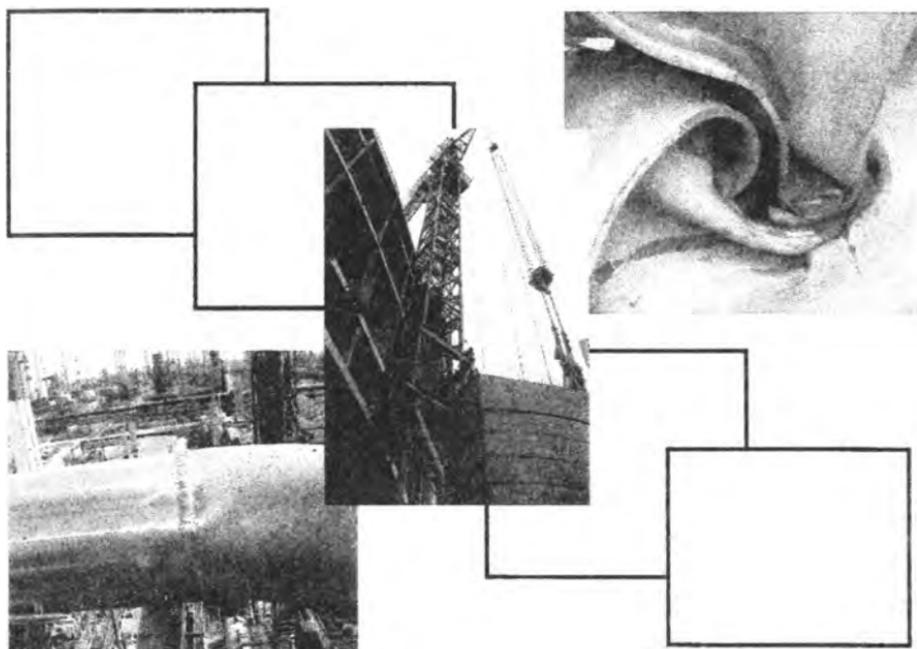


**Ф.И. Пантелеенко
А.С. Снарский**

**Методология оценки
состояния материала
ответственных металлоконструкций**



**Минск
БНТУ
2010**

**Ф.И. Пантелеенко
А.С. Снарский**

**Методология оценки
состояния материала
ответственных металлоконструкций**

**Минск
БНТУ
2010**

УДК 620.172:620.178:620.179.12

Рекомендовано
научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол № 1 от 11 октября 2010 г.)

Пантелеенко, Ф.И.

Методология оценки состояния материала ответственных металлоконструкций / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский. – Минск: БНТУ, 2010. – 196 с.

ISBN 978-985-525-570-4.

Монография посвящена рассмотрению вопросов старения металла при длительной эксплуатации на примерах различных ответственных конструкций, таких как: магистральные трубопроводы по транспорту газа, нефти и нефтепродуктов; оборудование и конструкции нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и пищевой промышленности (реакторы, колонны, теплообменники, емкости, резервуары, технологические трубопроводы и т.п.); а также различные грузоподъемные машины и механизмы (башенные краны, мостовые, козловые и автокраны и т.п.). Монография обобщает опыт многолетних исследований, связанных с оценкой состояния, структуры и свойств металла, а также с установлением причин аварий и повреждений указанных выше объектов. Рассмотрены вопросы поиска эффективной методики неразрушающего контроля состояния металла и оценки остаточного ресурса конструкции по степени деградации механических свойств металла, оцененной неразрушающим способом по геометрическим параметрам пирамидального отпечатка, полученного на конструкции при измерении твердости по Виккерсу, в том числе переносными твердомерами.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области технической диагностики, а также будет интересна магистрантам, аспирантам и студентам ряда технических специальностей, изучающим дисциплины, связанные с вопросами диагностики и оценки качества различных металлоконструкций.

Табл. 32. Ил. 88. Библиогр. 171 назв.

Рецензенты:

Ю.В. Василевич, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой
«Сопротивление материалов машиностроительного профиля» БНТУ;

В.М. Катцевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой
«Технология металлов» БГАТУ

ISBN 978-985-525-570-4

© Пантелеенко, Ф.И.,
Снарский А.С., 2010
© БНТУ, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Во всех отраслях хозяйства Республики Беларусь используется целый ряд ответственных металлических конструкций самого различного назначения. К ним относятся: магистральные трубопроводы по транспорту газа, нефти и нефтепродуктов; оборудование и конструкции нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и пищевой промышленности (реакторы, колонны, теплообменники, емкости, резервуары, технологические трубопроводы и т.п.); а также различные грузоподъемные машины и механизмы (башенные краны, мостовые, козловые и автокраны и т.п.).

Проблема надежности и безопасности ответственного оборудования и металлоконструкций с каждым годом становится все более актуальной. Особую остроту данной проблеме придает деградация, старение металла и прогрессирующий износ оборудования и конструкций (средний срок эксплуатации которого на разных предприятиях Республики Беларусь составляет более 20–30 лет, а на некоторых и более 40 лет). Об актуальности данного направления исследований свидетельствует включение его в число приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 годы, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17.05.2005 г. № 512 (направление 2.1: «надежность и безопасность машин и технических систем» и оставшихся актуальными и приоритетными в Республике Беларусь на период 2011–2015 г.: рассматриваемые в монографии вопросы полностью соответствует п. 8.10 «Неразрушающий контроль материалов и конструкций» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований РБ на 2011–2015 гг, утвержденных постановлением Совета Министров РБ от 19.04.2010 г. № 585.

Опыт эксплуатации магистральных трубопроводов, ряда оборудования технологических установок нефтеперерабатывающей промышленности, грузоподъемных кранов и механизмов показывает, что иногда увеличение сроков службы оборудования и конструкций может быть не совсем обоснованным, что приводит к аварийным разрушениям оборудования и металлоконструкций, которые не удавалось предупредить. Одной из причин таких разрушений являются изменения физико-механического состояния металла, приводящие к снижению работоспособности конструкции, поэтому контроль свойств металла (в первую очередь неразрушающий) имеет важное значение при оценке состояния металла диагностируемых объектов.

Основная концепция, используемая при диагностике различного оборудования и конструкций, четкая и универсальная для любых металлических объектов. В качестве базовой концепции оценки состояния используется подход, основанный на принципе «безопасной эксплуатации по техническому состоянию», согласно которому оценка технического состояния объекта осуществляется по параметрам технического состояния, обеспечивающим его надежную и безопасную эксплуатацию согласно нормативной и конструкторской документации, а остаточный ресурс – по параметрам технического состояния. В качестве опреде-

ляющих параметров технического состояния принимаются параметры, изменение которых (в отдельности или некоторой совокупности) может привести объект в неработоспособное, неисправное или предельное состояние. Указанная концепция является основной и для работ представленных ниже.

Работы в области диагностики и оценки состояния ответственных металлоконструкций активизировались в последнее время в научных учреждениях на всем постсоветском пространстве. Это связано с тем, что данные исследования направлены на создание условий надежной и безопасной работы оборудования и конструкций, которое уже эксплуатируется длительное время. При этом каждая группа исследователей основывается на ими установленной научной новизне. Так, например, разработан способ диагностики металлоконструкций сосудов и аппаратов давления и определения их остаточного ресурса [1, 2]. В основе данного способа лежит определение скорости смещения температурной зависимости характеристик трещиностойкости металла объектов. Данный метод хорошо зарекомендовал себя и имеет широкое применение, в первую очередь, для объектов нефтехимических предприятий. Однако он также предполагает применение микровырезов из диагностируемой конструкции.

Хорошо зарекомендовал себя при работе с различными металлоконструкциями, в том числе с сосудами и грузоподъемными кранами, метод определения фактического напряженно-деформированного состояния металла магнитным контролем (определением коэрцитивной силы) с использованием магнитного структуроскопа [3, 4, 5].

Указанный метод позволяет определять места с критически высоким уровнем внутренних напряжений – места потенциального разрушения под действием статических нагрузок. Однако данный метод не позволяет выявлять места с минимальным уровнем ударной вязкости, параметром определяющим сопротивление металла динамическим (ударным) нагрузкам.

Вместе с тем, наряду с имеющимися положительными сторонами известного подхода к диагностике различных металлических объектов они имеют и ряд недостатков. Так, например, в большинстве нормативной документации по указанным выше металлическим объектам недостаточно уделяется внимания вопросам оценки фактического уровня механических свойств, степени деградации структуры, а также уровня напряженно-деформированного состояния металла объектов, находящихся в эксплуатации. При этом вопрос рассматривается с позиции:

- обязательного определения твердости металла и возможности отбраковки по твердости [6];
- вырезки металла из конструкции (где это возможно) и определении механических свойств на образцах из вырезки и отбраковки по полученным данным [6, 7];
- применения расчетных методик, практически без объективной информации о фактических механических свойствах на данный момент.

Вырезка образцов из конструкции в любом случае травмирует конструкцию, изменяя уровень напряженно-деформированного состояния в месте отбра. После вырезки, как правило, предусматривается ремонт с использованием сварки, однако это создает дополнительные концентраторы напряжений в кон-

струкции в виде сварных швов и зон термического влияния с изменением структуры металла и его механических свойств на этих участках. Оценка уровня свойств металла без вырезки образцов, только по значениям твердости с применением расчетных методик также весьма приблизительно характеризует металл и его работоспособность.

Следует отметить также непригодность традиционных методов неразрушающего контроля к выявлению дефектов на раннем этапе их развития. Все большее количество специалистов начинают понимать, что более опасным во многих случаях (особенно на стареющем оборудовании) является «преддефектное» состояние металла, когда на уровне структуры произошли необратимые изменения, и повреждение из-за усталости может произойти внезапно и, как правило, в тех зонах, где оно не ожидается. Уровень чувствительности традиционных методов неразрушающего контроля не позволяет выявить «преддефектное» состояние металла [8].

Материал, приведенный в данной монографии, обобщает опыт работ по диагностике различных металлических объектов и базируется на положительных результатах научно-исследовательских работ: ГПОФИ «Диагностика» задание № 24 (2003–2005 гг.) «Разработка теоретических и технологических основ оценки механических свойств материалов малоразрушающим способом», ГКПНИ «Техническая диагностика» задание № 13 (2006–2008 гг.) «Разработка и внедрение методики и пакета прикладных компьютерных программ оценки остаточного ресурса оборудования и металлоконструкций, основанных на косвенном определении комплекса механических свойств металла неразрушающим способом», ГКПНИ «Техническая диагностика» задание № 48 (2009–2010 гг.) «Методология оценки напряженно-деформированного состояния металла сосудов, работающих под давлением, по структурным, механическим и магнитным характеристикам».

Таким образом, разработка эффективной методики неразрушающего контроля и оценки фактического состояния металла, в том числе степени деградации структуры и механических свойств диагностируемой конструкции, которая будет рассматривать проблему диагностики объекта комплексно и максимально объективно, является актуальной для Республики Беларусь, с учетом повышения надежности и безопасности эксплуатации различных ответственных металлических объектов, включающих, в первую очередь, сосуды, работающие под давлением; магистральные трубопроводы; грузоподъемные машины и механизмы.

Глава 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

1.1. Анализ состояния и материального исполнения оборудования и конструкций нефтеперерабатывающей отрасли

Наиболее высокая концентрация ответственного оборудования и конструкций (после АЭС) характерна для нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических предприятий. Указанные предприятия в Республике Беларусь входят в концерн «Белнефтехим». Характерными наиболее крупными их представителями являются ОАО «НАФТАН» (г. Новополоцк), Мозырский нефтеперерабатывающий завод (г. Мозырь), ОАО «ГРОДНО-АЗОТ» (г. Гродно). На данных предприятиях в схеме различных технологических установках эксплуатируется целый ряд оборудования и конструкций подконтрольных Госпромнадзору МЧС РБ. Это различные сосуды, работающие под давлением: реакторы, теплообменники, конденсаторы, холодильники, емкости и т.п. Вопросы надежности и безопасности их эксплуатации с каждым годом становятся все более актуальными, что связано с прогрессирующим старением указанных объектов. Более 60 % опасного в технологическом отношении нефтеперерабатывающего оборудования, подконтрольного органам Госпромнадзора, эксплуатируется свыше 20 лет и выработало нормативный срок эксплуатации [9].

Как правило, у большинства нефтеперерабатывающего оборудования при проектировании заложен нормативный срок эксплуатации 10–25 лет:

- для реакторов и колонн – 20 лет;
- печей – 10 лет;
- теплообменников и конденсаторов-холодильников – 12–20 лет;
- емкостей – 10–12 лет;
- резервуаров – 25 лет.

Однако фактический срок эксплуатации большинства анализируемых объектов на предприятиях Республики Беларусь близок к окончанию проектного, а во многих случаях превышает его.

Проанализируем обобщенные результаты исследований по сроку эксплуатации различных ответственных металлоконструкций на примере ОАО «НАФТАН» – типичного представителя предприятия нефтеперерабатывающей отрасли Республики Беларусь и самого солидного по возрасту (ряд основного технологического оборудования на нем на момент исследований эксплуатировалось более 40 лет) (рисунок 1.1) [10].

Как видно из приведенных данных большинство оборудования эксплуатируется за установленным при проектировании нормативным сроком эксплуатации:

- реакторы – 85 % (эксплуатация более 20 лет);
- колонны – 73 % (эксплуатация более 20 лет);
- печи – 86 % (эксплуатация более 10 лет);
- теплообменники, конденсаторы – 70 % (эксплуатация более 20 лет);
- емкости – 84 % (эксплуатация более 12 лет);

– резервуары – 93 % (эксплуатация более 25 лет).

Очевидно, что процессы старения в материале за такое продолжительное время эксплуатации приводят к деградации структуры и ухудшению механических и эксплуатационных свойств.

Анализ причин отказов и повреждений металла оборудования и конструкций ОАО «Нафтан» (г. Новополок), позволяет разделить их на три основные группы [11]:

1) снижение механических свойств металла и потеря несущей способности конструкции из-за процессов старения металла, в том числе с учетом коррозионных разрушений – 50 % от общего числа причин;

2) разрушения, связанные с дефектами металла, обусловленными загрязнением металла неметаллическими включениями на стадии изготовления, нарушениями условий и режимов термической и термомеханической обработки – 28 %;

3) разрушения, связанные с прочими причинами – 22 %.

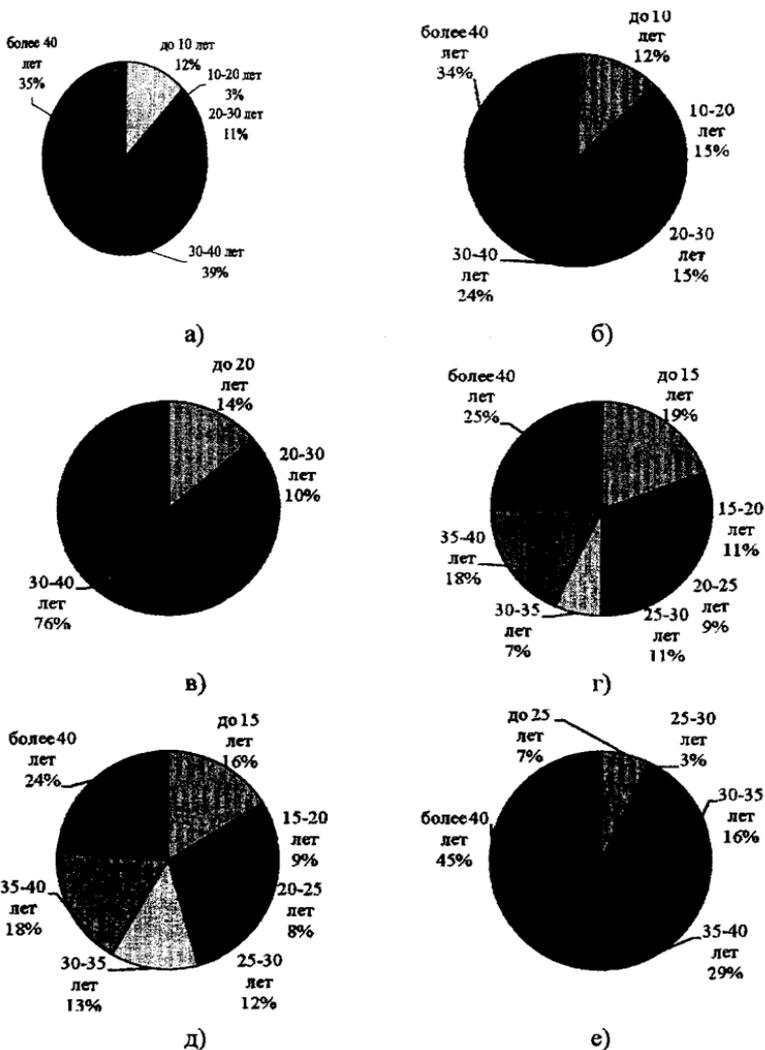
Как видно наиболее существенной причиной разрушения металлоконструкций является старение металла. Можно прогнозировать усиление данной тенденции в последующий период. Поэтому изучение особенностей деградационного старения и выявление его на ранней стадии является весьма важной и актуальной задачей.

На техническое состояние и работоспособность любой металлоконструкции влияют следующие деградационные процессы [2]:

- 1) процессы изменения геометрии элементов конструкции;
- 2) процессы коррозионного повреждения;
- 3) процессы образования и развития макродефектности;
- 4) процессы изменения (деградации) механических свойств материалов.

Все указанные процессы взаимосвязаны и зависят, при условии правильно подобранных основных и сварочных материалов от характеристик технологического процесса (температуры, давления, коррозионной активности продукта), а также от срока эксплуатации данного оборудования.

Процессы старения металла при длительных сроках эксплуатации вызывают деградацию структуры и резкое снижение уровня механических свойств, что влечет за собой потерю работоспособности конструкции, а иногда и аварийную ситуацию. В основе старения металла лежит понятие «деградация», при этом под деградацией понимается постепенное понижение какого-либо качества, процесс изменения чего-либо в сторону ухудшения, утрата ранее накопленных свойств [12]. Следует учитывать, что в деградационных процессах, происходящих в материале, имеют место изменения структурного состояния, старение (естественное, искусственное, деформационное, динамическое), образование и развитие механических повреждений в поверхностных слоях и в объеме материала, физико-химические повреждения (радиационные, коррозионные, эрозионные).



а – реакторы; б – колонны; в – печи;
 г – теплообменники и конденсаторы-холодильники;
 д – емкости; е – резервуары

Рисунок 1.1 – Фактические сроки эксплуатации оборудования и металлоконструкций (на примере ОАО «Нафтан»)

Одним из применяемых методов контроля (которым можно контролировать и старение металла) является соответствие твердости основного металла, а также сварного шва и зоны термического влияния требуемому диапазону значений твердости для разных сталей. Указанный метод оговорен в действующих в РБ Правилах по сосудам [6]. При этом несоответствие фактической твердости заданному диапазону является отбраковочной характеристикой и свидетельствует о протекании деградиационных процессов в металле, в том числе и процессов старения.

Однако, основным последствием старения металла является прежде всего снижение способности металла сопротивляться распространению в нем трещин. Так, например, тепловая хрупкость ферритных и ферритно-перлитных сталей обусловлена развитием при температурах $+250...+500$ °С (с выдержкой более 100 ч) процессов сегрегации вредных примесей по границам зерен и выделением карбидов высокой плотности, вызывает ослабление границ зерен и разрушение многих металлоконструкций нефтехимической отрасли. При этом твердость, предел прочности и предел текучести металла у потенциально аварийной конструкции практически не изменяются. Изменения видны лишь при определении характеристик ударной вязкости и трещиностойкости [13].

Старение при длительных сроках эксплуатации в сварных конструкциях из нержавеющей сталей приводит к выпадению и укрупнению избыточных фаз в зоне термического влияния, что резко снижает стойкость к межкристаллитной коррозии [14]. Однако указанная склонность выявляется только путем проведения специальных испытаний на вырезанных из конструкции образцах после обработки в специальных растворах (согласно ГОСТ 6032–2002).

Бесспорно, что разрушающие методы контроля при определении прочности, пластичности, ударной вязкости, склонности к межкристаллитной коррозии на вырезках являются весьма эффективными, позволяющими оценить количественные характеристики свойств. Однако указанные методы не всегда приемлемы для оборудования и объектов нефтехимии, т.к. приходится из элементов оборудования изготавливать образцы для испытаний и шлифы.

Вместе с тем в настоящее время все большую актуальность приобретают малоразрушающие и неразрушающие методы контроля текущего состояния металла. Так, например, весьма перспективен и широко применяется в нефтехимии метод малых проб и методика определения степени охрупчивания сталей [2]. Также существует методика определения стойкости к межкристаллитной коррозии неразрушающим методом: на поверхности оборудования шлифуется полоска глубиной до 1 мм и если на поверхности риски от шлифования пересекаются поперечными линиями, то это свидетельствует о разрушении границ зерен, т.е. о межкристаллитной коррозии [14, с. 195].

Как было сказано выше, одним из основных последствий старения высоколегированных сталей является снижение способности металла сопротивляться распространению в нем трещин. Разработана методика определения показателя трещиностойкости металлов и сплавов [15], которая заключается в определении и замере трещин в углах отпечатка индентора при определении твердости по Виккерсу:

$$S = 10 \cdot \frac{HV}{(c \cdot 10^{-6})}, \text{ МПа/м} \quad (1.1)$$

где S – показатель трещиностойкости, МПа/м; HV – твердость по Виккерсу, МПа; c – длина трещины, мкм.

Указанная методика показала свою эффективность при работе с хрупкими материалами, а при старении высоколегированных сталей охрупчивается, в первую очередь зона термического влияния.

Таким образом, в результате анализа процессов старения металла и областей с наибольшим уровнем старения, а, следовательно, и деградации механических свойств металла можно определять критические (слабые) места практически любой конструкции.

Наиболее опасными местами конструкции являются:

- области монтажных сварных соединений (зона термического влияния и металл шва);
- области контакта сред парогазовой и жидкой (для различных емкостей);
- области с минимальной толщиной стенки (после проведения толщинометрии);
- области сварки штуцеров и т.п.;
- области ремонтных сварных соединений.

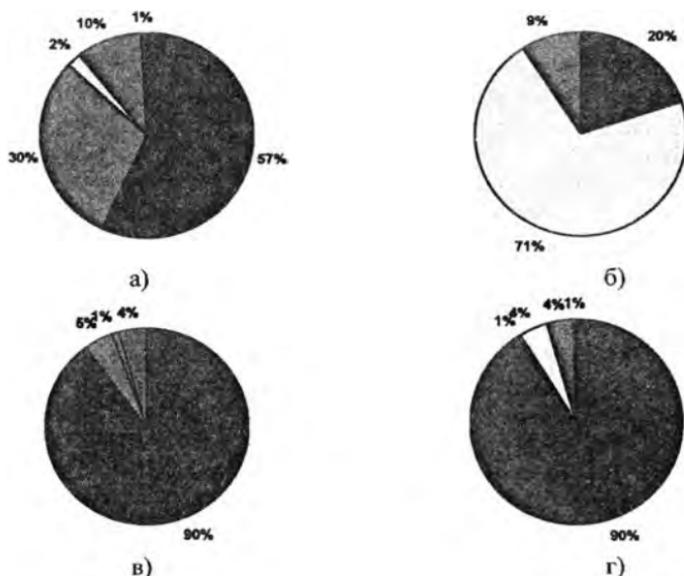
Очевидно, что выбору слабых, критических мест диагностируемой конструкции следует уделить повышенное внимание при разработке методики диагностирования (подробнее см раздел 4.6 данной монографии).

Указанные процессы имеют специфические особенности для различных групп сталей с учетом значительного влияния на них легирования и условий эксплуатации. В связи с этим было проанализировано материальное исполнение нефтехимического оборудования и металлоконструкций (на примере ОАО «НАФТАН»). Результаты анализа представлены на рисунке 1.2.

Анализ приведенных данных показывает, что для изготовления большинства нефтеперерабатывающего оборудования и конструкций преимущественно используется четыре группы сталей:

- 1) конструкционные углеродистые стали (основные из них: сталь Ст3, сталь 20);
- 2) низколегированные кремнемарганцевые стали (основные из них: 16ГС, 17ГС, 09Г2С);
- 3) теплоустойчивые стали (основные из них: 12ХМ, 15ХМ, 15Х5М);
- 4) коррозионностойкие стали (основные из них: 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 08Х13, 12Х13).

При изготовлении сосудов и аппаратов, печей, резервуаров и трубопроводов из конструкционных углеродистых сталей наибольшее распространение имеет сталь 20, из низколегированных кремнемарганцевых – 09Г2С, из теплоустойчивых – 15Х5М, из коррозионностойких – 12Х18Н10Т. Поэтому при разработке и апробации неразрушающего способа определения механических свойств использованы стали, являющиеся характерными представителями указанных групп – сталь 20, 09Г2С, 15Х5М, 12Х18Н10Т.



а – сосуды и аппараты; б – печи; в – резервуары; г – трубопроводы;
 ■ – углеродистые стали; ■ – низколегированные кремнемарганцевые стали;
 – теплоустойчивые стали; ■ – коррозионно-стойкие стали; ■ – другие группы сталей

Рисунок 1.2 – Материальное исполнение технологических установок нефтеперерабатывающего завода (на примере ОАО «Нафтан»)

К тому же, как показали исследования, результаты, полученные для данных сталей, распространяются и на другие стали их группы. Химический состав исследуемых сталей приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Химический состав исследуемых сталей [17, 18]

Марка стали	Химический состав, %											
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	P	S	Cu	As	N
Сталь 20	0,17-0,24	0,35-0,65	0,17-0,37	≤0,25	≤0,25	–	–	≤0,035	≤0,04	≤0,25	≤0,08	–
09Г2С	≤0,12	0,50-0,80	1,30-1,70	≤0,30	≤0,30	–	–	≤0,035	≤0,04	≤0,30	≤0,08	≤0,008
15Х5М	≤0,15	≤0,5	≤0,5	4,5-6,0	≤0,6	0,45-0,60	0,03	≤0,030	≤0,025	≤0,20	–	–
12Х18Н10Т	≤0,12	≤0,8	≤2,0	17,0-19,0	11,0-13,0	–	5С-0,7	≤0,035	≤0,02	≤0,30	–	–

Сталь 20 по содержанию углерода и прочности близка к углеродистым сталям обыкновенного качества, однако, благодаря улучшенному раскислению и пониженному содержанию серы и фосфора, она является более вязкой и мо-

жет эксплуатироваться до температур минус 30...40 °С [6]. Сталь 20 применяется в горячекатаном и нормализованном состояниях для сварных корпусов аппаратов с рабочей температурой, как правило, до +350 °С, работающих без коррозионноактивных сред, корпусов теплообменников и емкостей трубопроводов и других объектов [6, 19].

Сталь 09Г2С характеризуется повышенной прочностью по сравнению с углеродистыми сталями. В горячекатаном и нормализованном состояниях сталь имеет феррито-перлитную структуру, высокие прочностные свойства при нормальной и повышенных температурах, в том числе теплоустойчивость, высокие пластичность и вязкость в исходном состоянии, а также стабильность этих свойств и структуры после теплового воздействия на металл, низкий порог хладноломкости, отсутствие склонности к тепловой и отпускной хрупкости, а также к разупрочнению при длительных нагревах, повышенную стойкость против механического старения, высокие технологические свойства [19]. В нормализованном состоянии сталь 09Г2С обладает наилучшим уровнем значений механических свойств. В результате механического старения ударная вязкость стали как в горячекатаном, так и в нормализованном состояниях понижается, а порог хладноломкости сдвигается в сторону более высоких температур. Старение при 450...500 °С не вызывает заметного изменения механических свойств, определяемых при испытаниях на растяжение, несколько снижает ударную вязкость и смещает порог хладноломкости стали на 10...20 °С в сторону более высоких температур. Сталь 09Г2С применяется для корпусов, днищ, фланцев и других деталей сварных сосудов и аппаратов установок: атмосферно-вакуумной трубчатки, газофракционирующих, гидрогенизационного обессеривания нефтепродуктов, каталитического риформирования бензина, глубокой депарафинизации масел и др.

Изделия из стали 15Х5М (трубы, поковки, фитинги и др.) в нефтеперерабатывающей промышленности применяют как в состоянии отжига, так и в улучшенном состоянии. Металл труб из стали 15Х5М обладает высокой пластичностью, вязкостью, невысокой твердостью, что обеспечивает хорошую вальцоваемость труб в ретурбендах и решетках теплообменников. Микроструктура отожженной стали 15Х5М – феррит с карбидами. После улучшения сталь приобретает высокую прочность как при нормальной, так и при повышенной температурах. Микроструктура стали после улучшения – сорбит. Сталь 15Х5М широко применяется для печных, коммуникационных и некоторых технологических трубопроводов, пучков теплообменников установок атмосферной трубчатки, атмосферно-вакуумной трубчатки, термического крекинга, каталитического крекинга, установок гидроочистки дизельного топлива, блока риформинга установок каталитического риформинга и др.

Для стали 12Х18Н10Т характерно низкое отношение предела текучести к пределу прочности. Это способствует значительному упрочнению стали при холодной обработке давлением. Сталь имеет высокие характеристики: коррозионную стойкость, ударную вязкость, относительные удлинение и сужение, технологичность. Микроструктура стали 12Х18Н10Т – аустенитная. Сталь применяется как конструкционный материал для изделий, которые в процессе изго-

товления подвергаются холодной штамповке и сварке – обшивки, оболочки, емкости, трубопроводы и др.

При этом следует учитывать, что сталь СтЗ, 09Г2С, сталь 20, 16ГС и 17ГС – основные стали, используемые для изготовления и ремонта различных грузоподъемных машин и механизмов, а стали 16ГС и 17ГС – основные стали для магистральных трубопроводов.

Поэтому в качестве объектов для дальнейших более подробных исследований были выбраны именно эти стали указанных групп.

1.2. Анализ магистральных трубопроводов

1.2.1. Анализ фактического состояния

Роль магистральных трубопроводов в экономике России и Беларуси трудно переоценить. В наследство от Советского Союза нам досталась уникальная система магистральных трубопроводов для транспортировки природного газа, нефти и нефтепродуктов. Так, например, в России в настоящее время эксплуатируется более 240 тыс. км магистральных трубопроводов и около 350 тыс. км промысловых трубопроводов [20]. Система магистральных трубопроводов в Беларуси и России имеет общие особенности и одна из них связана со сроком их эксплуатации: подавляющая их часть была построена в 60–80-е годы 20 века, поэтому характерной чертой является их прогрессирующее старение. В этой связи интерес представляют следующие статистические данные, представленные в таблице 1.2 [21].

Таблица 1.2 – Возраст магистральных нефтепроводов

Возраст, лет	1995 год		2000 год	
	%	Протяженность, км	%	Протяженность, км
До 20	46	22 713	27	13 419
20–30	29	14 413	32	15 904
Более 30	25	12 574	41	20 377

Магистральные трубопроводы стареют из года в год: средний возраст газопроводов в России составляет 16 лет, 30 % газопроводов эксплуатируется более 20 лет, 40 тыс. км выработали нормативный срок эксплуатации [21]. Если экстраполировать указанные данные на текущий год, то цифры будут еще более серьезными: около 70 % трубопроводов эксплуатируется за нормативным сроком эксплуатации или вплотную подходят к данному возрасту.

Проанализируем более подробно магистральные трубопроводы, находящиеся на территории Республики Беларусь.

По территории Республики Беларусь проходит сеть магистральных газопроводов ОАО «Белтрансгаз» диаметром от 50 до 1400 мм, протяженность которых в однониточном исчислении составляет более 7300 км. Если проанализировать возраст трубопроводов (таблица 1.3), то ситуация также неутешительна: около

11 % трубопроводов эксплуатируется за пределами установленного срока эксплуатации и 39 % вплотную подходят к этому сроку.

Таблица 1.3 – Распределение магистральных трубопроводов по срокам эксплуатации (по материалам доклада И.И.Герасимчика, заместителя главного инженера, начальника УЭОЛЧ ОАО «Белтрансгаз» «Энергетическая безопасность Республики Беларусь. Система надежности и безопасности» (по состоянию на апрель 2007 г.)

Срок эксплуатации, года	Количество	
	км	%
До 10	1 540	21
10–20	2 126	29
21–33	2 847	39
Более 33	805	11

При этом часть газопроводов эксплуатируется с начала 60-х годов XX века и срок эксплуатации которых приближается к 50 годам (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Перечень газопроводов Республики Беларусь, имеющих максимальный фактический срок эксплуатации (по материалам доклада И.И. Герасимчика, заместителя главного инженера, начальника УЭОЛЧ ОАО «Белтрансгаз» «Энергетическая безопасность Республики Беларусь. Система надежности и безопасности» (по состоянию на апрель 2007 г.)

№ п/п	Наименование объекта	Условный диаметр, мм	Протяженность, км	Год ввода в эксплуатацию
1	Газопровод Дашава-Минск	700/800	184,89	1960
2	Газопровод-отвод Кобрин-Брест-Жабинка	150/200 100	41,24 1,83	1960 1960
3	Газопровод к г. Гомель (Щорс-Гомель)	500	32,5	1961
4	Газопровод к ГРС Белозерск	300/350	11,48	1961
5	Газопровод к ГРС г. Гродно	500/350	129,29	1963
6	Газопровод к ГРС п. Березовка	100	11,87	1963
7	Газопровод к ГРС п. Колосово	100	2,226	1963

Руководство ОАО «Белтрансгаз» видит решение вопросов повышения надежности и безопасности видит в применении комплексной методики диагностики трубопроводов и их систем, а также более широком внедрении новых прогрессивных способов и систем контроля технического состояния. На момент опубликования данной монографии часть газопроводов, указанных в таблице 1.4, выведены из эксплуатации и заменены на новые.

В Республике Беларусь эксплуатацию магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов на территории Беларуси осуществляют три предприятия трубопроводного транспорта: Унитарное предприятие «Запад-Транснефтепродукт», Республиканское унитарное предприятие «Гомельтранснефть Дружба», Новополоцкое рес-

публиканское унитарное предприятие по транспорту нефти «Дружба». Перечисленные предприятия осуществляют снабжение углеводородным сырьем нефтеперерабатывающих заводов, расположенных в городах Новополоцк и Мозырь, и осуществляют транзитные поставки в страны Западной Европы, Латвию и Украину. Транспортировка осуществляется по шести коридорам: Унеча-Полоцк-Скрудалиена и Сургут-Полоцк проходят по северо-восточной части, Дисна-Фаниполь, соединяющий северную и центральную часть республики, в данный момент выведен из эксплуатации и Унеча-Мозырь-Брест, Бельчица-Мозырь и Мозырь-Броды, проходят по южной части страны. Общая протяженность технических коридоров, в которых проложены магистральные нефтепроводы (МНП) и магистральные нефтепродуктопроводы (МНПП) по Беларуси составляет 1231,5 км, а суммарная длина всех трубопроводов в однониточном исчислении – 3613,5 км.

Возрастной состав существующих магистральных нефтепроводов различен – от новых участков до участков эксплуатирующихся более 45 лет (таблица 1.5) [22].

Таблица 1.5 – Магистральные нефтепроводы и нефтепродуктопроводы, расположенные на территории Беларуси с максимальным сроком эксплуатации [22]

№ п/п	Наименование объекта	Условный диаметр, мм	Протяженность, км	Год ввода в эксплуатацию
1	МНП «Унеча-Мозырь» I	820	183	1966
2	МНПП «Унеча-Стальной Конь» (345-559 км)	530	215	1966
3	МНП «Мозырь-Брест» I	630	441	1966
4	МНП «Унеча-Полоцк» I	820	380	1964
5	МНПП «Унеча-Полоцк» (53–433 км)	530	380	1964

На основании анализа представленных данных можно сделать вывод о том, что большинство магистральных нефтепроводов выработало свой нормативный срок службы, установленный Временным республиканским классификатором, равный 33 годам.

По результатам обработки статистических данных можно сделать вывод, что в жизненном цикле трубопровода можно выделить три основных этапа:

- приработки (длится в течение 3–4 лет);
- этап стабилизации (наступает после этапа приработки и длится приблизительно до 20 лет эксплуатации);
- этап старения (начинает проявляться после 20 лет) [23, 24, с. 41, 25].

При этом подавляющее большинство эксплуатирующихся нефте- и продуктопроводов как в Республике Беларусь так и в России [26–28] относятся к третьему этапу – этапу прогрессирующего старения и деградации механических и эксплуатационных свойств. Поэтому фактический срок эксплуатации трубопроводов приближается к тому моменту, когда значительно возрастает интенсивность отказов и аварий. По мере увеличения возраста трубопроводов

(таблица 1.6) усиливается тенденция к снижению их надежности и, следовательно, повышению вероятности возникновения аварии [22, 29, 34].

Таблица 1.6 – Сроки эксплуатации магистральных нефте-и продуктопроводов Республики Беларусь

Срок эксплуатации	Протяженность в одноконтинентном исчислении	Процент от общей протяженности		
		2000 г.	2005 г.	2010 г.
Нефтепроводы				
30 лет и более	1889,5	29 %	59 %	62 %
От 20 до 30 лет	575,5	33 %	5 %	2 %
От 10 до 20 лет	–	2 %	–	–
Менее 10 лет	441	11 %	11 %	11 %
Нефтепродуктопроводы				
30 лет и более	616,9	16 %	18 %	18 %
От 20 до 30 лет	90,5	2 %	–	–
От 10 до 20 лет	278	–	7 %	7 %
Менее 10 лет	–	7 %	–	–
Все трубопроводы				
30 лет и более	2506,4	45 %	77 %	80 %
От 20 до 30 лет	666	35 %	5 %	2 %
От 10 до 20 лет	278	2 %	7 %	7 %
Менее 10 лет	441	18 %	11 %	11 %

Проанализируем статистику повреждений, отказов и аварий на магистральных трубопроводах.

Так, по данным управления по надзору в нефтяной и газовой промышленности Госгортехнадзора России, основными техническими причинами аварий на трубопроводном транспорте являются [20]:

- повреждения в результате внешних (случайных) воздействий – 33 %;
- брак, допущенный при проектировании и монтаже – 24 %;
- брак, допущенный в заводских условиях производства труб – 17 %;
- наружная коррозия – 20 %;
- нарушение регламента эксплуатации – 6 %.

Проанализируем статистику аварий на предприятиях трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов Республики Беларусь по данным журналов регистрации аварий и инцидентов (согласно исследованиям, проводимым специалистами кафедры трубопроводного транспорта Полоцкого государственного университета) [29, 34]. Распределение плотности аварий в целом по отрасли представлено на рисунке 1.3 [34]. Как видно из представленного графика значительного роста аварий не наблюдается, несмотря на большой срок эксплуата-

ции всей системы магистральных трубопроводов. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что в последние годы предприятиями периодически проводится внутритрубная диагностика с помощью внутритрубных инспекционных приборов высокого разрешения, что позволяет обнаружить, классифицировать и измерить, провести расчет прочности существующих дефектов и предпринять меры по обеспечению безопасности трубопровода [27].

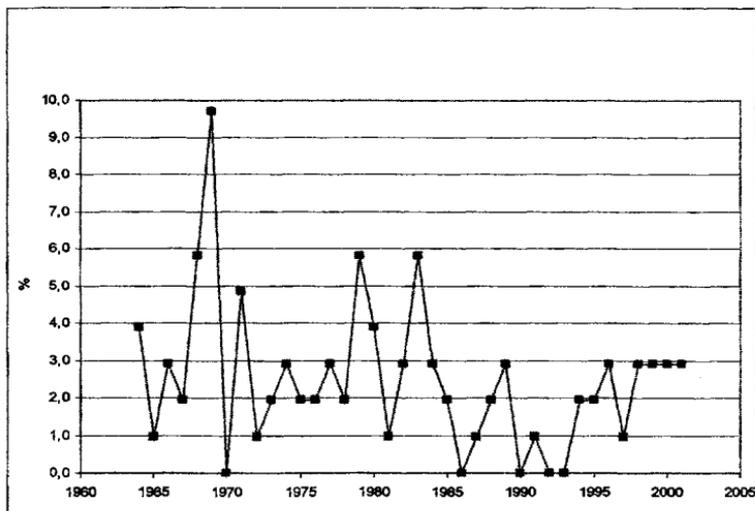


Рисунок 1.3 – Распределение плотности аварий в зависимости от срока эксплуатации [34]

В результате диагностических исследований выявляется значительное количество дефектов различного типа. Так, например, на магистральном нефтепродуктопроводе «Унеча-Дисна» зарегистрировано более полумиллиона дефектов следующих типов [29, 34]: дефекты стенки трубы (внутренняя и внешняя потери металла, расслоения, включения), дефекты геометрии трубы (вмятины и гофры), аномалии продольных и поперечных швов, классифицированы как смещения, несплошности плоскостного типа (непровары, трещины, несплавления). Из всего объема обнаруженных дефектов 99,5 % составляют дефекты типа «потеря металла». В тоже время около половины данных дефектов составляют дефекты малых геометрических размеров – менее 10 % от толщины стенки трубопровода. Анализ распределения данных дефектов в окружном направлении показывает равномерное распределение дефектов по окружности трубы. Это говорит о том, что вероятная причина возникновения данного типа дефектов – особенности изготовления трубы. Большинство обнаруженных дефектов не являются опасными и не приведут к аварии. При этом используемые в настоящее время средства диагностики, включая средства внутритрубной

диагностики, не позволяют обнаружить все опасные дефекты. Степень обнаружения опасных дефектов примерно 40–50 % (на сварных соединениях ожидается больше дефектов, чем на основном металле труб) [30, с. 154].

Прочность и остаточный ресурс дефектных участков магистральных трубопроводов зависят от множества факторов: геометрические параметры дефектов, геометрические параметры трубы, механические характеристики трубы и сварных соединений, характер нагруженности трубы, остаточные напряжения в трубопроводе, скорость протекания коррозионных процессов и ряд других. Оценка опасности дефектов и соответственно разрушающее и допустимое давление в данной точке трубопровода может быть рассчитано по ряду методик, в том числе и официально утвержденных [31]. Существующие методики однако не позволяют точно оценить уровень допустимости дефектов сварных соединений. Таким образом, невыявленные дефекты сварных соединений, вместе с недостаточно развитым аппаратом их идентификации и оценки опасности вместе с разнородностью механических свойств сварных соединений и общей деградацией металла с учетом длительной эксплуатации большинства из них могут быть основной причиной аварий на магистральных трубопроводах в ближайшем будущем.

Одной из последних аварий с тяжелыми последствиями являлось разрушение бесшовной трубы диаметром 377 мм и толщиной стенки 9 мм магистрального нефтепродуктопровода «Участок № 41» в Бешенковичском районе на 361,7 км 23 марта 2007 года. Раскрытие магистральной трещины произошло по дефекту, классифицированному по результатам внутритрубной диагностики, как расслоение с потерей сигнала вблизи кольцевого сварного шва [32]. Еще одна крупная авария произошла в 2003 году на резервной нитке подводного перехода нефтепровода «Мозырь–Брест» через озеро Глиницкое. Причиной разрушения стали коррозионные повреждения сварных швов [33].

Анализ произошедших аварий (рисунок 1.4) [34], проведенный по данным журналов учета аварий и инцидентов на предприятиях трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов Беларуси, показал, что наиболее значимым фактором, вызывающим аварий (57,7 %) являются дефекты сварных соединений, что подтверждает изложенные выше рассуждения.

