оказывают:

- химический состав материала (наличие в металле загрязняющих примесей, включений, структурная неоднородность, охрупчивание и т.д.);
- технология проведения плавки и изготовления литых заготовок (присутствие раковин, пористости, шлаковых включений, закаты, несплошности, неспаи и т.д.);
- механическая обработка изделия (трещины, задиры, заусенцы, прижоги, избыточная локальная пластическая деформация и др.);
- качество проведения сварочных работ (возникновение непроваров, сквозных отверстий, зон термического влияния и т.д.);
- правильность выбора режимов термической обработки (закалочные трещины, обезуглероживание, несоответствие структурных составляющих заявленным в КД, избыточный остаточный аустенит и др.);
- проведение металлообработки поверхности (водородное охрупчивание, потеря механических свойств и т.д.);
- нарушения сборки (нарушение геометрии деталей, задиры, затяжка деталей крепления с недостаточным или избыточным крутящим моментом, нарушение центрирования конструктивных элементов и т.д.).

Существует система контроля, направленная на диагностику отклонений процесса изготовления и сборки детали, которая позволяет выявлять неисправность без разрушения или демонтажа – неразрушающий контроль. Данный вид экспертного анализа направлен на выявление дефектности, которая может выражаться нарушениями сплошности металла, химической или структурной неоднородностью материала, фазовой анизотропией, отклонением габаритных размеров от номинальных значений и многими другими.

По критерию напряженно-деформированного состояния конструкций

несовершенства подразделяют на две крупные подгруппы:

- классические дефекты, имеющие конечный радиус закругления в вершине трещины. Главным параметром уровня концентрации напряжений в таких случаях является теоретический коэффициент концентрации напряжения;
- трещиноподобные дефекты — дефекты с острой вершиной (радиус закругления стремится к нулю). Концентрация напряжений в таком случае характеризуется коэффициентом интенсивности напряжения.

Для того, чтобы учесть данную классификацию, в системе неразрушающего контроля дефекты подразделяются по геометрическим параметрам на плоские и объёмные. Независимо от геометрии дефектов, их также принято подразделять на:

- критические — случаи, когда использование продукции по назначению недопустимо (опасно);
- значительные — когда опасности в использовании продукции нет, однако дефектность изделия оказывает существенные затруднения для использования и сказывается на срок эксплуатации;
- малозначительные — маловлияющие на применение продукции и на её долговечность.

Характер дефекта, в отличие от типа, выражает степень его влияния на продуктивность и безопасность изделия с учётом его назначения, то есть, прогнозирует наличие потенциальной опасности дефекта этого типа. Разумеется, дефекты одного и того же типа и размера могут принадлежать к разным видам, в зависимости от условий эксплуатации и режимов нагружения. Происхождение дефектов:

- производственно-технологические сюда относятся металлургические дефекты, нарушения в термообработке, неправильная механическая обработка, брак при склеивании, сварке, пайке, прокатке, волочении и других процессах изготовления;
- эксплуатационные — образующиеся после некоторого времени

использования изделия по причине усталости материала, коррозии, износа, ввиду неправильной эксплуатации или по причине неграмотного технического обслуживания;

— конструктивные дефекты – следствие ошибок конструктора.

По степени ремонтпригодности, определяемые при обследовании нефтепроводов и иных конструкций, подразделяют исправляемые – ремонт которых экономически целесообразен и возможен и неисправляемые – устранение которых нерентабельно, или невозможно. Наиболее свойственные для стальных нефтепроводов диагностируемые повреждения по причинам образования подразделяются на: технологические – появившиеся в ходе проведения строительно- ремонтных работ и эксплуатационные — возникшие в процессе их использования. Технологические дефекты выступают в роли концентраторов напряжений и могут перерасти в трещины, при длительной эксплуатации, что обуславливается коррозионным воздействием.

Для подбора оптимальных критериев оценки и параметров контроля, применяется классификация несовершенств по различным критериям: по области распространения, количеству, форме, размеру по расположению в изделии, ориентации, направлению и т.д. Размеры дефекта могут варьироваться от миллиметров до очень больших величин. На практике, наиболее распространены дефекты в пределах 0,01 мм – 1 см. Пределы наличия максимально допустимых размеров дефекта в изделии определяются его технической документацией.

Количественный анализ дефектов подразделяет их на одиночные, групповые (множественные) и сплошные дефекты (в металлах выражаются шлаковыми включениями, пористостью и др.).

По форме дефектов выделяют дефекты:

- правильной формы – овальные, близкие к цилиндрической или сферической конфигурации,
- без острых краёв – чечевицеобразной формы,
- с острыми краями – произвольной формы,

– с острыми краями – трещины и надрывы.

Форма дефекта характеризует степень его опасности прочности конструкции. Скруглённые дефекты без острых углов менее опасны, поскольку вокруг них не возникает концентрации напряжения, а, вот, остроконечные дефекты по той же причине наиболее опасны: такие дефекты имеют свойство расти и раскрываться по линии направления механической концентрации напряжения, что в последствии при эксплуатации может привести к разрушению.

По типу расположения дефекта подразделяют на:

- поверхностные дефекты, расположенные на поверхности изделия, к ним относятся вмятины, трещины;
- подповерхностные дефекты – расположенные внутри металла, но очень близко к поверхности контролируемого изделия;
- объёмные – расположенные внутри, в объёме изделия;
- сквозные – как правило, это наличие фосфовидных и нитридных включений.

Сквозные дефекты по форме их поперечного сечения можно подразделить на круглые (свищи и поры), щелевидные (трещины и непровары). По показателю эффективного диаметра для круглых в сечении дефектов подразделяют обыкновенные ($>0,5$ мм), капиллярные ($0,5 - 10^{-4}$ мм) и микрокапиллярные (больше $2 \cdot 10^{-4}$ мм). Характер внутренней поверхности сквозных дефектов позволяет выделить ещё одно подразделение на гладкие и шероховатые. Внутренняя поверхность трещин и непроваров, как правило, шероховатая, особенно в сравнении с внутренней поверхностью шлаковых каналов, которая относительно гладкая.

Выбор метода и параметров контроля зависит от ориентации несовершенства в изделии. Степень опасности дефекта по отношению к работоспособности изделия определяется исходя из комплексного анализа типа, вида, конфигурации и количества. Грамотная классификация дефекта позволяет правильно выбрать программу контрольных мер. Следует признать,

что прописанные в нормативной документации параметры отбраковки по результатам экспертизы неразрушающего контроля не гарантирует, что наличие браковочных дефектов в изделии непременно приведёт к его разрушению. Это обусловлено тем, что используемые технологии контроля, как правило, не позволяют с совершенной уверенностью установить тип дефекта и его параметры (глубина залегания дефекта, уровень кривизны, ориентация), без чего невозможно достичь безоговорочной достоверности расчёта прочностных характеристик. Стандартизация допустимых размеров дефектов, выявленных при неразрушающем контроле целесообразна лишь для определённого объекта (участка) контроля и заданных режимов его эксплуатации, а заключения контроля без определённых допущений не имеет смысла связывать с надёжностью контролируемого объекта. Как правило, браковочные параметры нужно расценивать как способ поддержания технологической дисциплины конкретного предприятия.

Оценку влияния несовершенств на механические и эксплуатационные характеристики проводят методами разрушающего контроля. Такие испытания делают на сварных образцах, вырезанных непосредственно из объекта исследования из специально сваренных контролируемых соединений, изготовленных в соответствии с технологией производства на процесс в определённых условиях. Испытания осуществляются с целью тестирования прочности и надёжности сварного соединения в конструкции, восприятия качества основного и свариваемого материала, проверки правильности применяемой технологии, и оценки компетенции сварщиков. Производится сравнение основного и свариваемого металла. Результаты считаются недостоверными, если они производятся не в соответствии с уровнем существующего регламента. Наибольшую значимость имеет оценка механических характеристик сварного соединения по ГОСТ 6996-66, в котором прописан порядок испытаний сварных соединений и швов металла: испытания сварного шва и различных участков металла по объёму изделия (наплавленного металла, зоны термического влияния и металла в целом), на

статическое растяжение, изгиб, ударные нагрузки, на стойкость к механическому старению металла, твёрдость шва и металла в различных местах.



а)



б)

Рисунок 28 – Внешний вид разрушенной шатунно-поршневой группы

Контрольные образцы для мехиспытаний имеют свой стандартный вид и размер для каждого определённого вида контроля. Так прочность сварных швов определяется испытаниями на статическое растяжение, а ударную

вязкость определяют на надрезанных образцах по испытанию на ударный разрыв. Результаты замера твёрдости позволяют судить о степени упрочнения и структурных составляющих, также об отсутствии или наличии охрупчивания сварного шва после его охлаждения.

Всякий дефект при соответствующих условиях может выявить отказ отдельного элемента или всей конструкции. металлоконструкции содержат множество различных дефектов, появившихся на этапе изготовления, их транспортировке, монтаже, при ремонте и эксплуатации. В связи с тем, что большинство несовершенств имеют макроскопические размеры, они хорошо выявляются современными средствами контроля [39].

Наглядным примером разрушения по причине некачественной сборки изделия является разрушение шатунно-поршневой группы автомобиля (рисунок 28).



Рисунок 29 – Изломы стального шатуна (а); изломы поршня из алюминиевого сплава (б)

Алгоритм разрушения выглядел следующим образом: во время работы двигателя автомашины, один из болтов крепления головки шатуна с подшипниками скольжения был ослаблен. Возможно, это произошло в процессе работы двигателя или болт был недостаточно сильно затянут в процессе ремонта. Возникшие при этом, пока не очень сильные ударно-

циклические нагрузки, привели к расплющиванию вкладышей-подшипников скольжения, что привело к увеличению амплитуды ударно-циклических нагрузок. На этой стадии, амплитуда ударно-циклических нагрузок оказалась достаточной, чтобы в естественном концентраторе напряжения – резьбе болта – образовался очаг зарождения усталостной трещины.

По мере дальнейшей эксплуатации автомобиля, усталостная трещина увеличивалась, уменьшая сечение болта и увеличивая амплитуду ударно-циклических нагрузок. Наконец, уменьшенное сечение болта не выдержало уже значительных ударно-циклических нагрузок и произошло полное разрушение (долом) болта.

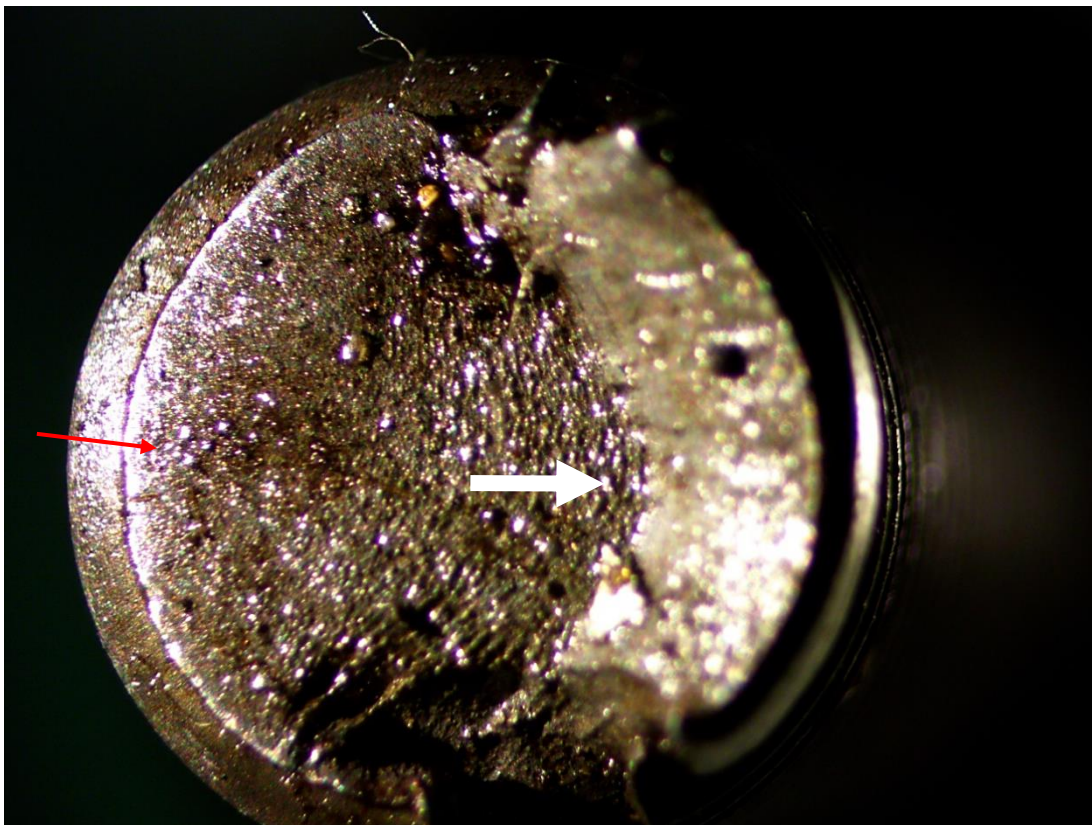


Рисунок 30 - Усталостный излом недеформированного болта (металлографический стереоскопический микроскоп).

В этих условиях нагрузка на второй, пока еще не разрушенный, болт резко возросла; резко возросли и ударно-циклические нагрузки. Об этом свидетельствует, в частности, значительное повреждение поверхности шейки

каленвала. Из-за нарушения центровки поршень, возможно, заклинил. Т.к. двигатель продолжал работать, разрушились шатун (рисунок 29 а) и поршень (рисунок 29 б). Оставшийся болт не мог выдержать сильную изгибающую нагрузку, из-за чего от изогнулся и тоже разрушился. Внешний вид разрушенного болта представлен на рисунке 30, где красной стрелкой отмечен предполагаемый очаг зарождения усталостной трещины; белой – длину зоны усталостного развития трещины

3.3 Разрушения в процессе эксплуатации

В процессе эксплуатации технических изделий, рано или поздно происходят поломки различных узлов из-за разрушения их отдельных деталей. Реальный срок службы изделия зачастую оказывается гораздо меньше запанированного, что вызвано различными неисправностями, возникающими в процессе эксплуатации (рисунок 31). Разумеется, поломка оборудования раньше гарантийного срока службы сопровождается весомыми убыткам, как для потребителя, так и для производителя.

Практика показывает, что некоторые из причин досрочного разрушения деталей связаны с низким металлургическим качеством материала объекта. Таким образом, обеспечение и контроль качества деталей является определяющей задачей в промышленности.

Нарастающий со временем износ, выраженный механическим истиранием, пластической деформацией и процессами окисления, неизбежно приводит к неисправности изделия. Поступательные движения сопровождаются трением в местах соприкосновений, в результате чего происходит износ. При движении одного тела по поверхности другого, оба тела испытывают на себе физическое воздействие, которое бывает двух видов: трение скольжения и трение качения (ГОСТ 23.002.78). По наличию смазочного материала можно обозначить трение без смазочного материала и трение со смазочным материалом.

Износ детали в присутствии смазочного материала будет минимальным либо будет отсутствовать вовсе. В процессе трения со смазкой сила сопротивления смазочного слоя создаётся за счёт его клиновидного действия, занимающего зазор подвижного сопряжения. Чем более вязкая смазка и чем выше скорость трения одного элемента относительно другого, тем более сильно проявляется клиновой эффект смазки.

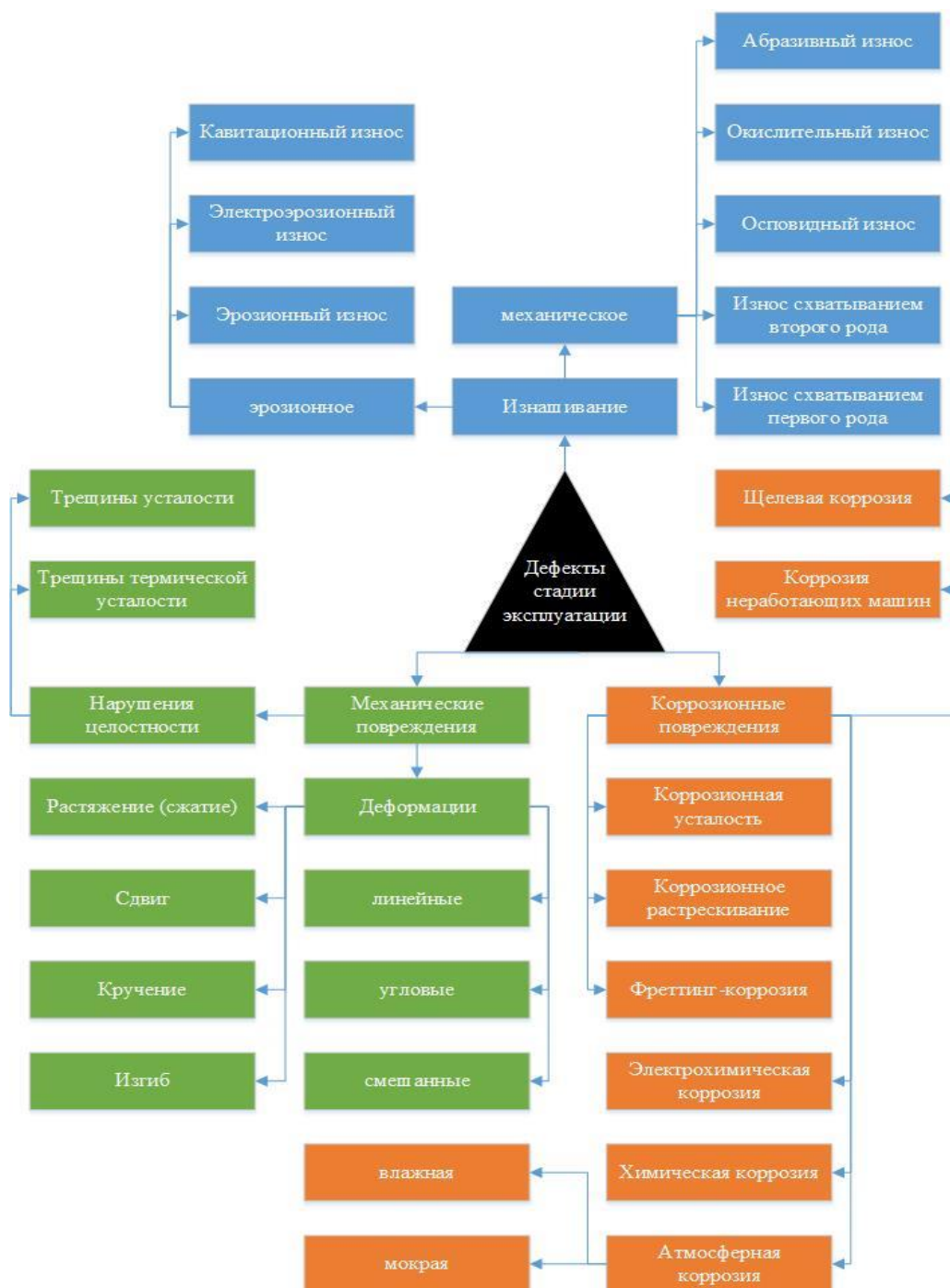


Рисунок 31 - Основные дефекты стадии эксплуатации [40].

Существуют машины, в которых осуществить трение со смазкой не получается. К тому же, любой подшипник при пуске и при снижении скорости оборотов до 3-4 минут работает при неполном смазывании.

Режим трения без смазки детально изучен И. В. Крагельским. По его теории трению присуща двойственная молекулярно- механическая теория. При контакте неровностей природа разрушения металла в точках касания зависит от глубины проникновения и геометрии вдавливаемых элементов, а также от адгезии и механических показателей. Параметры и интенсивность износа сильно зависят от приложенного силового воздействия (давление, воздействие нагрузок, скорость трения вибрации, температура и др.), физико-механических свойств трущихся поверхностей (структура материалов, пластические свойства, адгезия, параметры механической обработки элементов и др.), характеристик среды (чистота смазочного материала, обволакивающая способность и т.д.), специфика изготовления элементов, условий эксплуатации и прочего.

Среди основных видов неисправностей изнашивания деталей (рисунок 31) можно выделить следующие:

- изломы и деформированные состояния;
- механический износ;
- износ при заклинивании;
- коррозионно- механический износ.

Механический износ является результатом механического воздействия. Наиболее часто встречающиеся виды механического износа - это: абразивный износ, (гидроабразивный, газоабразивный), усталостный, эрозионный и кавитационный.

Абразивный износ – разрушение материала режущим или царапающим действием твёрдых частиц, присутствующих на поверхности изделия в свободном или закреплённом состоянии. Чаще всего, в качестве абразивных частиц выступают загрязняющие частицы (пыль, песок), которые попадают в зону трения из окружающей среды. Также возможно образование абразивных

элементов при самом истирании, например, выкрашивающиеся частички металла с поверхности изделия и др. В процессе данного вида износа абразивные частицы значительно измельчаются и попадают в смазку, если она, в свою очередь, имеет невысокие характеристики поверхностной активности, то трение сильно возрастает. Повреждения поверхности в совокупности с абразивным износом нарушают масляную плёнку, нарушая работу подвижного узла.

Гидроабразивный (газоабразивный) износ - разрушение материала режущим или царапающим действием твёрдых частиц, находящихся во взвеси жидкости или газа и перемещающихся их потоком. В качестве примера рассмотрим плунжер топливного насоса, где вместе с потоком автомобильного масла могут присутствовать следы посторонних примесей, которые выступая в качестве абразивов приведут к износу поверхности. Пример газоабразивного износа - износ фаски тарелки всасывающего клапана.

Усталостный износ – механический износ по причине наличия усталостного разрушения при многократной деформации микробъёмов металла поверхности изделия. Один из представителей усталостного изнашивания – так называемый питтинг (ямка) - выкрашивание, которое наиболее часто отмечается в деталях трения-качения или скольжения (подшипники, зубчатые колёса), но может наблюдаться и в деталях с другим подвижным соединением. Питтинги образуются по причине пульсационного контакта поверхностей сопряжения в сочетании с высокой нагрузкой.

Перекосы в соединениях сопрягаемых элементов на этапе сборки, несоблюдение конструктивно заданных зазоров, забитые полости и масляные каналы в процессе эксплуатации, несвоевременное смазывание, применение смазочных материалов с характеристиками, не соответствующими конструктивным требованиям приводят к разрушению подвижных соединений.

Избыточные напряжения, возникающие в результате температурного воздействия и при изменении коэффициента внутренних напряжений,

превышающие предел текучести или предел прочности материала, приводят к возникновению деформации, трещин (рисунок 32) и изломов.

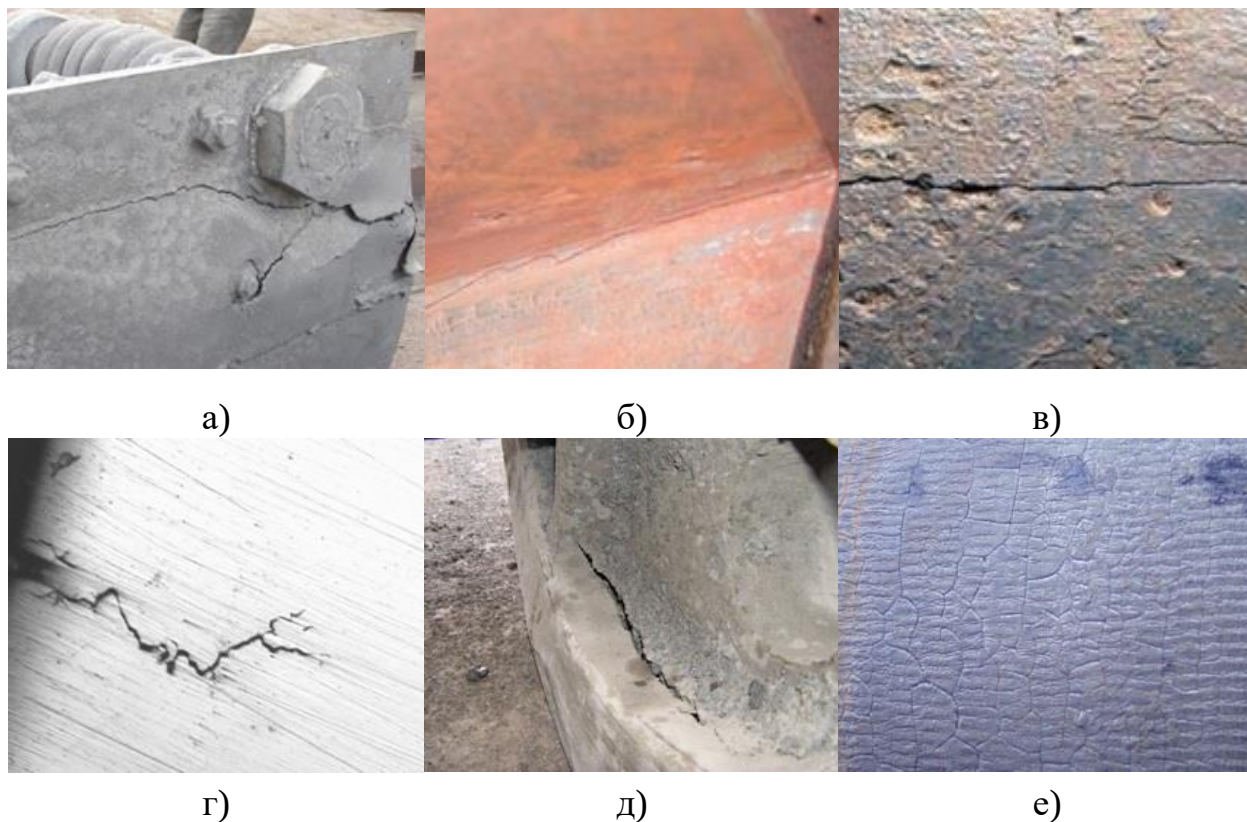


Рисунок 32 – Примеры трещин: а) трещина на лотке загрузочного устройства; б) трещина на соединительной муфте; в) продольная трещина по телу трубы; г) трещина на поверхности, $\times 100$; д) трещина на ходовом колесе; е) трещины разгара[40].

Накопление остаточной деформации вызывает изменение геометрии изделия или даже аварийный излом, и, как следствие, полную потерю работоспособности объекта. Остаточная деформация может сопровождаться таким негативным фактором, как коробление (к примеру, деталей автомобиля, находящихся вплотную друг к другу – это элементы двигателя: головки цилиндров, блок, картеры распределительные шестерни, или детали трансмиссии и др.). Коробление, в свою очередь, приводит к целому ряду последствий: возникновение тонкостей стенок изделий, расплющивание прокладок, протечка масел, и даже нарушение соосности валов, подшипников и шестерен, что влечёт за собой увеличение износа. Излом – это разновидность

аварийного повреждения.

Опыт эксплуатации машин показывает, что порядка 80% неисправностей происходит из-за усталостных изломов. Усталость возникает в следствии длительного разрушения металла при знакопеременных динамических нагрузках на пределе предела текучести материала.

Первопричиной усталостного разрушения являются касательные напряжения, поскольку разрушение начинается с зарождения усталостной трещины, которая возникает в наиболее уязвимом месте и совпадает с направлением векторов силы касательных напряжений. Наиболее часто зарождение трещины происходит на поверхности с дальнейшим ростом в глубь детали. Очаг трещины – место, где имеется наличие концентратора напряжений, чаще всего – неметаллического включения.