В работах российских исследователей [35–37] также отмечен факт преобладания отказов магистральных трубопроводов, связанных с разрушением труб по заводским сварным соединениям. В ряде источников отмечается, что почти все разрушения имеют один и тот же характер: разрыв вдоль образующей по сварному шву или по зоне термического влияния, особенно на концах труб. При этом отсутствует заметное утонение стенки трубы у кромок разрыва, а также остаточные деформации по периметру трубы. Зачастую, разрушение стенок труб происходит при средних рабочих давлениях в 2–2,5 раза ниже по сравнению с расчетным разрушающим давлением при однократном нагружении. Основной причиной разрушений отмечается низкая пластичность и вязкость сварных соединений в сочетании с концентрацией напряжений, вызванной формой усиления шва и неточной сборкой кромок труб под фаску. В работе [38] приведены результаты

анализа эксплуатационных отказов магистрального нефтепровода, эксплуатируемого РУП «Гомельтранснефть «Дружба». Отмечается, что 80 % всех аварийных ситуаций связаны с разрушением труб по продольным сварным соединениям, разрушение происходит практически всегда при установившемся постоянном давлении от 4,0 до 6,0 МПа и то, что разрушению способствовала тяжелая работа трубопровода в предшествующий период эксплуатации.



Рисунок 1.4 – Причины аварий на магистральном транспорте нефти Республики Беларусь.

Совпадение статистических данных причин аварий на магистральных трубопроводах Российской Федерации и Республики Беларусь объясняется тем, что условия строительства трубопроводов были идентичны и использовалась одинаковая нормативная база. Продолжительную часть времени трубопроводы также эксплуатировались в равных технических условиях. Кроме того, условия эксплуатации трубопроводов после распада Советского Союза коренным образом не изменялись и осуществлялись на прежней нормативной базе. Ошибки, допущенные на стадиях проектирования, сооружения и на начальном этапе эксплуатации также были одинаковыми.

Таким образом, если проанализировать и обобщить статистику, отказов, аварий и повреждений на магистральных трубопроводах, то можно установить следующие закономерности:

- более половины аварий на трубопроводах связано с накоплением повреждений в металле трубы и сварных швах, а также с деградацией структуры и, следовательно, механических и эксплуатационных свойств металла;
- наиболее опасным («узким») элементом трубопроводной системы являются сварные соединения.

1.2.2. Анализ процессов старения, происходящих в металле магистральных трубопроводов

При длительной эксплуатации металла трубопровода в результате комплексного воздействия целого ряда факторов: физико-химические воздействия перекачиваемого продукта, воздействия внешней среды (температура, коррозионная активность), нагруженность системы избыточным давлением (его величина и возможные перепады) происходит изменение механических свойств металла, а также изменение структурного состояния металла, что ведет к снижению эксплуатационных свойств и характеристик трубопровода и, в конечном счете, к снижению надежности и безопасности его эксплуатации [39–43]. В связи со значительным числом отказов по причине разрушения сварных соединений в Республике Беларусь [34] необходимо, в первую очередь, уделять внимание именно данным элементам трубопровода.

Вместе с тем, как считает ряд исследователей [23, 39] нормативный срок эксплуатации магистральных трубопроводов равный 33 года не имеет научно обоснованного физического смысла и носит условный характер. Очевидно, что фактический срок безопасной эксплуатации определяется фактическими свойствами конкретного участка трубопровода, на что влияет целый ряд факторов. К ним относятся: качество и исходные механические и эксплуатационные свойства металла труб, качество сварочных материалов и качество выполнения сварочно-монтажных работ и т.п. Поэтому, очевидно, что ресурс безопасной эксплуатации целесообразно назначать по комплексному анализу деградации структуры и фактических механических свойств диагностируемого участка трубопровода.

Анализ материального исполнения линейной части магистральных трубопроводов показывает, что материал труб для магистральных трубопроводов можно разделить на 4 основные группы [44, 45]:

1 группа – стали углеродистые обыкновенного качества и качественные (сталь СтЗсп, сталь СтЗпс, сталь 20 и др.). При этом применение кипящих сталей запрещено;

2 группа – стали низколегированные с марганцем и кремнием (сталь 17ГС, 17Г1С, 17Г1С-У 13Г1С-У и др.);

3 группа – дисперсионно-твердеющие стали (сталь 13Г2АФ, 16Г2АФ, 10Г2АФЮ, 15Г2АФЮ и др.);

4 группа – стали контролируемой прокатки (сталь 09Г2ФБ, 08Г2ФЮ, 10Г2ФБ и др.).

Применение сталей первой группы ограничивается как правило диаметром (рекомендованы для трубопроводов малых диаметров до 530 мм).

Применение сталей 3 и 4 групп сдерживается, в первую очередь, их стоимостью по сравнению со сталями 2-й группы (их стоимость примерно на одну треть выше) [45]. Анализ материального исполнения большинства магистральных газо-, нефте- и продуктопроводов на территории Республики Беларусь показывает, что большинство из них изготовлены из сталей 2 группы – низколегированных кремнемарганцевых сталей (стали 17ГС, 17Г1С, 17Г1С-У 13Г1С-У).

Системные исследования свойств материалов магистральных трубопроводов, проработавших длительное время, начались в конце прошлого века и продолжаются в настоящее время. Это связано с необходимостью максимально объективной оценки ресурса диагностируемого трубопровода и относительно длительным сроком эксплуатации большинства магистральных трубопроводов. Для оценки степени старения металла и сварных соединений зачастую используют отношение значения какого-либо параметра определенного при испытаниях образцов после длительной эксплуатации к значению этого же параметра, определенному до эксплуатации или установленного по паспортным данным [46]. Процессы, протекающие в металле труб в ходе длительной эксплуатации, могут оказывать влияние, как на стандартные механические свойства, так и на нестандартные, оцениваемые по специальным методикам [47].

В литературных источниках встречаются разные и иногда даже противоречивые данные об изменении механических свойств металла труб магистральных трубопроводов, проработавших длительное время. Проанализируем их более подробно.

Так, например, в работе [48] на основании результатов исследований более 50 образцов труб, проработавших 25 и более лет, сделан вывод, что изменения механических свойств металла труб, свидетельствующие о наличии деформационного старения металла и подлежащие учету при оценке работоспособности отсутствуют. В результате проведенных ими исследований признаки усталости труб (бороздчатой структуры) вне зоны дефектов, не были выявлены, что говорит об отсутствии значимых пластических деформаций труб в процессе их эксплуатации. Предел текучести и временное сопротивление не ниже значений, указанных в технических условиях в период изготовления труб, показатели относительного поперечного сужения свидетельствуют о сохранении ресурса пластичности.

Иной точки зрения придерживаются другие исследователи. Так, например, представители Уфимской школы в своих работах [24, 30, 40, 49, 50] приводят анализ технического состояния магистральных нефтепроводов, и закономерности изменения механических свойств основного металла труб и металла сварных соединений. Приведенные в работах данные по изменениям механических свойств также свидетельствуют о старении металла и возможности определения степени старения по изменению механических характеристик. Согласно представленным данным повышаются прочностные характеристики металла (предел прочности и предел текучести). Пластические свойства металла (относительное удлинение и сужение) снижаются. Предлагается рассчитывать склонность к старению по специальной эмпирической формуле коэффициента упрочнения. Исследование свойств материала магистральных трубопроводов Полоцк-Мажейкяй (20 лет эксплуатации), Полоцк-Вентспилс (30 лет эксплуатации) и нефтепродуктопровода Полоцк-Вентспилс (26 лет эксплуатации) приведенное в работе [52] также подтверждает повышение предела прочности и предела текучести для стали 17ГС (коэффициенты упрочнения 1,05 и 1,16 соответственно) и снижение пластических свойств.

В работах белорусских исследователей [53, 54] подтверждается возрастание свойств статической прочности на 5–15 % и снижение пластических характеристик на 20–40 % для стали марки 17Г1С после эксплуатации более 20 лет.

Таким образом, можно констатировать тот факт, что длительная эксплуатация металла магистральных трубопроводов приводит к некоторому увеличению прочностных характеристик (предела текучести и предела прочности) и снижению пластических характеристик (относительное удлинение и сужение).

Исследования, проведенные во ВНИИСПНефть [55], на трубных сталях (Ст3, 17ГС, 19Г, 14ХГС, 14ГН и др.), применяемых для магистральных нефтепроводов, в исходном состоянии и после эксплуатации их в течение различного срока их эксплуатации (от 7 до 31 года) методами рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии, металлографии, механических испытаний, исследования водородопоглощения и экстрагирования водорода, аннигиляции позитронов и других методами показывают, что процесс старения в указанных сталях в общем случае происходит следующим образом. В процессе эксплуатации в течение 15 лет в сталях происходит постепенное увеличение плотности дислокаций на 5–10 %, увеличение количества изгибных контуров и уменьшение их ширины в среднем на 200–400 Å, а также изменение геометрии цементитных пластин: ширина их увеличивается примерно на 100 Å, а длина уменьшается на 10 Å и более. Коэффициент диффузии водорода при поглощении на порядок выше, чем при выделении водорода из металла. Это объясняется тем, что в процессе эксплуатации в сталях возникают микродефекты (дислокации, микropopы, полосы скольжения, микротрещины), вследствие чего уход водорода из металла затрудняется. Например, эксплуатация стали 17ГС приводит к заметному возрастанию времени жизни позитронов – до 160 пс [55]. Это свидетельствует о значительном увеличении дефектности стали в процессе эксплуатации. В процессе старения углерод выделяется из твердого раствора, закрепляет дислокации и упрочняет ферритную матрицу. Работа зарождения трещины для металлов снижается с увеличением срока эксплуатации. Работа развития трещины уменьшается со снижением температуры тем интенсивнее, чем больше срок эксплуатации.

При эксплуатации в течение 15–20 лет происходят более интенсивные изменения этих параметров. Эти изменения сопровождаются разбиванием цементитных пластин и образованием в отдельных областях нерегулярного цемента. Распад цемента в этот период происходит до 30 %.

В период от 20 до 30 лет эксплуатации металла вышеописанные структурные изменения постепенно развиваются и к концу периода происходит полное раздробление цементитных пластин. Уменьшение цементитной фазы (Fe_3C) составляет около 50 % по отношению к его первоначальному количеству. Аналогичный характер изменения наблюдается и со следующими параметрами:

- а) изменение параметра кристаллической решетки;
- б) изменение межплоскостного расстояния кристаллической решетки;
- в) появление создаваемых или действующих напряжений;
- г) суммирование напряжений. Указанные параметры с течением эксплуатации растут, претерпевая определенный скачок в области 15–20 лет.

Металлографические данные показывают [39], что в процессе длительной эксплуатации сталей в областях вблизи дефектов образуются полосы скольжения. Полосы скольжения в зернах состаренного металла расположены на относительно большом расстоянии друг от друга. В некоторых случаях (после 30 лет эксплуатации) на полосах скольжения наблюдается образование субмикротрещины.

Характерными показателями сопротивления хрупкому разрушению сталей являются ударная вязкость и температура хрупко-вязкого перехода [56]. Хотя характеристики хрупкого разрушения не являются расчетными параметрами при определении толщины стенки трубопровода, в действующей документации на них накладываются определенные ограничения [44].

Испытания при динамическом изгибе образцов с надрезом [40, 47, 57] показали существенное снижение значений $KCV^{40^{\circ}\text{C}}$ и $KCV^{20^{\circ}\text{C}}$ (в среднем с 55–70 Дж/см² до 30–50 Дж/см²) для основного металла. Ударная вязкость сварных соединений $KCV^{40^{\circ}\text{C}}$ и $KCV^{20^{\circ}\text{C}}$ находится в диапазоне 19–78 Дж/см² и 10–95 Дж/см² соответственно. Значительное рассеяние значений объясняется большим количеством дефектов в сварных швах. Тем не менее, не вызывает сомнений факт значительного снижения показателей ударной вязкости с течением времени эксплуатации. Зафиксировано смещение критической температуры хрупко-вязкого перехода в сторону более высоких температур. Так после 25–30 лет эксплуатации трубопровода порог хладноломкости переходит в область положительных температур. Снижается сопротивление, как зарождению трещины, так и ее распространению, причем в наибольшей мере длительная эксплуатация оказывает влияние на сопротивление зарождению трещины, вызывая его снижение в зависимости от срока эксплуатации на 50–80 %. Выявлена также закономерность снижения характеристик хрупкому разрушению в зависимости от расположения труб по длине участка. С приближением к началу участка трубопровода значения $KCV^{40^{\circ}\text{C}}$ и $KCV^{20^{\circ}\text{C}}$ снижаются. Аналогично ведут себя и другие характеристики хрупкого разрушения – работы зарождения и распространения трещины. Для сварных соединений отсутствует монотонная зависимость изменения характеристик хрупкому разрушению в зависимости от силовых условий эксплуатации, что объясняется автором большой дефектностью сварных швов. Отмечено [40, 47, 57], что при увеличении содержания углерода в стали, усиливается снижение вязкопластичных свойств металла в процессе эксплуатации.

Согласно исследованиям приведенным в работе [52] во время эксплуатации трубопровода также происходит снижение параметров, определяющих сопротивление хрупкому разрушению трубных сталей. Согласно приведенным данным показатель старения по параметру $KCV^{20^{\circ}\text{C}}$ для стали 17ГС составляет 38,57 %.

В работах [24, 30, 49, 50] опубликованы результаты исследований сопротивления трубных сталей хрупкому разрушению. Согласно представленным данным снижение ударной вязкости $KCV^{40^{\circ}\text{C}}$ и $KCV^{20^{\circ}\text{C}}$ за время эксплуатации труб магистральных трубопроводов может достигать 65 % по отношению к исходному материалу. Для сталей 17ГС, 19Г, 14ГН, Х52 значение ударной вязкости падает ниже допустимого значения при температуре –40 °С. Статистическая обработка данных показала, что вариации по значениям испытанных

партий образцов достаточно малы и не превышают 30 %, что свидетельствует о достаточно устойчивых показателях. Данные фрактографических исследований изломов указывают на уменьшение волокнистой структуры и увеличение зернистой структуры, что свидетельствует об увеличении склонности металла к хрупкому разрушению с возрастанием срока эксплуатации.

Белорусские исследователи также подтверждают факт изменения свойств металла магистральных трубопроводов с течением времени. Так, например, работах [38, 42, 58–60] описаны методы поддержания и частичного восстановления прочностной надежности линейной части нефтепровода, эксплуатируемого РУП «Гомельтранснефть Дружба», базирующиеся на мониторинге его технического состояния и экспериментальных исследованиях деградации свойств трубной стали в процессе длительной эксплуатации. Авторами проведены испытания на ударную вязкость двух партий образцов, толщина которых равна толщине стенки трубы. Первая серия имела надрез на внутренней поверхности стенки, а вторая – на наружной. Значения ударной вязкости образцов исходного материала в обеих группах совпали, а значения ударной вязкости после эксплуатации на образцах с надрезом на внутренней стороне оказались в среднем на 18 % ниже значений полученных на образцах с надрезом на внешней стороне. Указанными исследованиями установлено, что сопротивление усталостному разрушению элементов труб после длительной эксплуатации существенно ниже, чем до эксплуатации. В результате длительной эксплуатации значение предела выносливости в зоне основного металла снижается на 14,9 %, а в зоне сварного шва на 9,5 %, при этом абсолютное значение предела выносливости у сварного соединения существенно ниже, чем у основного металла. Было установлено [58–60], что у образцов со сварным соединением трещины наблюдаются в зоне термического влияния по участку структур неполной закалки. Зарождение трещин наблюдается с поверхности на расстоянии 0,1–0,3 мм от сварного шва.

Характерной особенностью проявления старения трубных сталей является снижение ударной вязкости металла, при этом качественные зависимости указанного снижения одинаковы для основных отечественных трубных сталей (стали 17ГС, 14ХГС, 09Г2С, 16Г2У, 19Г): через 30 лет эксплуатации ударная вязкость снижается в 3–5 раз (так, например, для стали 17ГС – основной стали для большинства магистральных трубопроводов снижение с 260 Дж/см² до 80–90 Дж/см²) (см. рисунок 1.5) [21].

Обобщая результаты исследований по вопросу изменения структуры и свойств металла магистральных трубопроводов, можно констатировать, что при длительных сроках эксплуатации (наиболее четко и устойчиво прослеживается снижение после эксплуатации 30 и более лет) происходит снижение пластических, некоторое повышение прочностных свойств, значительное снижение ударной вязкости и порога хладноломкости. При этом указанные изменения наиболее существенны для металла сварных соединений.

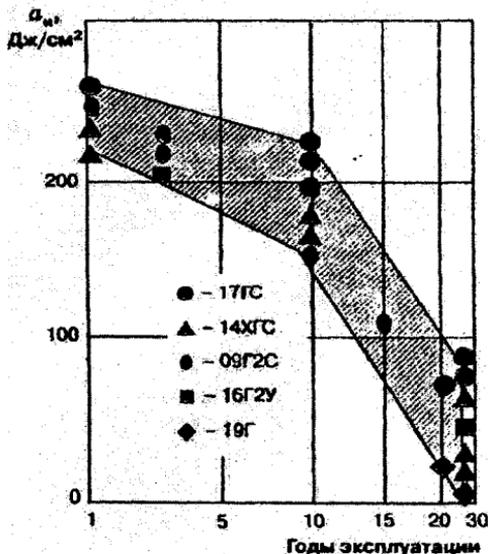


Рисунок 1.5 – Изменение ударной вязкости трубных сталей при эксплуатации газопроводов [21]

Учитывая эти обстоятельства, актуальной задачей для системы магистральных трубопроводов является разработка эффективных и, в первую очередь, неразрушающих методов оценки фактического состояния металла, его механических свойств и структуры с целью повышения надежности функционирования и продление ресурса всей трубопроводной системы.

Таким образом, учитывая все вышесказанное можно сделать следующие выводы.

1. На территории Республики Беларусь находится развитая сеть магистральных газо-, нефте- и нефтепродуктопроводов, большая часть которых имеет срок эксплуатации приближающийся к нормативному, а также превышающий нормативный (33 года). Учитывая возраст системы и заложенные при сооружении показатели надежности можно утверждать, что магистральные трубопроводы Беларуси входят в период старения, когда интенсивность отказов и аварий будет возрастать.

2. Характерной особенностью сталей применяемых для изготовления и ремонта магистральных трубопроводов является их старение при эксплуатации, наиболее ярко проявляющееся после 30 лет эксплуатации и заключающееся в снижении пластических, некотором повышении прочностных свойств, и, прежде всего, в значительном снижении ударной вязкости (до 3–5 раз по сравнению с исходными значениями после 30 и более лет эксплуатации).

3. Анализ материального исполнения большинства магистральных газо-, нефте- и продуктопроводов на территории Республики Беларусь показывает, что

большинство из них изготовлены из сталей 2 группы – низколегированных кремнемарганцевых сталей (чаще всего это стали 17ГС, 17Г1С, 17Г1С-У, 13Г1С-У).

4. В качестве основных мер повышения безопасности эксплуатации линейной части длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов необходимо рассмотреть разработку и более широкое применение эффективных неразрушающих методов контроля фактического состояния металла и его механических свойств.

5. Разработка неразрушающего метода определения ударной вязкости металла как элемента комплексной методики диагностики технического состояния актуальна и для магистральных трубопроводов, с позиции определения степени старения, а, следовательно, и корректировки технологических параметров эксплуатации, а также повышения надежности и безопасности эксплуатации всей системы магистральных трубопроводов.

1.3. Состояние парка грузоподъемных машин и механизмов

В настоящее время в Республике Беларусь уделяется повышенное внимание строительным объектам. При этом для предприятий отрасли отчисления в инновационный фонд увеличены на 13,5 %, что обусловлено целым рядом причин, главная из которых – наращивание объемов и темпов жилищного строительства. Материально-техническая база отрасли уже не позволяет в полной мере реализовать масштабные задания. Уровень обновления основного капитала предприятий стройиндустрии в 90-х годах составлял 1–2 процента в год вместо необходимых 8–10 %. Изношенность основных средств росла и к настоящему времени значительно превышает критический уровень 60 процентов, принятый в международной практике. По сравнению с 1990 годом парк строительной техники сократился в 2,5–4 раза. Около 90 % строительных машин и механизмов эксплуатируются с истекшим сроком службы. Например, в Минске износ активной части производственных фондов организаций и предприятий стройиндустрии достиг 80 %, а на стройках белорусской столицы работает на четверть меньше башенных кранов, чем необходимо [61].

В связи с этим, в рамках выполнения Государственной комплексной программы развития материально-технической базы строительной отрасли на 2006–2010 годы, предусматривается обновление парка основных строительных машин и механизмов, средств малой механизации, техническое перевооружение предприятий крупнопанельного и объемно-блочного домостроения. За счет различных источников финансирования в 2006–2010 годах планируется обновить парк основных машин, механизмов и технологической оснастки более чем на 10,2 тысячи единиц. Реализуется инвестиционный проект по организации производства башенных кранов на могилевском заводе «Строммашина» в сотрудничестве с российскими партнерами. Уже изготовлен опытный образец башенного крана, в дальнейшем планируется, что предприятие будет ежегодно изготавливать более 60 кранов [61].

Однако в настоящий момент ситуация с этим видом техники (кранами) в Республике Беларусь особенно в строительной отрасли критическая. В частно-

сти, на 1 января 2006 года только в Минске и Минской области зарегистрировано 5298 кранов. Из этого количества 4747, то есть 89 %, выработали свой эксплуатационный ресурс, установленный заводами-изготовителями и техническими нормативно правовыми актами (ТНПА). Динамика снижения уровня технического состояния кранового хозяйства республики за последние годы угрожающая, а именно: в 2001 году из 6200 кранов 68 % отработали нормативный срок эксплуатации, в 2002-й из 5942 кранов срок службы истек у 74 %, в 2003-й – из 5663 кранов у 84 %, в 2004-м году из 5441 кранов у 87 %. Таким образом, за пять лет кранов стало меньше на тысячу и «постарели» они на 20 %. Еще более критическая ситуация в регионах. В Молодечненском регионе (Молодечненский, Вилейский, Воложинский и Мядельский районы) из 30 кранов опломбировано 26, в Пуховичском запрещена работа всех 14 имеющихся, в Узденском остановлены семь из семи и т.д. [62].

Эта проблема поднималась неоднократно специалистами Проматомнадзора МЧС Республики Беларусь и по их мнению ситуация с кранами в республике не просто удручающая – она катастрофическая и если не принять соответствующих мер, примерно через пять лет мы окажемся в сложнейшем положении» [62].

Наиболее простое решение данной проблемы, являющееся основным в зарубежных странах, это замена существующего кранового парка новой техникой, однако очевидно, что это потребует привлечения значительных средств (стоимость одного крана около 0,6 млн долларов США), в первую очередь валютных, так как основными изготовителями кранов являются российские производители. Кроме этого трудно прогнозировать сроки изготовления такого количества техники, в связи с уже имеющимися планами загрузки и текущими заказами российских заводов, а как указано ранее, отечественные предприятия находятся только на первом этапе организации производства.

Из отмеченного выше можно сделать вывод, что наиболее реальным решением в настоящее время является продление эксплуатации кранов с истекшим сроком службы. Для этого необходима разработка эффективной методики и нормативной базы по оценке текущего состояния кранов, которые должны основываться на современных аналитических, научно обоснованных методах неразрушающего контроля и расчетных методиках, с прогнозированием сроков безопасной и надежной эксплуатации кранов [63, 64].

Действующие в настоящее время в республике ТНПА, в частности «Методические рекомендации по проведению технического диагностирования грузоподъемных кранов с истекшим сроком эксплуатации» (г. Минск: БОИМ, 2006 г.), разработанные на базе российского РД 22-318-91 «Краны башенные. Методические указания по проведению обследования грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы» (Москва: СКГБ БК, ПО Строймашина, 1991 г.), не в полной мере отвечают требованиям по обеспечению прогнозирования реальных сроков безопасной и надежной эксплуатации кранов, что подтверждается авариями и травматизмом связанными с эксплуатацией различного грузоподъемного оборудования последнего времени. Применяемая в данных документах методика релаксационных испытаний [65, 66], основанная на анализе данных, получаемых при испыта-

ниях образцов по параметрам микропластической деформации (ПМД) отличается от стандартных испытаний как способом нагружения образцов, так и видом измеряемых характеристик. Основной характеристикой, используемой для оценки эксплуатационного состояния материала является величина предела текучести. Отличительной особенностью ее является обязательность микровырезов из диагностируемой конструкции (из элементов крановых конструкций для последующего анализа вырезают образцы размерами от 2×2×4 мм до 4,5×4,5×9 мм) [66].

Диагностика ряда металлоконструкций и определения их остаточного ресурса [1, 2] основана на определении скорости смещения температурной зависимости, характеристик трещиностойкости металла объектов. Однако испытания проводят также на миниобразцах, вырезанных из конструкции.

Одной из основных причин разрушений металлоконструкций кранов является деградация и старение металла и сварных соединений, определяющих эксплуатационные характеристики крана. Изменение физико-механического состояния металла при длительной эксплуатации, его старение и охрупчивание под воздействием ряда факторов, в том числе за счет знакопеременных циклических нагрузок и термоциклирования, происходят как в основном металле так и в сварных соединениях, как правило, в зоне термического влияния, что приводит к резкому снижению надежной и безопасной работоспособности всей конструкции [63]. В связи с этим контроль свойств металла и его текущего состояния имеет важнейшее значение при оценке возможности эксплуатации различных конструкций и объектов, в том числе кранов, как характерного представителя ответственных сварных металлоконструкций.

Анализ материального исполнения основных элементов металлоконструкций большинства грузоподъемных кранов, эксплуатируемых в Республике Беларусь, показывает, что большинство их можно разделить на 3 группы:

- металлоконструкции, изготовленные из сталей обыкновенного качества, в первую очередь, это сталь Ст3 с различной степенью раскисления (Ст3сп, Ст3пс, Ст3кп);

- металлоконструкции из качественных углеродистых сталей (в первую очередь, сталь 20);

- металлоконструкции из низколегированных марганцево-кремниевых сталей (основная из них: сталь 09Г2С).

Эти данные также подтверждаются и литературными источниками, в том числе и нормативного характера [7, 67]

Таким образом, проведенный анализ состояния ряда ответственных металлоконструкций показывает, что одним из направлений решения поставленных вопросов, как уже отмечалось ранее, является проведение научных исследований и разработка системы и методики диагностики, позволяющей обеспечить проведение объективного мониторинга состояния сварных соединений и основного металла диагностируемой конструкции с прогнозированием и продлением сроков эксплуатации, что гарантированно позволит обеспечить необходимый уровень надежности и безопасности при эксплуатации различного оборудования и механизмов.

Глава 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Обзор существующих методов определения механических свойств металлов

Определение и изучение механических свойств сталей, применяемых при изготовлении ответственных металлоконструкций, которые проанализированы в предыдущих разделах данной работы, является одной из важнейших задач, решение которой способствует оценке текущего состояния и остаточного ресурса объектов. Вероятностная оценка и контроль показателей прочности и пластичности конструкционных сталей является необходимым звеном при оценке текущего состояния металла диагностируемых объектов, позволяющим достоверно оценивать их фактическое состояние и, в конечном счете, остаточный ресурс. Однако, до настоящего времени не разработан дешевый, простой и достаточно эффективный метод именно неразрушающего контроля механических свойств металла, крайне необходимый для ответственных металлоконструкций. Между тем одним из критериев для оценки качества сталей, которые в свою очередь влияют на долговечность и надежность всей конструкции, являются именно характеристики механических свойств. К ним относятся прочность и пластичность, характеризуемые пределами прочности, текучести; относительными удлинением и сужением, ударной вязкостью и некоторыми другими. Отдельным свойством выступает твердость. Обобщенный анализ этих показателей позволяет выполнить прогноз о текущем состоянии металла, а также позволяет судить о потенциале работоспособности конструкции и о возможном характере ее разрушения (хрупком или вязком).

Все существующие методы определения механических свойств металла оборудования и конструкций можно разделить на разрушающие и неразрушающие (рисунок 2.1). При этом очевидно, что максимально объективную информацию о механических свойствах металла диагностируемой конструкции (пределе прочности, пределе текучести, относительном удлинении и сужении, ударной вязкости) можно определить стандартными испытаниями на растяжение и ударный изгиб на образцах, изготовленных из диагностируемой конструкции. Данный вопрос просто решается на стадии изготовления конструкции, так в практику для ответственных металлоконструкций введено понятие контрольное сварное соединение (КСС). КСС – это сварное соединение, вырезанное из числа производственных сварных соединений или сваренное отдельно, но являющееся идентичным или однотипным по отношению к производственным сварным соединениям [6]. Указанное соединение предназначено для оценки механических свойств сварных соединений, в первую очередь, разрушающими методами. Однако, при текущем диагностировании конструкции, находящейся в эксплуатации для определения механических свойств, как правило, нужна вырезка образцов из конструкции.

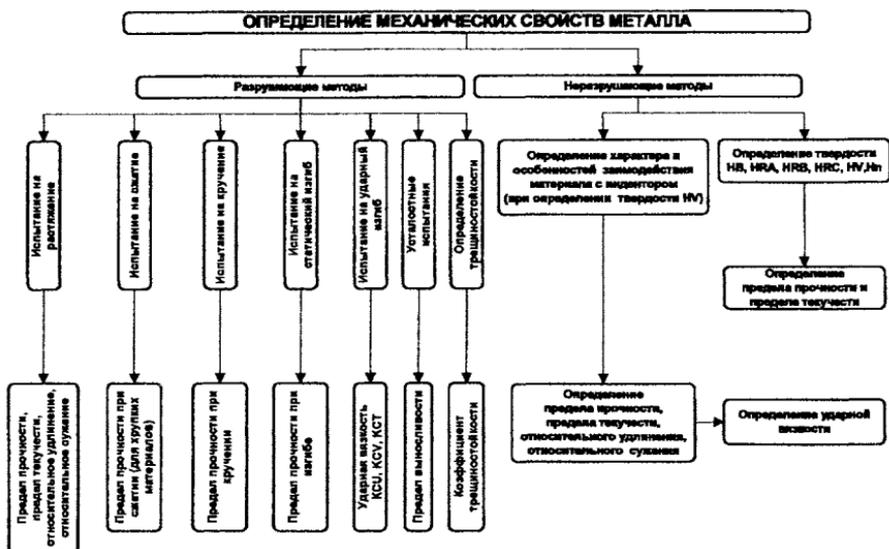


Рисунок 2.1 – Методы определения механических свойств металла

Существующие нормативные документы, регламентирующие определение фактического состояния металлоконструкции, предусматривают, как правило, разрушающие методы контроля механических свойств [6, 7, 67]. Для оценки механических характеристик сталей применяются различные виды стандартных испытаний (ГОСТ 1497, ГОСТ 9454, ГОСТ 7268 и др.). Стандартные испытания на растяжение, ударную вязкость в настоящее время входят в основные способы оценки текущего состояния и работоспособности любой металлоконструкции. Как правило, проведение таких испытаний трудоемко, требует больших затрат времени и средств. Но, самое главное, указанные испытания требуют изготовления образцов, вырезанных из диагностируемой конструкции, что резко изменяет надежность ее дальнейшей работы. Возможность вырезки образцов из контрольных сварных соединений (без вырезки из конструкции) существует только при изготовлении и ремонте конструкции [6, 7]. Эти методы относятся к разрушающим и приводят к повреждению детали или конструкции, а иногда размеры детали не позволяют изготовить из них стандартные образцы (например, пружины предохранительных клапанов, штоки компрессоров и т.д.). Особые трудности возникают при оценке свойств деталей и конструкций, работающих при различных температурах и давлениях. Во многих случаях механические свойства металла определять стандартными испытаниями на растяжение нецелесообразно, поскольку, они предусматривают вырезку стандартных образцов для испытаний. Металлоконструкция при этом становится непригодной к дальнейшей эксплуатации без проведения ремонтных работ. При стопроцентном контроле или малом размере деталей, а также на эксплуатируемой конструкции такие испытания

практически неосуществимы. Кроме того, испытания на растяжение дают усредненные значения механических свойств металла, тогда как в ряде случаев необходимо располагать данными о прочностных свойствах металла конструкции на конкретных участках ее поверхности [68, 69], являющихся линиями опасных сечений, в которых действуют наибольшие напряжения в эксплуатационных условиях. Это в полной мере относится к их сварным швам и зонам термического влияния различных сварных конструкций.

В настоящее время широко применяются мини-вырезки из конструкций, из которых изготавливают образцы для испытаний и шлифы [68, 70]. Они являются эффективными, однако позволяют получать ограниченный объем металла, из которого невозможно изготовить стандартные образцы для механических испытаний. Полномасштабные вырезки наносят непоправимый ущерб прочности конструкции в целом, а предельно допустимое количество вырезок из конструкции ограничено.

Из существующих методов контроля неразрушающие методы являются наиболее перспективными, т.к. обеспечивают экономию не только трудовых, но и материальных ресурсов, а самое главное, позволяют избежать вырезки металла из конструкции, а, следовательно, изменения фактического напряженно-деформированного состояния металла в диагностируемой конструкции. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является разработка неразрушающего оперативного, универсального, эффективного, безобразцового и свободного от трудоемкой процедуры изготовления образцов метода контроля механических свойств металла, позволяющего оценить механические характеристики материала диагностируемых объектов.

Механические свойства материала отражают разные стороны сложного процесса деформирования и разрушения его под воздействием внешних нагрузок. По современным представлениям механические характеристики определяются тремя группами факторов: структурой материала, размерами и формой конструкции объекта, условиями нагружения.

Механические испытания проводятся с целью проверки соответствия механических характеристик и качества металла и сварных соединений требованиям стандартов.

К основным разрушающим методам определения механических свойств относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, усталость, ударную вязкость, трещиностойкость [71–74]. Испытания на растяжение позволяют определить предел прочности (временное сопротивление) σ_B , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ_5 и относительное сужение ψ . Испытания на сжатие – предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$. Испытания на изгиб – предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$. Испытания на кручение – предел прочности при кручении $\sigma_{круч}$. Испытания на усталость – пределы выносливости при изгибе σ_{-1} и кручении τ_{-1} . Испытания на ударную вязкость – параметры KCU , KCV и KCT . Испытания на трещиностойкость – коэффициент интенсивности напряжений k_{Ic} .

Предел прочности σ_B и предел текучести $\sigma_{0,2}$ характеризуют сопротивление материала пластической деформации и являются критериями прочности при

статических нагрузках [71]. У хрупких металлов при растяжении при достижении максимальной нагрузки материал разрушается без образования шейки. Поэтому σ_B в этих случаях – критерий сопротивления разрушению (обычно сопротивления отрыву, а не срезу) [72, с. 26]. У пластичных металлов максимальная нагрузка при растяжении соответствует переходу от равномерной к сосредоточенной пластической деформации. Поэтому в этих случаях σ_B не отражает изменения сопротивления металла пластической деформации [72, с. 26]. Практическое значение предела текучести $\sigma_{0,2}$ двоякое [72, с. 21]. Во-первых, $\sigma_{0,2}$ определяет область упругой деформации. При прочих равных условиях: чем выше $\sigma_{0,2}$, тем выше сопротивление металла начальной пластической деформации. Во-вторых, положение $\sigma_{0,2}$ по отношению к σ_B существенно влияет на свойства металла в области пластической деформации и разрушения. При прочих равных свойствах материала пластичность и вязкость падают с увеличением $\sigma_{0,2}$. Чем ниже $\sigma_{0,2}$, тем раньше начинается пластическая деформация и связанное с ней обычно благоприятное перераспределение напряжений и тем более пластичным и вязким оказывается металл. С повышением $\sigma_{0,2}$ опасность хрупкого разрушения увеличивается. Диаграмма механического состояния также показывает, что с повышением $\sigma_{0,2}$ при прочих равных условиях увеличивается склонность металла к переходу от вязкого разрушения (путем среза) к хрупкому разрушению (путем отрыва). При этом между пределами прочности и текучести существует эмпирическая взаимосвязь, один из видов которой: $\sigma_{0,2} = 0,75 \times \sigma_B$ [72, с. 21].

Характеристики пластичности: δ_3 , ψ и, в первую очередь, ударная вязкость характеризуют сопротивление материала хрупкому разрушению, которое считается наиболее опасным [71, с. 126]. Пластичность металла зависит от количества примесей, включений, степени однородности металла и особенностей его структуры. При этом степень однородности металла определяют содержание и распределение в нем газов, вредных примесей, неметаллических включений, ликвации химических элементов и т.д.

Ударная вязкость является мерой надежности материала, мерой сопротивления ударному (динамическому) разрушению и определяет его способность поглощать механическую энергию в процессе эксплуатации под нагрузкой, т.е. характеризует сопротивляемость материала разрушению вследствие разрастания возникшей в месте концентрации напряжений микротрещины. Микротрещина, если она не растёт, может существовать достаточно долго в материале, не снижая его работоспособности. Рост трещины при низкой пластичности металла приводит к его разрушению.

Трещиностойкость – группа параметров, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины. Оценку трещиностойкости проводят по коэффициенту интенсивности напряжений k_{Ic} [71, с. 126].

Среди неразрушающих безобразцовых методов определения механических свойств наиболее широко распространение получили испытания, основанные на определении твердости, характеризуемой значениями твердости по Бринеллю (*HB*), Роквеллу (*HRA*, *HRB*, *HRC*), и Виккерсу (*HV*).

2.2. Обзор и анализ существующих методов определения твердости

2.2.1. Классификация методов определения твердости

В работе [73] показано, что измерение твердости можно рассматривать как местные механические испытания поверхностных слоев материала. Методы измерения твердости получили широкое распространение благодаря следующим их достоинствам [74–77]:

1) между твердостью пластичных металлов и сплавов (к которым относятся и большинство конструкционных сталей), определяемой способом вдавливания, и другими механическими свойствами (например, пределом прочности σ_b), существует количественная зависимость (например, $\sigma_b \approx C \cdot HB$ (где C – коэффициент, HB – твердость по Бринеллю);

2) неразрушающий метод испытаний, т.к. измерение твердости не влечет за собой разрушения изделия и серьезных его повреждений, и после измерения объект можно использовать по своему назначению (а для определения прочности, пластичности и ударной вязкости необходимо изготовление специальных образцов из изделия или из его части);

3) измерение твердости можно проводить и в тех случаях, когда вырезка образцов из детали невозможна или нежелательна;

4) твердость можно измерять на деталях небольшой толщины, а также в очень тонких слоях или на локальных участках (например, на участках области термического влияния сварных соединений), не превышающих десятых долей миллиметра или в микрообъемах металла (измерение микротвердости);

5) измерение твердости по технике выполнения значительно проще, чем определение прочности, пластичности и ударной вязкости; т.к. возможно с помощью переносных твердомеров непосредственно на диагностируемой конструкции и не требует специальной подготовки поверхности – достаточно обработать небольшой участок в месте будущего воздействия;

6) измерением твердости можно осуществить 100%-й контроль деталей и узлов в условиях эксплуатации практически в любом месте, в том числе в сварных швах и зонах термического влияния.

Наряду с самостоятельным значением в системе механических испытаний твердость играет важную вспомогательную роль в решении ряда задач материаловедения и технологии металлов. Опубликованные результаты ряда работ открыли большие информационные возможности метода твердости, что позволяет судить по значению твердости и характеру отпечатка с достаточно высокой точностью не только о механических свойствах, получаемых при испытании образцов на растяжение, сжатие, ударный изгиб, но и об изменении свойств и фазового состава металлов.

Так, например, в работе [72] показано, что измерение твердости можно рассматривать как местные механические испытания поверхностных слоев материала.

Кроме того, возможность получения диаграмм испытания на твердость (с различными формами инденторов) [77] позволяет находить корреляцию твер-

дости с пределами прочности, текучести, характеристиками пластичности, износостойкостью и т.д. К настоящему моменту развиты теоретические основы испытания на статическую и динамическую твердость, что позволяет осуществлять дальнейшую широкую программу устанавливать и уточнять связи между параметрами твердости и другими свойствами исследованных материалов.

Существуют следующие основные группы методов определения твердости: вдавливание индентора, царапание алмазной пирамидой (склерометрия), метод маятниковой и упругой отдачи [74, 75, 78] (см. рисунок 2.2). Наиболее распространена первая группа методов. В зависимости от формы индентора различают твердость по Бринеллю (*НВ*), Роквеллу (*HR*), Мейеру (*НМ*), Виккерсу (*HV*), Кнупу (*HKN*) и др. [75]. В исследовательских лабораториях и заводской практике широкое распространение получили как статические, так и динамические методы определения твердости и микротвердости с помощью инденторов различной формы и размеров. Эти методы основаны на образовании конечного пластического отпечатка на поверхностях испытуемых образцов или объектов. Во всех стандартных методах, применяемых на практике, твердость материала оценивается величиной некоторого условного среднего напряжения (методы Бринелля, Виккерса и т.д.) или величиной деформации при заданных условиях нагружения (метод Роквелла, Супер-Роквелла).

Твердость по Бринеллю [79] определяют путем вдавливания в материал стального шарика диаметром 10; 5 или 2,5 мм и рассчитывают как отношение нормальной нагрузки N к площади поверхности отпечатка, оставшегося после снятия нагрузки [74, 75, 78]:

$$HВ = \frac{2 \cdot N}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ МПа}, \quad (2.1)$$

где D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

Твердость по Роквеллу [80] определяют в безразмерных единицах из отношения при заданной нагрузке глубины внедрения индентора к 2 мкм. Для сверхтвердых и твердых материалов применяется алмазный конус с углом при вершине 120° , для мягких ($HВ < 450$) – шарик диаметром 1,59 мм [74, 75, 78].

Твердость по Мейеру по схеме измерения не отличается от твердости по Бринеллю. Ее находят из отношения нагрузки к площади проекции отпечатка шарика на плоскость, перпендикулярную направлению действия нагрузки [75].

Микротвердость по Виккерсу [81] определяют путем вдавливания в исследуемый материал четырехгранной алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° [74, 75, 78]. Микротвердость вычисляется по формуле:

$$HВ = 1,854 \cdot \frac{N}{d^2}, \text{ МПа}, \quad (2.2)$$

где N – нормальная нагрузка, Н; d – диагональ отпечатка, мм.

Микротвердость по Кнупу определяют путем вдавливания алмазной пирамиды с углами между противоположными гранями 130° и 172° [75].

Пластическая твердость [82] определяется путем вдавливания шара по ГОСТ 18835.

Метод склерометрии реализуется при оценке твердости по Моосу [83]. Твердость по Моосу оценивают путем царапания одного минерала другим, сравнивая исследуемый материал с эталонами.

Маятниковый метод (твердость по Шору) применяется при исследовании крупногабаритных деталей. Твердость определяется по высоте отскока от исследуемого тела свободно падающего маятника с бойком [75].

Твердость, определенная вдавливанием, характеризует сопротивление металла пластической деформации, твердость, определенная царапанием, – сопротивление металла разрушению (для большинства металлов путем среза), твердость, определенная по отскоку, – упругие свойства металла.

Вместе с тем при определении твердости и пересчете ее на другие механические характеристики следует учитывать степень однородности материала по сечению [77]. При этом следует различать следующие случаи:

1) материал однороден по всему сечению изделия (свойства поверхностного слоя не отличаются от свойств сердцевины). В этом случае определение механических свойств по твердости даст информацию о свойствах всего изделия;

2) материал неоднороден (свойства поверхностного слоя отличаются от свойств сердцевины). В этом случае определение механических свойств по твердости даст информацию только о свойствах поверхностного слоя;

3) материал неоднороден по всему сечению. В этом случае определение механических свойств по твердости даст информацию только о свойствах поверхностного слоя, но по ним можно судить о средних свойствах металла всего изделия.

2.2.2. Особенности определения твердости при квазистатическом внедрении индентора

В работе [77] предложен метод определения основных механических свойств стали по твердости, который основан на аналогии диаграмм растяжения и вдавливания сферического индентора. При этом диаграмма твердости строится в координатах «напряжение – деформация». Для построения диаграммы твердости производится вдавливание шарика под действием различных увеличивающихся нагрузок в одну и ту же лунку. При постоянно возрастающей нагрузке на шар в поверхностном слое лунки возникают сначала упругие деформации, затем малые пластические, которые увеличиваясь, достигают предельной величины, в результате чего в лунке может наступить разрушение. Напряжения в лунке, определенные в моменты, когда в ней возникают упругие деформации, пластические деформации и разрушение, будут характеризовать соответственно сопротивление материала упругому деформированию, пластическому деформированию и разрушению. Для конструктивных углеродистых и перлитных низколегированных сталей разработаны ГОСТ 22761 [84] (метод определения σ_B по НВ) и ГОСТ 22762 [85] (метод определения $\sigma_{0,2}$ по Н_{0,2}).

В работе [76] предложено число твердости, определяемое методом вдавливания шарика в большом интервале нагрузок, не зависящее от нагрузки и диаметра шарика. Числом твердости служит отношение:

$$H = \frac{P - P_0}{\pi D h}, \text{ МПа}, \quad (2.3)$$

где P – нагрузка при испытании, Н; P_0 – критическая нагрузка, при которой в центре отпечатка возникает пластическая деформация, Н; D – диаметр шарика, мм; h – глубина восстановленного отпечатка, мм.

Твердость H является своеобразной «пластической» твердостью металла, которая представляет собой модуль упрочнения материала при вдавливании в него сферического индентора [76]. Установлена аналитическая зависимость между твердостью H и твердостью по Бринеллю HB , твердостью по шкале B Роквелла и твердостью по Виккерсу HV [76]:

$$HB = \frac{H}{\left(1 - \frac{P_s}{P}\right) \cdot \left(1 + \frac{W}{h}\right)}. \quad (2.4)$$

$$H = \frac{9000}{130 - HRB}. \quad (2.5)$$

$$HV = 0,82 \cdot H. \quad (2.6)$$

В работах [86–89] показано, что кривизна испытываемой поверхности влияет на результаты измерений твердости. Если поверхность неровная (криволинейная или с выступами), то отдельные участки в различной степени участвуют в сопротивлении вдавливанию и деформации, что приводит к ошибкам в измерении твердости. Поэтому при измерении твердости на деталях и конструкциях следует выполнять только плоские шлифованные площадки. Например, в работе [86] установлена зависимость твердости металлов от кривизны испытываемой поверхности. С увеличением непараллельности поверхностей образца твердость уменьшается. Уменьшение твердости обусловлено разложением нагрузки, прилагаемой к индентору, на составляющие. Твердость по Бринеллю и Роквеллу практически не зависит от изменения шероховатости поверхности [86]. Твердость по Виккерсу увеличивается с понижением шероховатости поверхности. Это обусловлено влиянием наклепа поверхностного слоя, возникающего в результате механической обработки образца [86].

В работе [87] предложена методика учета кривизны вогнутой и выпуклой цилиндрических поверхностей при измерении на ней твердости HRB . Для вогнутой и выпуклой цилиндрических поверхностей соответственно:

$$HRB = HRB^0 - \Delta HRB; \quad (2.7)$$

$$HRB = HRB^0 + \Delta HRB; \quad (2.8)$$

где HRB^0 – твердость цилиндрической поверхности; ΔHRB – величина поправки к числу твердости.

В работах [88, 89] разработаны методы измерения твердости как на выпуклых, так и на вогнутых поверхностях любой формы с произвольным сочетанием их главных радиусов кривизны и при испытаниях сферическим, коническим и пирамидальным инденторами.

В работе [90] разработана методика определения пластической твердости H на криволинейных поверхностях с помощью индентора цилиндрической формы, которая позволяет при любой кривизне испытываемой поверхности обойтись без сложных ориентирующих устройств и повысить надежность испытаний.

2.2.3. Особенности косвенного определения механических свойств при определении твердости на металлоконструкциях

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников (монографий, журнальных статей, патентов, рекламных материалов, аннотаций реферативных журналов и др.) за последние 20 лет показал, что в практике диагностирования оборудования и металлоконструкций нарастает тенденция к разработке и использованию переносных приборов для измерения твердости для оценки характеристик твердости металла непосредственно на металлоконструкциях и изделиях. Это объясняется не только возросшими требованиями к качеству выпускаемой и эксплуатируемой промышленной продукции, но и преимуществами метода твердости как неразрушающего и экспрессного метода механических испытаний.

Развитие методов и технических средств измерения характеристик твердости интенсивно ведется в таких странах как Россия, Германия, Швейцария, Австрия, Япония и др. К настоящему времени создано много модификаций переносных приборов для измерения твердости, отличающихся принципом действия, конструктивными особенностями, габаритами, массой, сферами применения.

Прогресс в создании новых переносных и портативных приборов для измерения твердости в России и странах СНГ дополнительно объясняется также и тем, что с каждым годом возрастает количество единиц оборудования, выработавшего свой ресурс. В настоящее время в Беларуси, России и других странах СНГ в условиях дефицита и высокой стоимости запасных частей, металлопроката, в том числе трубного остро стоит вопрос о возможности продления ресурса эксплуатации различного оборудования и металлоконструкций. Для этих целей метод твердости является самым эффективным методом контроля механических свойств деталей, конструкций и других объектов. Поэтому не случайно в инструкциях по прогнозированию и оценке остаточного ресурса промышленного оборудования рекомендуется использовать переносные твердомеры.

На рисунке 2.2 приведена краткая классификация существующих переносных твердомеров по принципу их действия и измерения твердости. Эта классификация не является исчерпывающей, но она охватывает наиболее применяемые типы переносных твердомеров.

Определение твердости, количественная оценка которой обеспечивает оперативное определение механических свойств сталей, в условиях производства или в местах, удаленных от источников тока, а также крупногабаритных деталей или металлоконструкций, находящихся в эксплуатации, эффективно тогда, когда применение приборов статического действия затруднительно или нецелесообразно.

Особая роль в расширении возможностей оценки механических свойств металла принадлежит переносным твердомерам. Определение твердости на стационарных приборах не всегда осуществимо, т.к. реальные объекты испытания (трубопроводы, крупногабаритные изделия, а также конструкции, находящиеся в эксплуатации) не могут быть доставлены к стационарному твердомеру.

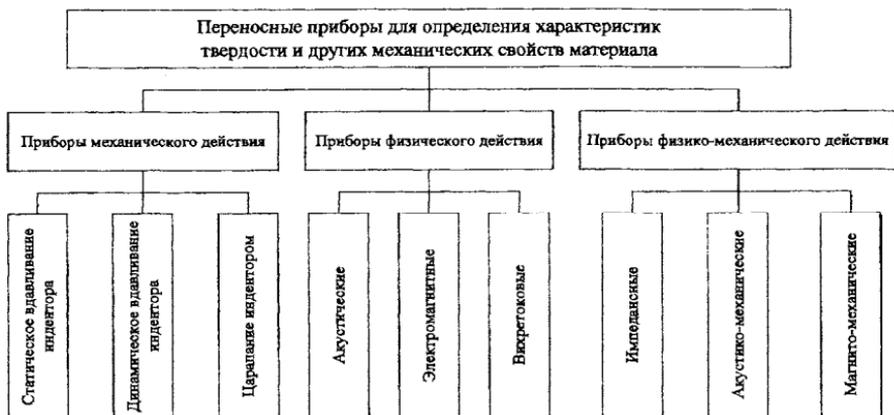


Рисунок 2.2 – Классификация переносных приборов для неразрушающего определения характеристик твердости и других механических свойств материала

Однако, не следует забывать, что наиболее надежные и точные показания твердости металла дают прямые статические механические методы испытаний, обеспечивающие необходимую степень нагружения согласно действующим ГОСТ. Все остальные методы в той или иной степени являются косвенными методами, основанными на корреляции различных механических и физических параметров с характеристиками твердости, определенными прямыми методами.

Вместе с тем, переносные приборы лишены недостатков, которыми обладают статические приборы. Эти приборы позволяют проводить определение твердости в любом пространственном положении и не требуют приложения больших нагрузок, а, значит могут быть использованы для измерения твердости на изделиях любой конфигурации, размеров, любых производственных условиях, а также на эксплуатируемых конструкциях и оборудовании.

Для измерения твердости в полевых условиях используют переносные твердомеры, работающие по принципу вдавливания индентора при постоянной нагрузке, вдавливания индентора при динамической нагрузке, по разности скоростей падения и отскока индентора от поверхности, приборы резонансно-импедансного метода действия и другие.

Измерение твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия производится по ГОСТ 22761 [91]; методом ударного отпечатка – по ГОСТ 18661 [92].

Для определения твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу на металлоконструкциях широко используются переносные отечественные твердомеры ТШП-4, ТШП-2, ТКП-1 [77]. Используется также прибор ТШПУ-1 [93], основанный на измерении твердости НВ, который более удобен в эксплуатации. Указанные приборы закрепляются на испытуемой поверхности с помощью

струбцин, магнитных, ленточных или цепных захватов. Нагрузка на индентор создается ручной механической подачей. Однако указанным приборам присущи недостатки – громоздкость крепления, большая масса. Это препятствует широкому применению таких приборов в производственных условиях.

Переносные приборы типа МЭИ-Т позволяют плавно менять нагрузку вдавливания шара и по данным испытаний строить диаграмму твердости в координатах «напряжение – деформация» [77].

Из иностранных переносных приборов можно отметить модель РНТ-В фирмы «АКАСИ», английский твердомер EPNST-APT фирмы «Microtron Ltd». Оба прибора не требуют крепления на испытываемой поверхности, имеют небольшие размеры и массу. Твердость определяется по глубине отпечатка алмазного конуса. Рабочая нагрузка создается вручную. Недостатком этих приборов является то, что линия действия рабочей нагрузки должна быть не только перпендикулярной к испытываемой поверхности, но и обязательно вертикальной.

Для определения динамической твердости металлов используются приборы ударного действия. Прибор Польди-Хютте используется для ориентировочного определения твердости методом вдавливания шарика ударом любой силы [77]. При этом шарик одновременно вдавливается в испытываемую поверхность и эталон. Прибор Баумана основан на вдавливании шарика в испытываемую поверхность заданной энергией от пружинного устройства [77]. Прибор типа ВПИ основан на одновременном внедрении индентора в эталон и испытываемую поверхность [77]. В работе [94] разработан метод построения тарировочных графиков для приборов ударного типа, благодаря чему удается избежать погрешностей измерения твердости.

Переносные приборы, основанные на принципе измерения отпечатка индентора при постоянной нагрузке, все же имеют относительно большие размеры и массу, поэтому в полевых условиях предпочтительны твердомеры на основе резонансно-импедансного метода действия. Принцип измерения твердости с помощью таких приборов следующий. Алмазная пирамида для измерения твердости по Виккерсу закрепляется на конце металлического стержня, который под действием пьезоэлектрической пластины колеблется с собственной резонансной частотой. При внедрении алмазной пирамиды в материал стержень меняет свою резонансную частоту. Между твердостью и изменением частоты существует прямая корреляция. С помощью выпускаемых приборов измеряют твердость по Виккерсу, пересчитывают результаты в единицы твердости по Роквеллу, Бринеллю, а также в значения предела прочности и текучести материала. Приборы имеют память и показывающий индикатор. Для измерения твердости в труднодоступных местах приборы снабжены набором зондов. Широкое применение среди указанного класса приборов нашли переносные твердомеры Microdur I, Microdur II и MIC 10 (фирма Krautkramer, Германия). Твердость определяется по результатам внедрения пирамидального индентора. Однако недостатком этих приборов является то, что линия действия рабочей нагрузки должна быть не только перпендикулярной к испытываемой поверхности, но и обязательно вертикальной.

В основе измерения твердости по отскоку индентора лежит зависимость разности скорости падения и отскока от твердости материала. Приборы, основанные на этих принципах, калибруются по мерам твердости ГОСТ 9031. На этих принципах выпускаются многочисленные твердомеры отечественного и зарубежного производства (фирм Krautkramer (Германия), Амдата, твердомеры российского производства типа ТЭМП и ряд других, указанные твердомеры малогабаритны и весьма просты в эксплуатации (рисунок 2.3).

Существуют также оригинальные специальные методы определения твердости. Так, например, к указанным методам относится метод определения усилия текучести для некоторых легированных сталей, применяемых в теплотехнике. Твердость измеряют на пределе текучести материала путем вдавливания шарика (ГОСТ 22762). При этом надо не забывать о проведении поверки приборов для измерения твердости [95].



Рисунок 2.3 – Пример использования переносного твердомера, работающего на принципе отскока индентора при замере твердости непосредственно на элементе конструкции

2.2.4. Основные требования к универсальному методу определения твердости и анализ существующих методов определения твердости с позиций требований к универсальности метода

Полученные различными исследователями экспериментальные данные свидетельствуют о том, что каждый из существующих методов определения твердости дает результаты, зависящие не только от механических свойств испытуемого материала, но и от условий проведения этих испытаний. Поэтому измерение твердости должно проводиться при установленных стандартных условиях. Для каждого из существующих стандартных методов определения твердости разработаны теоретические основы, учитывающие условия проведения опыта.

Данные, приведенные в подразделах 2.2.1–2.2.3 показывают, что следует найти наиболее универсальный способ определения твердости, т.к. диагности-

руемые ответственные металлоконструкции имеют разные размеры, форму, толщину стенки и изготовлены из различных по механическим свойствам материалов, а, следовательно их упруго-пластическое поведение при взаимодействии с индентором также будет различно. В связи с этим можно сформулировать основные требования к наиболее эффективному методу определения твердости:

1) он должен быть универсальным, т.е. применимым ко всем без исключения твердым телам – пластичным и хрупким, микроскопическим и большого размера;

2) значение твердости, определенное этим способом, для однородного твердого тела при постоянной температуре, должно быть материальной константой – независимой в широких пределах от величин прилагаемой нагрузки или затрачиваемой энергии;

3) твердость должна иметь определенный физический смысл и правильную размерность, характеризующую сопротивление материала пластической деформации или хрупкому разрушению;

4) результат измерения должен быть точным и воспроизводимым, сама операция – простой и доступной, прибор – надежным по конструкции, удобным в обращении. Для измерения твердости желательно применять приборы, выпускаемые промышленностью.

Выполним анализ методов определения твердости с позиции указанных выше требований.

Склерометрия – определение сопротивления тел разрушению в процессе резания, истирания, царапания и др. позволяет оценить их сопротивление износу, но не может считаться универсальным и достаточно эффективным способом определения твердости (нарушаются условия 2, 3 требований к методу, указанные выше).

Определение твердости по Бринеллю не является универсальным (не выполняется условие 1), т.к. с помощью закаленного стального шарика нельзя испытать твердость закаленной стали и более твердых материалов [75]. Замена стального шарика алмазным (как при определении твердости по Шору) не решает вопроса, т.к. потребуются иметь большой набор алмазных шариков разного диаметра для испытаний с различными нагрузками. Твердость по Бринеллю не удовлетворяет также закону механического подобия отпечатков (независимости величины твердости от величины прилагаемой нагрузки и получение геометрически подобных отпечатков) [75].

Способ определения твердости по Роквеллу также не универсален. Он не позволяет измерять твердость хрупких тел (абразивные материалы, стекла, минералы) и тел микроскопического размера (структурные составляющие сплава), т.к. применяемые нагрузки слишком велики для этих целей и вызывают разрушение указанных тел [75]. Способ имеет неудобства, т.к. величина твердости одного и того же тела, измеренная с помощью конического и разных сферических инденторов, выражается разными числами [75]. Однако данный способ широко распространен вследствие высокой производительности.

Определение твердости по Виккерсу является наиболее универсальным, т.к. используя малые нагрузки 1–200 гс, возможно измерять твердость как са-

мых хрупких материалов, так и тел микроскопических размеров, в том числе и структурных составляющих материала [75]. Отпечатки, сделанные пирамидальным индентором с разными нагрузками на одном и том же теле имеют подобную форму, поэтому твердость является постоянной величиной и не зависит от нагрузки, т.е. отвечает закону механического подобия отпечатков [75].

Таким образом, поскольку отпечатки, полученные при помощи конического и шарового инденторов, и волна вокруг них имеют вертикальную ось симметрии, и проекция их представляет круг [75, с. 96], то по круглым проекциям отпечатков нельзя сделать дополнительных заключений о механических свойствах металла, кроме его твердости. Необходимым же условием соблюдения закона механического подобия является геометрическое подобие отпечатков и только инденторы в форме пирамиды с углом между противоположными гранями 136° дают подобные отпечатки при любой глубине вдавливания [75]. Поэтому можно сделать вывод о том, что наиболее универсальным способом определения твердости является способ Виккерса. В случае необходимости работы с микро- и макротвердостью целесообразно работать именно с твердостью по Виккерсу и макротвердостью.

2.2.5. Обоснование косвенного определения основных характеристик механических свойств по форме и особенностям отпечатка на материале после внедрения индентора в виде алмазной пирамиды с углом при вершине 136°

Считается, что физически обосновать связь между равномерной деформацией и твердостью затруднительно, т.к. величина деформации отражает пластические свойства, а твердость – напряжение. Сопоставлять следует характеристики, близкие по своему физическому смыслу. Этому условию удовлетворяет форма отпечатка, полученная при измерении твердости по Виккерсу, характеризующая пластическими свойствами. Форма отпечатков, полученных с помощью индентора в виде пирамиды, зависит от механических свойств металла и отражает способность металла к упрочнению [96]. При этом на отпечатках всегда наблюдается отличие их проекций от квадратных. Проекции имеют вогнутые или выпуклые стороны.

В результате пластической деформации плотность металла практически не изменяется [96, 97, с. 85]. Поэтому образование отпечатка возможно за счет вытеснения некоторого объема металла индентором и упруго-пластической деформацией зоны металла, прилегающей к отпечатку [75, с. 94]. Небольшая часть металла, прилегающая к отпечатку, испытывает напряжения, большие предела текучести. Возникающая при этом пластическая деформация способствует вытеснению металла и образует волну вокруг отпечатка. Характер и параметры волны определяются механическими свойствами металла [96] и способностью металла к пластической деформации [75, с. 95].

Внедрение индентора в металл сопровождается возникновением в металле, окружающем индентор, неоднородного объемно-напряженного состояния [96].

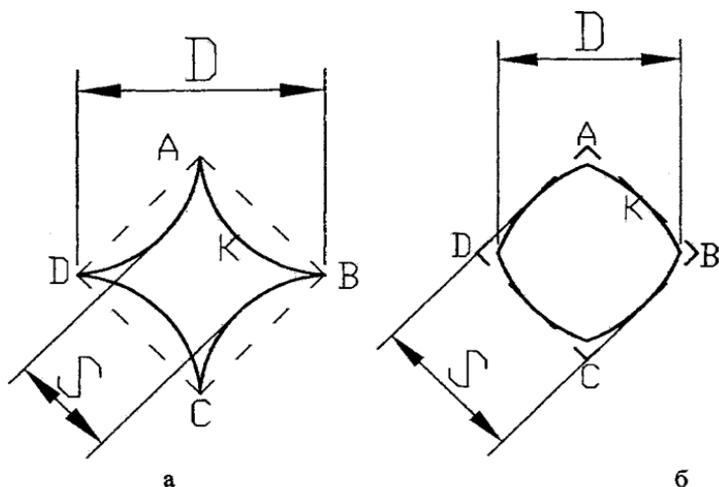
Металл вблизи отпечатка подвергается значительным напряжениям и в его объеме радиальные напряжения постепенно убывают от поверхности контакта вглубь металла. Тангенциальные напряжения также убывают. При этом они проходят через максимум, лежащий ниже вершины индентора. Вдавливание индентора в металл сопровождается возникновением объемного напряженного состояния [75]. Напряжения уменьшаются от поверхности контакта к периферии. В отличие от других методов испытаний (растяжение, сжатие и др.) напряжения и деформация вокруг отпечатка изменяются от нуля до очень больших величин. При этом не достигается предельного состояния металла (например, разрушения). Работа, необходимая для внедрения индентора на глубину h затрачивается [75]:

- 1) на вытеснение материала и образование волны вокруг отпечатка;
- 2) на пластическое деформирование объема материала вокруг отпечатка;
- 3) на упругое деформирование большего объема материала;
- 4) на образование новой поверхности;
- 5) на трение индентора с материалом при внедрении его в материал.

При вдавливании пирамиды деформации не одинаковы по различным радиальным направлениям. Наибольшие деформации образуются у середины сторон, а наименьшие – по углам отпечатка. Поэтому проекции отпечатков пирамиды не лежат в одной плоскости и имеют форму, отличающуюся от квадрата [75, с. 97]. В работах [75, 96, 98] объяснен механизм образования различных форм пирамидальных отпечатков, что дополнительно позволило обосновать выбор метода Виккерса как безобразцового и максимально объективного метода определения механических свойств металла диагностируемой конструкции.

Образование формы отпечатка происходит следующим образом. Высота волны и положение ее гребня определяются величиной пластически деформированного объема металла вокруг отпечатка [75, с. 95]. Если пластическая деформация охватывает большой объем металла, то волна образуется плоской, и ее гребень удален от отпечатка. Если пластическая деформация охватывает небольшой объем металла, то высота гребня волны образуется большой, и он находится вблизи краев отпечатка. Если металл имеет большую пластичность (металл проявляет ползучесть), т.е. склонен к упрочнению, то пластическая деформация при определении твердости распространяется на большой объем и волна имеет большой диаметр и небольшую высоту Δh [96]. Распределение напряжений и деформаций в середине стороны достигает максимальных значений. Так как металл склонен к упрочнению, пластическая деформация способствует повышению сопротивления деформированию и росту упрочнения, которое сопровождается повышением упругих свойств металла. После снятия нагрузки отпечаток упруго восстанавливается (см. рисунок 2.4). Восстановление из-за повышенной упругой энергии намного значительнее, чем в случае металла, мало склонного к упрочнению. Предел текучести деформированного металла превышает предел текучести недеформированного металла, поэтому упругое восстановление по величине больше, чем пластическая деформация недеформированного металла. В связи с максимальными напряжениями в середине стороны (в

точке K) восстановление здесь больше, чем у краев (в точках A и D) (рисунок 2.4). Поэтому получается отпечаток с вогнутыми сторонами. Если волна вокруг отпечатка относительно плоская и гребни четырех его волн отстоят далеко от сторон отпечатка, то проекция отпечатка имеет вогнутые стороны.



D – диагональ отпечатка, мм; S – ширина отпечатка, мм;
 A, B, C, D – края отпечатка; K – середина стороны отпечатка

Рисунок 2.4 – Форма пирамидального отпечатка до и после приложения нагрузки для металла склонного к упрочнению (а) и малосклонного к упрочнению (б)

Для металла, мало склонного к упрочнению, под нагрузкой отпечаток имеет контур квадрата с равными сторонами (см. рис. 2.4). После снятия нагрузки происходит упругое восстановление отпечатка. Так как в середине стороны отпечатка остаточная деформация больше, чем в крайних точках, то при восстановлении отпечатка распределение металла около его сторон имеет сферическую форму. В результате форма отпечатка выпуклая. Чем меньше пластичность металла, тем меньший его объем вокруг индентора испытывает пластическую деформацию. Поэтому волна имеет небольшой диаметр и большую высоту [96]. Если гребни волн близки или примыкают к сторонам отпечатков, то проекция отпечатка имеет выпуклые стороны.

Для некоторых металлов, занимающих по степени упрочнения промежуточное положение, остаточная деформация и увеличение упругого восстановления в результате упрочнения взаимно компенсируются, и отпечаток получает форму квадрата с равными сторонами. Квадратные проекции отпечатков образуются, когда волны у середины сторон и по углам отпечатков имеют одинаковую высоту.

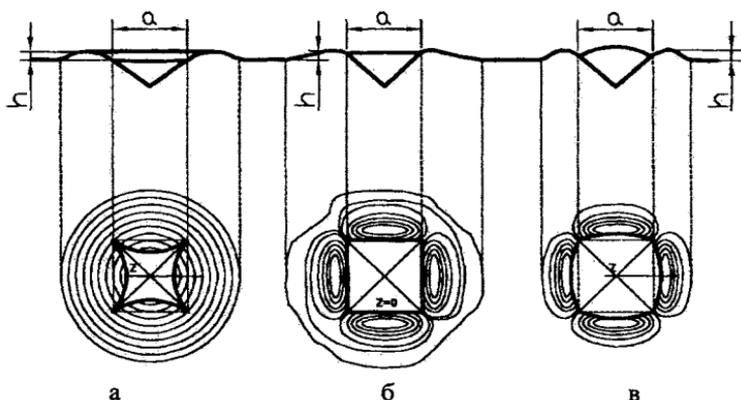


Рисунок 2.5 – Три типа отпечатков, получаемых при определении твердости индентором в форме пирамиды с углом между противоположными гранями 136° на отожженных (а), отпущенных после закалки (б) и наклепанных (в) металлах [75]

Наиболее сильное упрочнение получается у отпечатков с вогнутыми сторонами [98] (рисунок 2.5, а). У отпечатков с выпуклыми сторонами упрочнение деформированной зоны меньше (рисунок 2.5, в). Отпечатки с прямолинейными сторонами занимают промежуточное положение по упрочнению (рисунок 2.5, б).

Упрочнение вокруг отпечатка распределяется по сферической поверхности с выпуклостью в середине стороны отпечатка [98]. При этом деформация металла в центре стороны отпечатка достигает максимальных значений, постепенно уменьшаясь к краям.

В работе [98] показано, что отпечатки с вогнутыми сторонами наблюдаются на отожженных меди и алюминии и на закаленных сталях. Отпечатки с выпуклыми сторонами получают на наклепанных металлах, на сталях со структурой зернистого перлита. Правильная квадратная форма отпечатков наблюдается на улучшенных сталях.

На высокопластичных отожженных металлах деформируемый объем металла получается большим, а волна – плоской, с гребнем, удаленным от краев отпечатка [75, с. 97]. Отпечаток в этом случае лежит во впадине и имеет проекцию квадрата с вогнутыми сторонами. Такие отпечатки получают на материалах, которые отличаются высокими упругими свойствами. Восстановление отпечатков у них происходит более сильно у середины сторон, чем по углам.

На наклепанных металлах деформируемый объем металла небольшой, волна получается высокой и ее гребень прилегает к краям пирамиды. Проекция отпечатка представляет собой квадрат с выгнутыми сторонами [75, с. 97].

Установлена зависимость между изогнутостью сторон отпечатков и диаметрами пластически деформированных зон для некоторых металлов, а также изменение формы проекции отпечатков по мере увеличения температуры отпуска от

отпечатков с вогнутыми сторонами к отпечаткам с выпуклыми сторонами [96]. Форма проекций отпечатков позволяет судить о способности металла к наклепу.

Таким образом, форма изогнутости сторон отпечатка свидетельствует о способности металла воспринимать пластическую деформацию и изменяется также, как относительное удлинение и сужение.

Относительный диаметр пластически деформированной зоны имеет физический смысл объема, который испытывает пластические деформации [75, с. 101]. При определении твердости пирамидой изменение относительного диаметра пластически деформированной зоны приводит к изменению формы отпечатка и выражается относительной изогнутостью сторон z/a , которая является функцией диаметра деформированного металла и мерой пластичности металла.

Согласно [75] изогнутость определяется по формуле:

$$Z = \frac{a - a_2}{2}, \quad (2.9)$$

где Z – средняя изогнутость стороны отпечатка; a – средняя длина стороны отпечатка; a_2 – среднее расстояние между серединами сторон отпечатка.

В работе [99] установлено, что величина σ_B/HV зависит от упрочнения металла, а форма пирамидального отпечатка дает представление о способности металла к механическому упрочнению. Для ряда конструкционных сталей установлена зависимость между отношением σ_B/HV и шириной отпечатка S , которая имеет вид:

$$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot k \cdot S), \text{ МПа}, \quad (2.10)$$

где σ_B – предел прочности, МПа; HV – твердость по Виккерсу, МПа; S – ширина отпечатка, мм; k – коэффициент, зависящий от нагрузки.

В ряде случаев требуется оценить пластичность на малых участках изделия или ее измерение по длине, например, по сечению сварного шва, зоны термического влияния, в точках локального коррозионного воздействия и т.д. Для оценки пластичности металла в работе [100] установлена зависимость между характеристиками пластичности и формой пирамидального отпечатка для ряда конструкционных сталей. Уравнения связи имеют вид:

$$\delta_5 = D \cdot (9,38 + 24,43 \cdot k \cdot S), \%, \quad (2.11)$$

$$\psi = 16,4 + 80 \cdot k \cdot S, \%, \quad (2.12)$$

где δ_5 – относительное удлинение, %; ψ – относительное сужение, %; D – диагональ отпечатка, мм; S – ширина отпечатка, мм; k – коэффициент, зависящий от нагрузки на индентор.

Данные зависимости можно использовать для косвенного и ориентировочного определения основных характеристик механических свойств металла диагностируемой конструкции: предела прочности, относительного удлинения и сужения. При этом вопрос с определением ударной вязкости материала остается открытым.

2.3. Анализ методов определения механических свойств металла по результатам определения твердости

Общепринято мнение о том, что для конструкционной, как и для любой другой стали, не существует физически обоснованной количественной зависимости между механическими свойствами. Проявляется лишь качественная тенденция снижения механических свойств по мере повышения прочности и наоборот. Так, например, в работе [101] на примере ряда конструкционных сталей показано, что повышение прочности стали всегда сопровождается понижением пластичности, а основным критерием, определяющим значения предела текучести $\sigma_{0,2}$, относительного сужения ψ и ударной вязкости (KCU), является предел прочности σ_B . В основе этих представлений лежит многообразие факторов, влияющих на механические свойства. Считается, что испытания, основанные на определении твердости, позволяют определять числа твердости, которые не дают достаточной информации для оценки процесса упругопластического деформирования материала [102], т.к. значения твердости представляют только конечный результат оценки процесса контактного деформирования материала индентором. Особенности технологий производства, колебания режимов технологического процесса, незначительные изменения режимов термической обработки и химического состава одной марки стали могут значительно изменять ее механические свойства [103, 104]. Это является одним из препятствий широкого использования корреляционных соотношений в данной области.

Структура металлов и сплавов и распределение ее дефектов неодинаковы даже в пределах одного образца [105]. Механические свойства определяются структурой, разницей в химическом составе и дефектами. Поэтому они различны для разных объемов даже одного образца. Следовательно, значения механических свойств являются среднестатистическими величинами, которые показывают суммарную, наиболее математически вероятную характеристику всего объема испытываемого образца.

В работе [105] показано, что даже при точном определении механических свойств они неодинаковы у разных образцов из одного и того же материала. Кроме структуры и дефектов металла на значение механических свойств оказывают влияние и инструментальные ошибки при определении. Поэтому, чтобы оценить среднее значение механических свойств и ошибки при их определении необходимо применять статистическую обработку результатов экспериментов.

Более точные линейные корреляционные связи наблюдаются внутри тех групп механических свойств, которые характеризуют прочность, пластичность, упругость, а связь между этими группами свойств менее точная [106]. Ударная вязкость больше связана с пластичностью, чем с прочностью, а упругость более значительно зависит от прочности, чем от пластичности. Твердость хорошо коррелирует с прочностью и пластичностью материала.

Поэтому целесообразно устанавливать взаимосвязи или для групп сталей, образованных по уровням отдельных механических характеристик, или для всей совокупности сталей без разбивки их на группы. Последние связи менее тесны, чем связи для отдельных марок или групп сталей, но они более надеж-

ны, т.к. их использование позволяет с достаточно высокой точностью определять значения какой-либо характеристики по известным другим [103].

В работе [103] приведены данные, показывающие возможные корреляционные связи между отдельными механическими характеристиками или их сочетаниями (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Механические характеристики и их сочетания, используемые для получения корреляционных взаимосвязей [103]

№ п/п	Характеристики	№ пп	Характеристики	№ п/п	Характеристики
1	σ_B	6	$\sigma_B/\sigma_{0,2}$	11	$\sigma_{0,2}\Psi$
2	$\sigma_{0,2}$	7	$\sigma_B\delta_5$	12	KCU/Ψ
3	δ_5	8	Ψ/δ_5	13	σ_B/KCU
4	Ψ	9	$\sigma_B\Psi$	14	$\sigma_{0,2}/KCU$
5	KCU	10	$\sigma_{0,2}\delta_5$	15	KCU/δ_5

Таблица 2.2 – Значения коэффициента корреляции для различных случаев связи механических характеристик при комнатной и повышенной температурах (нумерация – в соответствии с обозначениями таблицы 2.1) [103]

Корреляционные связи	Коэффициент корреляции R		Корреляционные связи	Коэффициент корреляции r		Корреляционные связи	Коэффициент корреляции r	
	$t=20^\circ\text{C}$	$t>20^\circ\text{C}$		$t=20^\circ\text{C}$	$t>20^\circ\text{C}$		$t=20^\circ\text{C}$	$t>20^\circ\text{C}$
	1 – 2	0,888		0,855	2 – 9		0,679	0,723
1 – 9	0,681	0,737	2 – 11	0,842	0,833	5 – 15	0,473	0,535
1 – 10	0,335	0,734	2 – 13	0,454	0,462	7 – 10	0,736	0,798
1 – 13	0,501	0,461	2 – 14	0,581	0,479	8 – 11	0,720	0,489
1 – 14	0,529	0,424	3 – 6	0,670	0,587	9 – 10	0,515	0,740
2 – 3	-0,582	-0,474	3 – 7	0,831	0,552	9 – 11	0,913	0,879
2 – 6	-0,708	-0,501	4 – 9	0,574	0,305	13 – 14	0,954	0,991

Таким образом, установлено, что существует корреляционная связь между различными показателями механических свойств. При этом из таблицы 2.2 видно, что при комнатных температурах корреляционные связи для сталей более тесные, чем при повышенных.

Одной из задач данных исследований является поиск взаимосвязей твердости и/или параметров отпечатка, полученного при определении твердости, с основными механическими свойствами. Известен ряд взаимосвязей твердости с пределом прочности и другими механическими свойствами.

Определение механических характеристик материала является важным и обязательным моментом оценки работоспособности конструкции. Существующие методы и стандарты требуют соблюдения ряда норм и условий при подготовке, изготовлении и испытании образцов, что делает определение механиче-

ских характеристик трудоемкой операцией. Кроме того, используемые нормативные документы и методики определяют использование образцов, вырезка которых сопровождается нарушением сплошности детали или конструкции, изменением напряженно-деформированного состояния в металле конструкции и снижением ее надежности.

Традиционно для определения механических свойств металлов применяют методы испытания на образцах. При диагностировании текущего состояния металла объекта образцы металла вырезают из конструкции, предварительно отсоединив объект (с последующим восстановлением поврежденных участков), а также проводят исследования на образцах-свидетелях, работающих в идентичных с объектом условиях.

Задачам безобразцового определения механических характеристик конструкционных сталей посвящено много работ. Наиболее перспективными представляются методы, основанные на вдавливании индентора различной формы. Существует ряд исследований, связанных с поиском взаимосвязи механических свойств, твердости и диаграммой растяжения.

Поэтому актуальной является задача установления зависимости между твердостью и другими механическими характеристиками металлов. Для специалистов важно иметь надежные, хорошо согласующиеся с экспериментами, методы определения основных характеристик механических свойств, отражающих как прочностные, так и пластические свойства металла.

Авторами в работе [107] выполнен обзор существующих взаимосвязей значений твердости и основных механических свойств металла, а также существующих взаимосвязей между механическими свойствами. В таблице 2.3 приведены основные уравнения взаимосвязи между механическими свойствами металла.

Для многих металлов и сплавов между пределом прочности σ_B и твердостью по Бринеллю HB существует взаимосвязь, близкая к линейной [74]:

$$\sigma_B \approx C \cdot HB, \text{ МПа}, \quad (2.13)$$

где C — экспериментальный коэффициент, зависящий от химического состава металла.

Соотношения между σ_B и HB зависят от материала и поэтому имеют частный характер [77]. В работе [74] приведены приближенные зависимости между σ_B и HB для различных металлов (см. таблицу 2.3).

Таблица 2.3 – Зависимости между σ_B и HB для различных металлов [74]

Материал	σ_B , МПа	Материал	σ_B , МПа
Сталь твердостью HB: – 120–175; – 175–450	3,4 HB 3,5 HB	Алюминий и алюминиевые сплавы твердостью HB: – 20–45	(3,3–3,6) HB
Медь, латунь, бронза: – отожженная; – наклепанная	5,5 HB 4,0 HB	Дюралюмин: – отожженный; – после закалки и старения	3,6 HB 3,5 HB

По данным работы [108] коэффициент C равен 3,43–3,62, а для углеродистых и легированных сталей перлитного класса – 3,3–3,6. По данным работы [77, с. 56] коэффициент C принимает следующие значения: 0,15 – чугуны; 0,25 – литейные алюминиевые сплавы; 0,3 – титановые сплавы; 0,38 – деформируемые алюминиевые сплавы; 0,333 – высокопрочные стали; 0,36 – малоуглеродистые стали; 0,45 – аустенитные стали и латуни.

В работе [77] предложен метод определения основных механических свойств металла по твердости, базирующийся на аналогии диаграмм растяжения и вдавливания сферического индентора. Было введено число твердости $H_{0,2}$, вычисленное как среднее давление шарика на поверхности лунки диаметром 0,9 мм, в которой средняя деформация равна 0,2 % и предложено вычислять предел текучести материала как:

$$\sigma_{0,2} = C \cdot H_{0,2}. \quad (2.14)$$

Аналогичные требования предъявляются при определении предела прочности и остальных механических характеристик. Коэффициент пропорциональности C зависит от степени деформации на пределе прочности [77]. Однако данный метод требует тщательной подготовки поверхности испытуемого металла. Обработка поверхности должна заканчиваться полированием.

Развитие и применение к коническим отпечаткам данной теории приведено в работе [109]. Анализ диаграмм твердости позволил получить следующие зависимости:

$$\sigma_B = 0,30 \cdot H_B; \quad (2.15)$$

$$\sigma_{0,2} = 0,25 \cdot H_S, \quad (2.16)$$

где H_B – число твердости, полученное при вдавливании конуса с углом 120° ; H_S – число твердости, полученное при вдавливании конуса с углом 160° .

В работе [110] установлено, что величина σ_B/HV зависит от упрочнения металла, а форма пирамидального отпечатка дает представление о способности металла к механическому упрочнению. Для ряда конструкционных сталей установлена зависимость между отношением σ_B/HV и шириной отпечатка S , которая учитывает отклонение формы отпечатка от квадратной, что отражает способность стали к упрочнению и имеет вид [99]:

$$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot k \cdot S), \text{ МПа}, \quad (2.17)$$

где σ_B – предел прочности, МПа; HV – твердость по Виккерсу, МПа; S – ширина отпечатка, мм; k – коэффициент, зависящий от нагрузки.

В ряде случаев требуется оценить пластичность на малых участках изделия или ее изменение по длине, например, по сечению сварного шва, зоны термического влияния, в точках локального коррозионного воздействия и т.д. Для оценки пластичности металла в работе [111] установлена зависимость между характеристиками пластичности и формой пирамидального отпечатка для ряда конструкционных сталей. Уравнения связи имеют вид:

$$\delta_3 = D \cdot (9,38 + 24,43 \cdot k \cdot S), \%, \quad (2.18)$$

$$\psi = 16,4 + 80 \cdot k \cdot S, \%, \quad (2.19)$$

где δ – относительное удлинение, %; ψ – относительное сужение, %; D – диагональ отпечатка, мм; S – ширина отпечатка, мм; k – коэффициент, зависящий от нагрузки.

Данные зависимости можно использовать для косвенного определения относительного удлинения и сужения конструкционных сталей.

В работе [108] приведены корреляционные уравнения, выражающие зависимость пластических свойств, ударной вязкости и твердости от прочностных свойств для конкретных сталей. Так, для поковок из конструкционных сталей и сталей аустенитного класса:

$$\sigma_B \pm 50 = 3,4 \cdot HB. \quad (2.20)$$

Для углеродистых стальных отливок после нормализации с отпуском [108]:

$$\sigma_B \pm 40 = 3,8 \cdot HB. \quad (2.21)$$

Зависимость относительного удлинения от предела прочности для углеродистых сталей $\sigma_B \leq 850$ МПа [108]:

$$\sigma_B \cdot \delta = 10000. \quad (2.22)$$

Удлинение нормализованных образцов из проката углеродистых сталей с 0,19...0,6 % C [108]:

$$\delta = (80,16 - 0,119\sigma_B + 0,00005\sigma_B^2) \pm 1,8\%. \quad (2.23)$$

Зависимость относительного удлинения от предела прочности [108]:

$$\text{– сталь 25: } \delta = (49,23 - 0,0364\sigma_B) \pm 1,71\%; \quad (2.24)$$

$$\text{– сталь 35: } \delta = (45,03 - 0,0307\sigma_B) \pm 1,79\%; \quad (2.25)$$

$$\text{– сталь 55: } \delta = (38,63 - 0,0245\sigma_B) \pm 2,13\%. \quad (2.26)$$

Для связи предела прочности с ударной вязкостью и с относительным сужением материала справедливы следующие уравнения [108]:

$$\text{– для хромоникелевых сталей: } \sigma_B + 30 \cdot a_n = 1400 \pm 70 \quad (2.27)$$

$$\text{или } \sigma_B \cdot \frac{100}{100 - \psi} = 2400 \pm 100; \quad (2.28)$$

$$\text{– для хромоникельмолибденовых сталей: } \sigma_B + 30 \cdot a_n = 1530 \pm 100 \quad (2.29)$$

$$\text{или } \sigma_B \cdot \frac{100}{100 - \psi} = 2900 \pm 100. \quad (2.30)$$

Для сталей, имеющих после закалки в воде или в масле структуру мартенсита или мартенсита и бейнита и отпущенных при 500–700 °С с быстрым охлаждением определены уравнения [108]:

$$\sigma_B - 110 = \sigma_T \pm 96; \quad (2.31)$$

$$\delta + 4,1 = 32,6 - 0,017 \cdot \sigma_T; \quad (2.32)$$

$$\psi + 7,2 = 89,7 - 0,031 \cdot \sigma_T; \quad (2.33)$$

$$10 \cdot a_n \pm 0,48 = 37,0 - 0,025 \cdot \sigma_T. \quad (2.34)$$

Получены также [108] уравнения зависимости пластичности и ударной вязкости для конкретных сталей от предела текучести (таблица 2.5).