Контактная выносливость определяется рубежом усталостного выкрашивания, выраженного значением давления при контакте при указанном числе циклов, до начала питтингования. Избежать данный вид разрушения можно снизив удельные нагрузки в контакте и увеличив прочность материала.

Эрозия – механический износ при воздействии потока жидкости и газа, а кавитационное – гидроэрозионное, износ при перемещении изделия в потоке жидкости. Пузыри воздуха схлопываются на поверхности, что точечно повышает давление и температуру. Непрерывный контакт с потоком жидкости или газа приводит к интенсивному процессу разрушения. Металл от эрозии защищают пассивирующие плёнки, но при постоянном воздействии потока, происходит разрушение данных окисных плёнок и поверхность подвергается разрушению, причём, этому активно способствует наличие в жидкости минеральных частиц. Продуктивным методом увеличением надёжности долговечности материала в эрозионных условиях является повышение износостойкости и коррозионной стойкости.

Кавитационный износ образуется в определённых условиях потока жидкости с поверхностями изделия. Повреждение выражается полостями, диаметром 0,2 до 1,5 мм, окружёнными наплывами. Кавитация возникает на

тех участках, где неоднородный поток жидкости, обогащённый кислородом или иными газами, в условиях такого воздействия возникают пустоты, наполненные газом, которые принято называть кавитационными пузырями. Располагаясь в непосредственной близости к поверхности, лопаясь, такие пузыри вызывают крошечный гидроудар в пределах диаметра одного пузырька, но при значительном количестве пузырей происходит мощное воздействие и зарождаются очаги разрушения. Максимальное значение напряжения, возникающее на микроучастках поверхности, претерпевающих такую "бомбёжку" превышает предел текучести металла, что подтверждает наличие наклёпа (наплывов металла) на участках кавитационного износа. Коррозионное воздействие при этом несёт лишь вспомогательное воздействие, снижая сопротивляемость материала циклическим воздействиям. Кавитационная стойкость напрямую зависит от твёрдости материала, для металлов с высокой твёрдостью кавитационное воздействие происходит гораздо менее интенсивно.

Износ при заклинивании – изнашивание по причине схватывания, глубокого вырыва металла, его перемещения с одной поверхности на другую и действия появившихся дефектов на сопряжённую поверхность. Заедание возникает в результате процесса трения сопрягаемых поверхностей и сопровождается прекращением относительного перемещения. Данный вид дефекта появляется в местах контакта поверхностей при действии усилий, напряжения которых превышают фактический предел текучести металла и провоцируют нагрев. Это вызывает пластическую деформацию в тонких слоях металла, а область границы слоёв, представляющая собой адсорбционную смесь плёнки газов, воды и смазки, разрушается, открывая отдельные ювенильные области металла. Когда эти ювенильные площадки сближаются на расстояние примерно равное одному ангстрему, происходит межатомное притяжение и на площади фактического контакта поверхностей возникают химические связи металлических решеток, поверхности схватываются и возникает заедание. Число контактирующих пятен, а значит и реальный

размер соприкосновения зависят от шероховатости поверхностей и приложенной на деталь нагрузки.

Налипший металл под действием различного вида напряжений чаще всего, также разрушается, однако не всегда, при некоторых условиях трения, может возникнуть ситуация, что данные частицы, наоборот, будут деформироваться в следствии больших удельных нагрузок и упрочняться. В процессе относительного движения поверхностей, упрочнённые налипшие частички металла, словно резец, будут снимать металлическую стружку с поверхности сопряжения, либо будут вдавливаться и деформировать её в местах контакта. На ряду с этим, в других областях сопряженных деталей будут образовываться новые места схватывания, которые в дальнейшем будут вести себя точно так же. При определённых условиях подобный процесс может происходить непрерывно. В результате осуществляется непрерывное деформирование, износ и разрушение трущихся поверхностей.

Заедание трущихся поверхностей приводит к целому ряду негативных последствий: изменяются все физико- механические свойства детали, изменяется структура и однородность материала, происходит зарождение микротрещин, что существенно снижает прочность металла. Стабильное наличие смазочного материала в области трения, увеличение показателя твёрдости посредством термомеханического или химико-термического упрочнения сопрягаемых поверхностей, выбор пар металла, не имеющих склонности к схватыванию друг с другом способны сократить износ в результате заедания.

Коррозионо-механическое изнашивание - разрушение материалов, которое происходит из- за механического воздействия и сопровождается электро-химической реакцией материала со средой. Дефект данного вида является следствием механических факторов (трения, деформаций, напряжений и др.) и коррозии. Выделяют две разновидности износа данного тип: окислительный износ и фреттинг-коррозия.

Окислительный износ – это такая разновидность коррозионно-

механического изнашивания, при котором основное разрушающее воздействие оказывает химическая реакция материала с кислородом. К примеру, средняя величина износа цилиндров двигателя при стандартных условиях эксплуатации равна 5-7 мкм на 1000 км пробега автомобиля.

Фреттинг-коррозия - механический износ соприкасающихся поверхностей в присутствии незначительных колебаний при перемещении одной поверхности относительно другой. Данный подвид коррозионно-механического изнашивания происходит при колебаниях контактирующих поверхностей с малой амплитудой в присутствии кислорода и приводит к наволакиванию металла и значительным износам поверхностей трения.

Дефекты фреттинг-коррозии легко идентифицировать на деталях, поскольку их внешний вид похож на язвы, которые возникают на обеих парных деталях, сопровождаясь взаимным переносом металла и имея плёнку окислов вблизи повреждённых зон.

Хотелось бы отметить, что среди экспертов научного сообщества нет единого мнения по поводу механизма развития фреттинг-коррозии. Не так давно, исследованием процесса возникновения фреттинг-коррозии и выявлениями факторов влияющих на процессы интенсивного протекания фреттинг-коррозии занимался А. Я. Алябьев. В ходе проведённых им исследований удалось выявить, что на участках повреждения фреттинг-коррозией протекает целый комплекс разрушений: схватывание, абразивное разрушение, усталостно-окислительные процессы и в зависимости от механических факторов и факторов окружающей среды, какой-либо один из них может стать преобладающим. В таком случае, именно они и будут влиять на долговечность пары трения. Обычная смазка неспособна предотвратить появление фреттинг-коррозию. Взяв это во внимание, для повышения долговечности ответственных деталей, контактирующие поверхности дополнительно упрочняют, фосфатируют с последующей смазкой парафином или покрывают защитными белилами с дисульфидом молибдена.

Вышеизложенный текст позволяет сделать вывод, что в основе всех

разрушений, возникших в процессе эксплуатации заложены фундаментальные процессы пластической деформации, упрочнения, диффузии, образования соединений, термического влияния, а также изменения свойств металла при воздействии внешних и внутренних сил.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 33 – Фрагменты оси. Вид спереди: правая часть оси – а; левая часть оси – б. Вид сбоку: правая часть оси – в; левая часть оси – г

С целью снижения числа разрушений при эксплуатации, а также предупреждения несвоевременного возникновения неисправностей и дефектов требуется улучшение условий эксплуатации, модернизация конструкции и технологии производства, осуществление своевременного и компетентного ремонта, с использованием при этом прогрессивных технологий [40].

Ещё один пример разрушения по причине неправильной эксплуатации – это разрушение оси колесной пары электровоза (рисунок 33) и оценки соответствия свойства металла оси и моторно-осевых подшипников нормативным требованиям.

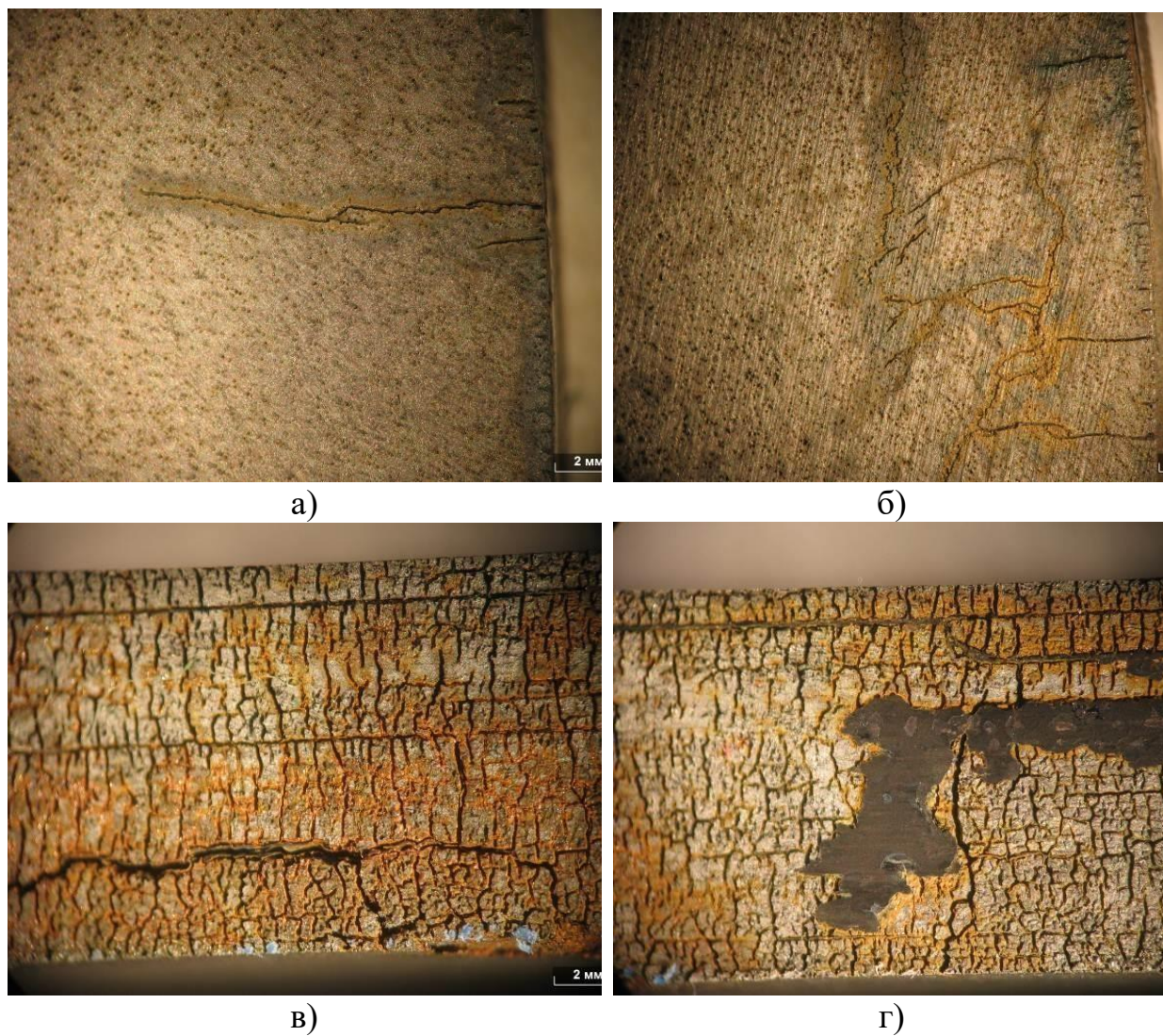


Рисунок 34 – Трещины, отходящие от поверхности ось вглубь (а и б); продольные (в) и поперечные (г) трещины на торцевой поверхности образца (внешней поверхности оси)

– Все исследуемые свойства материала оси колесной пары оси (химический состав, механические характеристики, параметры микро-макроструктуры), соответствуют требованиям ГОСТ 4728-2010.

– Исследование качества металла поверхностного слоя после технологии механической обработки оси показало более низкое повышение твердости упрочненной области по сравнению с сердцевиной, чем того требует Технологическая инструкция. Наиболее вероятно, это связано с разупрочнением поверхности в результате ее сильного разогрева.

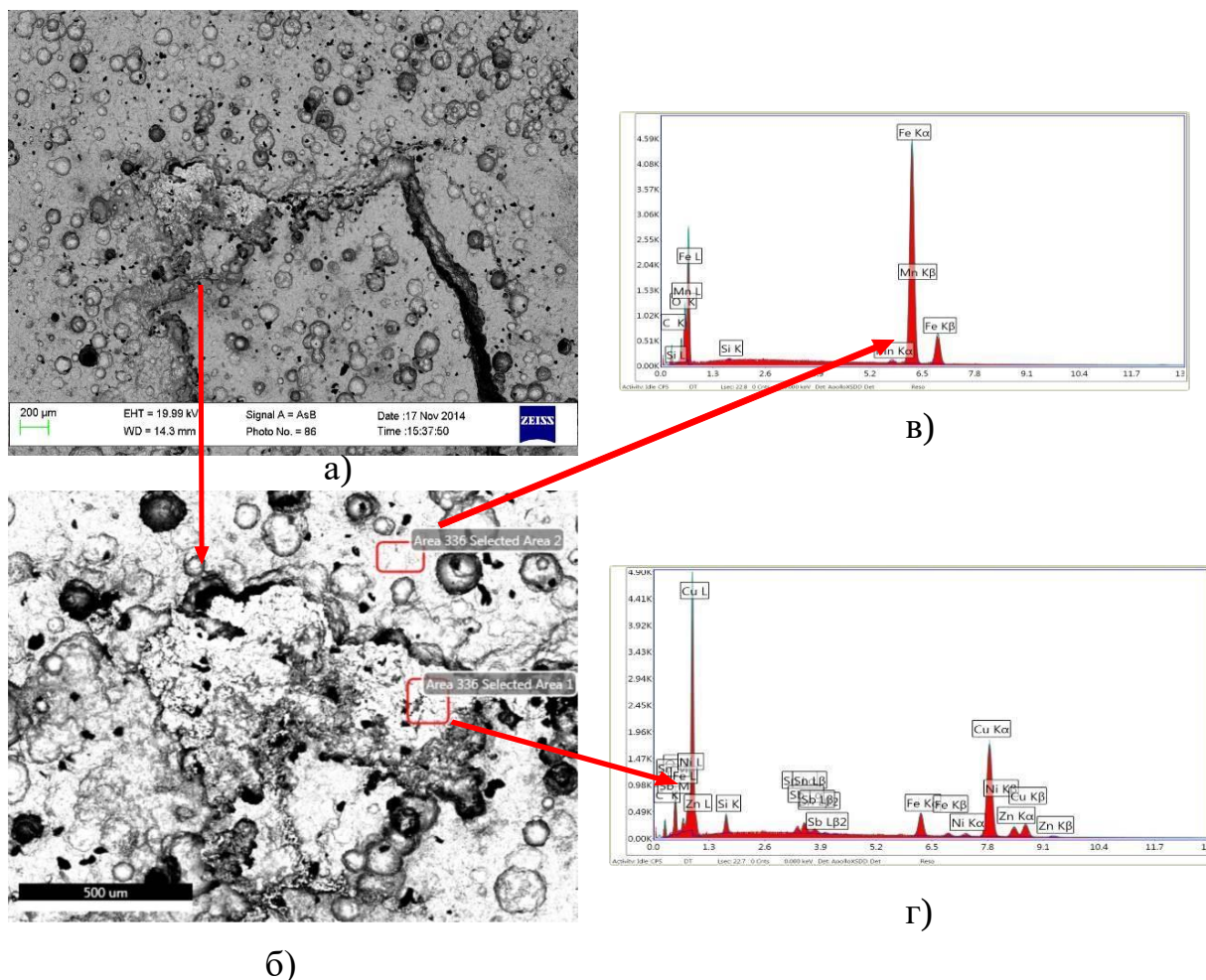


Рисунок 35 – Микроструктура трещины, расположенной на расстоянии ~ 3 мм от поверхности (а); б – вид расплава на кончике трещины; рентгеновские спектры, соответственно, вне (в) и в зоне расплава (г) (детектирование обратно рассеянных электронов с помощью детектора AsB)