В работе [112, с. 21] приводятся сведения о взаимосвязь между пределами прочности и текучести для ряда конструкционных сталей:

$$\sigma_{0,2} = 0,75 \cdot \sigma_B, \text{ МПа.} \quad (2.35)$$

Наиболее физически обоснованным является метод определения предела прочности по твердости, предложенный в работе [77], согласно которому величину σ_B определяют по значению максимальной твердости H_{\max} :

$$\sigma_B = 0,333H_{\max}. \quad (2.36)$$

Данный метод основан на том, что диаграммы растяжения и твердости подобны. При этом напряжения в лунке и при растяжении определяются при близких деформациях. Однако сложность определения H_{\max} , предусматривающего построение диаграммы твердости [77], затрудняет использование метода для оперативного определения механических свойств.

В работе [113] предложена формула для определения предела прочности аустенитных сталей по результатам измерения максимальной твердости:

$$\sigma_B = 0,3 \cdot H_{\max} + 8. \quad (2.37)$$

В работе [114] предложены корреляционные взаимосвязи для определения предела прочности аустенитной стали 08X18H12T по результатам определения твердости HB :

$$\text{при } d \geq 3,4 \text{ мм: } \sigma_B = 0,3HB + (10 \cdot d - 25); \quad (2.38)$$

$$\text{при } d < 3,4 \text{ мм: } \sigma_B = 0,3HB + (10 \cdot d - 22). \quad (2.39)$$

В работе [115] предложен метод определения предела прочности различных материалов по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора. Метод основан на том, что для конкретного материала справедлива единая кривая деформирования, устанавливающая связь между интенсивностями напряженного и деформированного состояний.

В работе [116] предложен метод определения параметров внедрения сферического индентора по диаграмме растяжения материала металлоизделий, а также определение предела прочности по параметрам внедрения сферического индентора.

В работе [102] предложена безобразцовая методика построения стандартной диаграммы растяжения и определения прочностных свойств сталей оборудования АЭС из диаграммы непрерывного вдавливания сферического индентора.

В работе [117] установлена взаимосвязь между основными характеристиками механических свойств для конструкционных сталей:

$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_B - \sigma_T}{0,75 \cdot [(\delta/\psi) \cdot (7,5 - 4,167 \cdot (\delta/\psi) - 1)]}. \quad (2.40)$$

В работе [118] для оценки механических свойств стали 09Г2 применен метод определения твердости:

$$\sigma_B = 2,7 \cdot HB + 80; \quad (2.41)$$

$$\delta_5 = -0,230 \cdot HB + 67,6; \quad (2.42)$$

$$\psi = -0,240 \cdot HB + 103,2. \quad (2.43)$$

В данном случае метод твердости дает удовлетворительную оценку прочностных свойств металла и может быть использован для оценки средних значений характеристик пластичности стали 09Г2 [118].

Для ряда титановых сплавов установлена связь между механическими свойствами [104]:

$$\sigma_B = 643 + 0,15 \cdot HB, \quad (2.44)$$

$$\delta = 337 + 0,28\sigma_B. \quad (2.45)$$

В работе [119] установлена зависимость между твердостью по Виккерсу и характеристиками прочности σ_B и $\sigma_{0,2}$ для ряда алюминиевых сплавов:

$$\sigma_B = 0,3 \cdot HV; \quad (2.46)$$

$$\sigma_{0,2} = 0,23 \cdot HV. \quad (2.47)$$

В работах [76, 120] показана возможность определения основных механических свойств металла по пластической твердости, которая по физическому смыслу представляет собой модуль упрочнения металла при вдавливании сферичного индентора и определяется при двукратном вдавливании шарика. Установлены зависимости характеристик прочности σ_B и $\sigma_{0,2}$ и пластичности δ_5 и ψ от пластической твердости H :

$$\sigma_s = 95,5(\sqrt{122 + H} - 12,2); \quad (2.48)$$

$$\sigma_{0,2} = 10K_s \cdot H, \quad (2.49)$$

где K_s – безразмерный коэффициент: $K_s = 0,2$ – для углеродистых сталей; $K_s = 0,22$ – для легированных конструкционных сталей.

– для углеродистых сталей (< 200 Н):

$$\psi = \frac{4515}{H} + 0,333 \cdot H + 25, \%; \quad (2.50)$$

– для легированных конструкционных сталей:

$$\psi = \frac{6100}{H} + 36,6, \%; \quad (2.51)$$

$$\delta_5 = 1725 \cdot H^{-0,79}, \%. \quad (2.52)$$

Однако приведенные формулы не нашли широкого применения, т.к. само число твердости требует измерения не диаметров, а глубин отпечатков. Данный метод более сложен в отношении измерений и вычислений.

В работе [121] установлены зависимости между характеристиками прочности металла и его твердостью по конусу $HK_{136} = HV$, определяемой при $\phi = 136^\circ$.

Так для сталей с $HV \leq 360$: $\sigma_s = 10,55 \cdot (\sqrt{122 + HV} - 11,05)$; (2.53)

– для сталей с $HV > 360$: $\sigma_s = 0,32 \cdot HV + 3$; (2.54)

– для сталей с $HV \leq 260$ (углеродистые): $\sigma_{0,2} = 0,244 \cdot HV$; (2.55)

– для сталей с $HV > 260$ (легированные): $\sigma_{0,2} = 0,27 \cdot HV$; (2.56)

– для хромистых сталей типа 15X, 15XA, 15XФ, 20X и др. (содержащих $\leq 0,2\%$ С):

$$\sigma_{0,2} = 0,26 \cdot HV - 9. \quad (2.57)$$

В работе [77] установлены корреляционные зависимости между характеристиками прочности σ_s и $\sigma_{0,2}$ и твердостью HB :

$$\sigma_s = 0,345 \cdot HB, \text{ МПа}; \quad (2.58)$$

$$\sigma_{0,2} = 0,367 \cdot HB - 240, \text{ МПа}. \quad (2.59)$$

Для сталей, применяемых при изготовлении элементов энергооборудования, установлены следующие корреляционные уравнения [122]:

Для стали 20 [122] (при HB 1128–1667 МПа):

$$\sigma_B = 0,36 \cdot HB, \text{ МПа}; \quad (2.60)$$

$$\sigma_{0,2} = \frac{0,41 \cdot HB - 167}{1,37}, \text{ МПа}. \quad (2.61)$$

Для сталей 12МХ, 15ХМ [122] (при HB 1275–1650 МПа):

$$\sigma_B = 0,35 \cdot HB, \text{ МПа}; \quad (2.62)$$

$$\sigma_{0,2} = 0,545 \cdot HB - 471, \text{ МПа}; \quad (2.63)$$

$$\delta_5 = \frac{3,17 \cdot 10^4}{\sigma_B + 2 \cdot \sigma_{0,2}}. \quad (2.64)$$

Для стали 12Х1МФ [122] (при HB 1275–650 МПа):

$$\sigma_B = 0,35 \cdot HB, \text{ МПа}; \quad (2.65)$$

$$\sigma_{0,2} = 0,545 \cdot HB - 471, \text{ МПа}; \quad (2.66)$$

$$\delta_5 = \frac{2,23 \cdot 10^4}{\sigma_B + 2 \cdot \sigma_{0,2}}, \quad (\sigma_{0,2} \leq 314 \text{ МПа}); \quad (2.67)$$

$$\delta_5 = \frac{3,71 \cdot 10^4}{\sigma_B + 2 \cdot \sigma_{0,2}}, \quad (\sigma_{0,2} > 314 \text{ МПа}). \quad (2.68)$$

Для стали 15Х1МФ [122] (при HB 1600–000 МПа):

$$\sigma_B = 0,36 \cdot HB, \text{ МПа}. \quad (2.69)$$

Для сталей 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ [122] (при HB 1571–1961 МПа):

$$\sigma_B = 0,257 \cdot HB - 116, \text{ МПа}; \quad (2.70)$$

$$\sigma_{0,2} = \frac{0,33 \cdot HB - 227}{0,87}, \text{ МПа}. \quad (2.71)$$

Для стали 09Х1М [122] (при HB 981–766 МПа):

$$\sigma_B = 0,3 \cdot HB + 64, \text{ МПа}. \quad (2.72)$$

Для стали 09Х1МФ [122] (при HB 981–766 МПа):

$$\sigma_B = 0,3 \cdot HB + 19, \text{ МПа}. \quad (2.73)$$

В работе [123] установлена связь между ударной вязкостью и относительным сужением:

$$KCU = k \cdot \frac{\psi}{1 - \psi}, \text{ МДж/м}^2. \quad (2.74)$$

где k – коэффициент, имеющий различные значения (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Значения коэффициента k и разбивка стали на группы по уровням механических свойств [123]

Разбивка на группы по ψ		Разбивка на группы по σ_B		Разбивка на группы по $\sigma_B \delta$	
Пределы	Кoeff. k	Пределы	Кoeff. k	Пределы	Кoeff. k
$\psi > 80$	0,61	$\sigma_B > 1450$	0,72	$\sigma_B \delta > 340$	1,07
$60 < \psi \leq 80$	0,76	$1200 < \sigma_B \leq 1450$	0,63	$290 < \sigma_B \delta \leq 340$	0,90
$40 < \psi \leq 60$	0,83	$1000 < \sigma_B \leq 1200$	0,71	340	0,95
$20 < \psi \leq 40$	1,19	$850 < \sigma_B \leq 1000$	0,73	$240 < \sigma_B \delta \leq 290$	0,98
$\psi \leq 20$	1,66	$600 < \sigma_B \leq 850$	0,80	$190 < \sigma_B \delta \leq 240$	0,73
		$450 < \sigma_B \leq 600$	0,76	$140 < \sigma_B \delta \leq 190$	0,70
		$\sigma_B \leq 450$	0,65	$90 < \sigma_B \delta \leq 140$	0,67
				$40 < \sigma_B \delta \leq 90$	

Обобщенные сведения о корреляционных взаимосвязях между различными механическими свойствами и их характеристиками сведены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Основные существующие корреляционные взаимосвязи между механическими свойствами металлов

№ п/п	Материал	Формула	Источник, примечания
1	Взаимосвязь предела прочности с твердостью		
	Сталь твердостью HB: – 120...175; – 175...450	$\sigma_B = 3,4 \cdot HB, МПа$ $\sigma_B = 3,5 \cdot HB, МПа$	[74]
	Сталь 20	$\sigma_B = 0,36 \cdot HB, МПа$	[122]
	Медь, латунь, бронза: – отожженная; – наклепанная	$\sigma_B = 5,5 \cdot HB, МПа$ $\sigma_B = 4,0 \cdot HB, МПа$	[74]
	Алюминий и алюминиевые сплавы твердостью HB: – 20...45	$\sigma_B = (3,3...3,6) \cdot HB, МПа$	[74]
	Дюралюмин: – отожженный; – после закалки и старения	$\sigma_B = 3,6 \cdot HB, МПа$ $\sigma_B = 3,5 \cdot HB, МПа$	[74]
	Разные материалы	$\sigma_B = 0,333 \cdot H_{max}, МПа$	[77]
	Аустенитные стали	$\sigma_B = 0,3 \cdot H_{max} + 8$	[113]
	Сталь 08X18H12T	при $d \geq 3,4$ $\sigma_B = 0,3HB + (10 \cdot d - 25)$ при $d < 3,4$ $\sigma_B = 0,3HB + (10 \cdot d - 22)$	[114]
	Конструкционные углеродистые и перлитные легированные стали	$\sigma_B = 0,365 \cdot HB^{0,989}, МПа$	[77]
	Аустенитные стали	$\sigma_B = 0,3 \cdot HB + 140, МПа$	[77]
	Нимоники	$\sigma_B = 0,28 \cdot HB + 280, МПа$	[77]
	12МХ	$\sigma_B = 0,337 \cdot HB + 21, МПа$	[77]
	15ХМ	$\sigma_B = 0,337 \cdot HB + 17, МПа$	[77]
	12МХ, 15ХМ	$\sigma_B = 0,35 \cdot HB, МПа$	[122]
	12Х1МФ	$\sigma_B = 0,335 \cdot HB + 17, МПа$	[77]
	12Х1МФ (при HB 1275...1650 МПа)	$\sigma_B = 0,35 \cdot HB, МПа$	[122]
	15Х1МФ	$\sigma_B = 0,312 \cdot HB + 70, МПа$	[77]

№ п/п	Материал	Формула	Источник, примечания
	Сталь 15Х1М1Ф (при НВ 1600...2000 МПа)	$\sigma_B = 0,36 \cdot HB, МПа$	[122]
	20ХМЛ	$\sigma_B = 0,35 \cdot HB - 11, МПа$	[77]
	15Х1М1ФЛ	$\sigma_B = 0,29 \cdot HB + 80, МПа$	[77]
	20ХМЛ, 20ХМФЛ и 15Х1М1ФЛ	$\sigma_B = 0,328 \cdot HB + 20, МПа$	[77]
	Стали 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ (при НВ 1571...1961 МПа)	$\sigma_B = 0,257 \cdot HB - 116, МПа$	[122]
	Сталь 09Х1М (при НВ 981...1766 МПа)	$\sigma_B = 0,3 \cdot HB + 64, МПа$	[122]
	Сталь 09Х1МФ (при НВ 981...1766 МПа)	$\sigma_B = 0,3 \cdot HB + 19, МПа$	[122]
	Поковки из конструкционной стали; сталь аустенитного класса	$\sigma_B \pm 50 = 3,4 \cdot HB$	[108]
	Углеродистые стальные отливки после нормализации с отпуском	$\sigma_B \pm 40 = 3,8 \cdot HB$	[108]
	Конструкционная сталь	$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot S), МПа.$	[99] S – ширина отпечатка, мм
	Сталь 09Г2	$\sigma_B = 2,7 \cdot HB + 80$	[99]
	Титановый сплав ВТ-22	$\sigma_B = 643 + 0,15 \cdot HB$ $\sigma_B = 1277 - 39,58 \cdot d_{опт}$	[99]
	Алюминиевые сплавы	$\sigma_B = 0,3 \cdot HV$	[99]
	Конструкционная сталь	$\sigma_s = 95,5 \cdot (\sqrt{122 + H} - 12,2)$	[99] H – пластическая твердость, $H = \frac{9000}{130 - HRB}$, H = 0,82 · HV
	Конструкционная сталь с HV ≤ 360	$\sigma_s = 10,55 \cdot (\sqrt{122 + HV} - 11,05)$	[99] HV = HK ₁₃₆ – твердость по конусу

№ п/п	Материал	Формула	Источник, примечания
	Конструкционная сталь с $HV > 360$	$\sigma_s = 0,32 \cdot HV + 3$	[99] $HV = HK_{136}$ – твердость по конусу
	Стали 45Х1, 35ХЗНМ, Сталь 60	$HV = 3,16 \cdot \sigma_B$	[124]
2	Взаимосвязь предела текучести с твердостью		
	Конструкционные углеродистые и перлитные легированные стали	$\sigma_{0,2} = 0,05 \cdot H_{0,2}^{1,37}, МПа$ $\sigma_{0,2} = 0,0496 \cdot H_{0,5}^{1,345}, МПа$ $\sigma_{0,2} = 0,367 \cdot HB - 240, МПа$	[77]
	Сталь 20	$\sigma_{0,2} = \frac{0,41 \cdot HB - 167}{1,37}, МПа$	[122]
	12МХ, 15ХМ	$\sigma_{0,2} = 0,545 \cdot HB - 471, МПа$	[122]
	Разные материалы	$\sigma_{0,2} = 0,3 \cdot H_{0,200M}, МПа$	[77]
	Разные материалы $HV > 1500$ $HV < 1500$	$\sigma_{0,2} = 0,367 \cdot HB, МПа$ $\sigma_{0,2} = 0,2 \cdot HB, МПа$	[77]
	Сталь 12МХ	$\sigma_{0,2} = 0,25 \cdot HB - 19, МПа$	[77]
	Сталь 15ХМЛ	$\sigma_{0,2} = 0,25 \cdot HB - 23,5, МПа$	[77]
	Сталь 20ХМ	$\sigma_{0,2} = 0,31 \cdot HB - 152, МПа$	[77]
	Сталь 12Х1МФ 12Х1МФ (при HB 1275...1650 МПа)	$\sigma_{0,2} = 0,235 \cdot HB + 18, МПа$ $\sigma_{0,2} = 0,545 \cdot HB - 471, МПа$	[77] [122]
	Сталь 15Х1М1Ф	$\sigma_{0,2} = 0,38 \cdot HB - 235, МПа$	[77]
	Сталь 15Х1М1ФЛ $HV < 2000$ $HV > 2000$	$\sigma_{0,2} = 0,29 \cdot HB - 114, МПа$ $\sigma_{0,2} = 0,57 \cdot HB - 627, МПа$	[77]
	Стали 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ (при HB 1571...1961 МПа)	$\sigma_{0,2} = \frac{0,33 \cdot HB - 227}{0,87}, МПа$	[122]
	Стали 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ $HV < 1600$ $HV > 1600$	$\sigma_{0,2} = \frac{0,328 \cdot HB - 129}{1,21}, МПа$ $\sigma_{0,2} = \frac{0,328 \cdot HB - 231}{0,87}, МПа$	[77]
	Сталь 16ГНМ	$\sigma_{0,2} = \frac{0,3 \cdot HB - 50}{1,03}, МПа$	[77]

№ п/п	Материал	Формула	Источник, примечания
	Конструкционная сталь	$\sigma_{0,2} = k_s \cdot H$	[76] <i>H</i> – пластическая твердость, $H = \frac{9000}{130 - HRB}$, $H = 0,82 \cdot HV$, $k_s = 0,2$ – для углеродистых сталей; $k_s = 0,22$ – для большинства легированных конструкционных сталей; $k_s = 0,182$ – для легированных сталей 15X, 15XA, 15XФ, 20X и 12XН2
	Сталь 09Г2	$\sigma_r = 0,196 \cdot H_{0,4} + 12,6$	[118]
	Алюминиевые сплавы	$\sigma_{0,2} = 0,23 \cdot HV$	[119]
	Стали 45X1, 35X3НМ, Сталь 60	$HV = 3,62 \cdot \sigma_{0,2}$	[124]
3	Взаимосвязь относительного удлинения с твердостью		
	Конструкционная сталь	$\delta_s = D \cdot (9,38 + k \cdot 24,43 \cdot S), \%$	[100] <i>D</i> – диагональ отпечатка, мм; <i>S</i> – ширина отпечатка, мм

№ п/п	Материал	Формула	Источник, примечания
	Легированная конструкционная сталь	$\delta = 1725 \cdot H^{-0,79}, \%$	[120] H – пластическая твердость
	Сталь 09Г2	$\delta_3 = -0,230 \cdot HB + 67,6$	[118]
4	Взаимосвязь относительного сужения с твердостью		
	Для углеродистых сталей (< 200 Н):	$\psi = \frac{4515}{H} + 0,333 \cdot H + 25, \%$	[76, 120] H – пластическая твердость
	Для легированных конструкционных сталей	$\psi = \frac{6100}{H} + 36,6, \%$	[76, 120] H – пластическая твердость
	Конструкционные стали	$\psi = 16,4 + k \cdot 80 \cdot S, \%$	[100] D – диагональ отпечатка, мм; S – ширина отпечатка, мм
5	Взаимосвязь ударной вязкости с относительным сужением		
	Конструкционные стали	$KCU = k \cdot \frac{\psi}{1-\psi}, \text{МДж/м}^2$	[123]
6	Прочие взаимосвязи		
	Конструкционная сталь	$B = \frac{n \cdot \sigma_B \cdot \delta}{KCU}$	[125, 126]
	Конструкционная сталь	$\sigma_B \cdot \delta_3 = k \cdot a_n$	[125, 126]
	12МХ, 15ХМ	$\delta_3 = \frac{3,17 \cdot 10^4}{\sigma_B + 2 \cdot \sigma_{0,2}}$	[122]
	12Х1МФ (при НВ 1275...1650 МПа)	$\delta_3 = \frac{2,23 \cdot 10^4}{\sigma_B + 2 \cdot \sigma_{0,2}} (\sigma_{0,2} \leq 314 \text{ МПа})$ $\delta_3 = \frac{3,71 \cdot 10^4}{\sigma_B + 2 \cdot \sigma_{0,2}} (\sigma_{0,2} > 314 \text{ МПа})$	[122]
	Конструкционная сталь	$\delta_3 = 0,18 - 10^{-5} \cdot \sigma_B$	[125, 126]
	Углеродистая сталь ($\sigma_B \leq 850 \text{ МПа}$)	$\sigma_B \cdot \delta = 10000$	[108]
	Углеродистая сталь (нормализация)	$\delta = (80,16 - 1,19 \cdot \sigma_B + 0,005 \cdot \sigma_B^2) \pm 1,8$	[108]
	Сталь 25	$\delta = (49,23 - 0,364 \cdot \sigma_B) \pm 1,71$	[108]

№ п/п	Материал	Формула	Источник, примечания
	Сталь 35	$\delta = (45,03 - 0,307 \cdot \sigma_B) \pm 1,79$	[108]
	Сталь 55	$\delta = (38,63 - 0,245 \cdot \sigma_B) \pm 2,13$	[108]
	Хромоникелевые стали	$\sigma_B + a_n = 140 \pm 7$	[108]
	Хромоникелевые стали	$\sigma_B \cdot \frac{100}{100 - \varphi} = 240 \pm 10$	[108]
	Хромоникельмолибденные стали	$\sigma_B + 3 \cdot a_n = 153 \pm 10$	[108]
	Хромоникельмолибденные стали	$\sigma_B \cdot \frac{100}{100 - \psi} = 290 \pm 10$	[108]
	Легированные стали	$\sigma_B - 11,0 = \sigma_T \pm 9,6$	[108]
	Легированные стали	$\delta \pm 4,1 = 32,6 - 0,17 \cdot \sigma_T$	[108]
	Легированные стали	$\psi \pm 7,2 = 89,7 - 0,31 \cdot \sigma_T$	[108]
	Легированные стали	$a_n \pm 4,8 = 37,0 - 0,25 \cdot \sigma_T$	[108]

Таким образом, обобщая все сказанное выше в данной главе, можно сделать следующие выводы.

1. Проведенный анализ существующих методов определения механических свойств металла позволил установить, что в настоящее время не разработаны оперативные методы диагностирования механических характеристик сталей, которые с достаточной точностью позволяли бы оценить надежность конструкций и отдельных деталей. Основные методы предусматривают использование громоздких стационарных приборов, при этом как правило, необходимо обязательное изготовления макрообразцов из диагностируемого объекта. Сложными и до сих пор до конца нерешенными на практике являются задачи неразрушающего определения механических свойств металла.

2. Наиболее перспективным с точки зрения простоты и удобства реализации, невысокой стоимости и доступности приборного обеспечения, исключающим местное повреждение исследуемой конструкции, связанное с необходимостью изготовления образцов для испытаний представляется метод косвенного определения основных механических свойств металла, основанный на определении твердости (наличие/отсутствие трещин вокруг отпечатка, их протяженность; вид и форма отпечатка, расстояние между гранями отпечатка).

3. Установлено, что метод определения твердости имеет преимущества по сравнению с другими методами диагностирования металла оборудования и конструкций в связи с наличием у него устойчивой корреляции измеряемых параметров с характеристиками механических свойств и структурного состояния металла. Проведенные исследования свидетельствуют о возможности широкого использования метода твердости для получения стандартных механических характеристик:

— метод твердости является незаменимым при оценке механических свойств металлических объектов в процессе эксплуатации; при оценке свойств поверхностного слоя; при аварийных исследованиях, когда не представляется

возможным вырезать образцы для испытаний; при необходимости 100 % контроля качества металла изделий и т.п.;

– вследствие простоты, дешевизны и возможности определения механических свойств непосредственно на изделиях без их разрушения этот метод имеет большое значение для диагностики различных ответственных конструкции непосредственно при их эксплуатации.

4. Выполнен аналитический обзор методов определения твердости материалов, применяемых при работе с различными деталями общего и нефтехимического машиностроения (методы Бринелля, Роквелла, Виккерса). Разработаны критерии оценки указанных способов:

а) с позиции универсальности метода (с целью необходимости объективного применения для работы с деталями различных размеров, формы, химического состава, твердости и т.п.) – наиболее универсальным является метод определения твердости по Виккерсу, т.к. твердость по Виккерсу не зависит от нагрузки, а получаемые отпечатки имеют геометрическое подобие;

б) с позиции максимальной чувствительности метода, а именно – чувствительности характера и размерных параметров пластической деформации материала детали вокруг индентора к изменению механических свойств и структуры диагностируемого материала (с целью использования выбранного наилучшего метода для косвенной оценки основных механических свойств материала контролируемой детали или конструкции) – наиболее чувствительным методом к изменению механических свойств (прочности и пластичности – см. формулы 2.10, 2.11, 2.12) и структуры материала является метод определения твердости по Виккерсу.

5. Вследствие того, что твердость по Виккерсу является наиболее чувствительной характеристикой структурно-фазового состояния металла, определение твердости данным методом является не только методом оценки прочностного состояния металла, но и наиболее чувствительным методом контроля структурно-фазового состояния металла. Следовательно, при необходимости работы с микро- и макротвердостью целесообразно работать именно с данным методом. Однако необходимы исследования, позволяющие определять механические характеристики не только по численным значениям твердости, а также по результатам анализа характера упруго-пластического взаимодействия материала с индентором.

6. Установлено, что форма проекций отпечатков после определения твердости по Виккерсу связана с пластичностью материала, а именно с относительными удлинением и сужением.

7. Установлено, что для измерения твердости непосредственно на оборудовании и металлоконструкциях следует использовать переносные приборы, основанные на введении в материал алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° (например, приборы Microdur I, Microdur II, M1C 10 и др.).

8. Особый интерес представляет собой установление связи между механическими свойствами металла и результатами экспериментов, полученных при введении в него четырехгранной алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° , в первую очередь, при определении твердости (наличие/отсутствие трещин, их протяженность; вид и форма отпечатка; парамет-

ры волны вокруг отпечатка и т.д.). Установив указанную связь можно будет определять механические свойства поверхностного слоя металла. А это имеет большое значение, поскольку, как показано в работе [77], разрушение металла при изгибе, кручении и растяжении с перекосом начинается с поверхности. Кроме того, из-за воздействия агрессивных сред на поверхности металла наблюдаются наибольшие изменения [112].

Выявление связи между результатами определения твердости по Виккерсу и основными механическими свойствами (в первую очередь, ударной вязкостью) металла диагностируемой конструкции позволит определять механические свойства металла конструкций в любом доступном месте без вырезки образцов и эффективно контролировать фактическое состояние металла и надежность конструкций в процессе эксплуатации.

Глава 3. РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО СПОСОБА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДИАГНОСТИРУЕМЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

3.1. Разработка неразрушающего способа определения ударной вязкости стальных металлоконструкций

Ударная вязкость играет важную роль при оценке качества металлов и занимает особое место среди других механических характеристик. Определение ударной вязкости позволяет установить склонность материала к хрупкому разрушению, определить условия возникновения хрупкого состояния, а также оценить поведение материалов в условиях эксплуатации и повышенной скорости деформирования (в особенности при наличии сложных условий нагружения при эксплуатации), а также при возникновении аварийных ситуаций и связанных с ними ударных воздействий на конструкцию.

Ударная вязкость отражает процессы, вызывающие хрупкость металла в различных условиях нагружения, в то время как стандартные статические характеристики при испытании на растяжение иногда даже не меняются. При определении ударной вязкости выявляются многие виды хрупкости стали: хладноломкость, обратимая и необратимая отпускная хрупкость, синеломкость и др. Хрупкое разрушение вызывает внезапный отказ деталей и элементов конструкций в условиях эксплуатации и считается наиболее опасным из-за протекания с большой скоростью при напряжениях ниже расчетных, а также возможных аварийных последствий. Известно много аварий из-за хрупкого разрушения различного оборудования и конструкций. Для предупреждения хрупкого разрушения конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью и ударной вязкостью. Таким образом, ударная вязкость характеризует надежность материала – сопротивление ударному воздействию и хрупкому разрушению. Поэтому разработка неразрушающего способа определения ударной вязкости позволит оценить один из основных показателей, определяющих надежность диагностируемой конструкции без вырезки образцов практически в любом доступном месте конструкции.

Из эмпирических формул взаимосвязи механических свойств (таблица 2.5) были проанализированы формулы, позволяющие определить неразрушающим способом ударную вязкость материала диагностируемой конструкции. Была выбрана эмпирическая формула, связывающая ударную вязкость с относительным сужением материала (2.74) [123], которая доказана исследованиями на большом количестве образцов из различных сталей [123].

Поиск взаимосвязи относительного удлинения с показателями, которые можно определить неразрушающим способом, например, при определении твердости, также дал положительный результат: найдена формула связывающая относительное сужение с твердостью по Виккерсу, а также с параметрами пирамидального отпечатка на материале (таблица 2.5, формула 2.19, [110, 111]).

Аналогом разработанного способа является метод определения ударной вязкости по ГОСТ 9454 [127]. Согласно ГОСТ 9454 испытаниям на ударную

вязкость подвергают образцы, вырезанные из деталей или конструкций, с концентраторами напряжений следующих типов: U-образный с радиусом в месте надреза $r_1 = 1_{-0,2}^{+0,2}$ мм, V-образный с радиусом в месте надреза $r_1 = 0,25_{-0,25}^{+0,25}$ и углом 45° и Т-образный с усталостной трещиной. Соответственно этому ударная вязкость обозначается *KCU*, *KCV* и *KCT*. Величину ударной вязкости определяют по шкале копра или по таблицам, зная начальную потенциальную энергию маятника и затраченную энергию или по площади диаграммы нагрузка–прогиб.

Главной особенностью и недостатком данного способа является то, что он относится к разрушающим способам, т.е. для определения ударной вязкости необходимо делать вырезку из деталей или конструкций для изготовления стандартных образцов (по ГОСТ 9454). При этом размер минимально возможного образца составляет $55 \times 10 \times 2$ мм. Очевидно, что вырезка даже минимального по размерам образца снижает несущую способность конструкции или даже делает практически любую металлоконструкцию непригодной к эксплуатации без последующих ремонтных работ.

Наибольшую ценность представили бы зависимости для определения величины ударной вязкости с учетом характеристик, полученных при испытании на растяжение или при определении твердости. Обзор литературных источников [128, 129] показал, что характеристики ударная вязкость и относительное сужение при растяжении согласуются между собой.

Прототипом разработанного способа является определение ударной вязкости стальных изделий, по которому ударная вязкость определяют в зависимости от относительного сужения материала по математической зависимости [130]. В данном способе ударную вязкость определяют в зависимости от относительного сужения материала по формуле:

$$a_n = k_1 \cdot \frac{\psi}{1-\psi}, \text{ МДж/м}^2,$$

где a_n – ударная вязкость, МДж/м²; ψ – относительное сужение, отн. ед.; k_1 – уточняющий коэффициент (с учетом перевода значения ударной вязкости с размерности кГм/см² [130] в систему единиц СИ, т.е. в МДж/м²), имеющий значения, приведенные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения коэффициента k_1 и разбивка стали на группы по уровням механических свойств [130]

Разбивка на группы по ψ		Разбивка на группы по σ_B		Разбивка на группы по $\sigma_B \delta_5$	
Пределы	Кэфф. k_1	Пределы	Кэфф. k_1	Пределы	Кэфф. k_1
$\psi > 80$	0,61	$\sigma_B > 1450$	0,72	$\sigma_B \delta_5 > 340$	1,07
$60 < \psi \leq 80$	0,76	$1200 < \sigma_B \leq 1450$	0,63	$290 < \sigma_B \delta_5 \leq 340$	0,90
$40 < \psi \leq 60$	0,83	$1000 < \sigma_B \leq 1200$	0,71	$240 < \sigma_B \delta_5 \leq 290$	0,95
$20 < \psi \leq 40$	1,19	$850 < \sigma_B \leq 1000$	0,73	$190 < \sigma_B \delta_5 \leq 240$	0,98
$\psi \leq 20$	1,66	$600 < \sigma_B \leq 850$	0,80	$140 < \sigma_B \delta_5 \leq 190$	0,73
		$450 < \sigma_B \leq 600$	0,76	$90 < \sigma_B \delta_5 \leq 140$	0,70
		$\sigma_B \leq 450$	0,65	$40 < \sigma_B \delta_5 \leq 90$	0,67

Особенностью указанного способа является определение ударной вязкости по математической зависимости. При этом относительное сужение ψ определяется путем стандартных испытаний на растяжение (проводимых по ГОСТ 1497 [131] или ГОСТ 11701 [132]). Недостатком указанного способа является то, что из конструкции также необходимо делать вырезки образцов для проведения испытаний на растяжение с целью определения величины относительного сужения ψ . Минимальный размер образцов составляет $t \times 10 \times 100$ мм (где t – толщина металла (для ГОСТ 11701)). При этом следует учитывать, что из некоторых объектов (деталей и конструкций) вырезку указанных стандартных образцов сделать невозможно из-за потери объектом своего функционального назначения. Если же вырезка образцов допустима вследствие достаточного размера объекта, то его дальнейшая эксплуатация невозможна без последующего ремонта.

В связи с этим задачей разрабатываемого способа является обеспечение определения ударной вязкости металла неразрушающим способом без вырезки образцов из объекта, что повысит надежность эксплуатируемых объектов.

В работах [110, 111] установлена зависимость между характеристиками прочности (σ_B), твердости (HV), пластичности (δ_5 , ψ) и параметрами пирамидального отпечатка (S , D – см. рисунок 3.1) при внедрении в материал алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° для конструкционных сталей. Уравнения взаимосвязи имеют вид:

$$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot k_2 \cdot S), \text{ МПа};$$

$$\delta_5 = \frac{k_2 \cdot D \cdot (9,38 + 24,43 \cdot k_2 \cdot S)}{100}, \text{ отн. ед.};$$

$$\psi = \frac{16,4 + 80 \cdot k_2 \cdot S}{100}, \text{ отн. ед.},$$

где σ_B – предел прочности, МПа; HV – твердость по Виккерсу; δ_5 – относительное удлинение, отн. ед.; ψ – относительное сужение, отн. ед.; D – диагональ отпечатка, мм; S – ширина отпечатка, мм; k_2 – коэффициент кратности (для нагрузки, равной 1000 Н (100 кг); 500 Н (50 кг); 300 Н (30 кг); 200 Н (20 кг); 100 Н (10 кг) и 50 Н (5 кг) величина k_2 составляет 1; 1,414; 1,825; 2,235; 3,161 и 4,472 соответственно).

Сущность разработанного способа состоит в том, что ударную вязкость определяют в зависимости от относительного сужения материала по формуле:

$$a_u = k_1 \cdot \frac{\psi}{1 - \psi},$$

где a_u – ударная вязкость, МДж/м²; ψ – относительное сужение, отн. ед.; k_1 – уточняющий коэффициент, имеющий значения:

$$k_1 = 0,61 \text{ при } \psi > 0,8;$$

$$k_1 = 0,76 \text{ при } 0,6 < \psi \leq 0,8;$$

$$k_1 = 0,83 \text{ при } 0,4 < \psi \leq 0,6;$$

$$k_1 = 1,19 \text{ при } 0,2 < \psi \leq 0,4;$$

$$k_1 = 1,66 \text{ при } \psi \leq 0,2.$$

При этом относительное сужение материала определяют по геометрическим параметрам отпечатка, полученного после вдавливания в материал пирамидального индентора при фиксированной нагрузке по формуле:

$$\psi = \frac{16,4 + 80 \cdot k_2 \cdot S}{100},$$

где ψ – относительное сужение, отн. ед.; S – ширина отпечатка, мм (рисунок 3.1); k_2 – коэффициент кратности имеющий значения:

$k_2 = 1$ при нагрузке 1000 Н;

$k_2 = 1,414$ при нагрузке 500 Н;

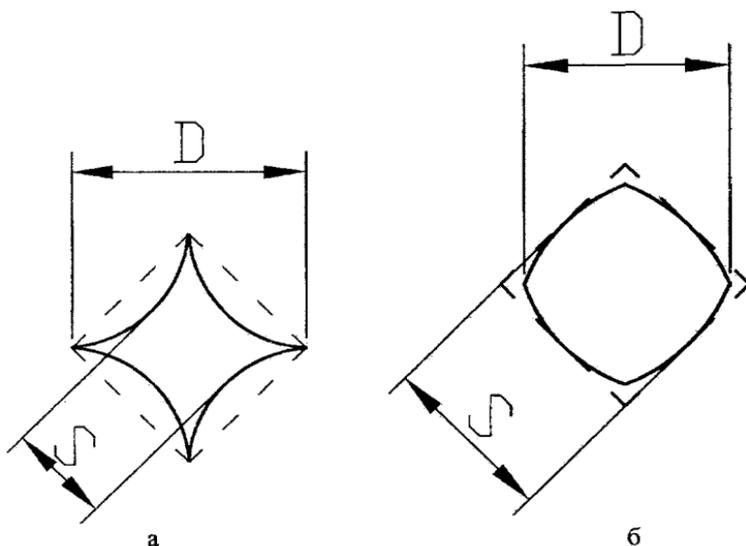
$k_2 = 1,825$ при нагрузке 300 Н;

$k_2 = 2,235$ при нагрузке 200 Н;

$k_2 = 3,161$ при нагрузке 100 Н;

$k_2 = 4,472$ при нагрузке 50 Н.

По результатам работы подана заявка на получение патента Республики Беларусь «Способ определения ударной вязкости стальных изделий» [133].



D – диагональ отпечатка; S – ширина отпечатка;

a – отпечаток с вогнутыми гранями; b – отпечаток с выпуклыми гранями

Рисунок 3.1 – Форма отпечатков, полученных при внедрении в материал алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136°

Отличительным признаком указанного способа является иное осуществление определения относительного сужения материала с использованием новых математических зависимостей. Благодаря данным отличиям обеспечивается определение ударной вязкости металла неразрушающим способом, прямо на

стальном изделии, без вырезки образцов из объекта. Это позволяет повысить надежность эксплуатируемых объектов и избежать последующего ремонта или даже утилизации объекта, т.к. после вырезки образцов для стандартного определения ударной вязкости большинство изделий, в частности детали, полностью теряют свою работоспособность. Эффективность разработанного способа была проверена на образцах из двух групп сталей, которые широко применяются для изготовления различных металлоконструкций, в первую очередь, объектов нефтехимической промышленности:

- конструкционные низколегированные стали (на примере стали 09Г2С);
- коррозионностойкие стали (на примере стали 08Х18Н10Т).

Из указанных сталей был изготовлен набор стандартных образцов:

- цилиндрические образцы для испытания на растяжение (образцы № 7 (тип III) по ГОСТ 1497);
- образцы для испытания на ударный изгиб с U-образным концентратором напряжений (образцы № 1 по ГОСТ 9454).

После изготовления образцов были проведены стандартные испытания на растяжение (по ГОСТ 1497) с определением предела прочности σ_b , предела текучести $\sigma_{0,2}$, относительного удлинения δ_5 , относительного сужения ψ . Также была определена ударная вязкость материала КСУ (по ГОСТ 9454).

На рисунке 3.2 изображена фотография образца после испытания на ударный изгиб, на котором определялись параметры отпечатка после вдавливания индентора. На рисунке 3.3 представлено схематическое изображение образца после испытания на ударный изгиб (заштрихованные области показывают места вдавливания пирамидального индентора). На рисунке 3.1 представлены возможные формы отпечатков пирамидального индентора на стальных изделиях: на рисунке 3.1, а – отпечаток с вогнутыми гранями, на рисунке 3.1, б – отпечаток с выпуклыми гранями, где D – диагональ отпечатка, S – ширина отпечатка.

Образцы после определения ударной вязкости шлифовали до параллельности сторон. Затем на поверхностях, не подверженных деформации от испытания, определяли твердость по Виккерсу (рисунки 3.2, 3.3). Твердость определяли по ГОСТ 2999 при нагрузке 200 Н. После этого определяли параметры отпечатка D и S индентора (см. рисунок 3.1) с использованием окуляр-микрометра на металлографическом микроскопе МИМ-7 при увеличении 90 раз.

Указанный в разработанном методе диапазон нагрузок для определения параметров отпечатка, приведенный в формуле (50 Н, 100 Н, 200 Н, 300 Н, 500 Н, 1000 Н), обусловлен наличием расчетных коэффициентов для данных нагрузок, подтвержденных экспериментально [110, 111]. Нагрузка 200 Н в рассматриваемом примере взята из данного ряда с учетом удобства определения параметров отпечатка индентора (D и S) с использованием окуляр-микрометра на металлографическом микроскопе МИМ-7.

Правомерность использования разработанного способа определения ударной вязкости по параметрам отпечатка индентора при других нагрузках (50 Н, 100 Н, 300 Н, 500 Н, 1000 Н) обусловлена геометрическим подобием отпечатков, полученных на материале алмазной пирамидой с углом между противополо-

ложными гранями 136° (которая и используется по ГОСТ 2999 при определении твердости по Виккерсу). Установлено теоретическими исследованиями и подтверждено экспериментально на различных материалах, в том числе и на сталях [75, с. 16–17], что именно для данного вида инденторов существует полное геометрическое подобие отпечатков и значений твердости независимо от применяемой нагрузки. Поэтому результаты, полученные при нагрузке 200 Н, можно распространить на весь приведенный в разработанном способе ряд нагрузок.

Определение ударной вязкости по разработанному способу, а также по стандартной методике (по ГОСТ 9454) проводили на одних и тех же образцах, что позволило повысить объективность оценки работоспособности разработанного способа. Выбор образцов для определения ударной вязкости обусловлен максимальной объективностью измерений: полученные значения ударной вязкости по заявляемому способу сравнимы со значениями ударной вязкости именно этих образцов, определенных стандартным способом по ГОСТ 9454.

Испытание образцов на растяжение из этих же сталей позволило определить фактическое относительное сужение материала и было необходимо для определения ударной вязкости по способу-прототипу.



Рисунок 3.2 – Фотография образца (после испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454), на котором определялись параметры индентора

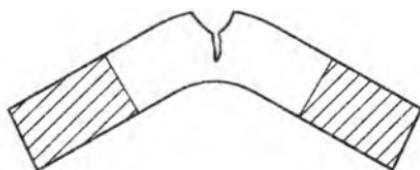


Рисунок 3.3 – Схема образца (после испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454), заштрихованные области показывают места определения геометрических параметров отпечатка индентора после определения твердости по Виккерсу

Также шел поиск оптимального коэффициента k_1 (таблица 3.1) с позиции максимальной объективности и близости полученных значений ударной вязкости по разработанному способу к значениям ударной вязкости, полученным на стандартных образцах (при испытаниях по ГОСТ 9454).

Пример определения ударной вязкости KCU для стали 09Г2С (образец № 2 см. таблицу 3.2).

Определяем твердость по Виккерсу (нагрузка 200 Н) на приборе для определения твердости по Виккерсу:

$$HV = 1411 \text{ МПа.}$$

Определяем параметры отпечатка (D и S , рисунок 3.1) при помощи металлографического микроскопа МИМ-7:

$$S_1 = 0,38 \text{ мм, } S_2 = 0,374 \text{ мм, } S_{\text{сред}} = 0,377 \text{ мм;}$$

$D_1 = 0,518$ мм, $D_2 = 0,514$ мм, $D_{\text{сред}} = 0,516$ мм.