– Причиной разрушения оси является развития трещин (рисунок 34) одновременно в нескольких сечениях перпендикулярных продольной оси в результате жидкометаллического охрупчивания металла под

действием легкоплавких элементов, содержащихся в баббите и латунном вкладыше. Подтверждением обоснования данной причины является наличие баббита, латуни и их компонентов, зафиксированное детектированием обратно рассеянных электронов с помощью детектора AsB, а также по рентгеновским спектром электронного микроскопа Zeiss Sigma (рисунок 35).

– Расплавление латунных вкладышей моторно-осевых подшипников предшествовало полному разрушению оси и произошло в результате смазочного голодания, причина которого не известна.

Выводы по разделу

Данный раздел рассматривает три основных направления причин разрушений, которыми являются:

- Ошибки при проектировании изделия (конструкторские недоработки, неправильно выбранный материал или его заложенные характеристики);
- Нарушения технологии производства детали или сборки конструкции (применение некачественного материала, нарушения технологии: термической обработки, нанесения покрытий, механической обработки и др., нарушения технологии сборки: и др.);
- Неправильные условия эксплуатации деталей (завышенные температурно-силовые режимы, неправильное функционирование системы смазки, коррозионно-активная среда, несвоевременное обслуживание и др.).

4. Разработка универсального алгоритма проведения металлографической экспертизы

4.1 Формирование этапов экспертного анализа

Первое, с чего стоит начать — это визуальный осмотр. Связано это с тем, что он позволяет выявить грубые дефекты и причины, которые лежат на поверхности, а значит, необходимость детально следовать всем этапам пропадает, поскольку возникнет понимание, что надо работать в определённом направлении. По некоторым данным, более чем в 50% случаев причина разрушения определяется уже на стадии осмотра, однако эти случаи редко попадают в НИИПТ, потому что инженера определяют её на месте аварии без всяких экспертиз, и не требуется привлечения высококвалифицированных специалистов лаборатории. В НИИПТ попадают действительно сложные, запутанные случаи, разобраться в которых – нелёгкая задача.

Бывали случаи, когда у заказчика не было объекта для экспертизы, а имелась лишь какая-либо документация, протоколы описания, но работать с такими случаями не рекомендуется, поскольку нет явных подтверждений достоверности данных бумаг.

Если же при первичном осмотре не обнаружено явной причины, тогда начинаются уже «искания»

Второе — это работа с документацией, проверка статистики подобных разрушений. Действительно, если есть статистика неприятностей с этим объектом, согласно которой разрушение такого рода происходит не в первый раз, тогда весьма вероятно наличие некоторой систематической проблемы. Например, это могут быть конструкторские ошибки, о которых говорилось в первом разделе.

Изучение всей доступной информации, в том числе, если речь идёт о серьёзной судебной экспертизе, необходимо проработать акт первичного расследования, раскрывающего при каких обстоятельствах произошло

разрушение. В некоторых случаях, это может внести ясность. Здесь будет уместно для понимания привести из опыта НИИПТ пример экспертизы, где причина разрушения была определена уже на стадии изучения нормативной документации.

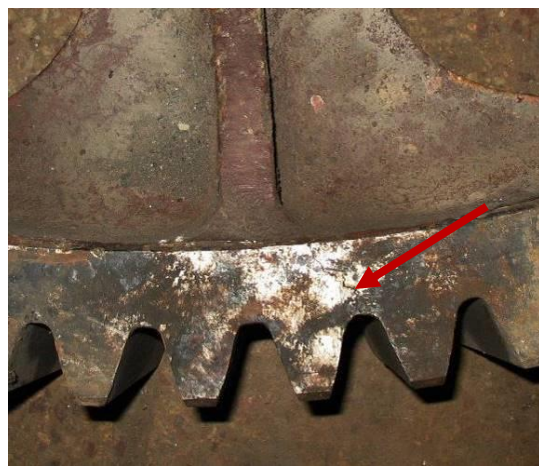
У локомотивов есть колёсные пары, на каждое колесо запрессовывают бандаж: сначала бандаж нагревают, он расходится и в процессе охлаждения происходит запрессовка. Что очень важно, этот натяг должен быть абсолютно определённым. Существуют паспорта на колёсные пары, которые прописывают, какой диаметр должен быть у колеса и какой у бандажа. На исследование в лабораторию поступал образец, где уже после визуального осмотра и изучения НД обнаружилось, что диаметры бандажа и колеса явно несовместимы. Это говорит о том, что при эксплуатации такого изделия, в нём возникнут избыточные напряжения, ведь если натянуть больше, то и напряжения будут больше по величине. Это и привело к разрушению. В случаях, когда бандаж установлен с перенатягом, в его поперечном сечении возникает повышенные напряжения и, если происходит разрушение бандажа, то он раскрывается, на величину пропорциональную напряжению натяга.

Этот пример является ярким доказательством того, что иногда путем простого изучения паспорта, можно добиться понимания причины аварии, в данном случае, наличия перенатяга, которое на предприятии должны были обнаружить, и не должны были допустить в эксплуатацию такую колёсную пару.

На третьем этапе необходимо оценить качество металла. Этап в совокупности включает в себя целый комплекс анализов: механические испытания, спектрально-химический анализ, макро- и микроскопический анализы выявления внешних и внутренних дефектов. Ярким примером дефекта по причине низкого качества материала является образование трещины во впадине зуба Колеса зубчатого (рисунок 36). Комплекс исследований и испытаний позволил сделать следующие основные выводы.



а)



б)

Рисунок 36 – Колесо зубчатое: а) – общий вид в состоянии поставки (место трещины на венце отмечено красной стрелкой); б) – трещина



а)



б)



в)



г)

Рисунок 37 – Дефекты литья: а) – поверхность разреза венца в продольном направлении зуба; б) и в) и г) – ответные поверхности разреза венца

— Зарождение трещины в области впадины Колеса зубчатого произошло из-за чрезвычайно низкого качества литья: наличия многочисленных макродефектов в виде пор, рыхлот, шлаковых включений (рисунок 37).

— Химический состав материала Колеса зубчатого не соответствует стали марки 35Л по ГОСТ 977-88 согласно требованиям чертежа.

— Твердость рабочей боковой поверхности зуба Колеса зубчатого, составила $53.2 \div 56.3$ HRC, что не соответствует требованиям чертежа п.2: «Зуб ТВЧ: рабочая поверхность HRC_э 34÷51В. Твердость во впадине между зубьев Колеса зубчатого составила $6.5 \div 12.9$ HRC, что не соответствует требованию чертежа п.2: впадина HRC_э ≥ 32».

— Причина появления трещины во впадине зуба Колеса зубчатого связана с ненадлежащим качеством металла, из которого он изготовлен.

— Колесо зубчатое в состоянии, представленном на экспертизу, было непригодно для выполнения своего прямого предназначения.

Четвёртым пунктом необходимо проверить правильность сборки. Если рассмотреть маршрут изделия от производства до разрушения, то это второй этап, первым было изготовление, ввиду этого логично сначала рассматривать качество материала, а затем в обязательном порядке анализировать сборку.

Примером разрушения по вине нарушения при сборке является расследование по определению причины разрушения Кронштейна промежуточного правой опоры подвески двигателя, на основании анализа всех проведенных испытаний и исследований которого можно сделать следующие выводы.

— Разрушение Кронштейна промежуточного правой опоры подвески двигателя произошло в результате развития усталостных трещин, зародившихся на ребрах жесткости в месте перехода от центральной части Кронштейна к внешней (поз. «1» и «2» на рисунке 38).

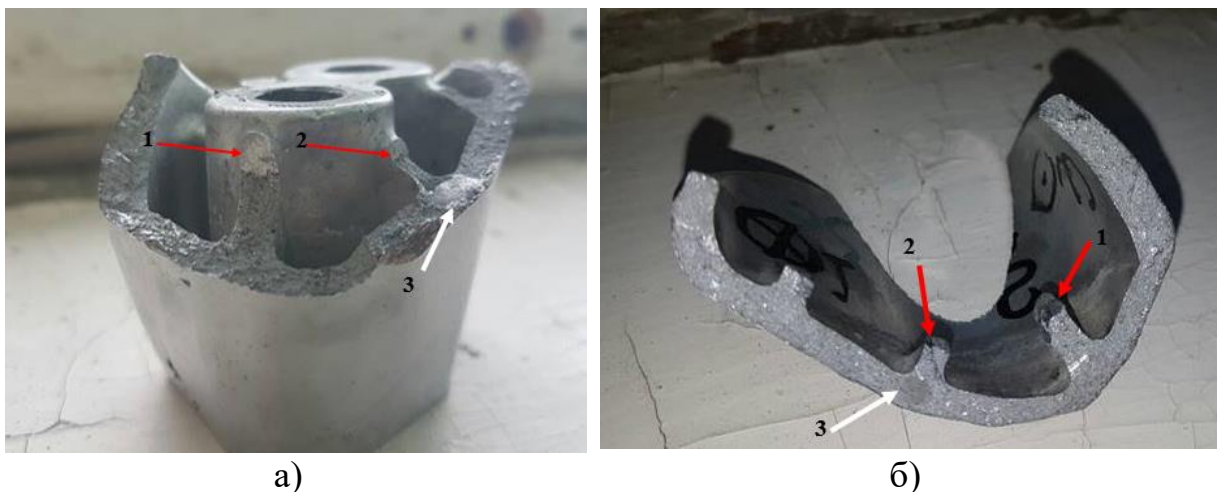


Рисунок 38 – Фрагмент разрушенного кронштейна с локально гладкими местами поверхности разрушения (отмечены стрелками): а) нижней части; б) верхней части

— Дефект литейного происхождения (поз. «3» на рисунке 38) не мог послужить непосредственной причиной разрушения Кронштейна.

— Зарождение усталостных трещин стало возможным из-за дополнительных изгибных напряжений, связанных с установкой Кронштейна на двигатель с перекосом, на фоне пониженной твердости металла Кронштейна.

Следующим этапом идёт эксплуатация. Например, когда во время эксплуатации в какой-то момент было трение в отсутствии смазки, но нарушение было вовремя замечено и исправлено: смазали и, казалось бы, всё работает нормально, однако даже такое кратковременное негативное воздействие может отрицательно сказаться через несколько лет и тогда понять первопричину будет уже крайне затруднительно.

Например, одним из основных элементов железнодорожной инфраструктуры являются вагоны. Зачастую, несмотря на жесткий контроль, вагоны перегружают и, конечно, ни в каких записях этого найти и задним числом это проверить никак не возможно.

Можно привести ещё и такой пример по исследованию причины разрушения предоставленных фрагментов билодержателя мельницы.

На основании проведенных металлографических исследований и изучения фото-материалов вышедших из строя билодержателей (рисунок 39), можно заключить, что причиной их разрушение является эксплуатация молотковой мельницы в режиме, отличном от штатного



а)



б)

Рисунок 39 – Фото вышедших из строя билодержателей

4.2 Схема универсального подхода к экспертизе общего характера

Результирующим этапом разработки универсального подхода к металлографической экспертизе общего характера должна стать схема. Схематичное представление является наиболее наглядным и емким из всех вариантов представления информации. Классификация схем по ГОСТ 2.701-84, позволила обозначить, предполагаемую схему как структурно-логическую. То, насколько эффективно будет восприниматься информация, заключённая в схеме зависит от взаиморасположения структурных частей, для лучшего восприятия, схема должна быть наглядна. Другими словами, чем меньше количество структурных элементов, тем лучше прослеживается их взаимосвязь.

Большое значение для восприятия имеет цветовая окраска: для выделения определённых этапов, а также для большей наглядности принадлежности одних элементов к другим резонно будет выделять блоки цветом. Гамма может быть выбрана произвольно, однако, не стоит использовать сильно яркие цвета, от них будет уставать глаз, а также тёмную палитру, иначе схема будет нечитаемая, поскольку цвет перекроет содержание текста. Палитра цветов должна быть разнообразна, не стоит выбирать оттенки одного цвета, это приведёт к утере наглядности, так как цвета будут сливаться.

Взяв во внимание всё вышеизложенное, была составлена схема универсального подхода к металлографической экспертизе общего характера (рисунок 40). Алгоритм действий схемы состоит из 5 основных этапов экспертного анализа – они выделены песочным цветом и располагаются централизованно. К ним относятся: внешний осмотр, информация об обстоятельствах отказа, исследование качества материала, оценка качества сборки и анализ соблюдения требований эксплуатации. Данные этапы подробно описаны и проиллюстрированы примерами в предыдущем пункте.

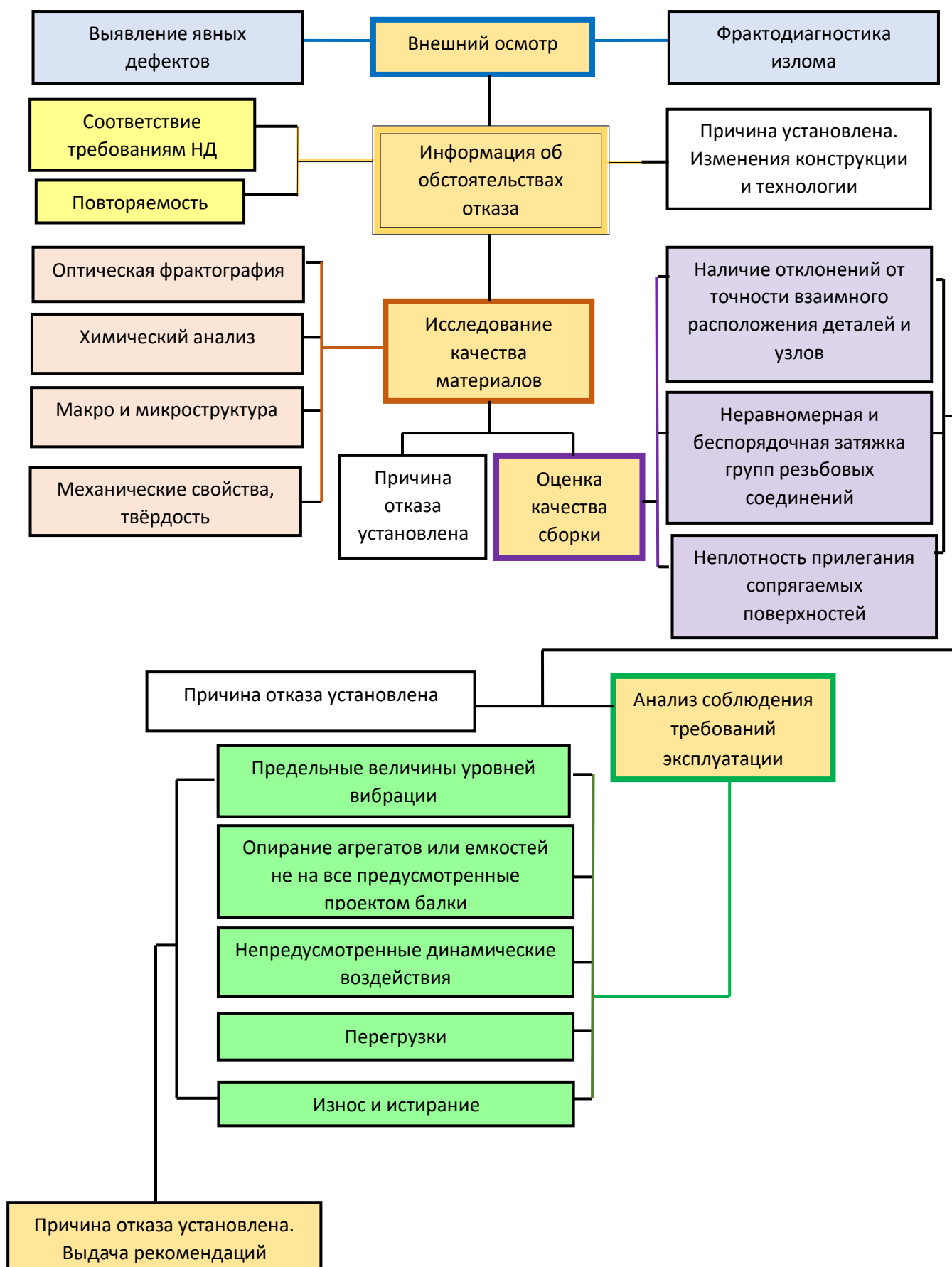


Рисунок 40 – Схема универсального подхода к экспертизе общего характера

Каждый из центральных этапов схемы имеет свой индивидуальный цвет контура и множественные ответвления сходного с контуром цвета, содержащие основные операции данного этапа. Рассмотрим каждый из этапов подробнее.

Этап внешнего осмотра включает в себя два основных процесса: выявление явных дефектов и фрактодиагностику излома.

Этап сбора информации об обстоятельствах отказа предполагает анализ соответствия детали требованиям, прописанным в НД и оценку повторяемости неисправности, в случае массовой повторяемости причина будет установлена, и, вероятнее всего, она будет в конструкторской недоработке, а значит, потребуется изменение конструкции или технологии. Стоит отметить, что блоки схемы, содержащие исчерпывающий ответ о причинах неисправности цветом не выделены.

Этап исследования качества материала (блок песчаного цвета с тёмно-оранжевым контуром) подразумевает целый комплекс операций (множественные ответвления влево бледно-розового оттенка), представляющих непосредственно материаловедческий экспертный анализ: оптическая фрактография, химический анализ, макро и микроскопическая оценка металла, механические испытания. Результатирующим действием данного этапа являются два блока: невыделенный цветом, обозначающий выявление причины отказа и блок продолжения исканий.

Этап оценки качества сборки (блок песчаного выделения с фиолетовым контуром) подразумевает проверку основных неточностей, возникающих в процессе сборки (блоки фиолетового оттенка): точность взаимного расположения деталей и узлов, затяжка групп резьбовых соединений и прилегание сопрягаемых поверхностей. Следуя линиям блок схемы, по завершению этого этапа проверки, также наблюдаются два исхода: неокрашенный цветом, конечный результат и дальнейшие поиски причины.

Этап анализа соблюдения требований эксплуатации – пятое основное звено схемы, блок имеет песчаный цвет с зелёным кантом. Данный этап

подразделяется на контроль шести основных условий возникновения неисправностей (блоки выделены зелёным цветом) : анализ уровня вибраций, анализ установки агрегатов на все предусмотренные проектом опоры, оценка динамических воздействий, проверка не было ли перегрузок, оценка износа и истирания.

Результирующим блоком схемы является установление причины отказа и выдача рекомендаций. Отметим, что несмотря на то, что данная операция является конечной, в данном случае, она является основной и поэтому также выделена песчаным цветом.

4.3 Анализ сокращения трудоёмкости методом сетевого моделирования графика работ

Оценка трудоёмкости методом построения сетевых графиков является одним из теоретических методов инженерного расчёта. Сетевая модель расчёта металлографической экспертизы без применения схемы представлена на рисунке 41.

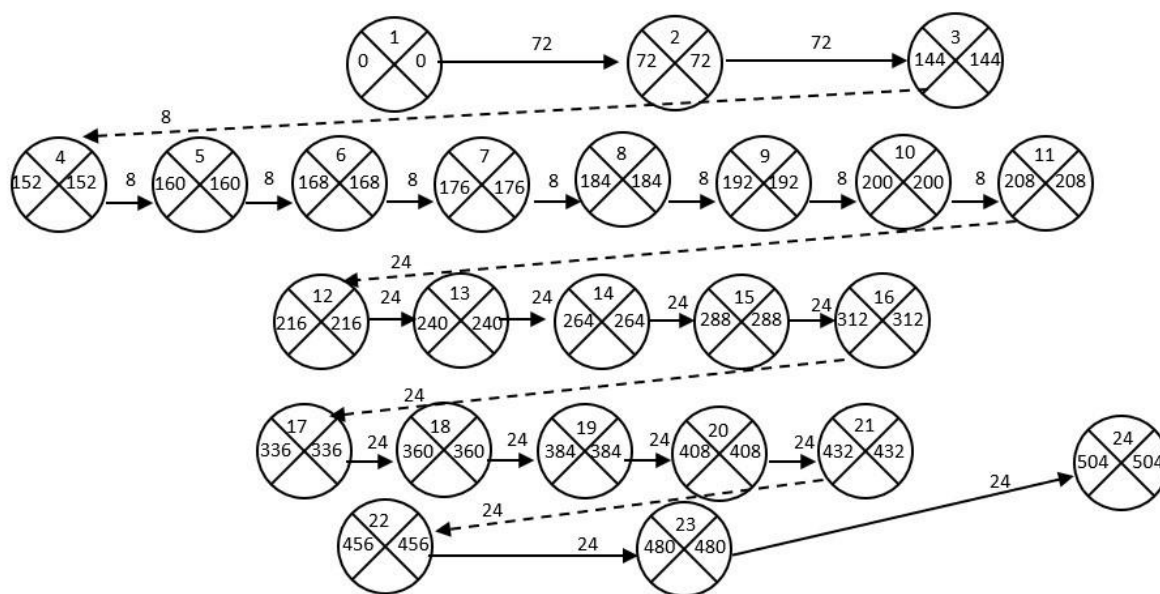


Рисунок 41 – Расчёт графика сетевой модели для экспертизы без применения разработанного универсального алгоритма

Модель сетевого графика базируется на двух основных элементах: стрелки - означающей работу и кружка – события, обозначающего совершение какого-либо этапа. Над стрелкой обозначают время проведения работ, а внутри кружка фиксируется три значения: обозначение номера операции, справа время начала работ, а слева время окончания.

Приведённая схема представляет уже оптимизированный вариант, то есть расчёт показывает минимальное время из возможных временных затрат. Для ясности, стоит пояснить значения каждого из событий схемы. Первое событие означает старт металлографической экспертизы, в верхней четверти полукруга стоит число 1, означающее, что это первая операция, начало работ, левое значение у него равно 0. Вторым этапом подразумевается оценка соответствия нормативной документации, сверху вписываем число 2, поскольку это вторая операция, на проработку документации запланировано затратить 72 часа. Далее идёт стрелка, обозначающая работу на оценку повторяемости неисправности, она также составит 72 часа. Событие оценки повторяемости, в кружочке видим сверху число 3, означающее номер операции, справа сумма начала работ предыдущей операции и работ затраченных на эту, выходит 144 часа. Из третьего события видим пунктирную линию, обозначающую, что следующее событие – анализ состояния поверхности, не может совершиться, пока не окончена данная операция. После анализа состояния поверхности идёт операция выявления трещин, определения очага, анализ совпадения очага разрушения с концентраторами напряжения, определение типа излома по месту, сопоставление излома со свежим, оценка соответствия геометрии, оценка выбора материала, работа на каждое из событий составляет 8 часов. Работа, затраченная на следующие этапы: оптическая фактография, химический анализ, определение микро и макроструктуры, механические испытания, выявление внешних и внутренних дефектов, электронная фактография, микрорентгеноструктурный анализ, анализ микротвёрдости, рентгеноструктурный анализ, рентгеноструктурная фактография, имитация разрушения и стендовые испытания составляет 24

часа. Двадцать четвёртым событием является выдача заключения – финишная операция, ранее начало работ и их окончание здесь равны и составляют 504 часа. Для заполнения правых граф схемы, от крайнего значения (504) надо отнять работу, затраченную на предыдущее событие. Далее для заполнения следовать в обратном направлении. Расчёт показывает, что на проведение металлографической экспертизы без разработанного алгоритма, следуя всем операциям будет затрачено 504 часа.

Сетевой график расчёта трудоёмкости по разработанному универсальному подходу к металлографической экспертизе приложен на рисунке 42.

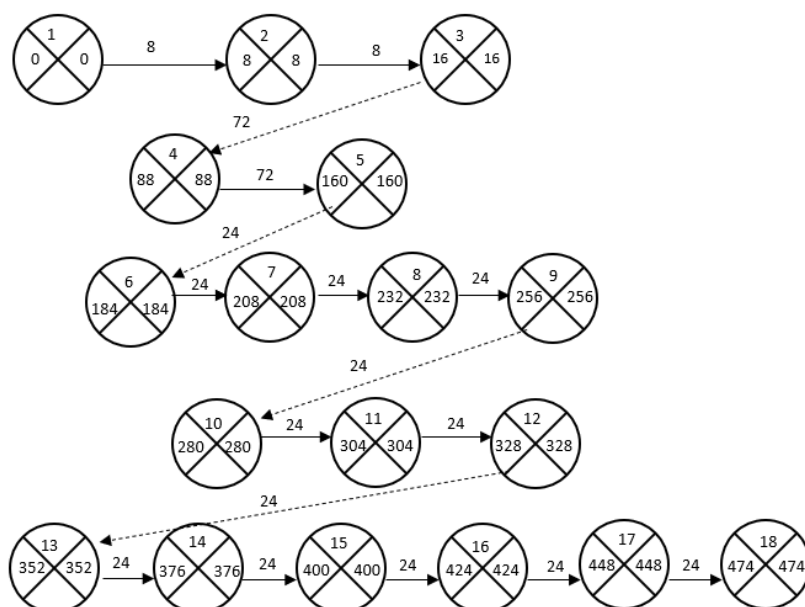


Рисунок 42 – Расчёт графика сетевой модели для экспертизы по разработанному универсальному алгоритму

Расчёт данного сетевого графика производился по полному подобию построения предыдущего графика. Как видно из расчёта, трудоёмкость металлографической экспертизы составила 474 часа. Таким образом, расчёт по графику сетевого моделирования доказал, что применение разработанной универсальной схемы металлографической экспертизы позволит сократить время на проведение экспертного анализа более чем на 30 часов.