Тогда относительное сужение, определенное по параметрам отпечатка, будет равно:

$$\psi = \frac{16,4 + 80 \cdot k_2 \cdot S}{100} = \frac{16,4 + 80 \cdot 2,235 \cdot 0,377}{100} = 0,838 \text{ отн. ед.}$$

Относительное сужение, определенное по ГОСТ 1497, равно: $\psi = 0,85$ отн. ед.

Ударная вязкость, определенная по разработанному способу, равна (с учетом того, что $k_1 = 0,61$ при $\psi > 0,8$):

$$KCU = k_2 \cdot \frac{\psi}{1 - \psi} = 0,61 \cdot \frac{0,838}{1 - 0,838} = 3,16 \text{ МДж/м}^2.$$

Ударная вязкость, определенная по способу-аналогу (ГОСТ 9454) равна: $KCU = 3,6$ МДж/м².

Результаты определения ударной вязкости приведены в таблице 3.2 и на рисунке 3.4.

Из таблицы 3.2 видно, что минимальные и максимальные погрешности ударной вязкости по разработанному способу при разбивке сталей на группы по ψ (в соответствии с таблицей 3.1) составляют – 2,2 % и 13,1 % соответственно для конструкционных низкоуглеродистых сталей; 2,6 % и 6,2 % соответственно для коррозионностойких, жаростойких, жаропрочных сталей. При этом значения на всех образцах немного ниже, чем по ГОСТ 9454, что говорит о запасе значений ударной вязкости.

Минимальные и максимальные погрешности ударной вязкости при разбивке сталей на группы по σ_b (в соответствии с таблицей 3.1) составляют – 5 % и 9,6 % соответственно для конструкционных низкоуглеродистых сталей; 1,7 % и 2,6 % соответственно для коррозионностойких сталей. Однако все значения выше фактических, что нежелательно.

Минимальные и максимальные погрешности ударной вязкости при разбивке сталей на группы по $\sigma_b \delta_5$ (в соответствии с таблицей 3.1) составляют – 4,4 % и 12,1 % соответственно для конструкционных низкоуглеродистых сталей; 14,2 % и 17,2 % соответственно для коррозионностойких сталей.

На основании полученных результатов (таблица 3.2) можно сделать вывод о том, что для определения коэффициента k_1 в формулах для косвенного определения механических свойств наиболее применима разбивка стали на группы по относительному сужению ψ , что и указано в разработанном способе.

Анализ данных таблицы 3.2 также показывает следующее:

– разработанный способ является приемлемым для применения к конструкционным низколегированным и коррозионностойким сталям, с учетом близости полученных значений ударной вязкости к значениям, полученным по стандартной методике (ГОСТ 9454);

– значения ударной вязкости, определенные по разработанному способу (практически для всех образцов) несколько ниже, чем значения, полученные по

стандартной методике (ГОСТ 9454). Это позволяет говорить о своеобразном коэффициенте запаса фактической ударной вязкости, что позволит повысить надежность эксплуатации стального изделия при определении ударной вязкости по разработанному способу.

Установлено, что значения ударной вязкости, определенные по данному способу, коррелируют со значениями, полученными по способу-аналогу. При этом положительной отличительной особенностью способа является возможность определения ударной вязкости непосредственно на объекте практически в любом доступном месте без его разрушения и вырезки образцов.

Разработанный способ был первично апробирован на ответственных деталях нефтехимической промышленности (в рамках выполнения хозяйственного договора между УО «Полоцкий государственный университет» и ОАО «Нафтан» № 07.3185 от 24.06.2004) на штоках компрессоров. В результате исследований неразрушающим способом на некоторых штоках установлен низкий уровень (ниже минимально допустимых значений) ударной вязкости металла и проведена их отбраковка, что позволило не допустить к эксплуатации (установки в компрессор) потенциально опасных (с позиции возможного разрушения) объектов (штоков).

Разработанный способ обеспечивает определение ударной вязкости металла неразрушающим способом, непосредственно на стальном изделии, без вырезки образцов из объекта. Это позволяет повысить надежность эксплуатируемых объектов и избежать последующего ремонта или даже утилизации объекта, т.к. после вырезки образцов для стандартного определения ударной вязкости большинство изделий, в частности детали, полностью теряют свою работоспособность.

Таблица 3.2 — Результаты определения ударной вязкости по разработанному способу

№ п/п	Группа сталей	КСУ (ГОСТ 9454) Аналог		КСУ (разбивка на группы по ψ) Прототип		КСУ (разбивка на группы по ψ) Разработанный способ		КСУ (разбивка на группы по σ _н)	
		значение МДж/м ²	погрешность*	значение МДж/м ²	погрешность*	значение МДж/м ²	погрешность*	значение МДж/м ²	погрешность*
1	Конструкционные низколегированные (сталь 09Г2С)	образец № 1	3,63	1,29	64,5 %	3,71	2,2 %	3,98	9,6 %
		образец № 2	3,6	1,35	62,5 %	3,16	10 %	3,78	5 %
		образец № 3	3,59	1,47	59 %	3,12	13,1 %	3,81	6,1 %
2	Коррозионно-стойкие (сталь 08Х18Н10Т)	образец № 1	1,546	1,01	34,7 %	1,45	6,2 %	1,52	1,7 %
		образец № 2	1,55	1,1	29 %	1,51	2,6 %	1,59	2,6 %

* — погрешность определена относительно результатов, полученных по ГОСТ 9454.

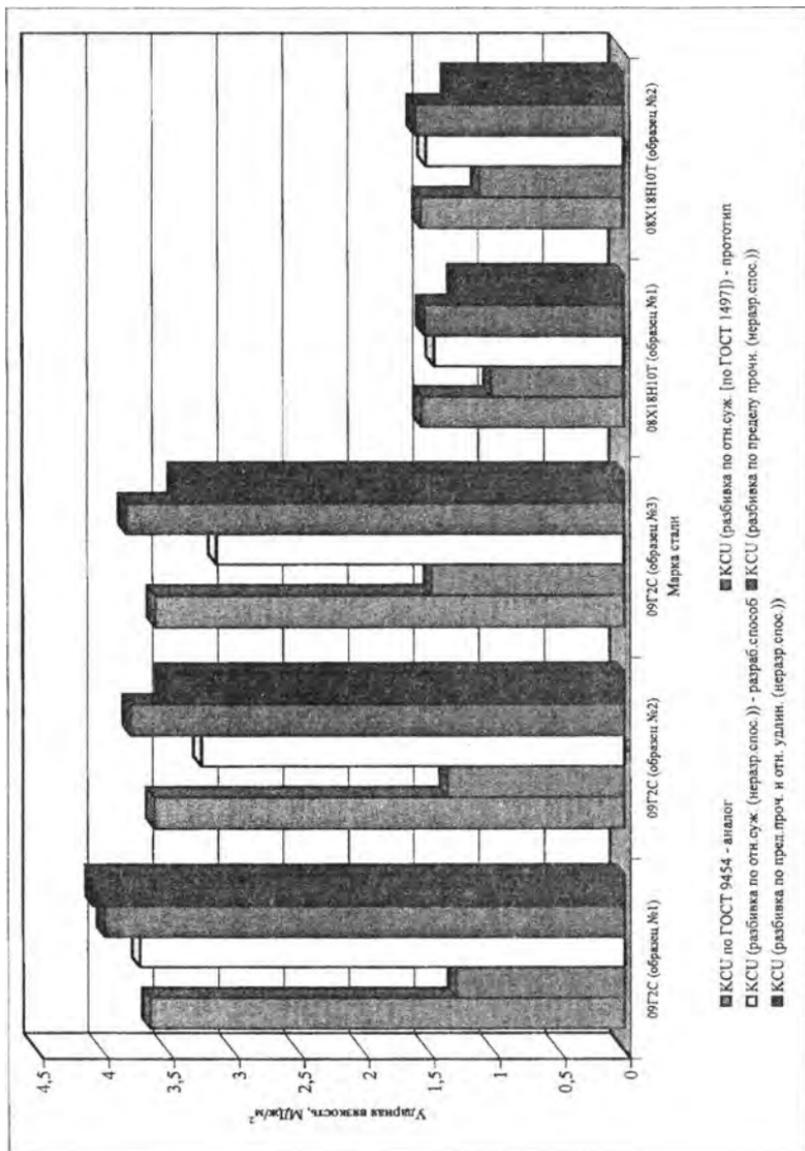


Рисунок 3.4 – Результаты определения ударной вязкости исследованных материалов по разработанному способу

3.2. Уточнение эмпирических формул взаимосвязи показателей механических свойств с параметрами пирамидального отпечатка

С учетом данных, изложенных в предыдущем разделе, касающихся возможности определения ударной вязкости стальных объектов как функции от относительного сужения, можно констатировать, что найден неразрушающий способ определения основных показателей механических свойств диагностируемых стальных металлоконструкций. Указанный способ включает следующие этапы:

- определение твердости по Виккерсу на диагностируемой конструкции (переносными твердомерами);
- определение параметров отпечатка (S, D – см. рисунок 3.1);
- расчет по эмпирическим формулам предела прочности, относительного удлинения, относительного сужения и ударной вязкости в конкретной точке конструкции;
- сравнение полученных данных с допустимым диапазоном значений с учетом марки стали и требований к показателям механических свойств, представленным в нормативной документации на материал и диагностируемую конструкцию (ГОСТ, Правила и т.п.);
- принятие решения о возможности дальнейшей эксплуатации диагностируемой металлоконструкции.

С учетом материального исполнения большинства ответственных металлоконструкций, анализируемых в данной работе (см. главу 1), а также с учетом определения твердости по Виккерсу и параметров полученного на конструкции пирамидального отпечатка с использованием переносных твердомеров с испытательной нагрузкой 50 Н, было выполнено уточнение эмпирических формул.

Предлагаемый неразрушающий способ определения механических свойств металла основан на существующих корреляционных уравнениях взаимосвязи основных механических характеристик (σ_B, δ_5, ψ) с параметрами формы отпечатка, полученного при определении твердости по методу Виккерса [110, 111]. Данные формулы справедливы для конструкционных сталей и обеспечивают наибольшую точность из имеющихся корреляционных уравнений для косвенного определения механических свойств металла деталей и конструкций. Нашими исследованиями [134–136] сталей для химического машиностроения установлено, что не всегда полученные по указанным уравнениям значения механических свойств совпадают с фактическими, т.к. взаимосвязи установлены только для широкого ряда конструкционных машиностроительных сталей. Однако стали, применяемые для ответственных металлоконструкций (сосуды и аппараты нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, резервуары, магистральные трубопроводы, металлоконструкции грузоподъемных машин и механизмов) имеют свою специфику. Поэтому экспериментально установлено, что следует использовать поправочный коэффициент ξ в указанных выше формулах. Данный коэффициент определен экспериментально и имеет

различные значения в зависимости от группы сталей (см. таблицу 3.3). При использовании поправочного коэффициента наблюдается наиболее точное определение относительных удлинения и сужения для исследованных сталей.

Таким образом, в основу разрабатываемого способа положены уточненные формулы [110, 111]:

$$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot k \cdot S), \text{ МПа} , \quad (3.1)$$

$$\delta_5 = \xi \cdot D \cdot k \cdot (9,38 + 24,43 \cdot k \cdot S), \% , \quad (3.2)$$

$$\psi = \xi \cdot (16,4 + 80 \cdot k \cdot S), \% , \quad (3.3)$$

где k – коэффициент кратности (для нагрузки, равной 1000 Н (100 кг); 500 Н (50 кг); 300 Н (30 кг); 200 Н (20 кг); 100 Н (10 кг) и 50 Н (5 кг) величина k составляет 1; 1,414; 1,825; 2,235; 3,161 и 4,472 соответственно); S – ширина отпечатка, мм; D – диагональ отпечатка, мм; ξ – поправочный коэффициент в зависимости от группы сталей (см. таблицу 3.3).

Таблица 3.3 – Значения поправочного коэффициента ξ для сталей различных групп

Группы сталей	Значения поправочного коэффициента ξ	
	при определении δ_5 по формуле 3.2	при определении ψ по формуле 3.3
Сталь конструкционная качественная углеродистая и легированная	1,0	1,0
Конструкционная низколегированная для сварных конструкций	0,75–0,8	0,7–0,8
Сталь конструкционная теплоустойчивая	1,0	1,0
Сталь коррозионностойкая, жаростойкая, жаропрочная	1,6–1,7	0,9–1,0

Исследования проводились на сталях из каждой группы (см. таблицу 3.3), наиболее широко применяемых для объектов указанных в главе 1 данной монографии: сталь 20, 09Г2С, 15Х5М, 12Х18Н10Т. Наряду с определением механических свойств по формулам 3.1, 3.2, 3.3 выполнена проверка соответствия полученных данных со значениями механических свойств, определенных по ГОСТ 1497.

Определение механических характеристик по разработанному способу, а также по стандартному методу (по ГОСТ 1497) проводилось на одних и тех же образцах, что позволило повысить объективность оценки применимости разработанного способа. Выбор образцов для определения механических свойств обусловлен максимальной объективностью измерений: полученные значения предела прочности, относительных удлинения и сужения по разработанному способу сравнимы со значениями механических характеристик именно этих образцов, определенных по ГОСТ 1497.

При проведении данных исследований оценка фактического состояния металла диагностируемой конструкции проводится на основании анализа твердости и пара-

метров отпечатка, полученного на материале после определения твердости по Виккерсу. При этом основными механическими свойствами (которые можно косвенно определить по эмпирическим формулам взаимосвязи являются σ_B , δ_5 , ψ , KCU).

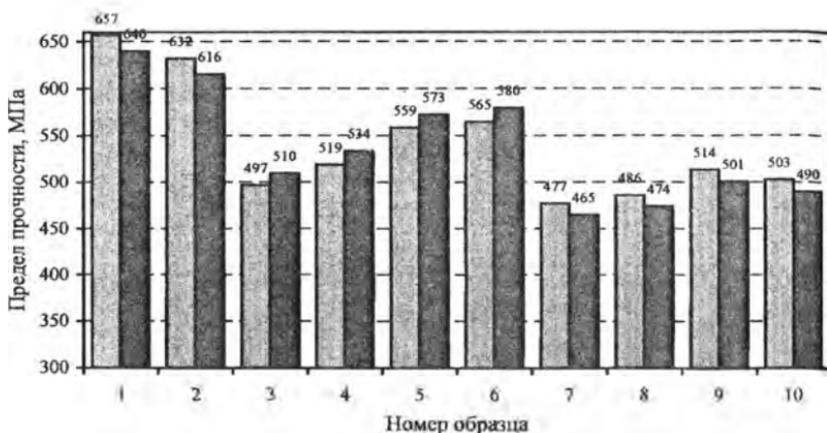
Результаты определения предела прочности σ_B по формуле 3.1 и ГОСТ 1497 приведены на рисунках 3.5–3.8 и в таблице 3.4.



Рисунок 3.5 — Сравнение значений предела прочности стали 20, определенных по формуле 3.1 и ГОСТ 1497

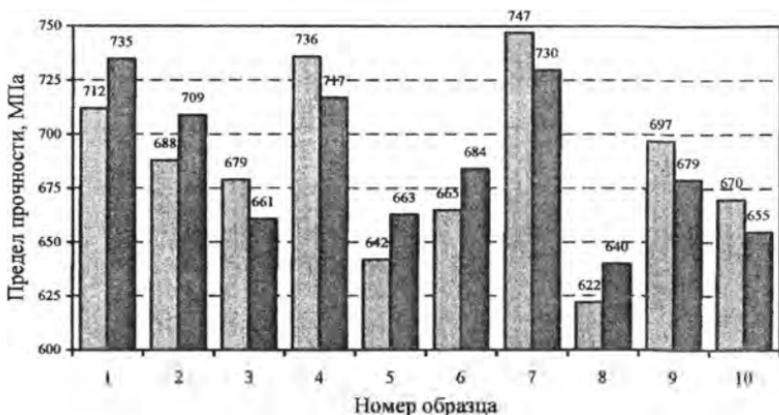


Рисунок 3.6 — Сравнение значений предела прочности стали 09Г2С, определенных по формуле 3.1 и ГОСТ 1497



■ – значения предела прочности, определенные по формуле 3.1;
 ■ – эмпирические значения предела прочности по ГОСТ 1497

Рисунок 3.7 – Сравнение значений предела прочности стали 15X5M, определенных по формуле 3.1 и ГОСТ 1497



■ – значения предела прочности, определенные по формуле 3.1;
 ■ – эмпирические значения предела прочности по ГОСТ 1497

Рисунок 3.8 – Сравнение значений предела прочности стали 12X18N10T, определенных по формуле 3.1 и ГОСТ 1497

Таблица 3.4 – Результаты определения предела прочности σ_B исследованных сталей по формуле 3.1 и ГОСТ 1497

№ образца	Сталь 20		09Г2С		15Х5М		12Х18Н10Т	
	по формуле 3.1	по ГОСТ 1497						
1	435	453	446	460	657	640	712	735
2	336	349	429	415	632	616	688	709
3	374	361	481	466	497	510	679	661
4	325	337	484	473	519	534	736	717
5	374	385	420	436	559	573	642	663
6	450	464	427	441	565	580	665	684
7	389	379	438	425	477	465	747	730
8	490	478	416	430	486	474	622	640
9	335	346	460	447	514	501	697	679
10	384	398	485	471	503	490	670	655

Для оценки погрешности определения предела прочности σ_B по формуле 3.1 построена сводная диаграмма (рисунок 3.9). Максимальная погрешность предела прочности, определенного по формуле 1.1, не превышает 5 % и составляет: сталь 20 – 3,9 %; 09Г2С – 3,6 %; 15Х5М – 2,8 %; 12Х18Н10Т – 3,2 %.

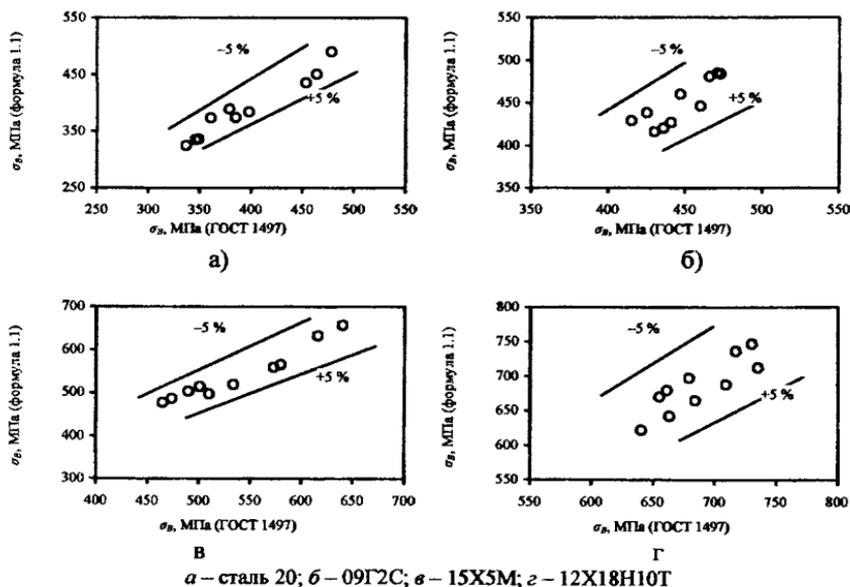
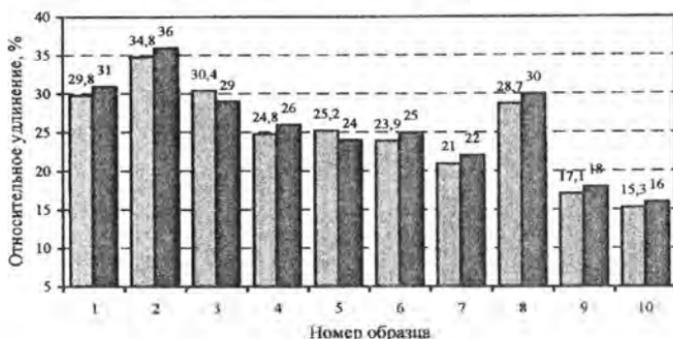


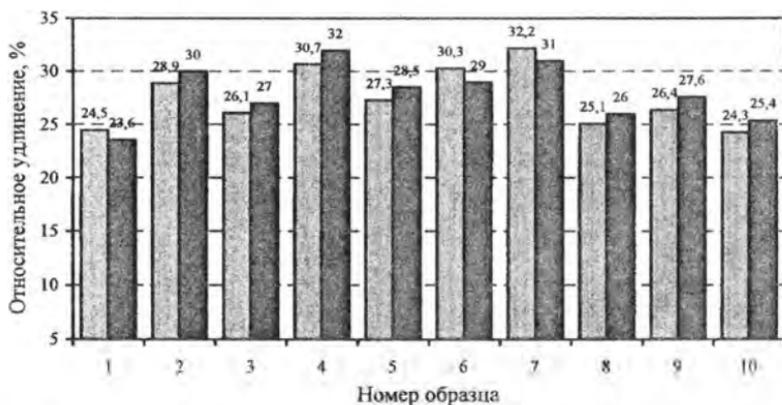
Рисунок 3.9 – Сводная диаграмма пределов прочности, определенных при растяжении и по формуле 3.1

Результаты определения относительного удлинения δ_5 по формуле 3.2 и ГОСТ 1497 приведены на рисунках 3.10–3.13 и в таблице 3.5.



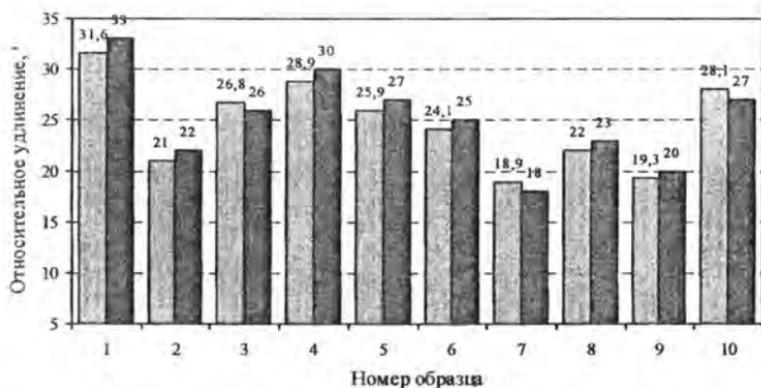
- — значения относительного удлинения, определенные по формуле 1.2;
- — эмпирические значения относительного удлинения по ГОСТ 1497

Рисунок 3.10 – Сравнение значений относительного удлинения стали 20, определенных по формуле 3.2 и ГОСТ 1497



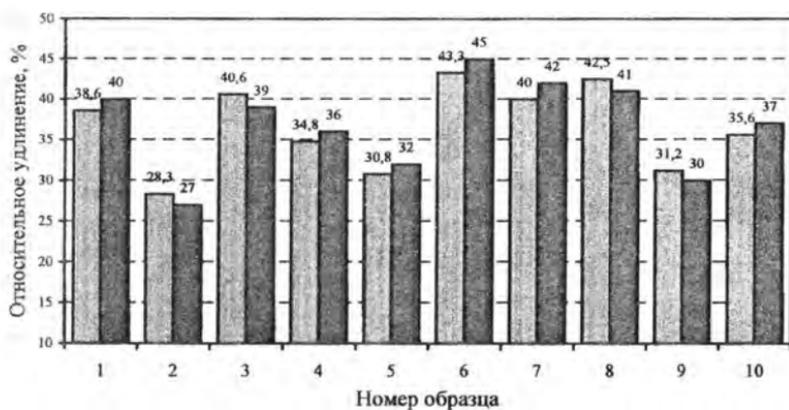
- — значения относительного удлинения, определенные по формуле 1.2;
- — эмпирические значения относительного удлинения по ГОСТ 1497

Рисунок 3.11 – Сравнение значений относительного удлинения стали 09Г2С, определенных по формуле 3.2 и ГОСТ 1497



- — значения относительного удлинения, определенные по формуле 3.2;
- — эмпирические значения относительного удлинения по ГОСТ 1497

Рисунок 3.12 – Сравнение значений относительного удлинения стали 15X5M, определенных по формуле 3.2 и ГОСТ 1497



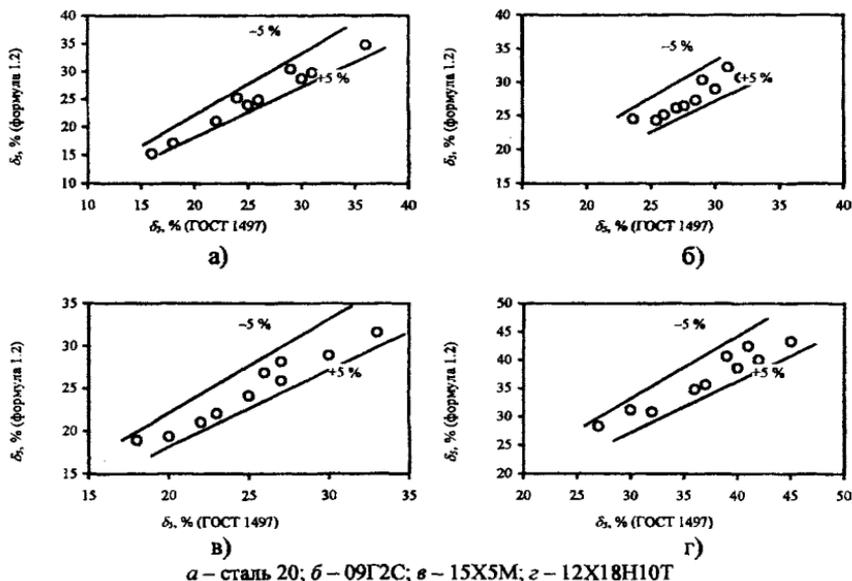
- — значения относительного удлинения, определенные по формуле 3.2;
- — эмпирические значения относительного удлинения по ГОСТ 1497

Рисунок 3.13 – Сравнение значений относительного удлинения стали 12X18H10T, определенных по формуле 3.2 и ГОСТ 1497

Таблица 3.5 – Результаты определения относительного удлинения δ_5 исследованных сталей по формуле 3.2 и ГОСТ 1497

№ образца	Сталь 20		09Г2С		15Х5М		12Х18Н10Т	
	по формуле 1.2	по ГОСТ 1497						
1	29,8	31	24,5	23,6	31,6	33	38,6	40
2	34,8	36	28,9	30	21	22	28,3	27
3	30,4	29	26,1	27	26,8	26	40,6	39
4	24,8	26	30,7	32	28,9	30	34,8	36
5	25,2	24	27,3	28,5	25,9	27	30,8	32
6	23,9	25	30,3	29	24,1	25	43,3	45
7	21	22	32,2	31	18,9	18	40	42
8	28,7	30	25,1	26	22	23	42,5	41
9	17,1	18	26,4	27,6	19,3	20	31,2	30
10	15,3	16	24,3	25,4	28,1	27	35,6	37

Для оценки погрешности определения относительного удлинения δ_5 по формуле 3.2 построена сводная диаграмма (рисунок 3.14). Максимальная погрешность относительного удлинения, определенного по формуле 2.2, не превышает 5 % и составляет: сталь 20 – 4,8 %; 09Г2С – 4,4 %; 15Х5М – 4,2 %; 12Х18Н10Т – 4,8 %.



а – сталь 20; б – 09Г2С; в – 15Х5М; г – 12Х18Н10Т

Рисунок 3.14 – Сводная диаграмма относительных удлинений, определенных при растяжении и по формуле 1.2

Результаты определения относительного сужения ψ по формуле 3.3 и ГОСТ 1497 приведены на рисунках 3.15–3.19 и в таблице 3.6.



Рисунок 3.15 – Сравнение значений относительного сужения стали 20, определенных по формуле 3.3 и ГОСТ 1497

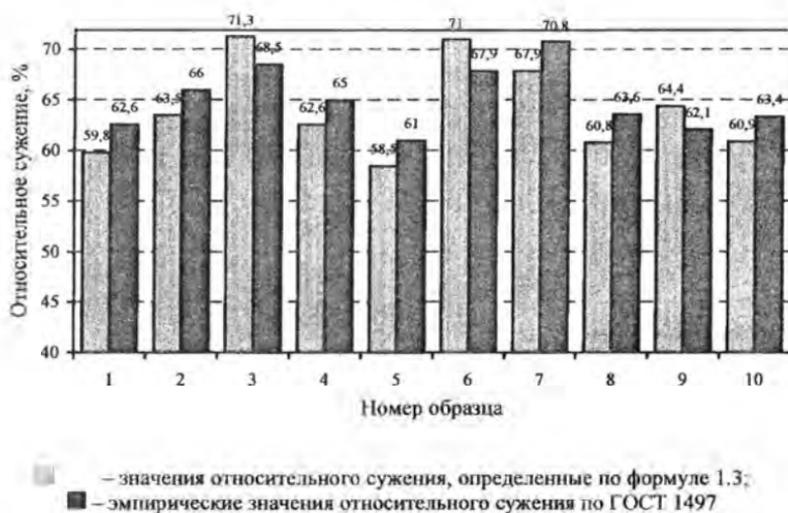
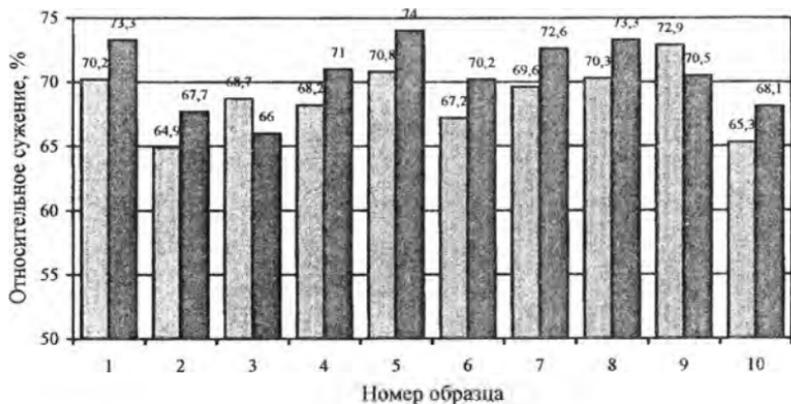
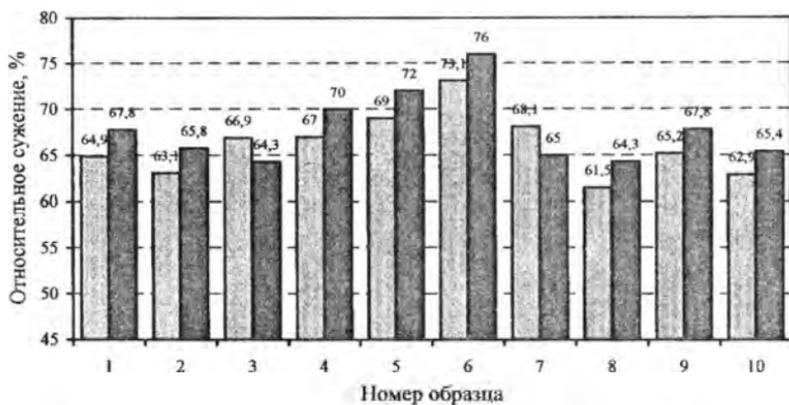


Рисунок 3.16 – Сравнение значений относительного сужения стали 09Г2С, определенных по формуле 3.3 и ГОСТ 1497



□ – значения относительного сужения, определенные по формуле 3.3;
 ■ – эмпирические значения относительного сужения по ГОСТ 1497

Рисунок 3.17 – Сравнение значений относительного сужения стали 15X5M, определенных по формуле 3.3 в ГОСТ 1497



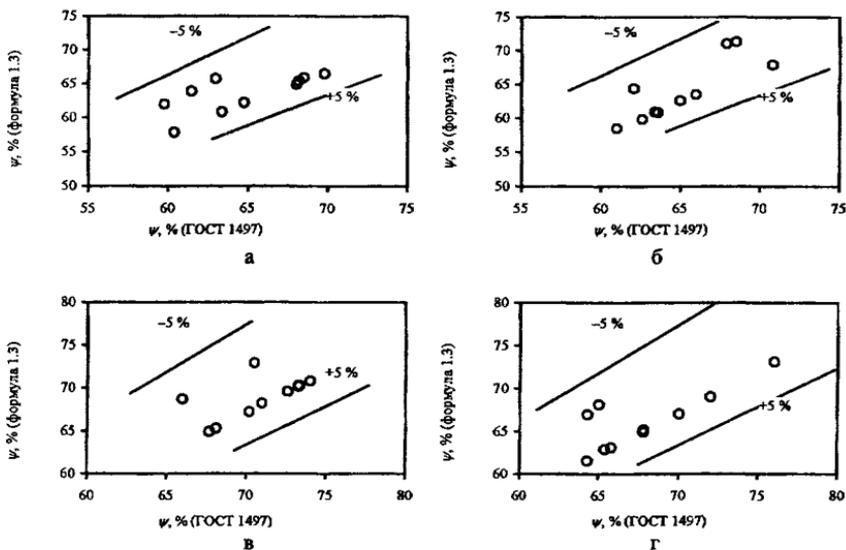
□ – значения относительного сужения, определенные по формуле 3.3;
 ■ – эмпирические значения относительного сужения по ГОСТ 1497

Рисунок 3.18 – Сравнение значений относительного сужения стали 12X18H10T, определенных по формуле 3.3 и ГОСТ 1497

Таблица 3.6 – Результаты определения относительного сужения ψ исследованных сталей по формуле 3.3 и ГОСТ 1497

№ обоз- ра- ца	Сталь 20		09Г2С		15Х5М		12Х18Н10Т	
	по фор- муле 3.3	по ГОСТ 1497						
1	65,8	63	59,8	62,6	70,2	73,3	64,9	67,8
2	66,5	69,8	63,5	66	64,9	67,7	63,1	65,8
3	64,9	68,1	71,3	68,5	68,7	66	66,9	64,3
4	57,8	60,4	62,6	65	68,2	71	67	70
5	60,8	63,4	58,5	61	70,8	74	69	72
6	65,9	68,5	71	67,9	67,2	70,2	73,1	76
7	62,2	64,8	67,9	70,8	69,6	72,6	68,1	65
8	62	59,8	60,8	63,6	70,3	73,3	61,5	64,3
9	65,4	68,2	64,4	62,1	72,9	70,5	65,2	67,8
10	63,9	61,5	60,9	63,4	65,3	68,1	62,9	65,4

Для оценки погрешности определения относительного сужения ψ по формуле 3.3 построена сводная диаграмма (рисунок 3.19). Максимальная погрешность относительного сужения, определенного по формуле 1.3, не превышает 5 % и составляет: сталь 20 – 4,7 %; 09Г2С – 4,5 %; 15Х5М – 4,3 %; 12Х18Н10Т – 4,5 %.



а – сталь 20; б – 09Г2С; в – 15Х5М; г – 12Х18Н10Т

Рисунок 3.19 – Сводная диаграмма относительных сужений, определенных при растяжении и по формуле 1.3

Анализ данных таблиц 3.4–3.6 и рисунков 3.10–3.19 показывает, что значения предела прочности σ_B , относительного удлинения δ_5 и сужения ψ определенные по формулам 3.1, 3.2 и 3.3 соответственно, коррелируют со значениями, полученными по ГОСТ 1497. Это свидетельствует о том, что при помощи указанных формул можно довольно точно определять характеристики прочности и пластичности исследованных сталей.

В результате экспериментов было установлено, что при переходе на переносные твердомеры (при работе со стальными конструкциями: сосудами, трубопроводами, резервуарами, емкостями, конструкциями грузоподъемных кранов и т.п.) в расчетные формулы, используемые для деталей и стационарных твердомеров Виккерса, необходимо вводить уточняющие коэффициенты, при этом указанные коэффициенты различны для разных групп сталей.

По результатам выполненных экспериментов установлено, что для определения механических свойств (σ_B , δ_5 , ψ) металла неразрушающим способом следует использовать формулы, приведенные в таблицах 3.7–3.9, т.к. они дают удовлетворительную корреляцию между параметрами формы пирамидального отпечатка и основными механическими свойствами металла.

Таблица 3.7 – Формулы для определения предела прочности σ_B для групп сталей, широко применяемых для ответственных конструкций

Группы сталей	Формулы для определения предела прочности σ_B , МПа
Сталь конструкционная качественная углеродистая	$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot k \cdot S)$
Конструкционная низколегированная для сварных конструкций	$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot k \cdot S)$
Сталь конструкционная теплоустойчивая	$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot k \cdot S)$
Сталь коррозионностойкая, жаростойкая	$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot k \cdot S)$

Таблица 3.8 – Формулы для определения относительного удлинения δ_5 для групп сталей, широко применяемых для ответственных конструкций

Группы сталей	Формулы для определения относительного удлинения δ_5 , %	Поправочный коэффициент для групп сталей ξ
Сталь конструкционная качественная углеродистая	$\delta_5 = \xi_a \cdot D \cdot k \cdot (9,38 + 24,43 \cdot k \cdot S)$	$\xi_a = 1,0$
Конструкционная низколегированная для сварных конструкций	$\delta_5 = \xi_b \cdot D \cdot k \cdot (9,38 + 24,43 \cdot k \cdot S)$	$\xi_b = 0,75 \dots 0,8$
Сталь конструкционная теплоустойчивая	$\delta_5 = \xi_c \cdot D \cdot k \cdot (9,38 + 24,43 \cdot k \cdot S)$	$\xi_c = 1,0$
Сталь коррозионностойкая, жаростойкая	$\delta_5 = \xi_d \cdot D \cdot k \cdot (9,38 + 24,43 \cdot k \cdot S)$	$\xi_d = 1,6 \dots 1,7$

Таблица 3.9 – Формулы для определения относительного сужения ψ для групп сталей, широко применяемых для ответственных конструкций

Группы сталей	Формулы для определения относительного сужения ψ , %	Поправочный коэффициент для групп сталей ξ
Сталь конструкционная качественная углеродистая	$\psi = \xi_a \cdot (16,4 + 80 \cdot k \cdot S)$	$\xi_a = 1,0$
Конструкционная низколегированная для сварных конструкций	$\psi = \xi_b \cdot (16,4 + 80 \cdot k \cdot S)$	$\xi_b = 0,7 \dots 0,8$
Сталь конструкционная теплоустойчивая	$\psi = \xi_c \cdot (16,4 + 80 \cdot k \cdot S)$	$\xi_c = 1,0$
Сталь коррозионноустойчивая, жаростойкая	$\psi = \xi_d \cdot (16,4 + 80 \cdot k \cdot S)$	$\xi_d = 0,9 \dots 1,0$

Таким образом, установлено, что при переходе на переносные твердомеры (при работе со стальными конструкциями: сосудами, трубопроводами, резервуарами, емкостями, элементами грузоподъемных кранов и т.п.) в расчетные формулы, используемые для деталей и стационарных твердомеров Виккерса, необходимо вводить уточняющие коэффициенты, при этом указанные коэффициенты различны для разных групп сталей.

Использование разработанного способа (с применением переносных твердомеров, переносного микроскопа, совмещенного с цифровым фотоаппаратом, а также с учетом использования поправочных коэффициентов указанных выше) при диагностировании металла технологического оборудования ОАО «Нафтан» показало, что он достаточно точен и удобен для решения ряда практических задач.

Таким образом, можно констатировать, что разработан эффективный способ неразрушающего определения основных механических свойств металла для различных диагностируемых конструкций, основанный на определении твердости по Виккерсу и параметров отпечатка на материале с последующим расчетом основных характеристик механических свойств по эмпирическим формулам взаимосвязи твердости и параметров отпечатка с пределом прочности, относительными удлинением и сужением, а, самое главное, с ударной вязкостью материала. При этом экспериментально доказана хорошая корреляция предлагаемого неразрушающего способа со стандартными способами определения механических свойств, а также выполнено определение уточняющих коэффициентов в формулах 3.1–3.3, позволяющих более точно определять основные характеристики механических свойств непосредственно на конструкции с применением переносных твердомеров.

Глава 4. РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ИЗМЕНЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДИАГНОСТИРУЕМЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

4.1. Анализ механических свойств металла диагностируемых конструкций с целью поиска эффективного метода контроля их изменений и отбраковки

Одной из главных задач диагностики любой металлоконструкции является принятие объективного решения о возможности дальнейшей эксплуатации диагностируемой металлоконструкции. При этом указанное решение должно базироваться на комплексном анализе полученных экспериментальных данных, а также учитывать изменения всех показателей механических свойств материала и разную динамику этих изменений.

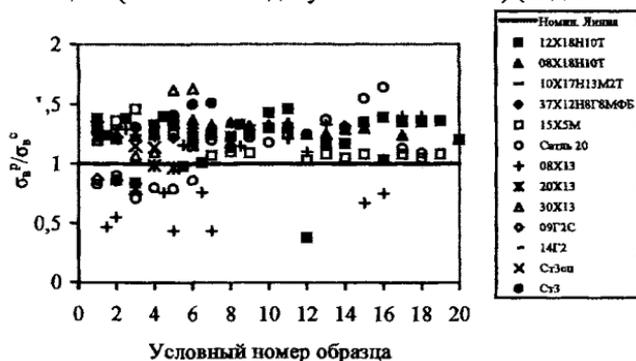
Целью исследований, приведенных ниже являлась разработка критериев оценки изменения механических свойств металла, а также поиск графической зависимости, позволяющей определять динамику деградации комплекса механических свойств металла диагностируемой конструкции

Были проведены исследования металла оборудования и конструкций более чем на 50 различных объектах: корпуса колонн, защитные кожуха реакторов, различные элементы внутренних устройств реакторов, технологические трубопроводы, змеевики камер печей, крепежные детали узлов плавающей головки теплообменников, штоки компрессоров и др. (на базе ОАО «Нафтан»). При этом учитывались сроки и условия эксплуатации (температура, давление, рабочая среда) исследованных объектов. Были определены следующие характеристики механических свойств материала: предел прочности σ_B , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ_5 при испытании на растяжение при 20 °С; ударная вязкость KCU при испытаниях на ударный изгиб при 20 °С; (для основного металла и металла сварных соединений).

Оценку текущего состояния металла оборудования и конструкций проводят путем определения механических свойств металла и сравнения их с минимальными значениями, регламентированными нормативной документацией. В большинстве случаев в нормативной документации (в первую очередь, в ГОСТ) не предусматривается строго определенных интервалов значений характеристик прочности и пластичности металла. В большинстве случаев требуется, чтобы эти характеристики были не менее некоторого определенного значения (например, $\sigma_B \geq 510$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 372$ МПа, $\delta_5 \geq 20$ %, $KCU \geq 0,78$ МДж/м²). В связи с этим на рис. 4.1, 4.2 показаны отношения величин σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ_5 , KCU , найденных при стандартных испытаниях на растяжение к их минимально допустимым значениям, предусмотренным нормативной документацией.

Для металла, который по данной характеристике удовлетворяет требованиям стандартов, указанное отношение должно быть не менее 1. Таким образом, точки, лежащие выше номинальной линии (проходящей на уровне ординаты, равной единице), соответствуют годному металлу, а точки, находящиеся ниже

указанной линии, характеризуют негодный металл. Индексами «р» и «с» на рисунках 4.1, 4.2 обозначены значения соответствующей характеристики, полученные экспериментально при растяжении (индекс «р») и предусмотренные нормативной документацией (минимально допустимое значение) (индекс «с»).