4.4 Оценка универсальности работы алгоритма

Стоит отметить, что не исключены сбои в разработанной структуре, поскольку при каждом определённом случае путь будет не всегда одинаковый. В ряде случаев бывает, что после осуществления всего комплекса анализов чёткого представления о причине разрушения не наступает.

Одно крупное предприятие по выпуску стальных пружин для железнодорожного транспорта и автомобилей на стадии запуска производства столкнулось с проблемой недостаточного ресурса изготовленных пружин при стендовых испытаниях. Проведение ряда металлографических экспертиз показало, что каждый раз причина разрушения оказывалась разная: то разрушение зарождалось на неметаллическом включении, то на дефекте поверхности, то на повреждении лакокрасочного покрытия. Такая многовариативность навела эксперта на мысль, что разрушение происходит не из-за ненадлежащего качества пружины, а из-за проведения стендовых испытаний при режимах, превышающих номинальные. То есть, пружины при таких испытаниях в любом случае должны были сломаться и поэтому они каждый раз ломались в самом уязвимом для данной пружины месте (где существуют какие-либо, пусть и незначительные концентраторы напряжения). Это говорит о том, что практически невозможно разработать схему, универсальную для абсолютно всех случаев. Бывают случаи, когда предприятие что-то выпускает и у него идёт брак, оно хочет установить причину, заказывает экспертизу и лаборатория определяет истину. Для предприятия главное – понять причину, чтобы в будущем её не допускать. Это экспертиза частного характера и к ней не предъявляются особо жесткие требования. Но зачастую, экспертиза назначается по решению судов. Производитель произвёл продукцию, передал ее в эксплуатацию, а у потребителя она вышла из строя. Естественно, потребитель требует от производителя возврата или обмена продукции, с чем производитель не согласен и обвиняет потребителя в том, что тот не должным образом

эксплуатировал продукцию. После этого от одной из сторон, обычно, от потребителя, поступает заявление в арбитражный суд, который назначает проведение экспертизы. Проведение подобной экспертизы имеет несколько иной формат, здесь необходимо дать юридически чёткое заключение, поскольку имеются адвокаты, которые всегда будут искать к чему бы придраться, по какой причине выдвинуть протест. Предположим, обнаружен какой-то дефект, и в принципе, уже понятно в чем причина, но нет, несмотря на очевидность, необходимо провести экспертизу в полном объеме, в том числе проверку качества металла и документации и все других параметров.

4.5 Применение разработанного алгоритма к экспертизе

Применим разработанный алгоритм экспертизы на установление причины разрушения автосцепного устройства головной секции электровоза. Программа исследований, согласно предложенной схеме, предполагает проведение следующих мероприятий:

а) внешний осмотр поступивших фрагментов автосцепки;

б) изучение документации;

в) оценка качества материала:

1) определение химического состава металла,

2) определение механических характеристик,

3) фрактографический анализ излома,

4) металлографический анализ:

- макроскопический анализ металла,

- микроскопический анализ металла;

г) выявление причины разрушения на основании комплексного анализа полученных результатов исследований.

4.5.1 Внешний осмотр фрагментов проушины хомута

Визуальный осмотр показал, что ответные части излома корпуса сцепки находятся в различном состоянии: если излом со стороны хвостовика боковой рамы находится в удовлетворительном состоянии (рисунок 43 а,б), то со стороны головной – сильно прокорродирован и имеет следы пластической деформации (рисунок 43 в,г). Поэтому в дальнейшем все исследования проводили на материале хвостовика



а)



б)



в)



г)

Рисунок 43 – Внешний вид двух ответных частей разрушенной проушины хомута: внешний вид (а) и вид излома (б) со стороны хвостовика; внешний вид (в) и вид излома (г) со стороны головной части

4.5.2 Изучение нормативных документов и сопроводительной документации

В процессе экспертизы использовалась следующая документация:

- ГОСТ 22703-91. Детали литые автосцепного устройства подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия;
- Акт комиссионной проверки оборудования электровоза приписки эксплуатационного локомотивного депо

4.5.3 Оценка качества материала

4.5.3.1 Химический анализ

Определение химического состава стали бандажа проводили с помощью оптико-эмиссионного спектрометра "Q4 TASMАN".

Результаты анализа химического состава образца, вырезанного из хвостовика сцепки, приведены в таблице 1. В таблице указаны средние значения, по результатам не менее трех измерений на одном образце.

Таблица 1. Химический состав металла

Измерения		Массовая доля элементов, 0,1%														
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu	V	Nb	W	Ti
1	Образец металла корпуса сцепки	2,67	6,34	14,88	0,27	0,29	1,36	1,55	0,32	0,62	0,11	1,52	1,44	<0,10	<0,20	<0,05
2	Погрешность измерения по ГОСТ 18895-97	±0,24	±0,6	±0,8	±0,06	±0,08	±0,16	±0,16	±0,08	±0,20	±0,04	±0,20	±0,16	±0,04	±0,08	±0,04
3	Марка стали 20Г1ФЛ по ГОСТ 22703-91	1,7-2,5	3,0 – 5,0	9,0 – 14,0	≤0,40	≤0,40	≤3,0	≤3,0	-	-	-	≤3,0	0,6-1,3	-	-	≤0,25

Наиболее близко химический состав стали, из которой изготовлен корпус сцепки, соответствует стали 20Г1ФЛ по ГОСТ 22703. Тем не менее, содержание углерода, марганца и ванадия в стали находится на верхнем уровне допустимого диапазона (с учетом погрешности измерений), а содержание кремния даже превышает допустимые нормы. То есть химический состав стали металла корпуса сцепки не соответствует марке стали 20Г1ФЛ

требованиям ГОСТ 22703 по содержанию кремния. Однако, указанный в ГОСТ 22703 состав для стали 20Г1ФЛ носит справочный характер, то есть главное – чтобы были обеспечены основные механические характеристики.

4.5.3.2 Механические испытания

Механические испытания на растяжение проводили с помощью универсальной испытательной машины Н50КТ по ГОСТ 1497-84 по трем образцам с размерами рабочей части $\varnothing 5 \times 30$ мм (рисунок 44 а), диаграммы испытания которых приведены на рисунке 44 б.

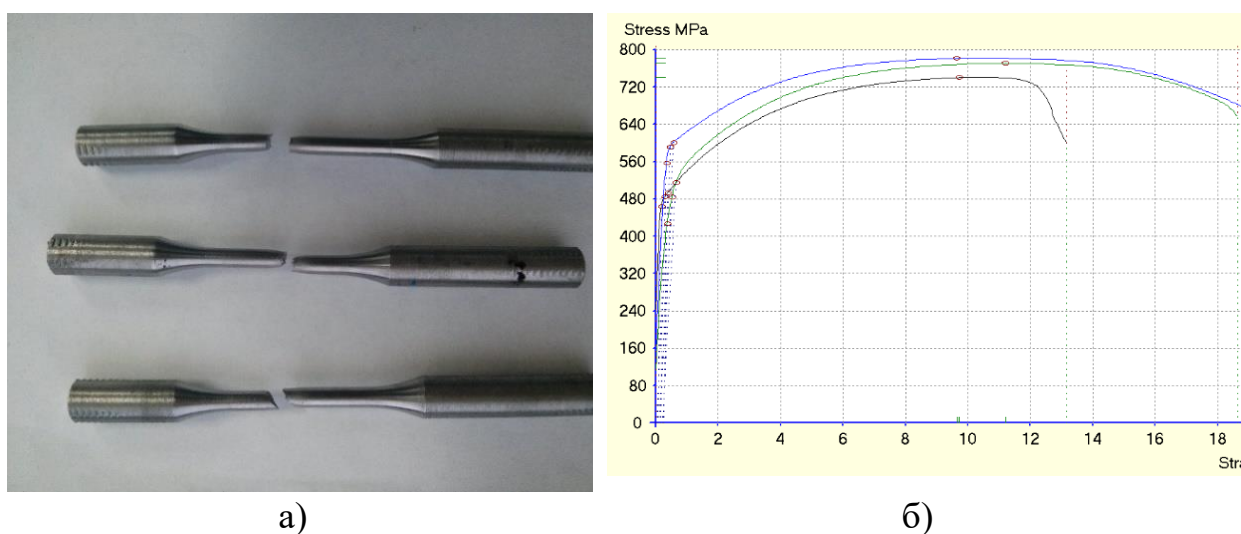


Рисунок 44 – Вид образцов после испытаний (а) и их диаграммы растяжения

Испытания на ударную вязкость проводили с помощью копра JB-W300 с маятником на 300 Дж по ГОСТ 9454-78 при температурах плюс 20 °С и минус 60 °С, по три образца при каждой температуре. Результаты испытаний на ударную вязкость приведены в таблице 2.

Таблица 2. Механические характеристики металла

Номер испытания	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость КСУ, при плюс 20 °С, Дж/см ²	Ударная вязкость КСУ, при минус 60 °С, Дж/см ²
1	485	741	13	16	26,7	2,6
2	592	782	20	31	39,0	31,5
3	483	771	18,6	27	22,4	2,6
По ГОСТ 22703-91 для 1-й группы, 2-й категории	450÷500	Не менее 560	Не менее 15	Не менее 30	-	Не менее 25

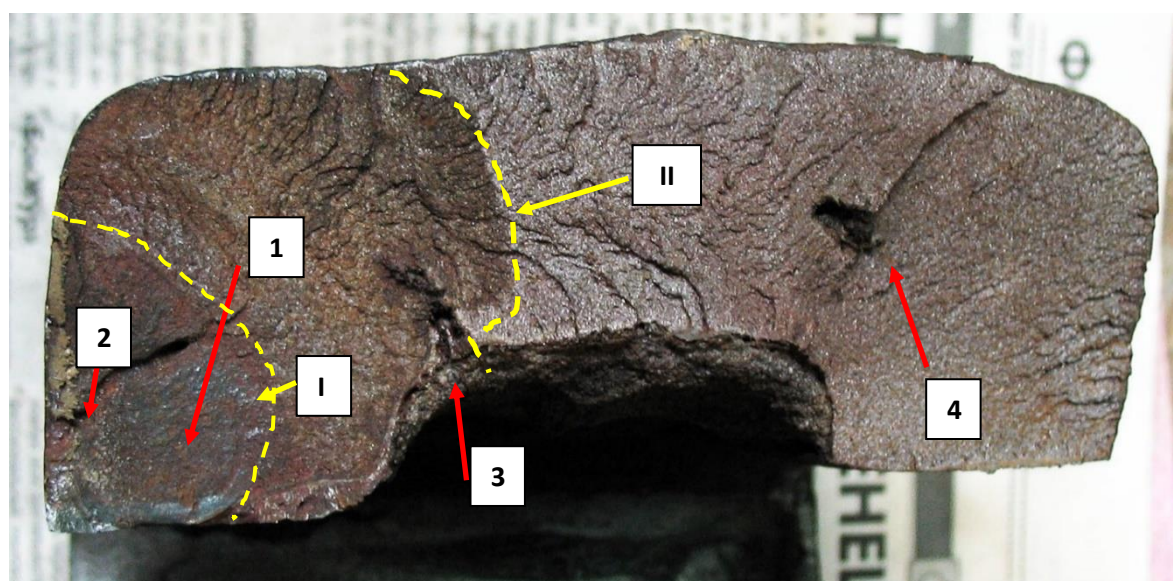
Как следует из результатов механических испытаний, свойства стали от образца к образцу сильно отличаются, при этом, результаты определения ударной вязкости при отрицательной температуре совершенно не удовлетворяют требованиям ГОСТ 22703-91 для сталей, относящихся к первой группе изделий (в табл. 2 выделены красным цветом). Такие результаты, связаны с неудовлетворительным качеством литья: наличием многочисленных пор.

4.5.3.3 Фрактографический анализ излома

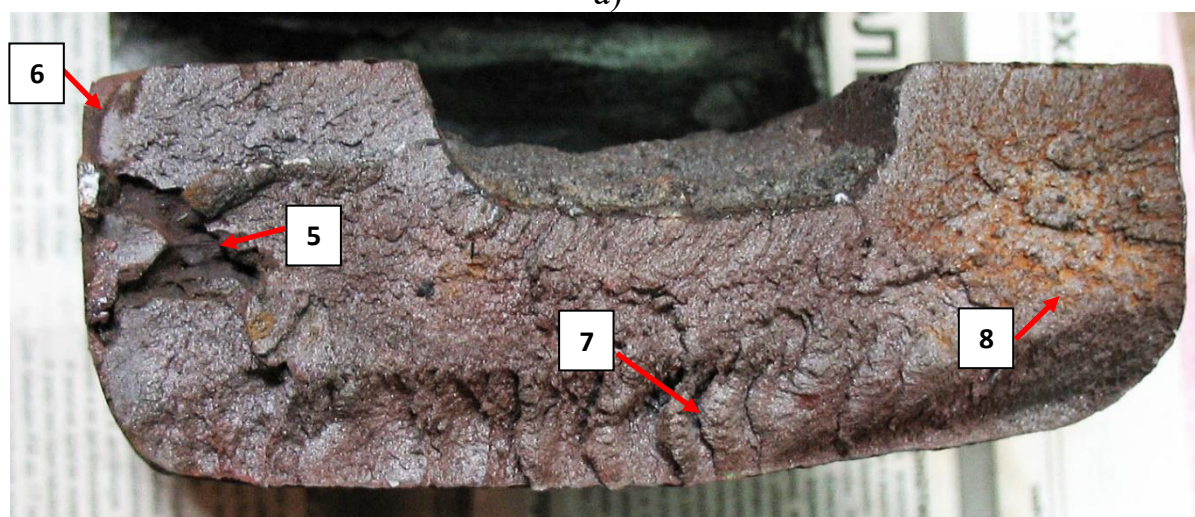
Фрактографический анализ проводили на изломе со стороны хвостовика, поскольку он находился в гораздо лучшем состоянии, чем со стороны головной части. Исследование морфологии поверхности осуществляли с помощью металлографического стереоскопического микроскопа Zeiss Stemi 2000-C (рисунок 45).