а



б

Рисунок 4.1 – Результаты оценки годности исследованных материалов по отношению: пределов прочности σ_B^p / σ_B^c (а); пределов текучести $\sigma_{0.2}^p / \sigma_{0.2}^c$ (б)

При анализе металла, имеющего пониженные значения пределов прочности и текучести материала (рис. 4.1, а, б), выявлена значительная деградация микроструктуры, что и обуславливает полученные значения. В металле происходит укрупнение зерна, а также коагуляция (зернистость с укрупнением) цементита в перлите с образованием карбидной сетки. При этом также заметно уменьшение микротвердости феррита. Указанные изменения наиболее часто связаны с явлением перегрева металла (например, при эксплуатации печных змеевиков), что и обуславливает резкое снижение прочности и пластичности.

Снижение пластичности и, особенно, ударной вязкости (рисунок 4.2, а, б), а также значительное повышение прочностных характеристик наблюдается для металла, имеющего укрупнение избыточных первичных и выделение вторичных (карбидных, интерметаллидных и др.) фаз. При этом происходит охрупчивание металла. Это обстоятельство может быть связано со старением металла и его охрупчиванием в процессе эксплуатации при повышенных температурах (в первую очередь это касается высоколегированных сталей и их сварных соединений).



а



б

Рисунок 4.2 – Результаты оценки годности исследованных материалов по отношению: относительных удлинений δ_3^p / δ_3^c (а); ударной вязкости KCU^p / KCU^c (б)

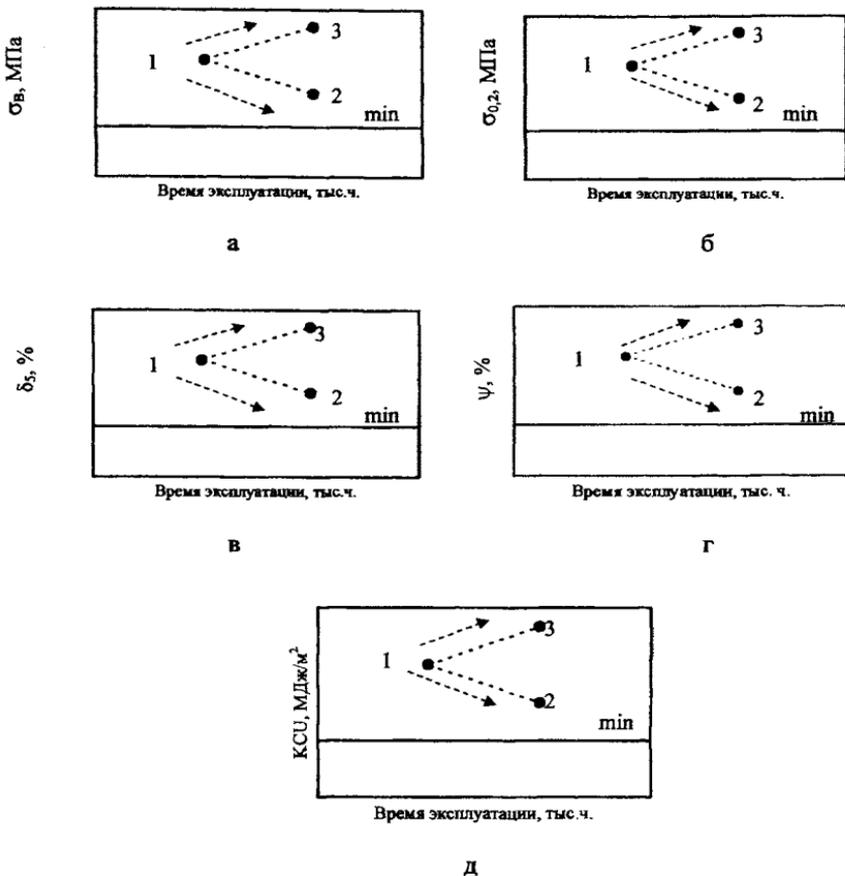
Как видно из графиков (рисунки 4.1, 4.2) одна и та же сталь характеризуется четырьмя точками на разных графиках. Так, для экспериментально определенных механических свойств аустенитных нержавеющей сталей (12X18H10T и 08X18H10T) отношения σ_B^p / σ_B^c и $\sigma_{0,2}^p / \sigma_{0,2}^c$ больше единицы. Однако, отноше-

ние KCU^p / KCU^e меньше единицы. Отношение δ_2^p / δ_2^e принимает значения как больше, так и меньше единицы. Аналогичный разброс значений наблюдается для сталей 08X13, 20X13, 15X5M и др. Таким образом, на примере нержавеющей аустенитных сталей можно показать, что по пределам прочности и текучести материал может относиться к годному металлу, по ударной вязкости – к бракованному, а по относительному удлинению – как к годному, так и к бракованному. То есть материал по различным характеристикам может находиться в различных областях годности на рисунках 4.1, 4.2.

Поэтому исследование годности металла сводится к анализу четырех графиков. Однако, при оценке деградации механических свойств по конкретной характеристике с помощью приведенных графиков не учитываются изменения, происходящие с остальными механическими характеристиками. Так, например, снижение ударной вязкости отражает процессы, вызывающие хрупкость металла в различных условиях нагружения, при этом стандартные характеристики при статических испытаниях на растяжение могут не меняться [137]. Если значение одной из характеристик на графике будет приближаться к критической границе, то это не значит, что остаточный ресурс конструкции минимален, т.к. лимитирующей для каждого конкретного случая является своя характеристика. Общий вид графиков для определения деградации конкретных механических свойств приведен на рисунке 4.3.

Из представленных графиков (рисунки 4.1, 4.2) видно, что при оценке годности металла по пределу прочности 18 % экспериментальных точек располагаются ниже номинальной линии. При оценке годности металла по пределу текучести 8 % экспериментальных точек располагаются ниже номинальной линии. При оценке годности металла по относительному удлинению – 28 % экспериментальных точек располагаются ниже номинальной линии. При оценке годности металла по ударной вязкости 69 % экспериментальных точек располагаются ниже номинальной линии.

Анализ графиков показывает, что ударная вязкость занимает особое место среди других механических характеристик и является лимитирующей характеристикой, т.к. она наиболее объективно отражает деградационные процессы, происходящие в металле (69 % экспериментальных точек характеризуют негодный металл) и свидетельствует о чувствительности металла и сварных соединений к эксплуатационным повреждениям. Вместе с тем оценка годности металла по пределу текучести, который является расчетной характеристикой, не выявляет видимой деградации металла, т.к. только 8 % экспериментальных точек характеризует негодный металл.



1 – исходное состояние; 2 и 3 – возможное состояние после эксплуатации (min – линия, характеризующая минимально допустимое значение механической характеристики по нормативно-технической документации)

Рисунок 4.3 – Общий вид графиков для определения деградации конкретных механических свойств: стрелками показаны возможные направления смещения экспериментальной точки после эксплуатации

В связи с этим предлагается использовать ударную вязкость в качестве основной характеристики для разработки методики, позволяющей определять динамику деградации механических свойств металла диагностируемых ответственных металлоконструкций. Этот вывод подтверждается тем, что ударная вязкость позволяет установить склонность материала к хрупкому разрушению, определить условия возникновения хрупкого состояния и оценить поведения материалов в условиях эксплуатации и повышенной скорости деформирования (в особенности при наличии сложных условий нагружения при эксплуатации) [71, 97].

Таким образом, анализ деградации механических свойств, а тем более определение фактического состояния механических свойств металла и деградации механических свойств при помощи данных графиков весьма затруднительны. Деградацию механических свойств при помощи приведенных графиков можно оценить только по отдельной характеристике. Оценка деградации металла по нескольким характеристикам механических свойств затруднительна, т.к. необходимо анализировать несколько графиков (рисунки 4.1 и 4.2).

Приведенным выше анализом установлена высокая чувствительность ударной вязкости к деградации металла, что открывает перспективы для дальнейшей разработки графического способа фиксирования деградации механических свойств металла, основанного на анализе ударной вязкости материала. Актуальной остается задача поиска графической зависимости, позволяющей определять динамику деградации комплекса механических свойств металла диагностируемых конструкций.

4.2. Разработка основ метода графической интерпретации фактических механических свойств металла диагностируемой конструкции

Приведенный выше анализ классического подхода к графической интерпретации механических свойств показывает затруднения в анализе и контроле динамики их изменений при эксплуатации. С учетом контроля динамики изменений указанных свойств, возникает необходимость применения принципиально иного подхода к графической интерпретации их изменений:

- наиболее эффективно контролировать изменение минимального количества показателей механических свойств;
- лучше всего использовать один комплексный показатель;
- указанный показатель обязательно должен иметь взаимосвязь с ударной вязкостью материала.

В основу разработки графической интерпретации деградации механических свойств и предлагаемого метода контроля текущего состояния металла оборудования и конструкций положена графическая интерпретация количественной взаимосвязи основных характеристик механических свойств стали [125, 126, 138]. В данных работах приведена количественная взаимосвязь характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости, которая выражается равенством:

$$n \cdot \sigma_B \cdot \delta_5 = B \cdot KCU, \quad (4.1)$$

где σ_B – предел прочности, МПа; δ_5 – относительное удлинение, отн. ед.; KCU – ударная вязкость, МДж/м²; n – коэффициент, равный 0,9; B – параметр взаимосвязи указанных характеристик (σ_B, δ_5, KCU), м⁻¹.

Левая часть равенства (4.1) определяет удельную работу при статическом деформировании [125, 126]:

$$A = n \cdot \sigma_B \cdot \delta_5, \text{ МДж/м}^3. \quad (4.2)$$

Равенство (4.1) представляет собой гиперболу $y = c/x$, которая выражается уравнением [125, 126]:

$$B = \frac{n \cdot \sigma_B \cdot \delta_5}{KCU} = \frac{A}{KCU}, \text{ м}^{-1}. \quad (4.3)$$

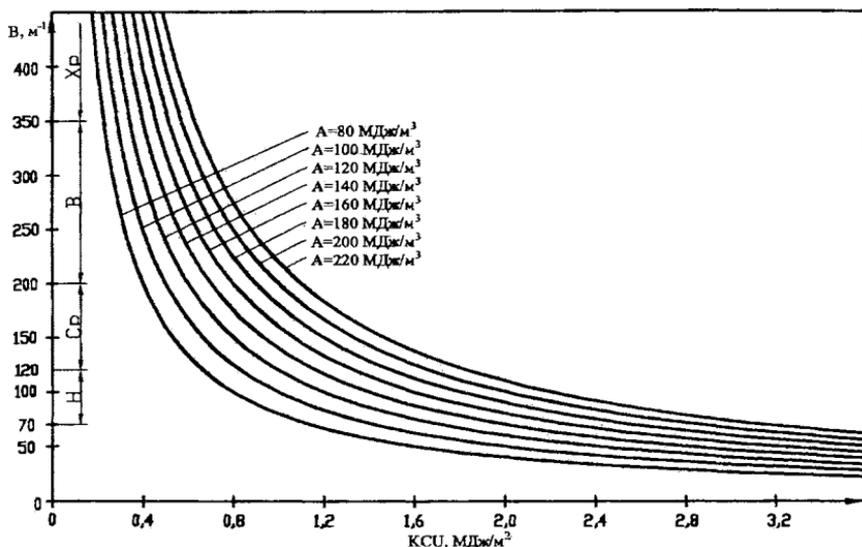
Надежность металла оборудования и конструкций определяется комплексом механических характеристик, важнейшими из которых являются пределы прочности и текучести, относительные удлинение и сужение при разрыве, ударная вязкость, трещиностойкость, твердость и др. Корректное определение этого комплекса характеристик позволит прогнозировать его ресурс и обеспечивать безотказную работу оборудования и конструкций. В данном случае параметр B является комплексным показателем механических свойств, учитывающим основные характеристики (предел прочности, относительное удлинение и ударную вязкость). Поэтому разработка методики оценки текущего состояния металла диагностируемых конструкций, учитываемых комплексным показателем B , является правомерной.

Параметр B связан с линейным размером зоны деформирования l образца на растяжение на основе соотношения $l = 1/B$, м [125]. Поэтому физический смысл параметра B заключается в том, что он является обобщенным критерием взаимосвязи комплекса механических свойств. Он взаимно связывает три основные характеристики механических свойств (σ_B, δ_5, KCU), а также выражает количественное соотношение удельной работы деформации при статическом и ударном нагружении.

Взаимосвязь характеристик механических свойств можно изобразить графически. На рисунке 4.4 изображены гиперболические кривые, построенные при значениях удельной работы при статическом деформировании A (см. формулу 4.2) от 80 до 220 МДж/м³, что перекрывает обычные для сталей величины предела прочности σ_B и относительного удлинения δ_5 [125, 126].

Эти граничные линии соответствуют наименьшей ($A = 80$ МДж/м³) и наибольшей ($A = 220$ МДж/м³) конструкционной прочности стали.

Для конкретной стали в определенном состоянии работа при статическом деформировании A близка к постоянному значению, для разных сталей она различна, вследствие чего получаются разные гиперболы в пределах графика (см. рисунок 4.4) [125, 126].



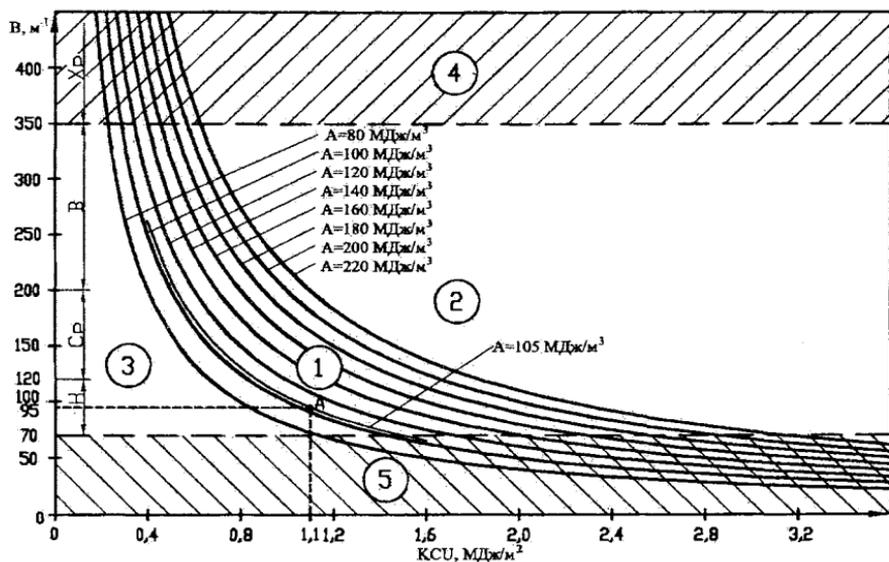
Выделены области, соответствующие сталям низкой – Н, средней – Ср и высокой – В прочностей, а также хрупкой – Хр стали, для которых параметр B соответственно равен $70 \dots 120$; $120 \dots 200$; $200 \dots 350$; $>350 \text{ м}^{-1}$ (в соответствии с данными [125, 126])

Рисунок 4.4 – Графическая взаимосвязь характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости [125, 126]

Анализ особенностей указанного метода (рисунок 4.4, формулы 4.1–4.3) дал основание для разработки так называемых карт деградации механических свойств металла диагностируемых ответственных деталей и конструкций [134–136] и позволил провести комплексные исследования. Ниже приводятся сведения о разработанных картах деградации.

На графике взаимосвязи характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости (рисунок 4.4) можно выделить пять характерных областей (рисунок 4.5).

Если экспериментальная точка располагается в области I (область ограничена двумя гиперболами и двумя штриховыми линиями) (рисунок 4.5), то это свидетельствует об оптимальном сочетании характеристик механических свойств и наилучшей работоспособности металла в конструкции.



- 1 – область наилучшего сочетания характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости стали;
- 2 – область наибольшей конструкционной прочности стали;
- 3 – область наименьшей конструкционной прочности стали;
- 4 – область склонности стали к хрупкому разрушению;
- 5 – область особо низкой конструкционной прочности стали

Рисунок 4.5 – Обобщенный график взаимосвязи характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости

Рассмотрим пример: Сталь 40 после закалки и отпуска при 400 °С имеет $\sigma_B = 730$ МПа; $\delta_5 = 0,16$; $KCU = 1,1$ МДж/м², чему соответствует $B = 95$ м⁻¹ (точка А) (см. рисунок 4.5) [125, 126].

Важным представляется метод, позволяющий для каждого конкретного случая эксплуатации металлоконструкции представить в обобщенном виде информацию относительно областей, в которых преимущественно реализуется тот или иной механизм деградации, и о скоростях деградации механических свойств металла. Один из таких методов графически представлен на рисунке 4.6. Он заключается в построении графика в координатах «ударная вязкость KCU – комплексный показатель механических свойств B ($B = 0,9 \cdot \sigma_B \cdot \delta_5 / KCU$). Как сказано выше, на этом графике можно выделить отдельные области, соответствующие интервалам фактических значений механических свойств металла, в которых преимущественно реализуется тот или иной механизм деградации. В пределах этих областей нанесены контуры постоянных скоростей деградации, иллюстрирующие усредненную скорость деградации, связанную с соответствующим со-

стоянием металла в металлоконструкции. При этом области ограничены между собой гиперболическими кривыми наибольшей ($A = 220 \text{ МДж/м}^3$) и наименьшей ($A = 80 \text{ МДж/м}^3$) конструкционной прочности, а также прямыми, соответствующими ординатам для стали низкой прочности ($B = 70 \text{ м}^{-1}$) и стали в состоянии хрупкости ($B = 350 \text{ м}^{-1}$; $A_1 = 80 \text{ МДж/м}^3$; $A_2 = 220 \text{ МДж/м}^3$) (см. рисунок 4.6).

Считается, что указанные выше значения являются предельно допустимыми для любой конструкционной стали [125, 126, 138].

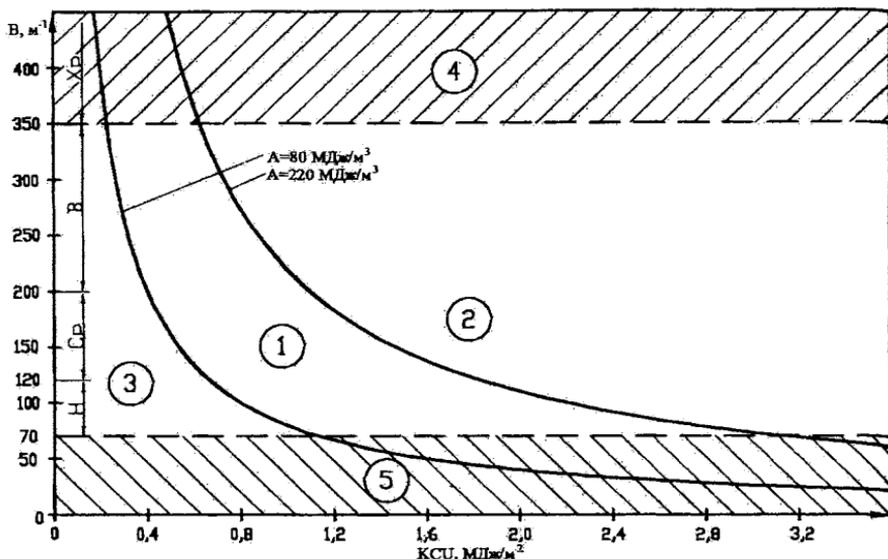
Графическая интерпретация деградации механических свойств представляет соотношение между тремя величинами: пределом прочности, относительным удлинением и ударной вязкостью. Для удобства в дальнейшем графическую интерпретацию деградации механических свойств предлагается называть картой. Подобные карты деградации механических свойств оказываются особенно полезными, когда выполняется диагностирование технического состояния металла длительно эксплуатирующегося оборудования и конструкций.

Все карты деградации разделены на области. В пределах каждой из них действует преимущественно тот или иной механизм деградации. Границы областей – геометрические места точек, в которых два механизма вносят одинаковый вклад в общую величину скорости деградации.

Лежащие в основе каждой карты данные наносятся в виде образующих отдельные области значений. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что материалы, принадлежащие к одному структурному классу, характеризуются схожими картами деградации. Для всех сталей одного класса (по экспериментальным данным) наблюдается практически идентичное расположение областей.

На карте деградации также выделены области, соответствующие сталям низкой H , средней S_p и высокой B прочностей, а также хрупкой X_p стали, для которых параметр B соответственно равен $70 \dots 120$; $120 \dots 200$; $200 \dots 350$; $>350 \text{ м}^{-1}$ (в соответствии с данными [125, 126]).

Однако, для конкретной стали или группы сталей классификация по прочности будет отличной, что найдет свое отражение на карте деградации (расположение точек в различных областях графика).



1-5 – области сочетаний механических свойств (см. рисунок 4.5)

Рисунок 4.6 – Общий вид карты деградации механических свойств

В литературе [78, с. 90; 71, с. 141] приводится обобщенная классификация конструкционных сталей по прочности (см. таблицу 4.1), которую можно адаптировать к указанному графику.

Таблица 4.1 – Обобщенная классификация конструкционных сталей по прочности [78, с. 90; 71, с. 141]

Класс конструкционной стали	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа
Низкой прочности	до 1000	до 650
Средней прочности	до 1500	650...1300
Высокой прочности	> 1500	1300...1400

Карта деградации механических свойств (рисунок 4.6) позволяет проводить интегрированную оценку комплекса механических характеристик (σ_B , δ_5 и КСУ), наглядно представлять его графически в виде одной точки и определять изменения, происходящие в материале с течением времени.

Для дальнейших работ следует учитывать особенности областей, указанных на карте деградации с позиции попадания экспериментальных точек в указанные области (рисунок 4.6).

Области 1, 2 – области работоспособного состояния сталей:

– область 1 – область наилучшего сочетания прочности, пластичности и ударной вязкости материала, что характеризует надежную эксплуатацию диагностируемой конструкции;

– область 2 – область, где металл характеризуется повышенной прочностью (σ_B , $\sigma_{0,2}$) металла при сохранении высоких значений пластичности (δ_5 , ψ) и ударной вязкости (KCU). Однако реально в условиях эксплуатации деградация механических свойств (смещение точки, характеризующий сочетание механических свойств) в область 2 не происходит (пояснения см. ниже).

Области 3, 4, 5 – области неработоспособного состояния сталей:

– область 3 – металл характеризуется низкой прочностью (σ_B , $\sigma_{0,2}$) при одновременном снижении пластичности (δ_5 , ψ) и ударной вязкости (KCU);

– область 4 – область, характеризующаяся увеличением прочности металла (σ_B , $\sigma_{0,2}$), а также снижением пластичности и ударной вязкости, что резко повышает склонность металла в процессе эксплуатации к хрупкому разрушению. Это наиболее опасная область. При этом, чем выше располагаются точки, тем более явно проявляется переход от вязкого к хрупкому разрушению;

– область 5 – металл характеризуется высокими значениями пластичности (δ_5 , ψ) и ударной вязкости (KCU), а также низкой прочностью. В области 5 кроме вязкого разрушения, возможно хрупкое разрушение в результате зарождения и развития трещины.

Наибольшей склонностью к подобным разрушениям обладают сварные соединения теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталей с повышенной механической неоднородностью. Основным его видом являются трещины в разупрочненном участке – «мягкой» прослойке – зоны термического влияния на расстоянии 2–4 мм от границы сплавления. При нагружении сварного соединения нормально к расположению шва в «мягкой» прослойке (при ее относительно малой ширине) возникает объемное напряженное состояние, препятствующее свободной деформации и перераспределению в ней напряжений. Если это нагружение проводится в условиях ползучести, то оно сопровождается снижением долговечности и резким падением пластичности сварного соединения с появлением хрупких разрушений в «мягкой» прослойке [139].

4.3. Уточнение метода графической интерпретации характеристик механических свойств сталей

Цель исследований, приведенных ниже, – разработка и уточнение метода графической интерпретации характеристик механических свойств сталей с использованием карт деградации.

Разработку, отладку и уточнение метода проводили на базе металлоконструкций нефтехимического комплекса. В качестве объектов исследований были выбраны две группы сталей, широко применяемых для изготовления различных ответственных металлоконструкций: низколегированные кремнемарганцевые и теплоустойчивые стали.

На карту деградации нанесены точки, характеризующие сочетание характеристик механических свойств для различных марок стали из двух указанных групп с учетом вида их термической обработки, а также других факторов, влияющих на механические свойства (содержание углерода, температура отпуска, состояние металла). Было проанализировано около 50 различных объектов для каждой группы сталей. В основу были положены данные из источников [112, 140, 141], а также собственные экспериментальные данные, полученные при анализе металла оборудования и конструкций ОАО «Нафтан». Результаты представлены на рисунке 4.7.

Установлено, что экспериментальные точки для указанных сталей локализируются в отдельных областях. При этом можно существенно сузить критические границы (см. рисунок 4.6), с учетом распределения экспериментальных точек. Так, для низколегированных кремнемарганцевых сталей границы распределения соответствуют

$$B = 1,8 \text{ см}^{-1}; A = 158 \text{ МДж/м}^3, B = 0,7 \text{ см}^{-1}, A = 103 \text{ МДж/м}^3.$$

Для теплоустойчивых сталей – $B = 1,9 \text{ см}^{-1}, A = 158 \text{ МДж/м}^3, B = 0,3 \text{ см}^{-1}, A = 88 \text{ МДж/м}^3$. Полученная область распределения большинства точек для каждой группы сталей является областью наилучшего сочетания характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости.

Таким образом, стали, значения механических свойств которых отражены на графиках точками, расположенными в данной области, обладают высокой конструкционной прочностью, т.е. комплексом механических свойств, обеспечивающих максимально надежную работу металла в условиях эксплуатации.

Анализ указанной области для исследованных сталей позволил сделать следующие выводы.

Для низколегированных кремнемарганцевых сталей:

1. При смещении точек к верхней гиперболе, соответствующей

$A = 158 \text{ МДж/м}^3$, конструкционная прочность стали стремится к наибольшему значению.

2. При смещении точек к нижней гиперболе, соответствующей

$A = 103 \text{ МДж/м}^3$, конструкционная прочность стали стремится к наименьшему значению.

3. При смещении точек к верхней границе, соответствующей ординате

$B = 1,8 \text{ см}^{-1}$, предел прочности увеличивается, а ударная вязкость и пластичность уменьшаются. Поэтому чем выше будут находиться точки на карте деградации, тем большей будет вероятность хрупкого разрушения металла.

4. При смещении точек к нижней границе, соответствующей ординате

$B = 0,7 \text{ см}^{-1}$, предел прочности уменьшается, а ударная вязкость и пластичность увеличиваются. Поэтому чем ниже будут находиться точки на карте деградации, тем большей будет вероятность перехода металла в зону особо низкой прочности (разупрочнение металла).

Аналогичные выводы справедливы и для теплоустойчивых сталей.

Для теплоустойчивых сталей:

1. При смещении точек к верхней гиперболе, соответствующей

$A = 158 \text{ МДж/м}^3$, конструкционная прочность стали стремится к наибольшему значению.

2. При смещении точек к нижней гиперболе, соответствующей

$A = 88 \text{ МДж/м}^3$, конструкционная прочность стали стремится к наименьшему значению.

3. При смещении точек к верхней границе, соответствующей ординате $B = 1,9 \text{ см}^{-1}$, предел прочности увеличивается, а ударная вязкость и пластичность уменьшаются. Поэтому чем выше будут находиться точки на карте деградации, тем большей будет вероятность хрупкого разрушения металла.

4. При смещении точек к нижней границе, соответствующей ординате $B = 0,3 \text{ см}^{-1}$, предел прочности уменьшается, а ударная вязкость и пластичность увеличиваются. Поэтому чем ниже будут находиться точки на карте деградации, тем большей будет вероятность перехода металла в зону особо низкой прочности (разупрочнение металла).

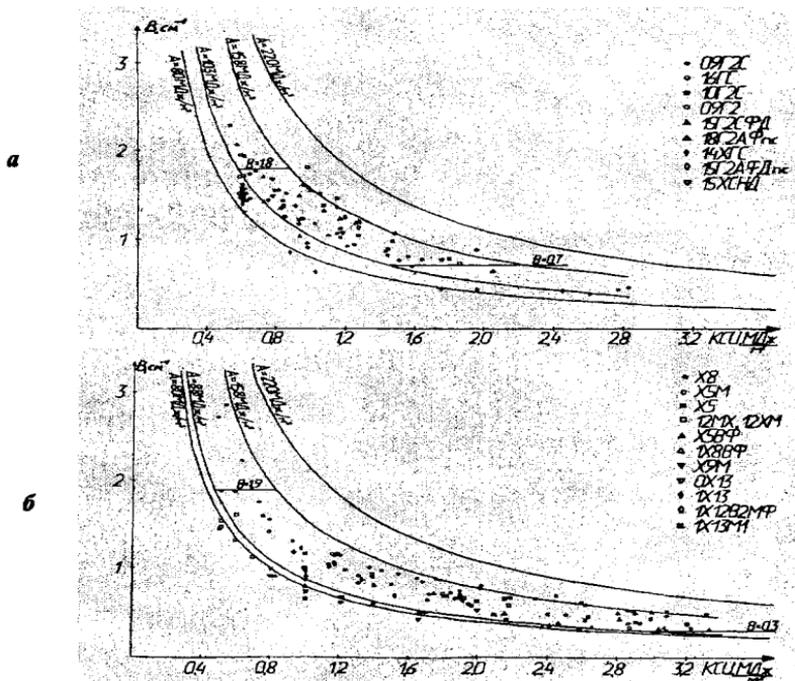
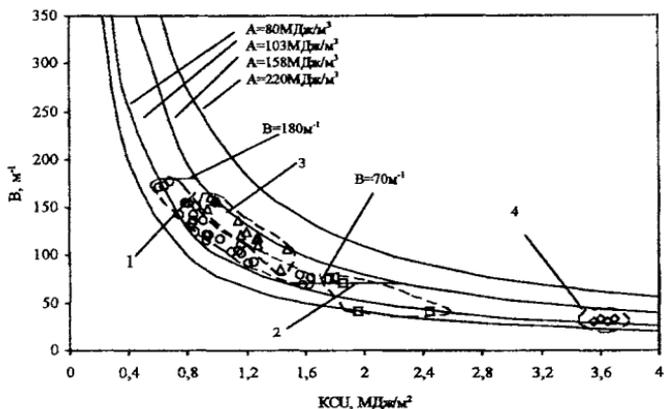
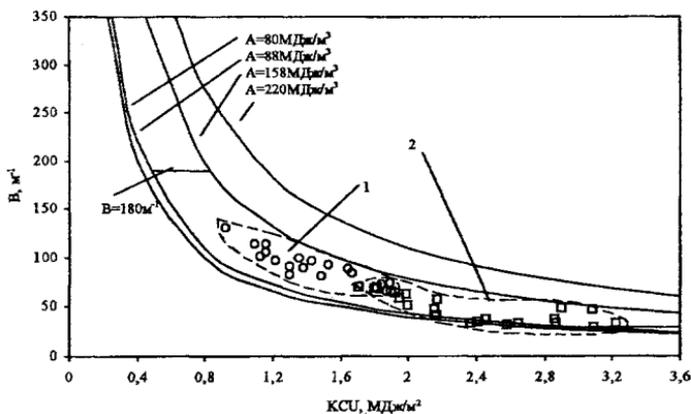


Рисунок 4.7 – Карта деградации для различного сочетания характеристик механических свойств низколегированных (а) и теплоустойчивых (б) сталей



а



б

а – для низколегированных кремнемарганцевых сталей (09Г2С, 16ГС, 10Г2С, 09Г2, 15Г2СФД, 18Г2АФ, 14ХГС, 15Г2АФД, 15ХСНД);

б – для теплоустойчивых сталей (Х8, Х5М, Х5, 12ХМ, 12МХ, Х5ВФ, 1Х8ВФ, Х9М, 0Х13, 1Х13, 1Х12В2МФ, 1Х13М1);

1 – область искусственного старения (точки – ○);

2 – область улучшения (точки – □); 3 – область нормализации (точки – Δ);

4 – область естественного старения для стали 09Г2С (точки – ◇)

Рисунок 4.8 – График взаимосвязи характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости для наиболее характерных видов термической обработки

На рисунке 4.8 выделены области, в которых расположено большинство имеющихся точек для некоторых наиболее характерных видов термической обработки низколегированных кремнемарганцевых и теплоустойчивых сталей.

Рисунок 4.8 иллюстрирует закономерное расположение точек в плоскости графика с учетом вида термической обработки сталей. Видно, что точки, соответствующие различным видам термической обработки, локализуются в отдельных областях.

Представляет интерес проследить динамику смещения экспериментальной точки в зависимости от исходных механических свойств (термической обработки) и фактических механических свойств на момент испытаний. Были экспериментально определены механические свойства стали 09Г2С, которая находилась в эксплуатации более 20 лет, т.е. сталь была подвержена естественному старению. Исходная термообработка стали – улучшение. На график (рисунок 4.8, а) нанесены четыре экспериментальные точки, которые расположены в крайней правой части графика (область 4). После естественного старения сталь 09Г2С имеет аномально высокие значения ударной вязкости ($3,59\text{--}3,63 \text{ МДж/м}^2$), прочность и пластичность при этом изменились незначительно. Области искусственного и естественного старения для нее не совпадают. Это объясняется тем, что время проведения искусственного старения обычно не превышает 4000 ч. За это время в стали не могут произойти все структурные изменения, которые происходят за время естественного старения. В литературных источниках [112] имеются сведения, согласно которым при повышении температуры и времени искусственного старения ударная вязкость может достигать больших значений (до $2,8 \text{ МДж/м}^2$), а прочность и пластичность при этом существенно не изменяются. Следовательно, на графике (рисунок 4.8, а) необходимо четко разграничивать области искусственного и естественного старения, т.к. при данных состояниях сталь имеет различные механические свойства. По сравнению с исходной термообработкой (улучшением) точки сместились в правую часть графика. Поэтому прочность стали уменьшилась, а пластичность и ударная вязкость увеличились по сравнению с исходным состоянием. Таким образом, наблюдается тенденция изменения механических свойств стали, и появилась вероятность перехода стали в зону особо низкой прочности (ползучесть и разупрочнение стали).

Таким образом, на основании обобщения приведенных выше данных, можно констатировать высокую чувствительность предложенных карт деградации к изменениям, вызываемым в материале термической обработкой и процессами естественного старения. С учетом границ оптимального сочетания механических свойств для разных групп сталей указанные карты деградации можно использовать для наглядной оценки фактического состояния металла диагностируемой конструкции.

4.4. Установление закономерностей деградации механических свойств металла оборудования и конструкций

Цель исследований, приведенных ниже – установить закономерности изменения (деградации) механических свойств металла после длительной эксплуата-

ции, а также подтвердить применимость карт деградации, позволяющих определять динамику деградации комплекса механических свойств металла оборудования и конструкций. При этом предполагалось оценить применимость карт деградации механических свойств (см. ранее) для изучения изменения механических свойств металла после длительной эксплуатации и с целью разработки методики определения остаточного ресурса оборудования и конструкций.

Экспериментальные точки, характеризующие металл тех же объектов, что и на рисунках 4.1, 4.2 нанесены на график, представленный на рисунке 4.9.

Ниже рассмотрена возможность применения карт деградации к анализу текущего состояния металла и оценена их чувствительность к структурным изменениям в материале на примере некоторых наиболее характерных сталей для ответственных металлоконструкций.

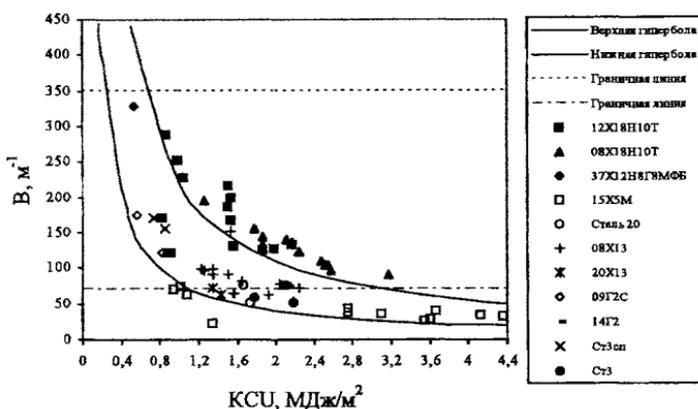
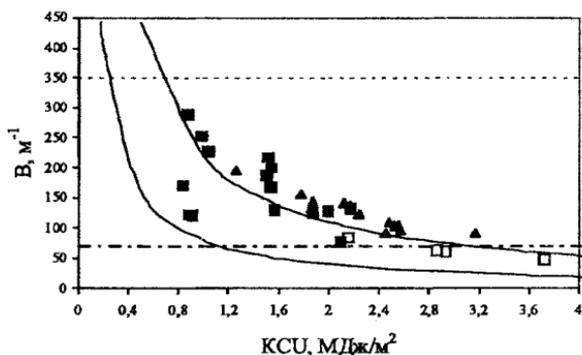


Рисунок 4.9 – Результаты оценки деградации механических свойств анализируемого металла с использованием карты деградации (верхняя и нижняя гипербола, а также граничные линии соответствуют универсальным критическим значениям, установленным для большинства конструкционных сталей (см. рисунок 4.6)

Анализ конструкций, изготовленных из аустенитных сталей 08Х18Н10Т и 12Х18Н10Т.

Экспериментальные точки для аустенитных сталей 08Х18Н10Т и 12Х18Н10Т располагаются вблизи верхней гиперболы (рисунки 4.9, 4.10), что свидетельствует о том, что конструкционная прочность данных сталей имеет наибольшее значение. По сравнению с минимально допустимыми свойствами для аустенитных сталей наблюдается смещение экспериментальных точек в левую верхнюю часть графика (рисунок 4.10). Поэтому наблюдается тенденция изменения механических свойств сталей, и чем выше находятся точки на графике, тем больше вероятность увеличения склонности стали к хрупкому разрушению. Большинство экспериментальных точек располагается выше верхней гиперболы, что свидетельствует о том, что в данных сталях при эксплуатации

происходят деградационные процессы и конструкционная прочность сталей приближается к своему максимальному значению. Пластичность и ударная вязкость при этом снижаются.



■ – 12Х18Н10Т (после длительной эксплуатации); ▲ – 08Х18Н10Т (после длительной эксплуатации); □ – 12Х18Н10Т (по ГОСТ 7350); △ – 08Х18Н10Т (свойства по [140, с. 528])

Рисунок 4.10 – Результаты оценки деградации механических свойств аустенитных нержавеющих сталей 08Х18Н10Т и 12Х18Н10Т (верхняя и нижняя гиперболы, а также граничные линии соответствуют универсальным критическим значениям, установленным для большинства конструкционных сталей (см. рисунок 4.6)

Аустенитные стали после длительного высокотемпературного старения имеют структуру с включениями избыточных фаз внутри и по границам зерен. Эти включения наиболее часто идентифицируются как $Me_{23}C_6$, σ -фаза и TiC [142]. Частицы карбида TiC расположены внутри аустенитных зерен, $Me_{23}C_6$ и σ -фаза – на границах и по тройным стыкам зерен. Предполагается [142], что дальнейшее эксплуатационное старение данных сталей и перегрев будут сопровождаться коагуляцией и ростом частиц σ -фазы, что может привести к образованию микропор по границам аустенитных зерен в местах расположения σ -фазы. Указанные структурные изменения металла могут способствовать снижению несущей способности конструкции из данных сталей.

Также известны случаи хрупкого разрушения при температурах 500–650 °С узлов из аустенитной стали 12Х18Н10Т, которые подвергались гибке и правке в холодном состоянии. Такие разрушения наблюдались на гibaх труб пароперегревателей паровых котлов, на компенсаторах газопроводов и т.д. Считается, что разрушение в данном случае вызвано резким охрупчиванием данной стали в условиях ползучести при температурах 500 °С и выше [142, 143, 144]. Охрупчивание объясняют прохождением диффузионных процессов, приводящих к резкому упрочнению тела зерна вследствие дисперсионного твердения и разрушения границ зерен [143]. Напряжения при деформировании наклепанного металла достаточно высоки, поэтому появление первых межзеренных надрывов создающих местное перенапряжение, вызывает быстрое разрушение.

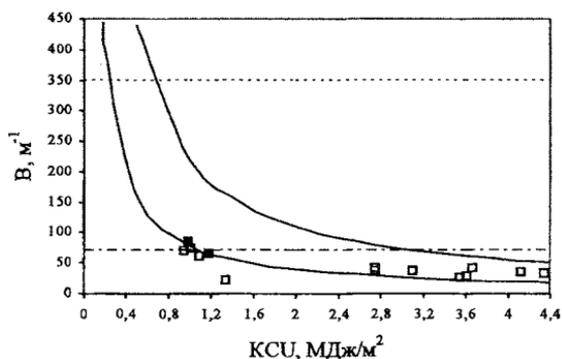
В термически обработанном металле, когда остаточные напряжения полностью сняты, деформационная способность сохраняется на достаточно высоком уровне и нет условий для возникновения межзеренных надрывов [145]. Нарушение оптимальных параметров термической обработки или ее отсутствие после гибки или вальцовки может привести к преждевременному выходу из строя сварных конструкций [142].

Исследования высокотемпературного охрупчивания стали 12X18H10T [144] показывают, что в процессе длительной эксплуатации по границам аустенитных зерен образуется оксидная пленка, которая служит очагом зарождения трещины. При этом основной причиной, вызывающей разрушение, является усиленная диффузия кислорода с поверхности в глубь металла по границам аустенитных зерен. Возможен следующий механизм охрупчивания данной стали: значительные продольные остаточные напряжения в сварных соединениях и наличие концентраторов напряжений на поверхности металла приводят к интенсификации процессов ползучести и ускоренной диффузии кислорода по границам аустенитных зерен, что способствует образованию оксидов железа, по которым развивается трещина [144]. С учетом всего сказанного выше одной из возможных причин разрушения сварных соединений стали 12X18H10T при температуре около 500 °С является избирательное окисление границ зерен с последующим возникновением трещин в хрупкой оксидной фазе.

Таким образом, приведенный график (рисунок 4.10) отражает закономерности деградации механических свойств металла (на примере сталей 08X18H10T и 12X18H10T).

Анализ конструкций, изготовленных из теплоустойчивых сталей (на примере стали 15X5M).

По сравнению с минимально допустимыми свойствами для стали 15X5M (по ГОСТ 550) большинство экспериментальных точек сместилось в правую часть графика (см. рисунки 4.9, 4.11). Следовательно, прочность стали уменьшилась, а пластичность и ударная вязкость увеличились по сравнению с минимально допустимыми требованиями. Поэтому наблюдается тенденция изменения механических свойств стали, и появилась вероятность перехода стали в область особо низкой прочности (разупрочнение стали, состояние ползучести). При этом в теплоустойчивой низколегированной стали 15X5M имеет место сфероидизация перлита (сорбита и бейнита). Известно, что деградация микроструктуры и механических свойств теплоустойчивых сталей в конечном счете приводит к появлению в металле микропор ползучести [142, 143]. На стадиях длительной эксплуатации (свыше 100 тыс. ч.) коагуляция (укрупнение) карбидных частиц становится основным фактором, приводящим к снижению эффективности дисперсионного твердения теплоустойчивых сталей. Все это ухудшает прочностные свойства металла и может стать причиной аварийного разрушения оборудования. Для некоторых экспериментальных точек ударная вязкость стали 15X5M при длительной эксплуатации изменилась незначительно (рисунки 4.2, б и 4.11): точки расположены вблизи требуемых свойств по ГОСТ 550 на рисунке 4.11.