Из представленных на рисунке 45 изображено, совершенно очевидно, что процесс разрушения происходил в три этапа. На первом этапе разрушения первичная трещина распространилась вглубь металла до границы, обозначенной на рисунке 45а пунктирной линией «I» (это видно как по контрасту – более темная по сравнению с остальными область излома, так и по рельефу – более гладкая поверхность). Далее трещина развилась до

границы «II» (вторая пунктирная линия на рисунке 45 а), и уже затем произошел окончательный долом хвостовика сцепки по всему сечению.



а)



б)

Рисунок 45 – Вид излома со стороны хвостовика сцепки: а – условно левая сторона; б – условно правая сторона

На рисунке 46 элементы разрушения на условно левом изломе приведены в большем масштабе. Как видно, (рисунок 46а) поверхность первичного разрушения сильно окислена, что исключает возможность исследования тонкого рельефа с помощью высокоразрешающей микроскопии. Однако вид поверхности даже в таком состоянии позволяет утверждать, что

характер разрушения не усталостный (полностью отсутствуют следы усталостных дорожек). То есть первичное разрушение произошло одномоментно или в результате нескольких больших скачков.

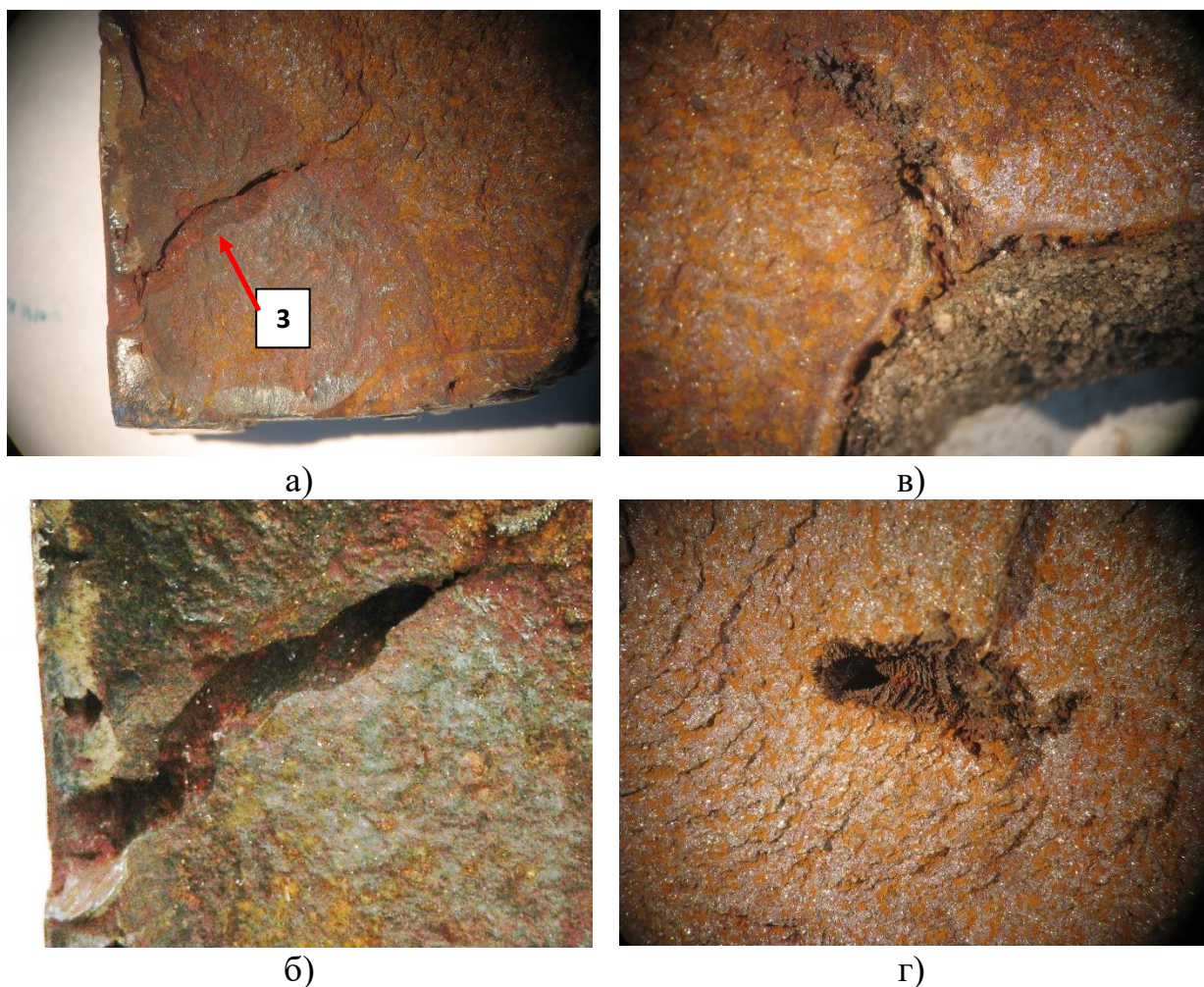


Рисунок 46 – Дефекты на изломе со стороны левой части: а – поверхность первичного разрушения; б – очаг разрушения; в – дефект со стороны отверстия; г – крупная пора на поверхности излома

Исследование поверхности в области первичного разрушения показало, что на ней присутствует несплошность вытянутой формы (обозначена цифрой 3 на рисунке 46а), имеющая размеры в поперечных направлениях более 2-х мм и в продольном более 20 мм (рисунок 46 б), которая являлась мощным концентратором напряжений и сыграла роль фокуса разрушения.

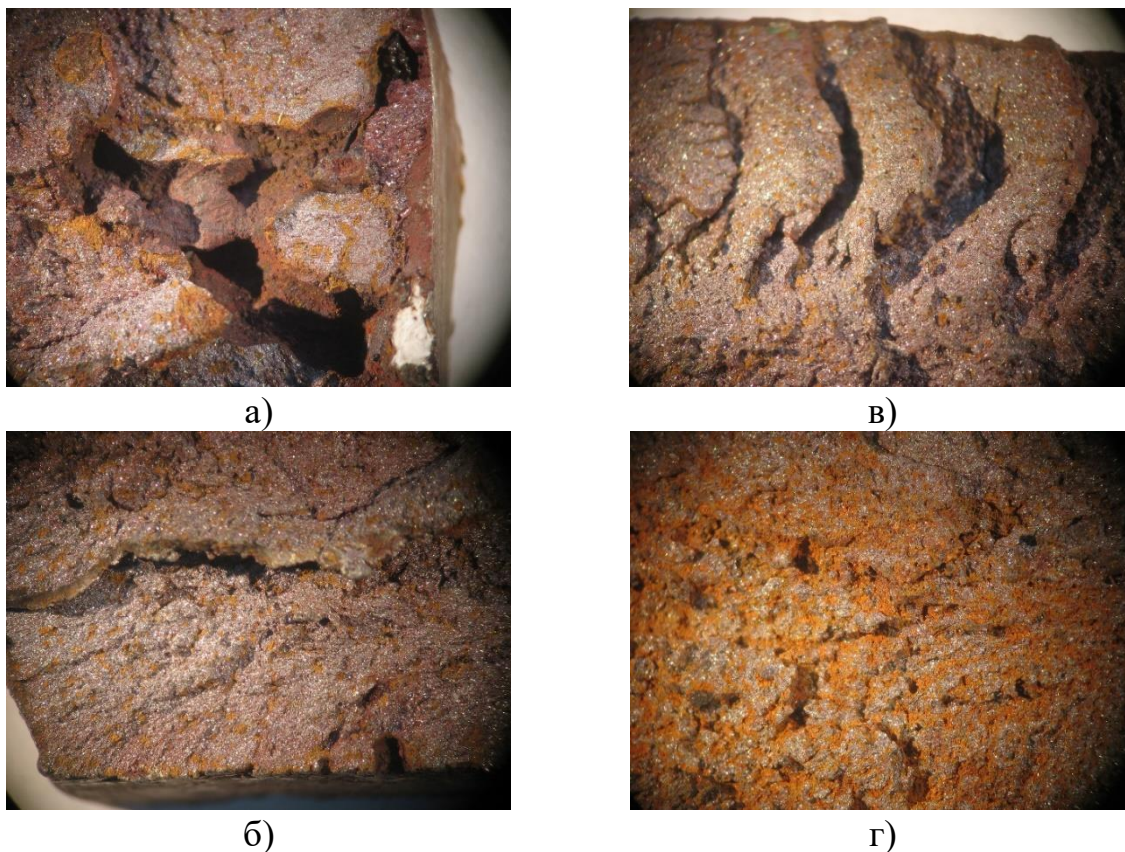


Рисунок 47 – Дефекты на изломе со стороны правой части: а – несплошность; б – дефект со стороны внешней поверхности; в – грубый рельеф разрушения; г – рыхлоты

Необходимо отметить, что и в других областях излома присутствует множество дефектов основные из которых приведены на рисунках 46 и 47, а сам излом имеет грубую рыхлую структуру.

Таким образом, согласно фрактографическому анализу, основной причиной разрушения является ненадлежащее качество литья сцепного устройства.

4.5.3.4 Металлографический анализ металла

4.5.3.4.1 Макроскопический анализ

Для проведения макроскопического анализа металла сцепки его хвостовик был разрезан в продольном (рисунок 48 а,б) и поперечном направлении (вблизи излома, рисунок 48 в,г).

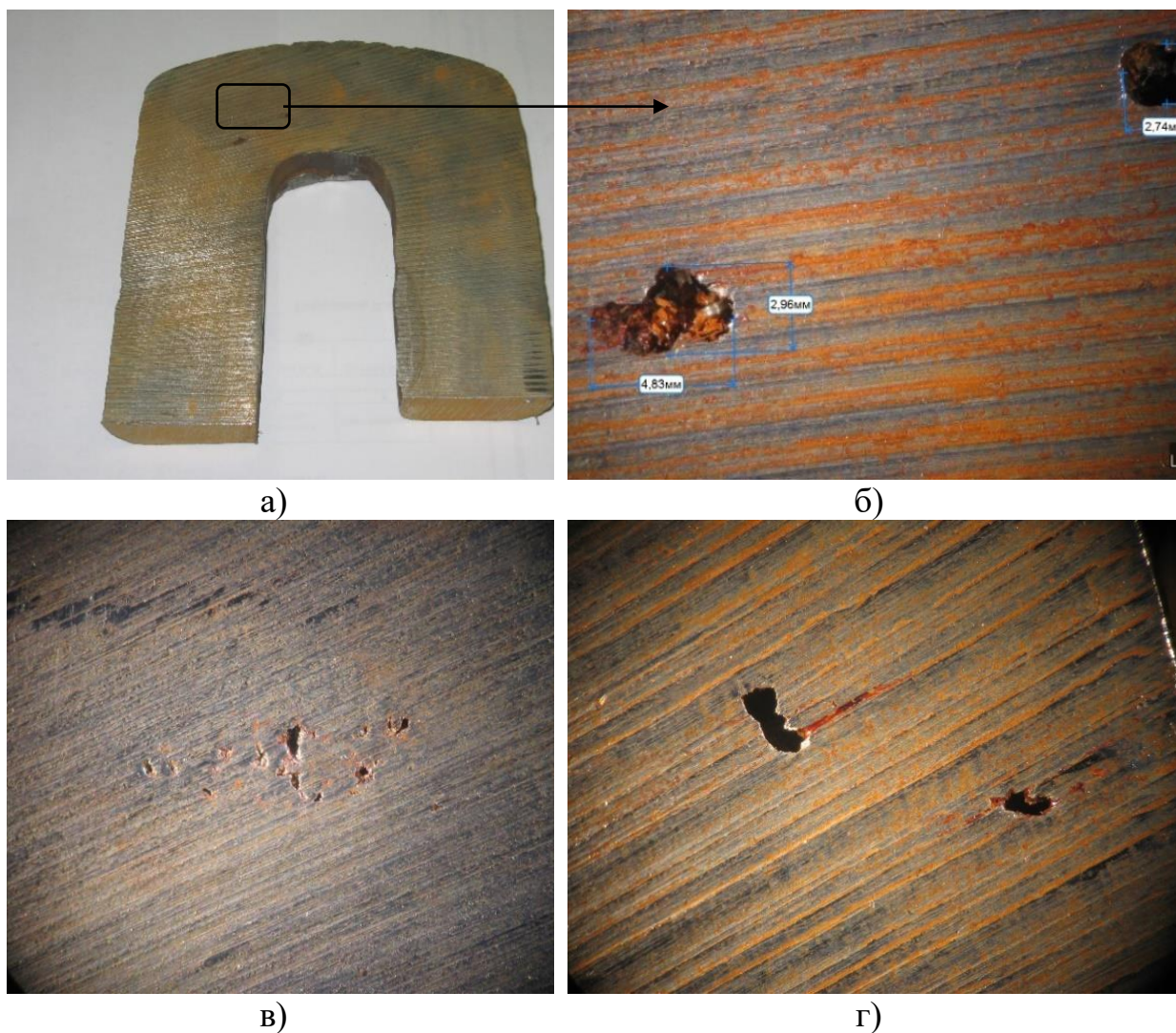
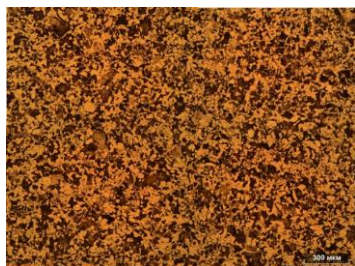


Рисунок 48 – Поры на продольном (а, б) и поперечных разрезах проушины хомута (в, г).

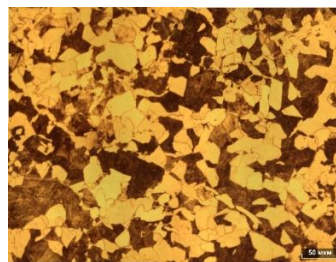
Как в предыдущем разделе на изломе, так и на любых произвольно выполненных разрезах (сечениях) обнаружены макропоры (несплошности) с поперечными размерами $2 \div 5$ мм, представлены на рисунке 48 б в увеличенном виде поры, с результатами измерения их размеров. Результаты макроскопического анализа только еще раз подтверждает вывод предыдущего раздела о ненадлежащем качестве литья ответственного изделия.

4.5.3.4.2 Микроскопический анализ

Образец для исследования микроструктуры вырезался из проушины хомута автосцепки в поперечном направлении и запрессовывался в пластмассу, после чего производилась подготовка шлифа на шлифовально-полировальном станке TegraPol-11 + TegraForce-1 + TegraDoser-5.



а)



б)

Рисунок 49– Микроструктура проушины хомута: а – ($\times 100$), б – ($\times 500$)

Структура металла (рисунок 49) представляет феррит + перлит, что соответствует химическому составу стали марки 20Г1ФЛ. Балл зерна проушины хомута составляет $7\div 9$ балл по ГОСТ 5639–82.

4.5.4 Комплексный анализ полученных результатов

На основании всего комплекса проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

- Основной причиной разрушения хвостовой части сцепного устройства головной секции электровоза является ненадлежащее качество металла: наличие большого числа макродефектов в виде пор, несплошностей и рыхлот.
- Механические свойства: относительное сужение и ударная вязкость при отрицательной температуре не соответствуют требованиям ГОСТ 22703-91 для сталей первой группы изделий, к которым относится корпус сцепного устройства.

Выводы по разделу

Данный раздел посвящён созданию схемы универсального подхода к металлографической экспертизе, формированию этапов экспертного анализа с приведением ярких примеров, анализу её трудоёмкости оценке применимости.

Определение основных этапов экспертизы осуществлялось на основании многолетнего экспертного опыта НИИПТ, базируясь на который, выявлена резонность подхода к экспертизе согласно учёту жизненного цикла детали. Первым этапом экспертизы является визуальный осмотр – именно здесь могут быть выявлены очевидные причины разрушения, или обозначены какие-либо параметры, на которые стоит обратить особое внимание при дальнейшем анализе. Вторым звеном схемы обозначена работа с документацией – она включает в себя проработку технической документации и прослеживание наличия повторяемости, которая может указывать на конструкторскую недоработку. Следующей задачей в исследовании будет оценка качества материала – выявление дефектов структуры, литья и термической обработки. Четвёртый этап подразумевает проработку дефектов ремонта и сборки. Замыкает схему анализ аспектов эксплуатации.

Стилистическое оформление схемы также играет немаловажную роль. Для наибольшей наглядности основные структурные элементы схемы и подконтрольные операции имеют определённое цветовое выделение.

Проведена оценка трудоёмкости методом расчёта сетевой модели. Трудоёмкость экспертизы проведённой по разработанной схеме и трудоёмкость металлографической экспертизы без применения фиксированного алгоритма были сопоставлены и тем самым удалось выяснить, что применение схемы позволяет снизить трудоёмкость на проведение экспертизы на 30 часов.

Схема была подтверждена проведением успешного экспертного анализа по её алгоритму.

Заключение

Материаловедческая экспертиза, охватывающая все этапы жизни детали – комплексное исследование, состоящее из множества этапов, систематизация которого позволяет значительно сократить затраты времени и бюджета. Составляя алгоритм поэтапного контроля, необходимо производить глубокую аналитику, основываясь на многолетнем опыте крупных научных центров.

Проведенный анализ множества металлографических экспертиз, выполненных НИИПТ, позволил составить универсальный алгоритм проведения МЭ и применить его на практике для разработки перечня минимально необходимых мероприятий по определению причины разрушения на примере разрушения сцепного устройства.

С целью определения сокращения трудоёмкости, был применён расчёт сетевой модели – теоретический метод инженерного расчёта организации работ. Путём сравнения затрат рабочего времени на проведение металлографической экспертизы без чёткого алгоритма действий и с применением разработанной схемы контроля, было установлено, что применение схемы позволит снизить затраты рабочего времени более, чем на 30 часов. Следовательно, снижение рабочего времени приведёт к снижению затрат на электроэнергию и оплату труда сотрудников.

Таким образом, универсальная схема позволила существенно снизить расходы на проведение экспертизы и снизить её трудоёмкость.

Результаты работы были представлены на Всероссийской научно-практической конференции «Молодёжь. Наука. Общество», проходившей в Тольятти с 20 по 24 декабря 2021 года в виде доклада, который удостоился почётного третьего места, а также вошли в материалы статьи, опубликованной в журнале *Frontier Materials & Technologies*, входящего в базу цитирований Scopus.

Список используемых источников

1. В Латвии сошел с рельсов и перевернулся поезд [Электронный ресурс] // ИТАР-ТАСС. – Режим доступа: <https://tass.ru/glavnie-novosti/546590>
2. Причиной ж/д аварии в Приамурье стал излом рамы грузовой тележки. [Электронный ресурс] // РИА Новости. – Режим доступа: <https://ria.ru/20120131/552864544.html>
3. Информационное агентство "Амур.Инфо". Цистерны с нефтью сошли с рельсов из-за излома боковой рамы тележки вагона. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.amur.info/news/2012/05/11/6.htm>. (дата обращения: 04.03.2022.)
4. Информационный портал "РЖД. Партнер". Излом боковой рамы тележки вагона стал причиной схода на ВСЖД. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.rzdpartner.ru/news/2012/08/16/380078print.html>. (дата обращения: 04.03.2022).
5. Локомотивщик Алтая. Техническое заключение по излому боковой рамы 30.01.2012 на Заб.ж.д. [Электронный ресурс]. – URL: <http://grin59.forum2x2.ru/t1496topic>. (дата обращения: 04.03.2022).
6. Шайхутдинова Г С. Анализ зарубежной литературы по вопросам снижения аварийности надземных трубопроводов [Электронный ресурс] : выпускная квалификационная работа бакалавра : 23.03.03 / Г. С. Шайхутдинова. — Красноярск : СФУ, 2021
7. Кожаева К. В. Обеспечение стабилизации проектного положения подводных переходов газонефтепроводов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Уфа 2017
8. Варламов Д. П. Прогнозирование рисков безопасной эксплуатации литейной части магистральных газопроводов. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук Москва 2014 -349 с
9. Тебекин, А. В. Управление качеством : учебник для бакалавриата и магистратуры / А. В. Тебекин.— 2-е изд., перераб. и доп.— Москва:

Издательство Юрайт, 2019.— 410 с.

10. Касперович С. А., Коновальчик Г. О. Организация производства и управление предприятием: учеб. пособие для студентов технических специальностей. Минск : БГТУ, 2012. – 344 с.

11. Шинкоренко С. Ф., Белецкий Е. П., Ширяев А. А. Справочник по обогащению руд черных металлов / под ред. С. Ф. Шинкоренко. — Москва: Недра, 1980. — 527 с.

12. ГОСТ 24297-2013 Межгосударственный стандарт верификация закупленной продукции. Организация проведения и методы контроля Verification of purchased products. Organization and methods of control ОКС 03.120.10 Дата введения 2014-01-01

13. Елохов А. М., Арбузова Т. А. Управление качеством. Часть II. Система менеджмента качества: учебное пособие : в 2 ч. ПГНИУ – 3-е изд., перераб. и доп. – Пермь, 2020. 188 с. [Электронное издание] Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/eloxov-arbuzova-upravlenie-kachestvom-ch2.pdf> (дата обращения: 26.02.2022)

14. ГОСТ Р 58972-2020 Национальный стандарт Российской Федерации. Оценка соответствия. Общие правила отбора образцов для испытаний продукции при подтверждении соответствия Conformity assessment. General sampling rules for products testing during attestation assessment ОКС 03.120.20 Дата введения 2021-01-01

15. Егоров М. Е., Дементьев В.И., Дмитриев В.Л. Технология машиностроения [Текст]: учебник для вузов – М.: Высшая школа, 1976. – 536 с

16. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81 (с Изменением N 1) / Свод правил от 27 декабря 2010 г. № 16.13330.2011. 177с

17. Иванов В. Н. Словарь-справочник по литейному производству. — М.: Машиностроение, 1990. — 384 с.

18. ГОСТ 19200-80. Группа В00. Государственный стандарт Союза

ССР. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов.

19. Sarivan IM, Greiner JN, Díez Álvarez D, Euteneuer F, Reichenbach M, Madsen O, et al. Enabling real-time quality inspection in smart manufacturing through wearable smart devices and deep learning. // *Procedia Manuf.* 2020. Vol. 51. P. 373 – 380. DOI: [10.1016/j.promfg.2020.10.053](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.053).

20. Galvis Leal L, Orozco De Alba L, Romero-Conrado AR. Desarrollo, tendencias, aplicaciones y herramientas de la industria 4.0 en el sector textil. // *Boletín Innovación, Logística y Operaciones – BILO.* 2020. №2. P.2–5. DOI: [10.17981/bilo.02.01.2020.15](https://doi.org/10.17981/bilo.02.01.2020.15).

21. Romero-Conrado AR, Coronado-Hernandez JR, Rius-Sorolla G, García-Sabater JP. A Tabu list-based algorithm for capacitated multilevel lot-sizing with alternate bills of materials and co-production environments. // *Appl Sci.* 2019. №9. P. 6–9. DOI: [10.3390/app9071464](https://doi.org/10.3390/app9071464)

22. Xia Q, Jiang C, Yang C, Zheng X, Pan X, Shuai Y, et al. A method towards smart manufacturing capabilities and performance measurement. *Procedia Manuf* 2019 №39. P.851– 858. DOI: [10.1016/j.promfg.2020.01.415](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.415).

23. Stavropoulos P, Papacharalampopoulos A, Petridis D. A vision-based system for real-time defect detection: a rubber compound part case study. // *Procedia CIRP.* 2020. № 93 .P.1230 – 1235. DOI: [10.1016/J.PROCIR.2020.04.159](https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.04.159).

24. Deshpande A.M., Minai A.A., Kumar M. One-Shot Recognition of Manufacturing Defects in Steel Surfaces. *Procedia Manuf* 2020; №48. P.1064–1071. DOI: [10.1016/J.PROMFG.2020.05.146](https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.05.146)

25. Bici M., Broggiato G.B., Campana F., Dughiero A. Computer Aided Inspection Procedures to Support Smart Manufacturing of Injection Moulded Components. // *Procedia Manuf.* 2017. № 11. P. 1184–1192. DOI: [10.1016/J.PROMFG.2017.07.243](https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.07.243).

26. Galindo-Salcedoa M., Pertúz- Morenoa A., Guzmán-Castilloa S., Gómez-Charrisab Y., Alfonso R. Romero-Conrado Smart manufacturing applications for inspection and quality assurance processes // *Procedia Computer Science.* 2022. Vol. 198. P. 536-541. DOI: [10.1016/j.procs.2021.12.282](https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.282)

27. ГОСТ 1855-55 Отливки из серого чугуна. Допускаемые отклонения по размерам и массе и припуски на механическую обработку / ГОСТ от 10 августа 1955 г
28. ГОСТ 2009-55 Отливки стальные фасонные. Допускаемые отклонения по размерам и массе и припуски на механическую обработку / ГОСТ от 10 августа 1955 г.
29. Рыбкин В. А. Ручное изготовление литейных форм. Учебник для технических училищ. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. школа, 1981.— 192 с
30. Слесарев В. Е. Управленческий учёт, контроль и анализ эффективности использования технологической оснастки на предприятиях приборостроения. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата экономических наук Йошкар-Ола – 2010
31. ГОСТ 9012-59 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю
32. ISO 410-82 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю
33. ISO 6506-81 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю.
34. ГОСТ 9377-81 Наконечники и бойки алмазные к приборам для измерения твердости металлов и сплавов. Технические условия
35. ГОСТ 2999-75 (СТ СЭВ 470-77) Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу (с Изменениями N 1, 2) / ГОСТ от 28 июля 1975 г. № 2999-75.
36. ISO 6507 Металлы и сплавы Измерение твёрдости по Виккерсу. Часть 1 Метод измерения Metals and alloys. Vickers hardness test. Part 1. Test method
37. ГОСТ 24621-2015 (ISO 868-2003). Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору)
38. Самохоцкий А.И. Технология термической обработки металлов М: Машиностроение 1976. - 311с.

39. Описание и виды травления металла. Плюсы технологии, область применения. Используемые травители. [Электронный ресурс]. – URL: <https://prompriem.ru/stati/travlenie-metalla.html> (дата обращения: 25.05.2022).

40. Строительные машины и оборудование, справочник. [Электронный ресурс]. – URL: <https://stroy-technics.ru/article/vidy-razrusheniya-detalei-mashin-v-ekspluatatsii> (дата обращения: 26.03.2022).

41. Родионова В.Н. Яголковская Е.Н. Организация эксплуатации и технического обслуживания оборудования на предприятии. // Экономинфо 2017 №4 DOI:[10.31772/2587-6066-2020-21-3-307-313](https://doi.org/10.31772/2587-6066-2020-21-3-307-313)

42. Куклин Н. Г., Куклина Г. С. К 89 Детали машин: Учеб. для машиностроит. спец. техникумов. — 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Высш. шк., 1987.— 383 с.

43. Маслов Б.Г. Основные дефекты сварных соединений и их выявляемость методами НК. - М: Издательский центр «Академия» 2008. – 272 с.