□ – 15Х5М (после длительной эксплуатации); ■ – 15Х5М (по ГОСТ 550)

Рисунок 4.11 – Результаты оценки деградации механических свойств стали 15Х5М (верхняя и нижняя гиперболы, а также граничные линии соответствуют универсальным критическим значениям, установленным для большинства конструкционных сталей (см. рисунок 4.6)

Однако, опыт эксплуатации печных змеевиков при длительных пребываниях при повышенных температурах показывает, что пластичность и ударная вязкость могут заметно снизиться. Так, например, на установке «Псевдокумол» (здесь и ниже установки ОАО «НАФТАН» (г. Новополоцк) после 16 лет эксплуатации относительное удлинение металла труб составило 17,3–18,2 %, ударная вязкость 0,94–1,09 МДж/м² (против, соответственно, норм 22 % и 1,18 МДж/м²), а на установке «Вторичная ректификация бензинов» (27 лет эксплуатации) хотя такого существенного изменения свойств и не выявлено, все же в металле наблюдались заметные структурные изменения. Но при этом следует отметить, что температура рабочих сред в обоих случаях была сравнительно невысока (примерно 200 и 350 °С). Заметные изменения структуры наблюдались в металле на установке «Гидроочистка», где длительность эксплуатации составила 27 лет при температурах рабочей среды до 400 °С. Таким образом, длительные сроки эксплуатации металла 15Х5М (более 10 лет) приводят к снижению пластичности и ударной вязкости, т.е. сталь 15Х5М склонна к тепловой хрупкости [112].

Анализ конструкций, изготовленных из конструкционных углеродистых сталей (на примере стали 20).

Основной металл и зона термического влияния стали 20 имеют невысокие пластические свойства (рисунок 4.12). В углеродистой стали 20 при длительной эксплуатации происходит графитизация перлита (распад цементита Fe₃C на железо и структурно свободный графит (углерод). Факторами, вызывающими графитизацию, являются повышенное содержание алюминия и кремния в стали, мелкое зерно, остаточные напряжения после сварки или холодной гибки, повы-

шенная температура, длительность наработки элемента конструкции и рабочие эквивалентные напряжения [97]. Детали, пораженные графитизацией, проявляют высокую чувствительность к хрупкому разрушению. Для стали 20 высокая работоспособность обеспечивается при отсутствии графитизации металла.

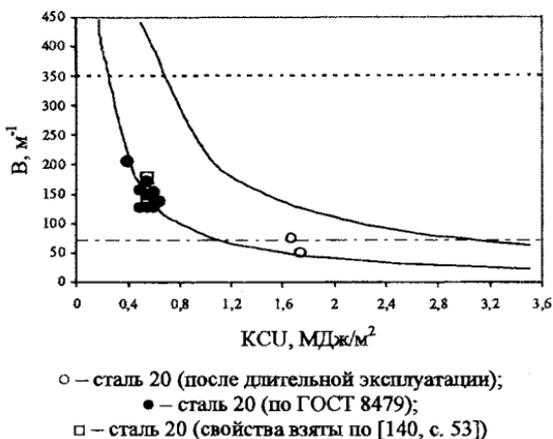
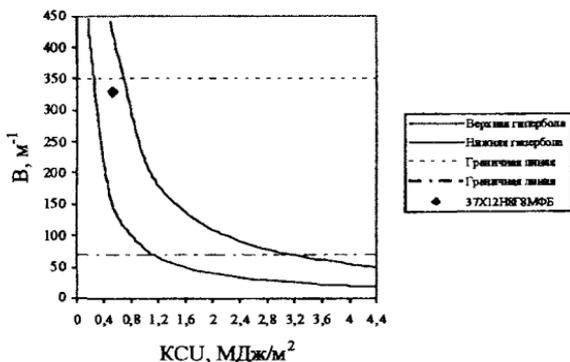


Рисунок 4.12 – Результаты оценки деградации механических свойств стали 20: (верхняя и нижняя гиперболы, а также граничные линии соответствуют универсальным критическим значениям, установленным для большинства конструкционных сталей (см. рисунок 4.6)

Анализ элементов крепежа, изготовленных из специальных высоколегированных сталей (на примере стали 37Х12Н8Г8МФБ).

Для стали 37Х12Н8Г8МФБ экспериментальная точка располагается в левой верхней части графика (рисунки 4.9, 4.13) и находится в области, характеризующей стали с повышенной хрупкостью. При этом на установке «Гидроочистка-4» ОАО «Нафтан» произошло разрушение крепежного материала (шпильки) узла плавающей головки теплообменника из данной стали, которое было вызвано продолжительным (около 20 лет) совместным действием агрессивной среды, содержащей водород и сероводород, и постоянным наличием растягивающих напряжений, обуславливающих сероводородное растрескивание под действием напряжений. Вид разрушения (45° к оси) типичен при совместном наводороживании и наличии напряжений растяжения при дополнительном негативном воздействии высокой температуры и свидетельствует о решающей роли в процессе разрушения водородного охрупчивания под действием напряжений.



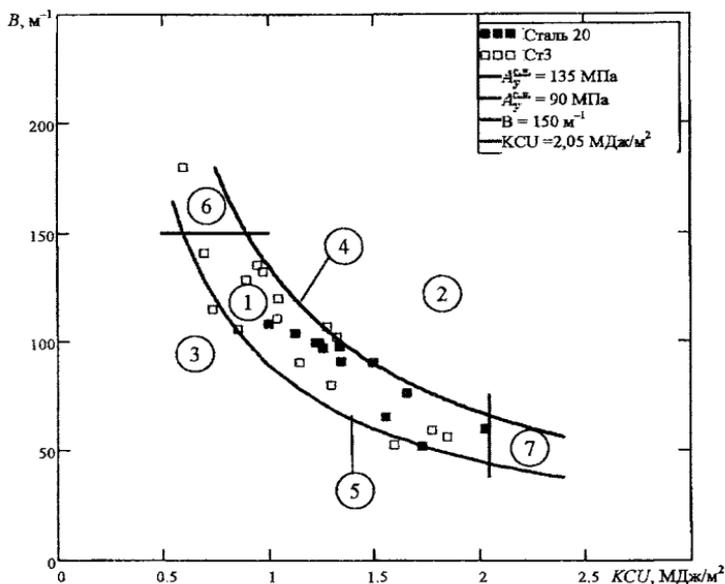
◆ – сталь 37Х12Н8Г8МФБ (после длительной эксплуатации)

Рисунок 4.13 – Результаты оценки деградации механических свойств стали 37Х12Н8Г8МФБ (верхняя и нижняя гиперболы, а также граничные линии соответствуют универсальным критическим значениям, установленным для большинства конструкционных сталей (см. рисунок 4.6))

Таким образом, приведенный краткий анализ свойств некоторых сталей после длительной эксплуатации свидетельствует о хорошей селективности при распределении экспериментальных точек в плоскости карты деградации (рисунок 4.9), что позволяет проводить комплексные исследования деградации механических свойств металла оборудования и конструкций и свидетельствует о возможности фиксирования изменений в стали в процессе длительной эксплуатации при помощи разработанных карт деградации.

Установлена закономерность в расположении экспериментальных точек на картах деградации характеристик механических свойств (рисунки 4.9–4.13) при деградации механических свойств и старении металла, что свидетельствует о возможности их применения для определения скорости деградации механических свойств и разработки методики для определения остаточного ресурса металла оборудования.

Вместе с тем анализ расположения экспериментальных точек на картах деградации механических свойств разных групп сталей показывает их различную локализацию (рисунки 4.9–4.13), что позволяет говорить о возможности уточнения критических границ на картах деградации различных групп сталей. Было проанализировано около 50 металлоконструкций, изготовленных из различных сталей, находящихся в эксплуатации и уточнены критические границы карт деградации (см. рисунки 4.14–4.17). При диагностировании конструкции выход экспериментальной точки, полученной при текущем диагностировании за указанные границы, т.е. в области неработоспособного состояния (области 3, 6, 7 см. рисунки 4.14–4.17) свидетельствует о необходимости вывода конструкции из эксплуатации по причине несоответствующего (закритического) уровня механических свойств.

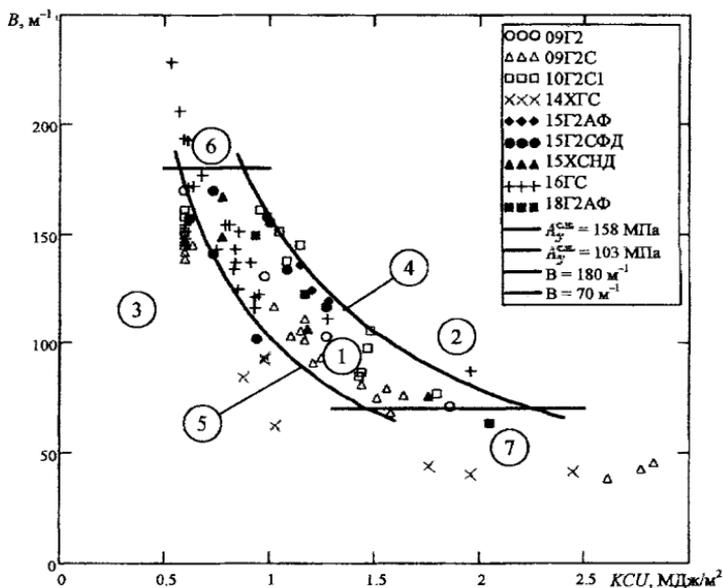


1, 2 – области работоспособного состояния сталей; 3, 6, 7 – области неработоспособного состояния сталей; 4 – граница наибольшей конструкционной прочности сталей;

5 – граница наименьшей конструкционной прочности сталей

Точками на графике показаны фактические механические свойства объектов, изготовленных из указанных сталей (на основании анализа и диагностики более 50 различных металлоконструкций, эксплуатирующихся на нефтеперерабатывающих заводах)

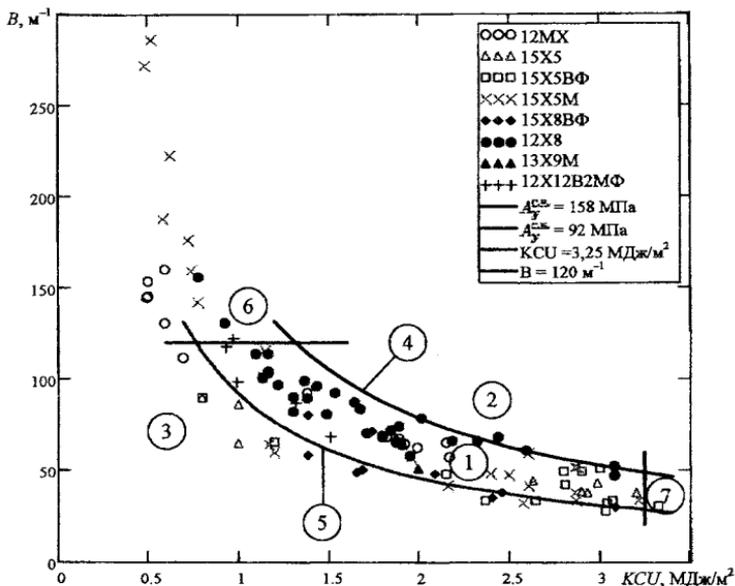
Рисунок 4.14 – Карта деградации механических свойств для углеродистых сталей



1, 2 – области работоспособного состояния сталей; 3, 6, 7 – области неработоспособного состояния сталей; 4 – граница наибольшей конструкционной прочности сталей;
5 – граница наименьшей конструкционной прочности сталей

Точками на графике показаны фактические механические свойства объектов, изготовленных из указанных сталей (на основании анализа и диагностики более 50 различных металлоконструкций, эксплуатирующихся на нефтеперерабатывающих заводах)

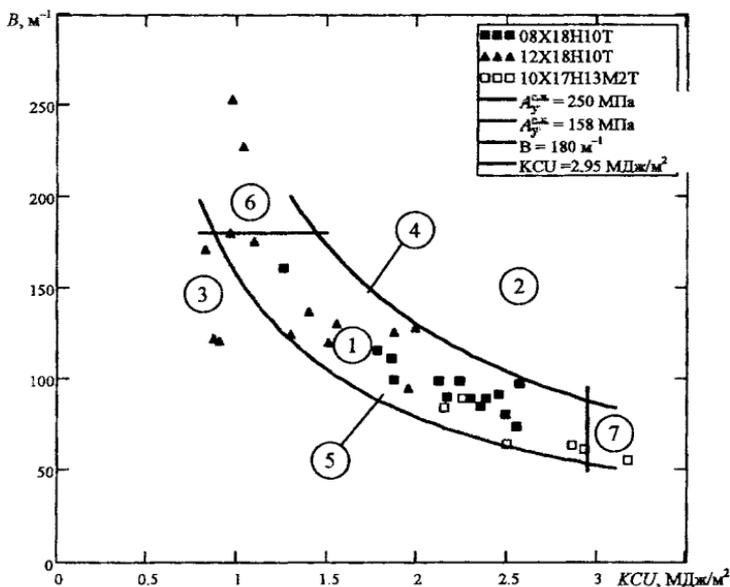
Рисунок 4.15 – Карта деградации механических свойств для низколегированных кремнемарганцевых сталей



1, 2 – области работоспособного состояния сталей; 3, 6, 7 – области неработоспособного состояния сталей; 4 – граница наибольшей конструкционной прочности сталей; 5 – граница наименьшей конструкционной прочности сталей

Точками на графике показаны фактические механические свойства объектов, изготовленных из указанных сталей (на основании анализа и диагностики более 50 различных металлоконструкций, эксплуатирующихся на нефтеперерабатывающих заводах)

Рисунок 4.16 – Карта деградации механических свойств для теплоустойчивых сталей



1, 2 – области работоспособного состояния сталей; 3, 6, 7 – области неработоспособного состояния сталей; 4 – граница наибольшей конструкционной прочности сталей; 5 – граница наименьшей конструкционной прочности сталей

Точками на графике показаны фактические механические свойства, объектов изготовленных из указанных сталей (на основании анализа и диагностики более 50 различных металлоконструкций, эксплуатирующихся на нефтеперерабатывающих заводах)

Рисунок 4.17 – Карта деградации механических свойств для коррозионностойких сталей

Пример построения карты деградации механических свойств для конкретной диагностируемой конструкции и возможная работа с ней приведены в приложении.

4.5. Разработка способа определения скорости деградации механических свойств металла

В основу способа определения скорости деградации механических свойств металла, а, следовательно, контроля текущего состояния металла оборудования и конструкций положена количественная взаимосвязь основных характеристик механических свойств стали, которая связывает основные показатели механических свойств (предел прочности σ_B , относительное удлинение δ_5 и ударную вязкость KCU) в одну математическую зависимость, а также карты деградации механических свойств (см. выше). При этом текущее состояние металла (а именно основные показатели механических свойств) могут быть представлены одной точкой на карте деградации (см. разделы 4.2–4.4 данной монографии).

Скорость деградации предлагается определять для комплекса механических свойств диагностируемой конструкции. Для этого необходимо определить значение характеристик механических свойств (разрушающим или неразрушающим способом) и нанести экспериментальную точку на карту деградации. Через определенную промежуток времени следует повторить измерения и снова нанести точку на карту деградации. Расстояние между точками, отнесенное ко времени между измерениями, позволит определить скорость деградации механических свойств. Тогда каждая сталь в зависимости от присущих ей механических свойств (σ_B , δ_5 , KCU) будет отмечена соответствующей точкой на карте деградации – например, сталь А отмечена точкой с координатами (KCU^A ; B^A) (см. рисунок 4.18).

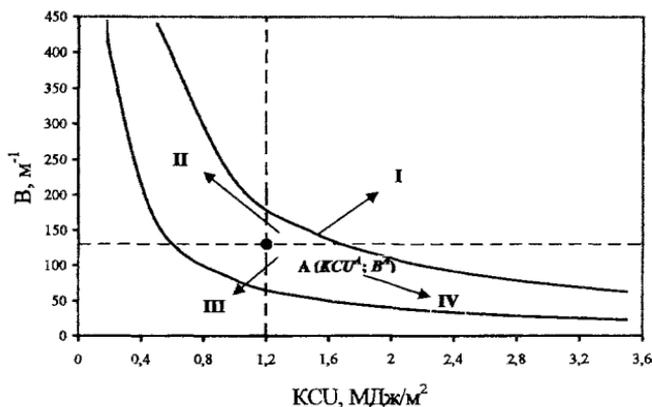


Рисунок 4.18 – Схема расположения экспериментальной точки для стали А с координатами (KCU^A ; B^A). Стрелками указаны возможные направления деградации механических свойств

Деградация механических свойств при эксплуатации по отношению к точке А может происходить по четырем различным направлениям: 1) в область I; 2) в область II; 3) в область III; 4) в область IV.

При деградации механических свойств в область I скорость деградации механических свойств следует определять следующим образом (см. рисунок 4.19, формулу 4.1).

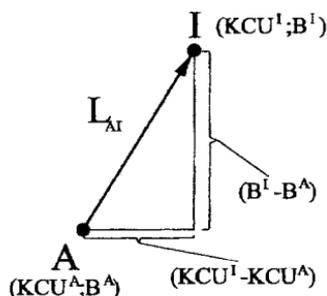


Рисунок 4.19 – Схема для определения скорости деградации механических свойств металла при смещении экспериментальной точки в область I (рисунок 4.18)

$$V_{\text{дегр. мех. св-в}} = \frac{L_{AI}}{\tau}, \text{ ед. мех. св-в / год}, \quad (4.1)$$

где $V_{\text{дегр. мех. св-в}}$ – скорость деградации механических свойств, ед. мех. св-в/год; L_{AI} – расстояние на графике между экспериментальными точками, ед. мех. св-в; τ – период времени между измерениями, годы (тыс. ч.).

Расстояние L_{AI} определяется по формуле

$$L_{AI} = \sqrt{(KCU^I - KCU^A)^2 + (B^I - B^A)^2}, \text{ ед. мех. св-в}. \quad (4.2)$$

При деградации механических свойств в область II скорость деградации механических свойств следует определять следующим образом (см. рисунок 4.20, формулу 4.3).

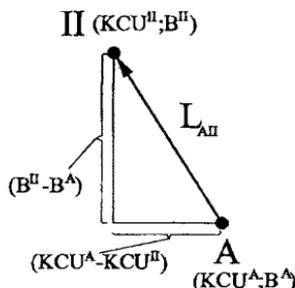


Рисунок 4.20 – Схема для определения скорости деградации механических свойств металла при смещении экспериментальной точки в область II (рисунок 4.18)

$$V_{\text{дегр. мех. св. - в}} = \frac{L_{\text{AII}}}{\tau}, \text{ ед. мех. св. - в / год}, \quad (4.3)$$

где L_{AII} – расстояние на графике между экспериментальными точками, ед. мех. св.-в.
 Расстояние L_{AII} определяется по формуле:

$$L_{\text{AII}} = \sqrt{(KCU^A - KCU^{\text{II}})^2 + (B^{\text{II}} - B^A)^2}, \text{ ед. мех. св. - в.} \quad (4.4)$$

При деградации механических свойств в область III скорость деградации механических свойств следует определять следующим образом (см. рисунок 4.21, формулу 4.5).

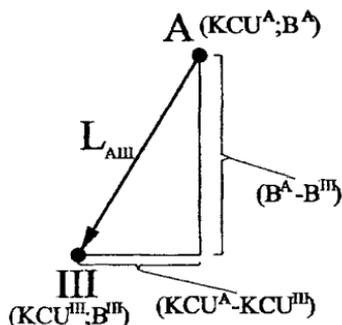


Рисунок 4.21 – Схема для определения скорости деградации механических свойств металла при смещении экспериментальной точки в область III (рисунок 4.18)

$$V_{\text{дегр. мех. св. - в}} = \frac{L_{\text{AIII}}}{\tau}, \text{ ед. мех. св. - в / год} \quad (4.5)$$

где L_{AIII} – расстояние на графике между экспериментальными точками, ед. мех. св.-в.
 Расстояние L_{AIII} определяется по формуле

$$L_{\text{AIII}} = \sqrt{(KCU^A - KCU^{\text{III}})^2 + (B^A - B^{\text{III}})^2}, \text{ ед. мех. св. - в.} \quad (4.6)$$

При деградации механических свойств в область IV скорость деградации механических свойств следует определять следующим образом (см. рисунок 4.22, формулу 4.7).

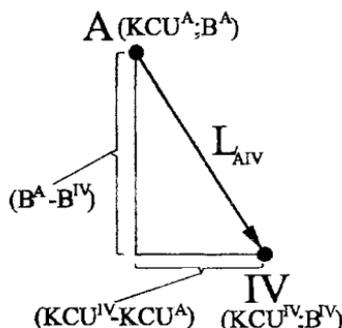


Рисунок 4.22 – Схема для определения скорости деградации механических свойств металла при смещении экспериментальной точки в область IV (рисунок 4.18)

$$V_{\text{дегр. мех. св-в}} = \frac{L_{\text{ДВ}}}{\tau}, \text{ ед. мех. св-в / год}, \quad (4.7)$$

где $L_{\text{ДВ}}$ – расстояние на графике между экспериментальными точками, ед. мех. св-в.

Расстояние $L_{\text{ДВ}}$ определяется по формуле

$$L_{\text{ДВ}} = \sqrt{(KCU^{\text{IV}} - KCU^{\text{A}})^2 + (B^{\text{A}} - B^{\text{IV}})^2}, \text{ ед. мех. св-в}. \quad (4.8)$$

Практическая апробация предложенного способа определения скорости деградации механических свойств выполнена на примере металла шпилек после эксплуатации 50 и 100 тыс. ч.

В работе [146, с. 111–113] приводятся данные о механических свойствах ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$, δ_5 , ψ , KCU , HV) крепежных материалов (шпилек) в исходном состоянии и после эксплуатации в течение 50 и 100 тыс. ч. (см. таблицу 4.2). К материалу шпилек предъявляются требования 100%-го контроля твердости и остальных механических свойств в исходном состоянии и через каждые 50 тысяч часов эксплуатации [146].

Экспериментальные данные таблицы 4.2 нанесены на карту деградации механических свойств (см. рисунок 4.23). Эта же карта, но в увеличенном масштабе, представлена на рисунке 4.24.

Таблица 4.2 – Механические свойства металла крепежа (шпилек) после различных сроков эксплуатации [146]

Марка стали	Исходное состояние по ГОСТ 20700						Состояние после эксплуатации											
	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU , МДж/м ²	HV	50 тыс. ч.					100 тыс. ч. и более						
							$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU , МДж/м ²	HV	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU , МДж/м ²	HV
Не менее						Не менее					Не менее							
20Х1М1Ф1Т Р	830	680...800	15	50	0,6	241...277	780	680...800	15	50	0,5	224...269	770	620...800	15	50	0,4	221...269
20ХМФБР	830	680...800	14	50	0,6	241...277	780	680...800	14	50	0,5	241...277	750	620...800	14	50	0,4	241...277
18Х12ВМБФ Р	830	680...800	15	50	0,6	241...277	780	680...800	15	45	0,5	228...277	750	620...800	15	45	0,4	221...277
20Х2М1Ф	830	680...800	12	50	0,6	241...277	780	680...800	12	50	0,4	224...277	720	620...800	12	50	0,4	221...269

Примечание. В графах, где приведена одна цифра, сообщаются минимально допустимые значения по [146].

Рисунок 4.23 показывает, что при эксплуатации происходит изменение (деградация) механических свойств металла шпилек, изготовленных из сталей разных марок – стали 20Х1М1Ф1ТР (рисунок 4.25), стали 20ХМФБР (рисунок 4.26), стали 18Х12ВМБФР (рисунок 4.27), стали 20Х2М1Ф (рисунок 4.28).

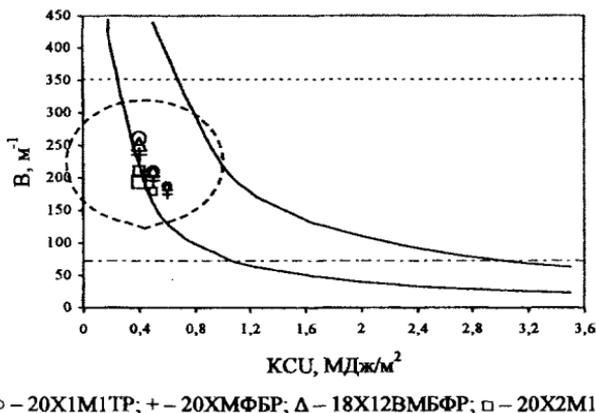


Рисунок 4.23 – Результаты оценки деградации механических свойств металла шпилек

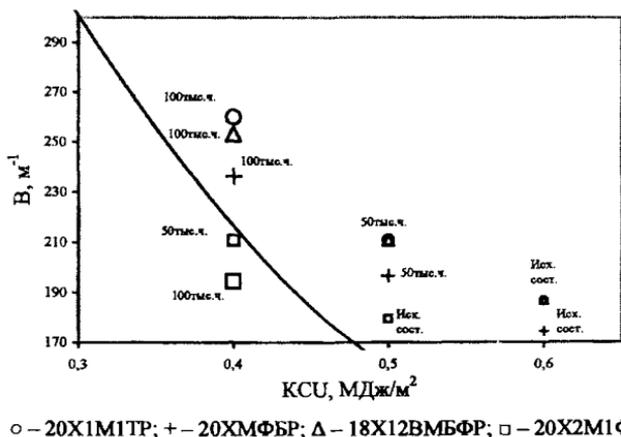
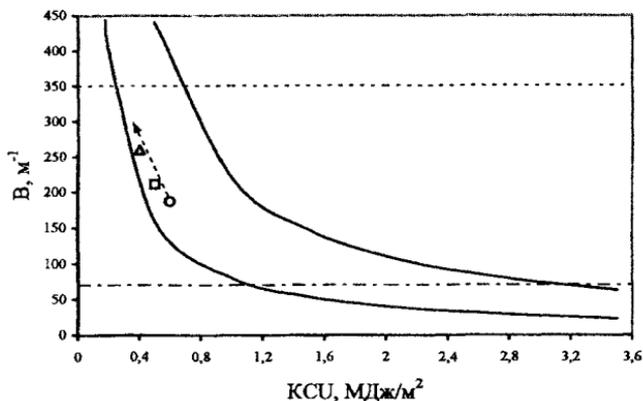
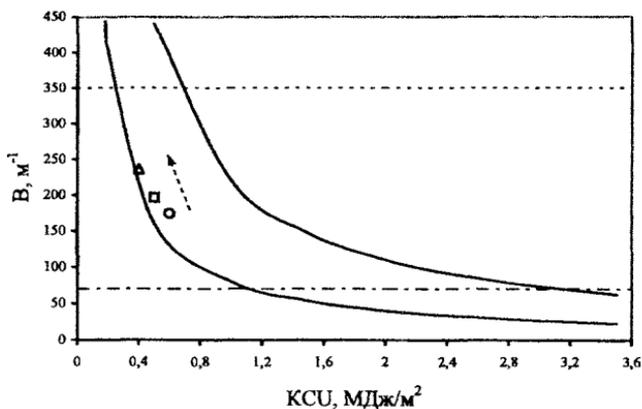


Рисунок 4.24 - Результаты оценки деградации механических свойств металла шпилек (см. рисунок 4.23 (выше) в увеличенном масштабе)



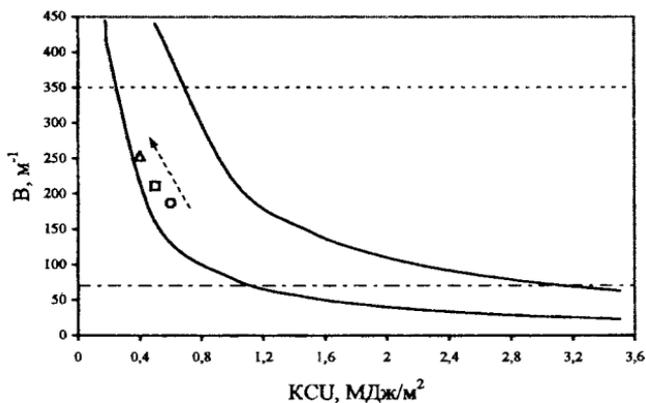
○ – 20X1M1Φ1TP (исходное состояние); □ – 20X1M1Φ1TP (после эксплуатации 50 тыс. ч.);
 Δ – 20X1M1Φ1TP (после эксплуатации 100 тыс. ч.)

Рисунок 4.25 – Результаты оценки деградации механических свойств стали 20X1M1Φ1TP после эксплуатации 50 и 100 тыс. ч. (стрелкой указано направление деградации механических свойств)



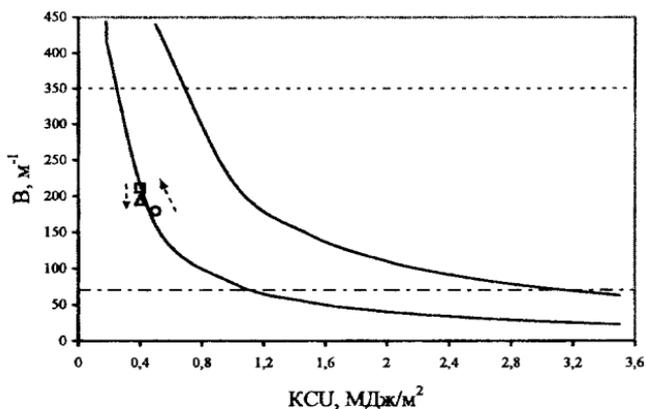
○ – 20XMΦBP (исходное состояние); □ – 20XMΦBP (после эксплуатации 50 тыс. ч.);
 Δ – 20XMΦBP (после эксплуатации 100 тыс. ч.)

Рисунок 4.26 – Результаты оценки деградации механических свойств стали 20XMΦBP после эксплуатации 50 и 100 тыс. ч. (стрелкой указано направление деградации механических свойств)



○ – 18X12ВМБФ (исходное состояние); □ – 18X12ВМБФ (после эксплуатации 50 тыс. ч.);
 Δ – 18X12ВМБФ (после эксплуатации 100 тыс. ч.)

Рисунок 4.27 – Результаты оценки деградации механических свойств стали 18X12ВМБФ после эксплуатации 50 и 100 тыс. ч. (стрелкой указано направление деградации механических свойств)



○ – 20X2М1Ф (исходное состояние); □ – 20X2М1Ф (после эксплуатации 50 тыс. ч.);
 Δ – 20X2М1Ф (после эксплуатации 100 тыс. ч.)

Рисунок 4.28 – Результаты оценки деградации механических свойств стали 20X2М1Ф после эксплуатации 50 и 100 тыс. ч. (стрелками указаны направления деградации механических свойств)

Разработка способа определения скорости деградации механических свойств металла дала возможность определить указанную для конкретной стали диагностируемой конструкции. Ниже определена скорость деградации механических свойств на примере металла шпилек после длительной эксплуатации.

Для стали 20Х1М1Ф1ТР (см. рисунок 4.25) (общее время эксплуатации – 100 тыс. ч.):

– через 50 тыс. ч.:

$$V_{\text{дегр.мех.св-в}} = \frac{\sqrt{(KCU^{50\text{тыс.ч.}} - KCU^{\text{мех.}})^2 + (B^{50\text{тыс.ч.}} - B^{\text{мех.}})^2}}{50\text{тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{(0,5 - 0,6)^2 + (210,6 - 186,75)^2}}{50\text{тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{568,83}}{50\text{тыс.ч.}} = 0,477 \text{ ед. мех. св-в} / 50\text{тыс.ч.};$$

– через 100 тыс. ч.:

$$V_{\text{дегр.мех.св-в}} = \frac{\sqrt{(KCU^{100\text{тыс.ч.}} - KCU^{50\text{тыс.ч.}})^2 + (B^{100\text{тыс.ч.}} - B^{50\text{тыс.ч.}})^2}}{50\text{тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{(0,4 - 0,5)^2 + (259,87 - 210,6)^2}}{50\text{тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{2427,54}}{50\text{тыс.ч.}} = 0,985 \text{ ед. мех. св-в} / 50\text{тыс.ч.}$$

Таким образом, видно, что за первые 50 тыс. ч. скорость деградации механических свойств стали 20Х1М1Ф1ТР меньше, чем за вторые 50 тыс. ч., т.е. скорость деградации механических свойств стали 20Х1М1Ф1ТР неравномерна. В данном случае с увеличением срока эксплуатации наблюдается увеличение скорости деградации механических свойств.

Для стали 20ХМФБР (см. рисунок 4.26) (общее время эксплуатации – 100 тыс. ч.):

– через 50 тыс. ч.:

$$V_{\text{дегр.мех.св-в}} = \frac{\sqrt{(KCU^{50\text{тыс.ч.}} - KCU^{\text{мех.}})^2 + (B^{50\text{тыс.ч.}} - B^{\text{мех.}})^2}}{50\text{тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{(0,5 - 0,6)^2 + (196,56 - 174,3)^2}}{50\text{тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{495,518}}{50\text{тыс.ч.}} = 0,445 \text{ ед. мех. св-в} / 50\text{тыс.ч.};$$

– через 100 тыс. ч.:

$$V_{\text{дегр.мех.св-в}} = \frac{\sqrt{(KCU^{100\text{тыс.ч.}} - KCU^{50\text{тыс.ч.}})^2 + (B^{100\text{тыс.ч.}} - B^{50\text{тыс.ч.}})^2}}{50\text{тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{(0,4 - 0,5)^2 + (236,25 - 196,56)^2}}{50\text{тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{1575,31}}{50\text{тыс.ч.}} = 0,794 \text{ ед. мех. св-в} / 50\text{тыс.ч.}$$

Таким образом, видно, что за первые 50 тыс. ч. скорость деградации механических свойств стали 20ХМФБР меньше, чем за вторые 50 тыс. ч., т.е. скорость деградации механических свойств стали 20ХМФБР неравномерна. В данном случае с увеличением срока эксплуатации наблюдается увеличение скорости деградации механических свойств.

Для стали 18Х12ВМБФР (см. рисунок 4.27) (общее время эксплуатации – 100 тыс. ч.):

– через 50 тыс. ч.:

$$V_{\text{дегр.мех.св-в}} = \frac{\sqrt{(KCU^{50\text{тыс.ч.}} - KCU^{\text{мех.}})^2 + (B^{50\text{тыс.ч.}} - B^{\text{мех.}})^2}}{50\text{тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{(0,5 - 0,6)^2 + (210,6 - 186,75)^2}}{50\text{тыс.ч.}}$$

$$= \frac{\sqrt{568,83}}{50 \text{ тыс.ч.}} = 0,477 \text{ ед. мех. св - в / 50 тыс. ч. ;}$$

– через 100 тыс. ч.:

$$V_{\text{дегр. мех. св - в}} = \frac{\sqrt{(KCU^{100 \text{ тыс.ч.}} - KCU^{50 \text{ тыс.ч.}})^2 + (B^{100 \text{ тыс.ч.}} - B^{50 \text{ тыс.ч.}})^2}}{50 \text{ тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{(0,4 - 0,5)^2 + (253,12 - 210,6)^2}}{50 \text{ тыс.ч.}}$$

$$= \frac{\sqrt{1807,96}}{50 \text{ тыс.ч.}} = 0,85 \text{ ед. мех. св - в / 50 тыс. ч.}$$

Таким образом, видно, что за первые 50 тыс. ч. скорость деградации механических свойств стали 18X12ВМБФР меньше, чем за вторые 50 тыс. ч., т.е. скорость деградации механических свойств стали 18X12ВМБФР неравномерна.

Для стали 20X2М1Ф (см. рисунок 4.28) (общее время эксплуатации – 100 тыс. ч.):

– через 50 тыс. ч.:

$$V_{\text{дегр. мех. св - в}} = \frac{\sqrt{(KCU^{50 \text{ тыс.ч.}} - KCU^{\text{мех.}})^2 + (B^{50 \text{ тыс.ч.}} - B^{\text{мех.}})^2}}{50 \text{ тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{(0,4 - 0,6)^2 + (210,6 - 149,4)^2}}{50 \text{ тыс.ч.}}$$

$$= \frac{\sqrt{3745,48}}{50 \text{ тыс.ч.}} = 1,224 \text{ ед. мех. св - в / 50 тыс. ч. ;}$$

– через 100 тыс. ч.:

$$V_{\text{дегр. мех. св - в}} = \frac{\sqrt{(KCU^{100 \text{ тыс.ч.}} - KCU^{50 \text{ тыс.ч.}})^2 + (B^{100 \text{ тыс.ч.}} - B^{50 \text{ тыс.ч.}})^2}}{50 \text{ тыс.ч.}} = \frac{\sqrt{(0,4 - 0,4)^2 + (194,4 - 210,6)^2}}{50 \text{ тыс.ч.}}$$

$$= \frac{\sqrt{262,44}}{50 \text{ тыс.ч.}} = 0,324 \text{ ед. мех. св - в / 50 тыс. ч.}$$

Из расчетов видно, что за первые 50 тыс. ч. скорость деградации механических свойств стали 20X2М1Ф больше, чем за вторые 50 тыс. ч., т.е. скорость деградации механических свойств стали 20X2М1Ф неравномерна.

Таким образом, на примере оценки изменения механических свойств металла шпилек после длительной эксплуатации, подтверждена эффективность, высокая чувствительность и наглядность предлагаемого способа оценки скорости деградации механических свойств металла диагностируемой конструкции с применением комплексного показателя механических свойств и использованием карт деградации механических свойств.

4.6. Разработка критериев выбора критических мест диагностируемой конструкции

Разработанные и представленные выше методы косвенного определения механических свойств металла диагностируемой конструкции, а также метод графической интерпретации деградации механических свойств характеризует свойства в конкретных точках конструкции, где проводились замеры. Поэтому с целью объективной оценки фактического состояния всей диагностируемой конструкции целесообразно применять указанные выше методы на наиболее слабых – критических участках указанной конструкции.

Целью данного этапа исследований являлась разработка рекомендаций по выбору слабых – критических мест с учетом особенностей диагностируемой конструкции.

Выполнен анализ и выбор критических областей различных металлоконструкций, которым следует уделять особое внимание при оценке механических свойств по разработанной методике, т.к. именно на металле в этих областях определяются фактические механические свойства (согласно главе 3 данной монографии).

В таблице 4.3 приведен перечень критических областей материала технологического оборудования и металлоконструкций (на основании практики эксплуатации, анализа технических нормативных правовых актов (ТНПА) и литературных источников). Перечисленные ниже критические области материала технологического оборудования и металлоконструкций являются потенциально опасными в плане возможного разрушения объектов с учетом повышенной вероятности снижения механических свойств и деградации структуры металла именно по этим областям.

Таблица 4.3 – Критические области оборудования и металлоконструкций

Наименование критической области в материале объекта	Обоснование выбора
Сосуды и аппараты	
Корпуса колонн в зоне ввода и вывода среды [147, с. 110, 146, с. 32]	Коррозионно-эрозионное изнашивание
Нижние обечайки корпуса колонн (≈ 2 шт.) [146, с. 32]	Воздействие на металл высоких температур
Напряженные и незащищенные термоизоляцией с наружной стороны участки металла	Концентрация напряжений
Участки поверхности в местах повреждения защитного покрытия [146, с. 30; 148, с. 84]	Возможное появление дефектов в металле стенок корпуса объекта. Коррозионное изнашивание металла
Для сосудов, имеющих раздел фаз – места с исключительно газовой и жидкостной средой и зоной переменного смачивания [149]	Наибольшее коррозионное изнашивание поверхности металла в месте раздела фаз
Участки пересечения продольных и кольцевых сварных швов [6; 148, с. 19]	Концентрация напряжений
Монтажные сварные соединения [6]	Концентрация напряжений
В плакированных сосудах и аппаратах – сварные швы с внутренней поверхности со стороны плакирующего слоя [148, с. 94]	Возможное наличие мартенситных структур в наплавленном коррозионно-стойком металле из-за нарушения технологии сварки

Наименование критической области в материале объекта	Обоснование выбора
Основной металл сосудов, работающих с сероводородсодержащими средами при нормальной температуре [148 с.77, 149–151]	Изменение механических свойств металла и снижение конструкционной прочности объекта вследствие расслоения стенки объекта
Основной металл сосудов, работающих с сероводородсодержащими средами при повышенных температуре и давлении [149–151; 148, с. 40, с. 82]	Изменение механических свойств и структуры металла
Места сварки штуцеров в сосудах и аппаратах, работающих при высокой температуре [6; 152; 148, с. 40]	Повреждение поверхностей в виде свищей, трещин и разрывов
Места загибов, отбортовок, а также места приварки опор и колец жесткости [146, с. 31]	Возможное возникновение трещин в указанных местах
Нижняя часть внутренних поверхностей объекта, места опор [146, с. 31]	Интенсивное коррозионное повреждение металла
Нижние части обечаек корпуса (для горизонтальных сосудов и аппаратов) [146, с. 31]	Интенсивное коррозионное повреждение металла
Места движения рабочей среды с повышенной скоростью, а также места поверхности вблизи внутренних вращающихся устройств [146, с. 31]	Эрозионное изнашивание
Участки металла объектов, работающих при температуре стенки, превышающей 475 °С [146, с. 31]	Ползучесть металла
Внутренние поверхности в местах возможного скопления конденсата [146, с. 32]	Вероятность образования межкристаллитных трещин, обусловленных наличием щелочной среды и повышенными напряжениями в металле
Места перехода цилиндрической части корпуса в эллиптическую [146, с. 32]	Концентрация напряжений
Участки поверхности с максимальной температурой [146, 148]	Термические напряжения
Места возможного попадания на поверхность металлоконструкций из аустенитных сталей воды, паров и влажных газов [148, с. 14]	Образование в указанных местах коррозионных трещин
Участки с различными условиями эксплуатации (в зависимости от конструктивных особенностей сосуда, температуры, давления, среды) [148, с. 30]	Различная степень охрупчивания металла

Наименование критической области в материале объекта	Обоснование выбора
Участки с различными режимами сварки и материального исполнения элементов конструкции [148, с. 30]	Различная степень охрупчивания металла
Трубные пучки теплообменников (особенно в местах крепления трубок в трубных досках) [149]	Коррозионно-эрозионное изнашивание
Места с явными забоинами и деформациями поверхности	Вероятность наклепа и изменения механических свойств (повышение прочности, снижение пластичности), вероятность образования трещин
Места с коррозионными повреждениями большими, чем на остальной поверхности диагностируемого объекта	Концентрация напряжений, возможное возникновение трещин
Ремонтные сварные соединения	Более высокая вероятность дефектов, чем у заводских сварных швов, концентрация напряжений, возможное возникновение трещин
Технологические трубопроводы	
Печные трубы и двойники на выходе радиантных секций печей [149, с. 110]	Интенсивное коррозионное изнашивание
Трубопроводы от печей до ректификационных колонн (трансферные линии), шлемовые линии а также на линиях транспортировки горячих среднестиллятных нефтепродуктов [149, с. 110]	Интенсивное коррозионное изнашивание
Трубопроводы, работающие в водородсодержащих средах [148, 149]	Изменение механических свойств и структуры металла
Участки трубопроводов, работающие в наиболее сложных условиях (отводы, калачи, тройники, врезки, места сужения трубопровода, перед арматурой и после нее, места скопления влаги и коррозионных продуктов (застойные зоны) [153, с. 29]	Эрозионное изнашивание. Коррозионное изнашивание.
Участки трубопроводов, расположенные непосредственно по ходу среды за регулирующими клапанами или в местах установки дроссельных шайбовых наборов и щелевых дросселей [146, с. 94]	Эрозионно-коррозионное изнашивание

Наименование критической области в материале объекта	Обоснование выбора
Участки трубопроводов с рабочей температурой 450°C и выше, работающие в условиях ползучести [146, с. 94; 153, с. 31]	Вероятность изменения структуры и свойств металла и превышения длительной прочности
Места попадания на горячую внутреннюю поверхность паропровода холодного конденсата из дренажных, байпасных, импульсных линий, отводов предохранительных клапанов [146, с. 108]	Вероятность термоусталостных повреждений
Участки трубопроводов, коррозионное воздействие среды на металл которых может вызвать изменение механических свойств [153, с. 31]	Снижение конструкционной прочности
Места с явными забойнами и деформациями поверхности	Вероятность наклепа и изменения механических свойств (повышение прочности, снижение пластичности), вероятность образования трещин
Места с коррозионными повреждениями большими, чем на остальной поверхности диагностируемого объекта	Концентрация напряжений, возможное возникновение трещин
Ремонтные сварные соединения	Более высокая вероятность дефектов, чем у заводских сварных швов, концентрация напряжений, возможное возникновение трещин
Резервуары	
Участок примыкания нижнего пояса резервуара к днищу и нижняя часть первого пояса (наибольшая опасность) [154, с. 215, 223]	Интенсивное коррозионное изнашивание и местная коррозия вследствие наличия осадка
Кровли резервуаров [149, с. 7]	Из-за наиболее частого коррозионного повреждения уже через 1,5 года вследствие наличия агрессивной паровой фазы
Днище [154, с. 215]	Коррозионное изнашивание вследствие наличия осадка
Окрайка днища [154, с. 214]	Возможное возникновение трещин
Средние пояса стенки резервуара с плавающей крышей [154, с. 215]	Точечная коррозия
Места раздела фаз – места с исключительно газовой и жидкостной средой и зоной переменного смачивания [149]	Наибольшее коррозионное изнашивание поверхности металла в месте раздела фаз

Наименование критической области в материале объекта	Обоснование выбора
Околошовные зоны монтажных сварных швов [154, с. 214]	Возможное возникновение трещин
Участки поверхности, воспринимающие наибольшие нагрузки [155, с. 198]	Концентрация напряжений
Места с неудачными конструкторскими решениями [155, с. 198]	Концентрация напряжений
Места с явными забоинами и деформациями поверхности	Вероятность наклепа и изменения механических свойств (повышение прочности, снижение пластичности), вероятность образования трещин
Места с коррозионными повреждениями большими, чем на остальной поверхности диагностируемого объекта	Концентрация напряжений, возможное возникновение трещин
Ремонтные сварные соединения	Более высокая вероятность дефектов, чем у заводских сварных швов, концентрация напряжений, возможное возникновение трещин
Магистральные трубопроводы (линейная часть)	
Монтажные кольцевые сварные соединения (металл шва, металл зоны термического влияния) линейной части трубопроводов	Более высокая вероятность дефектов, чем у заводских сварных швов, концентрация напряжений, возможное возникновение трещин
Продольные сварные швы труб	
Места с явными забоинами и деформациями поверхности	Вероятность наклепа и изменения механических свойств (повышение прочности, снижение пластичности), вероятность образования трещин
Места с коррозионными повреждениями большими, чем на остальной поверхности диагностируемого участка трубы	Концентрация напряжений, возможное возникновение трещин
Ремонтные сварные соединения	Более высокая вероятность дефектов, чем у заводских сварных швов, концентрация напряжений, возможное возникновение трещин

Наименование критической области в материале объекта	Обоснование выбора
Металлоконструкции грузоподъемных кранов*	
Ремонтные сварные соединения (см. рисунок 4.29)	Более высокая вероятность дефектов, чем у заводских сварных швов, концентрация напряжений, возможное возникновение трещин
Сварные соединения, имеющие дефекты, выявленные при визуальном контроле (грубая чешуйчатость, неравномерность ширины и высоты металла шва, следы подварочных швов) (см. рисунок 4.30)	Более высокая вероятность скрытых дефектов, концентрация напряжений, возможное возникновение трещин
Закрытые нижние части трубчатых конструкций	Атмосферная коррозия, воздействие конденсата и термоциклирование зимой (замерзание-оттаивание)
Места с явными забоинами и деформациями поверхности (см. рисунок 4.31)	Вероятность наклепа и изменения механических свойств (повышение прочности, снижение пластичности), вероятность образования трещин
Места с отслоениями краски и/или характерными трещинами по краске (см. рисунок 4.32)	Высокая вероятность деформации металлоконструкции по данному участку, вероятность наклепа и изменения механических свойств (повышение прочности, снижение пластичности), вероятность образования трещин
Места с явными затеками ржавчины по краске	Высока вероятность коррозионных разрушений под слоем краски, концентрация напряжений, возможное возникновение разрушения
Места с коррозионными повреждениями большими, чем на остальной поверхности диагностируемой конструкции	Концентрация напряжений, возможное возникновение трещин

* – указания по расположению наиболее критических мест (участков с повышенной вероятностью разрушений) в зависимости от вида и особенности крановой металлоконструкции приведены в приложениях к источнику [7].

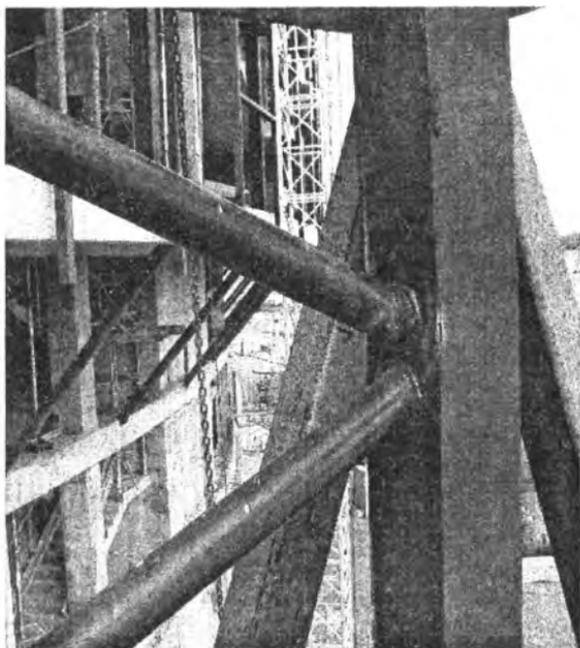
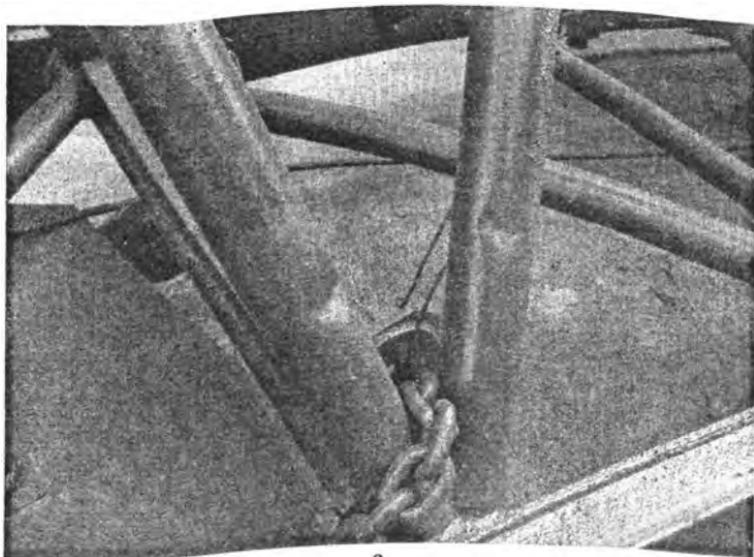


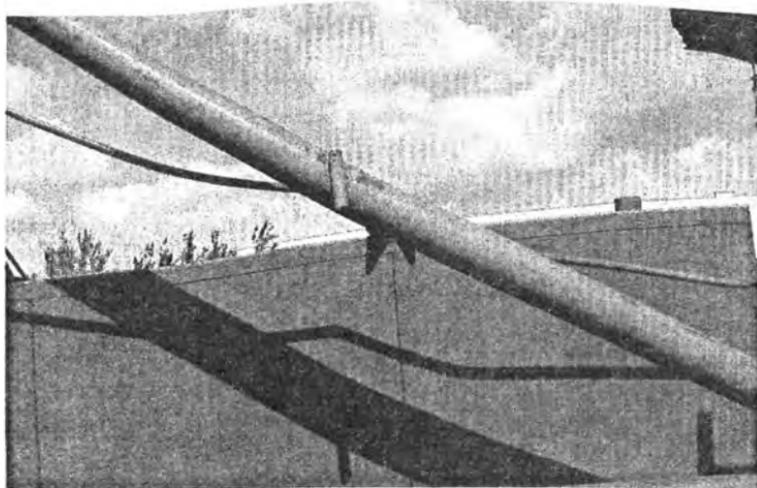
Рисунок 4.29 – Типичный ремонтный сварной узел крановой конструкции



Рисунок 4.30 – Сварной узел с явными дефектами в виде неравномерности по ширине и высоте сварного шва



а



б

а – заборны; б – деформация

Рисунок 4.31 – Характерный внешний вид заборны и деформаций на крановых конструкциях

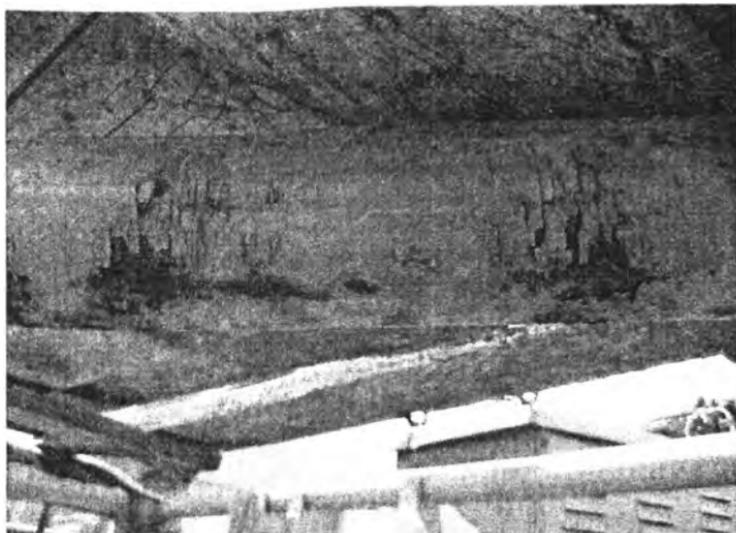


Рисунок 4.32 – Характерный внешний вид растрескивания краски в областях деформаций на крановых конструкциях

4.7. Планирование необходимого объема контроля

При планировании объема контроля механических свойств для конкретной диагностируемой конструкции возникает вопрос о необходимом и достаточном количестве участков на поверхности объекта контроля, выбираемых для измерений. Для контроля механических свойств объектов неразрушающим способом следует проводить выборочный контроль, т.к. он отличается невысокой трудоемкостью, а объем полученной информации позволяет достоверно судить о фактическом техническом состоянии металла объекта и его несущих элементов. Назначение мест и объема контроля производится по рекомендациям, указанным в таблице 4.3 с учетом объекта исследований, а также в местах выявленных дефектов по результатам анализа технической документации на объект, визуального контроля и применения традиционных способов дефектоскопии. Перечень дефектов, выявляемых в металлоконструкциях, и их влияние на конструкционную прочность объекта приведен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Перечень дефектов, выявляемых в металлоконструкциях

Наименование дефекта	Влияние на конструкцию (конструкционную прочность)
1	2
Анализ технической документации	
<p>Места концентрации напряжений в основном металле и сварных швах [148, с. 14]: наличие неучтенных при проектировании особенностей эксплуатации, неудачные конструкторские решения, перепады сечения по толщине стенки, участки поверхности с резкими переходами, участки поверхности с наименьшей толщиной стенки, места приварки штуцеров, люков, горловин, фланцев к обечайке и днищам, участки пересечения сварных швов, зоны сопряжения обечайки с днищами, места приварки опорных узлов, монтажные сварные швы и др.</p>	<p>Концентрация напряжений</p>
<p>Участки поверхности с наибольшим воздействием среды на металл [149]</p>	<p>Коррозионно-эрозионное изнашивание</p>
<p>Несоответствие фактических условий эксплуатации оборудования паспортным данным (превышение температуры, давления, периодическое попадание холодной среды на горячую поверхность металла, чрезмерно высокие скорости движения среды и изменение ее состава) по сравнению с регламентированными [148, с. 11]</p>	<p>Концентрация напряжений. Снижение конструкционной прочности</p>
<p>Места возможного скопления конденсата</p>	<p>Наибольшее коррозионное изнашивание поверхности металла в месте раздела фаз</p>
<p>Зоны проведенных ранее ремонтов [148, п. 3.5.3]</p>	<p>Возможное повторное развитие имевшегося повреждения металла объекта</p>
<p>Элементы оборудования или сварные соединения, качество металла которых вызывает сомнения [148, с. 19 п. 3.6.1.7]</p>	<p>Снижение конструкционной прочности</p>
<p>Участки поверхности, подвергающиеся повышенным нагрузкам (определяются по конструктивным признакам оборудования)</p>	<p>Концентрация напряжений</p>

Визуальный контроль

1	2
Дефекты основного металла и сварных швов, которые возникли при изготовлении, транспортировке и монтаже оборудования [146, с. 31; 156]: в сварных соединениях непровары, пористость, выходящие на поверхность кратеры, неметаллические включения, свищи, подрезы в местах переходов от шва к основному металлу, наплывы, царапины, задиры, прожоги, вырывы, смещение кромок, отсутствие плавных переходов от одного сечения к другому и т.п.	Концентрация напряжений. Снижение конструкционной прочности
Дефекты основного металла и сварных швов, которые возникли в процессе эксплуатации: пропуски и потения в основном металле и металле сварных швов, наличие трещин всех видов и направлений в сварных швах, околошовной зоне и основном металле, надрывов, свищей и пористости швов, подрезов, наплывов, прожогов, незаплавленных кратеров;	Концентрация напряжений. Снижение конструкционной прочности. Аварийное состояние
смещений кромок, коррозии стенок, коррозионно-эрозионного износа, выпучин, вмятин, отдулин, отслоений, видимых деформаций, гофр и др. [157]	
Места видимых механических повреждений, дефектов, допущенных ранее при изготовлении объекта, которые могут повлиять на его дальнейшую безопасную эксплуатацию [157]	Снижение конструкционной прочности
В сосудах, изготовленных из двухслойных сталей – повреждения защитного слоя, особенно в зоне сварных швов, загибов и отбортовок [146, с. 31]	Коррозионное изнашивание основного металла
Наличие коррозионно-эрозионных поражений основного металла и сварных швов, особенно в местах подачи рабочей среды, где могли быть проливы, в местах ремонта [148, п. 3.5.3]	Снижение конструкционной прочности
Видимые поверхностные дефекты, появившиеся или развившиеся в процессе эксплуатации, например, вмятины, выпучины, царапины, изменения геометрической формы (коробление, провисание и другие отклонения от первоначального расположения) [148, п. 3.5.3]	Снижение конструкционной прочности

1	2
Наличие коррозионных трещин, язв, питтингов, сплошной коррозии на основном металле, сварных швах и околошовной зоне, в местах ремонта, застойных зонах, под осадком, в зоне скопления конденсата, где возможно возникновение щелевой коррозии [148, п. 3.5.4]	Коррозионное изнашивание металла. Снижение конструкционной прочности
Дефектоскопия	
Места наибольшего коррозионного износа внешней и внутренней поверхности металлоконструкций	Снижение конструкционной прочности
Места поверхности с наличием поверхностных и внутренних металлургических, технологических или эксплуатационных дефектов (дефекты сварки, трещины в сварных швах, околошовной зоне и основном металле, задиры и надрывы в штампованных деталях; пористость, расслоение, трещиноватость, усадочные раковины и др. дефекты в литых деталях; отклонение от заданных геометрических размеров сверх допусков в элементах оборудования и сварных швах и др.)	Концентрация напряжений

По результатам указанных работ (контроль на наиболее критических – слабых участках с учетом данных таблиц 4.3 и 4.4) определяются наиболее опасные с позиции разрушения участки исследуемого объекта с максимальной поврежденностью материала, на которых выявлены или предполагается наличие дефектов, снижающих конструкционную прочность металлоконструкции. На каждом из данных участков производится определение механических свойств неразрушающим способом (см. раздел 3 монографии). Также следует производить определение механических свойств металла и сварных швов, не имеющих видимых дефектов – для сравнения результатов измерений и оценки деградации механических свойств.

Для выборочного контроля достоверность определения механических свойств может быть достаточно высокой, если определено среднеквадратическое отклонение определяемой характеристики. Поэтому на каждом участке контроля (сварной шов, основной металл) рекомендуется производить не менее пяти измерений твердости по Виккерсу с последующим определением механических свойств по разработанному способу (см. раздел 3).

После проведения измерения твердости по Виккерсу места контроля следует подвергать механической зачистке (с помощью шлифовальной машинки или другими способами) для устранения концентраторов напряжений.

Механические свойства определяются по результатам статистической обработки данных испытаний по формуле [148, с. 50; 158, с. 92]:

$$R = \sigma_n - \alpha \cdot S, \quad (4.9)$$

где R – определяемая механическая характеристика; σ_n – среднее арифметическое значение механической характеристики по результатам испытаний, определяемое по формуле:

$$\sigma_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i; \quad (4.10)$$

α – коэффициент, учитывающий объем выборки, определяемый по формуле:

$$\alpha = 1,65 \cdot \left(1 + \frac{1,28}{\sqrt{n}} + \frac{1,5}{n} \right); \quad (4.11)$$

S – среднее квадратическое отклонение результатов испытаний, определяемое по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_n)^2}, \quad (4.12)$$

σ_i – результаты определения механической характеристики на i -ых участках поверхности; n – количество измерений (величина n должна быть не менее 10, т.к. при меньшем значении n точность оценки S неудовлетворительна).

При обнаружении в процессе контроля недопустимого уровня значений механических свойств, объем контроля должен быть увеличен не менее чем вдвое. Дополнительные измерения рекомендуется проводить на расстоянии 20–50 мм от точек, показавших неудовлетворительный результат. При подтверждении полученных значений твердости и основных характеристик механических свойств производится выявление размеров участка или длины сварного шва с отклонениями по значениям механических свойств с целью принятия решения о необходимости ремонта и его особенностях. Данные о фактических значениях механических свойств металла и их изменении в процессе эксплуатации используются в качестве параметров технического состояния диагностируемой конструкции (наносятся на карту деградации механических свойств) (см. приложение данной монографии), а также в дальнейшем могут использоваться для прогнозирования остаточного ресурса диагностируемых объектов.

Таким образом, проанализировав возможности использования указанных выше карт деградации механических свойств можно определить области их рационального использования:

– для оценки фактического состояния металла различных диагностируемых стальных конструкций (различных видов сосудов, работающих под давлением; трубопроводов, в том числе как технологических так и магистральных; металлоконструкции грузоподъемных кранов и т.п.) в период их эксплуатации;

– для оценки остаточного ресурса металла оборудования и конструкций (с учетом применения разработанного способа определения скорости изменений (деградации) механических свойств металла диагностируемой конструкции);

– при диагностировании различного оборудования и конструкций в период проведения капитальных ремонтов;

– для ответственных деталей (например, штоки компрессоров, шпильки и другие элементы крепежа ответственного оборудования и т.п.).

4.8. Алгоритм методики оценки фактического состояния металла диагностируемых конструкций

Алгоритм методики оценки фактического состояния материала диагностируемой металлоконструкции обобщает основные методы и приемы описанные выше и позволяет комплексно проанализировать их взаимосвязь и все этапы предлагаемой методики (см. рисунок 4.33).

Указанная методика справедлива для определения (проверки) механических свойств металла практически любых металлических конструкций при этом как комплексно (для конструкции в целом) так и для отдельных элементов конструкции (в любом доступном месте конструкции, например, при ремонте или при повреждении конструкции).

При этом указанная методика вариабельна в части п. 1.1–1.4 (см. рисунок 4.33): определение фактических механических свойств металла в конструкции можно производить не только разработанным неразрушающим способом, но еще двумя другими способами.

1-й способ. Определение механических свойств разрушающим способом (путем вырезки образцов из конструкции и проведения стандартных испытаний (ГОСТ 1497, ГОСТ 9454 и др.) с определением характеристик механических свойств (если вывозка возможна и допустима).

2-й способ. Определение механических свойств на микрообъемах материала (малоразрушающим способом). Суть методики определения механических свойств металла на микрообразцах заключается в испытании призматических или цилиндрических микрообразцов размером $2 \times 2 \times 6$ мм или $\varnothing 3 \times 6$ мм на одноосное сжатие [159, 160]. Полученная диаграмма оцифровывается и обрабатывается по специальному алгоритму. В результате определяются σ_{np} , σ_m и вычисляются ψ , σ_B . 3-й способ. Определение механических свойств неразрушающим способом по результатам анализа параметров и формы пирамидального индентора после определения твердости по Виккерсу (подробно рассмотрена в предыдущих главах данной работы).

Применение указанной методики, в первую очередь, неразрушающего контроля механических свойств имеет важное значение для решения ряда задач, указанных ниже.

1. Определение состояния металла диагностируемой конструкции и степени его деградации с целью возможной отбраковки и принятия решения о ремонте и/или продлении эксплуатации.

2. Определение механических свойств в отдельных проблемных зонах конструкции (зоны перегрева, деформации, механических повреждений, повышенной скорости коррозии и т.п.).

3. Определение механических свойств элементов конструкции после повреждений и аварий.

4. Определение механических свойств деталей, бывших в эксплуатации, или отдельных зон таких деталей.

5. Изучение распределения механических свойств по объему или сечению ответственных деталей.

6. Изучение свойств сварных соединений в пределах зоны термического влияния и материала сварного шва.

7. Изучение влияния коррозии и действия активных сред на механические свойства металлов.

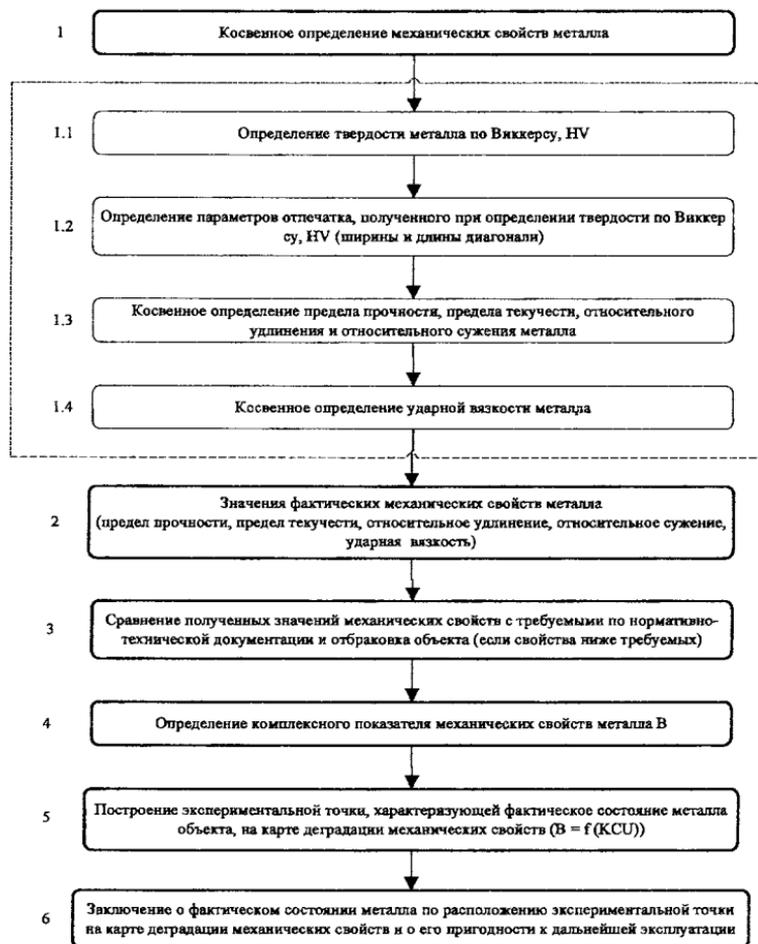


Рисунок 4.33 – Этапы методики определения механических свойств материала оборудования и конструкций



Рисунок 4.34 – Блок-схема вариантов определения фактических механических свойств металла диагностируемой конструкции

Настоящая методика позволяет проводить косвенное определение механических свойств металла деталей и конструкций, а, следовательно, оценивать состояние металла объектов в различных отраслях промышленности (с учетом установленной возможности применения переносных твердомеров).

1. Химическое и нефтяное машиностроение – контроль качества крупногабаритных сварных аппаратов (особенно зоны термического влияния сварных соединений), в том числе сварных швов для возможной последующей термической обработки участков шва с неудовлетворительными механическими свойствами; контроль механических свойств основного металла и металла сварных соединений в процессе эксплуатации.

2. Нефтеперерабатывающая промышленность – оценка воздействия агрессивных сред, температур и давлений на основной металл и особенно на сварные соединения (возрастание твердости, предела прочности, предела текучести и уменьшение пластичности и ударной вязкости приводит к трещинообразованию и хрупкому разрушению).

3. Машиностроение – обеспечение входного контроля заготовок металлургического производства и выбраковка по механическим свойствам; контроль результатов термической обработки продукции и заготовок и режимов поверхностного пластического деформирования – накатки и обработки дробью.

4. Металлургия – контроль качества изготовления и термической обработки проката; контроль механических свойств при сдаче готовой продукции (полуфабрикатов).

5. Теплоэнергетика – контроль механических свойств материалов трубопроводов и других элементов энергоблоков при монтаже новых и обследовании в ремонтные периоды действующих тепловых электростанций; надзор за состоянием структуры основного металла и металла сварных соединений.

6. Строительство – контроль качества и механических свойств металла сварных соединений газо- и нефтепроводов; надзор за состоянием отдельных, наиболее опасных участков трасс газо- и нефтепроводов, элементов крановых конструкций при их эксплуатации; входной контроль механических свойств металлопроката с целью получения рациональных параметров запаса прочности металлоконструкций; контроль металла железобетонных конструкций.

7. Судостроение – входной контроль механических свойств металла для изготовления и ремонта различных элементов судна с целью выбраковки; контроль качества полученных сварных соединений.

8. Криогенная техника – контроль механических свойств основного металла и металла сварных соединений, металлоконструкций работающих при низких температурах для оценки их по критериям хладноломкости (температурный порог хладноломкости).

Практическое применение методики неразрушающего контроля механических свойств особенно важно в случаях, когда:

- 1) требуется контроль качества каждого изделия;
- 2) размеры изделия столь малы, что не допускают изготовления стандартных образцов для механических испытаний;
- 3) необходим контроль состояния металла в процессе эксплуатации оборудования и конструкций;
- 4) требуется исследование состояния ограниченных объемов металла в труднодоступных местах оборудования и конструкций.

Применение разработанной методики косвенного определения механических свойств и определения фактического состояния металла объектов позволит устранить материальные и трудовые затраты на вырезку проб и изготовление образцов-свидетелей, а также на последующее восстановление мест вырезки проб в крупногабаритных объектах и конструкциях.

Область применения разработанной методики ограничена следующими группами сталей:

1. Сталь конструкционная углеродистая обыкновенного качества.
2. Сталь конструкционная углеродистая качественная.
3. Сталь конструкционная низколегированная для сварных конструкций.
4. Сталь конструкционная теплоустойчивая.
5. Сталь коррозионноустойчивая, жаростойкая.

Следует учитывать, что существуют свои ограничения, которые основаны на действующих стандартах, Правилах и других нормативных документах [6, 7, 153 и др.], которые устанавливают пределы изменения механических свойств в

процессе эксплуатации. Кроме того, полученных характеристики механических свойств металла диагностируемой конструкции должны соответствовать требованиям стандартов и другой нормативной документации на соответствующую марку стали и соответствующий диагностируемый объект.

4.9. Разработка способа оценки достижения материалом предельного состояния – основы методики оценки остаточного ресурса диагностируемой металлоконструкции

На данном этапе работ выполнено уточнение определения скорости изменения механических свойств металла (раздел 4.5) с целью разработки эффективного способа оценки достижения материалом диагностируемой конструкции своего предельного состояния – своеобразной критической границы при выходе за которую эксплуатация должна быть запрещена.

Для определения скорости изменения механических свойств металла диагностируемой конструкции (далее – скорости деградации, $V_{\text{дег}}$) необходимо определить исходные значения механических характеристик (σ_s , δ_s , KCU) (по паспорту оборудования или путем проведения механических испытаний) и нанести экспериментальную точку на карту деградации (согласно рекомендациям разделов 4.1–4.3). Через определенный промежуток времени следует повторить измерения и снова нанести точку на карту деградации. При периодическом диагностировании материала конструкции на карту деградации будет нанесен массив данных. Скорость деградации определяется по результатам сопоставления значений механических свойств, определенных через различные периоды эксплуатации объекта: «начало эксплуатации \Rightarrow капитальный ремонт \Rightarrow ... \Rightarrow капитальный ремонт \Rightarrow окончание расчетного срока эксплуатации \Rightarrow окончание назначенного остаточного ресурса эксплуатации» и т.д.

Для точной оценки $V_{\text{дег}}$ необходим постоянный мониторинг за изменением механических свойств в эксплуатации (например, через три года во время проведения капитальных ремонтов технологической установки). На начальном этапе мониторинга для расчета имеются данные только о двух измерениях механических характеристик, соответствующие начальному и конечному этапам эксплуатации за рассматриваемый отрезок времени. В данном случае скорость деградации можно определить используя линейную зависимость комплексного показателя механических свойств от времени. Однако изменение механических свойств материала при эксплуатации металлоконструкций, как правило, не является монотонным. Поэтому этим способом можно определить только ориентировочное значение $V_{\text{дег}}$. Более точное определение $V_{\text{дег}}$ возможно при наличии трех измерений механических характеристик. В этом случае $V_{\text{дег}}$ определяется используя полиномиальную зависимость. При накоплении данных о значениях механических свойств материала объекта, определенных в каждый капитальный ремонт технологической установки, проводится точное определение $V_{\text{дег}}$.

Рассмотрим определение $V_{\text{дег}}$ при наличии двух измерений механических характеристик (начало мониторинга конструкции). Координаты исходной точ-

ки A , соответствующей значению комплекса механических свойств материала в начале эксплуатации, на карте деградации обозначим KCU_{A0} и B_{A0} (рисунки 4.35 и 4.37). Возможные направления смещения значений экспериментальных точек на карте деградации механических свойств в эксплуатации по отношению к точке A показаны на рисунке 4.35.

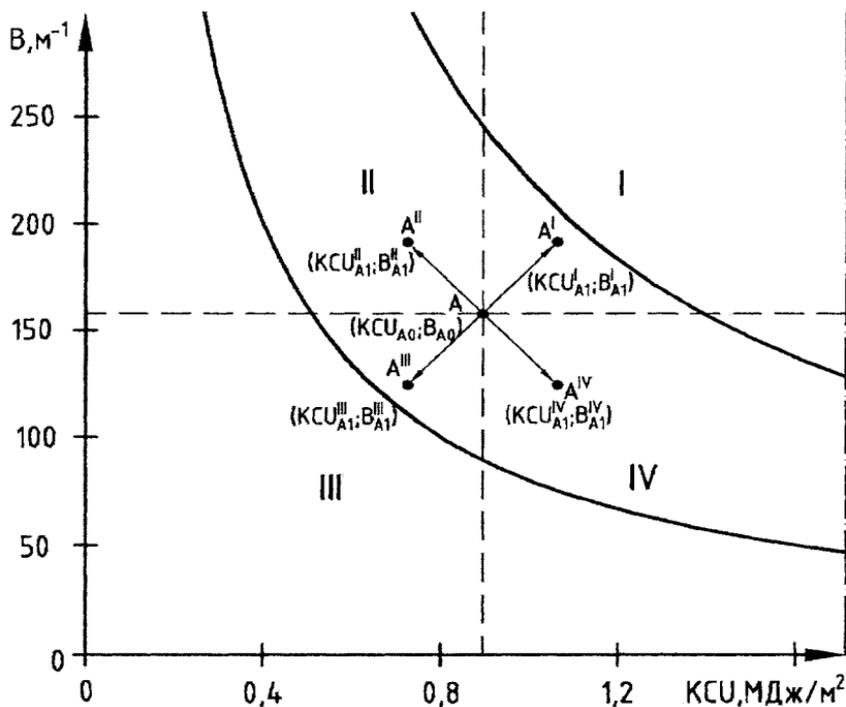


Рисунок 4.35 – Схема, поясняющая изменение механических свойств материала (линейная зависимость)

Для определения скорости деградации механических свойств материала, когда имеется только две экспериментальные точки, необходимо построить график в координатах «комплексный показатель механических свойств B (m^{-1}) – продолжительность (время) эксплуатации τ (лет)» (рисунок 4.36).

Две точки на графике соединяются прямой линией. Зная координаты точек $[\tau_0; B_0]$ и $[\tau_1; B_1]$ определяются параметры линейного уравнения:

$$B_0 = a \cdot \tau_0 + b, \quad (4.13)$$

$$B_1 = a \cdot \tau_1 + b, \quad (4.14)$$

$$B_1 - B_0 = (a \cdot \tau_1 + b) - (a \cdot \tau_0 + b) = a \cdot (\tau_1 - \tau_0) \quad (4.15)$$

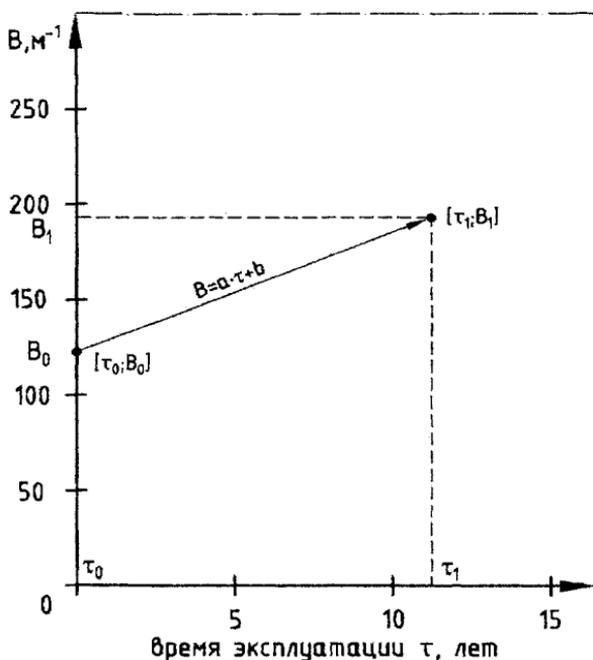


Рисунок 4.36 – Схема, поясняющая определение скорости деградации механических свойств материала (линейная зависимость)

Откуда

$$a = \frac{B_1 - B_0}{\tau_1 - \tau_0}, \quad (4.16)$$

$$\begin{cases} b = B_0 - a \cdot \tau_0; \\ b = B_1 - a \cdot \tau_1. \end{cases} \quad (4.17)$$

Средняя скорость деградации механических свойств материала на рассматриваемом отрезке эксплуатации определяется по формуле:

$$V_{\text{дег}}^{\text{ср}} = \frac{\Delta B}{\Delta \tau} = \frac{B(\tau_1) - B(\tau_0)}{\tau_1 - \tau_0} = a. \quad (4.18)$$

Отношение $\Delta B / \Delta \tau$ является средней скоростью изменения функции $B(\tau)$ на рассматриваемом интервале изменения независимой переменной (аргумента) τ . Значение мгновенной $V_{\text{дег}}$, указывающей скорость изменения функции $B(\tau)$ в узловых точках, совпадает со значением средней $V_{\text{дег}}$.

Рассмотрим определение $V_{\text{дег}}$ при наличии трех измерений механических характеристик. Схема, поясняющая возможные направления деградации механических свойств материала, приведена на рисунке 4.37.

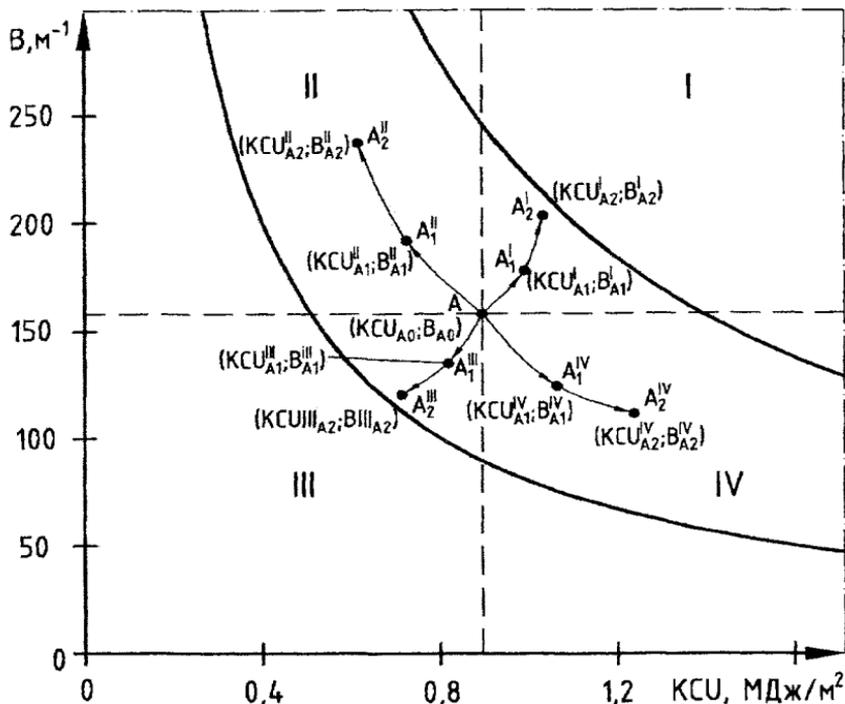


Рисунок 4.37 – Схема, поясняющая изменение механических свойств материала (полиномиальная зависимость)

Для определения скорости деградации механических свойств материала, когда имеется три экспериментальные точки, по полученным значениям показателя B строится график в координатах «комплексный показатель механических свойств B (м^{-1}) – продолжительность (время) эксплуатации τ (лет)» (рисунок 4.38).

При периодическом определении механических свойств материала получится последовательное расположение точек на графике (см. рисунок 4.38), которое описывается функцией $B(\tau)$, значения которой определены в узловых точках

$$B(\tau_0), B(\tau_1), B(\tau_2), \dots, B(\tau_m). \quad (4.19)$$

Через точки проводится полиномиальная линия. Необходимо найти непрерывную функцию в виде многочлена, аппроксимирующую (приближающую) искомую зависимость $B = B(\tau)$. В качестве этой функции будем использовать интерполяционный многочлен Лагранжа.

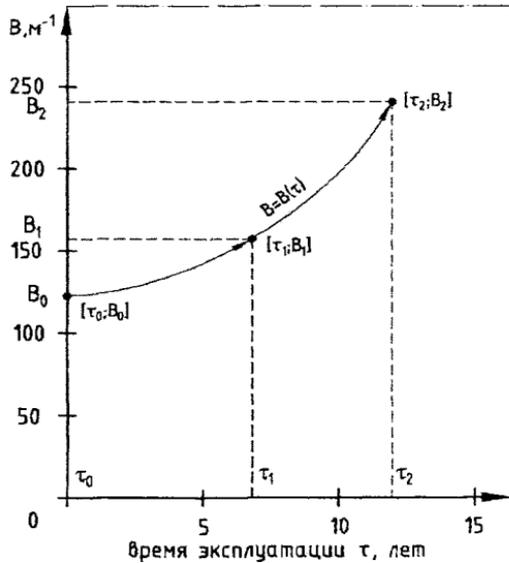


Рисунок 4.38 – Схема, поясняющая определение скорости деградации механических свойств материала (полиномиальная зависимость)

По значениям функции $B(\tau)$ в узловых точках находится целый многочлен $L(\tau)$ наименьшей степени, который в заданных точках τ_i ($i = 0, 1, 2, \dots, m$), называемых узлами интерполирования, принимает те же значения, что и функция $B(\tau)$. Приближенно полагают, что для любого τ справедлива интерполяционная формула Лагранжа [161, с. 296]:

$$B(\tau) = L(\tau). \quad (4.20)$$

Для поиска многочлена $L(\tau)$, удовлетворяющего условиям

$$L(\tau_i) = B(\tau_i) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, m), \quad (4.21)$$

вводим многочлены m -й степени

$$l_k(\tau) = \frac{(\tau - \tau_0) \cdot (\tau - \tau_1) \cdot \dots \cdot (\tau - \tau_{k-1}) \cdot (\tau - \tau_{k+1}) \cdot \dots \cdot (\tau - \tau_m)}{(\tau_k - \tau_0) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_{k-1}) \cdot (\tau_k - \tau_{k+1}) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_m)} \quad (4.22)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, m),$$

которые, соответственно индексу, принимают значение 1 при $\tau = \tau_k$ и обращаются в 0 при $\tau = \tau_i$, если $i \neq k$.

Поэтому интерполяционный многочлен Лагранжа

$$L(\tau) = \sum_{k=0}^m B(\tau_k) \cdot l_k(\tau) \quad (4.23)$$

удовлетворяет всем условиям (4.21). Степень многочлена не выше m , поэтому условиями (4.21) он определяется однозначно.

Средняя скорость деградации механических свойств материала на рассматриваемом отрезке эксплуатации определяется по формуле:

$$V_{\text{дез}}^{\text{сп}} = \frac{1}{\tau_{\text{кон}} - \tau_{\text{нач}}} \cdot \int_{\tau_{\text{нач}}}^{\tau_{\text{кон}}} \sqrt{1 + \left(\frac{dL(\tau)}{d\tau} \right)^2} \cdot d\tau. \quad (4.24)$$

Значение средней скорости деградации показывает среднюю скорость изменения функции $B(\tau)$ на рассматриваемом интервале изменения независимой переменной τ . Из формулы (4.24) видно, что средняя скорость деградации механических свойств зависит и от самого момента времени $\tau_{\text{нач}}$, и от промежутка времени $\Delta\tau$ ($\tau_{\text{кон}} - \tau_{\text{нач}}$).

Мгновенная¹ скорость деградации механических свойств материала (в любой точке $\tau \in [0; \tau_{\text{кон}}]$) равна производной функции $L(\tau)$ ($L(\tau) = B(\tau)$) по времени и определяется по формуле:

$$V_{\text{дез}}^{\text{мгн}}(\tau) = \frac{dL(\tau)}{d\tau}. \quad (4.25)$$

Значение мгновенной $V_{\text{дез}}$ указывает скорость изменения функции $L(\tau) = B(\tau)$ в любой момент времени τ эксплуатации оборудования при изменении независимой переменной τ . Мгновенная скорость деградации механических свойств зависит единственно от момента времени τ и выражает скорость изменения функции $B(\tau)$ в фиксированный момент времени.

В практическом использовании, чем выше полученное численное значение $V_{\text{дез}}$, тем быстрее изменяется комплекс механических свойств (σ_B, δ_5, KCU) материала в эксплуатации. Например, если $V_{\text{дез}}^{\text{мгн}}(\tau) = 2 \text{ м}^{-1}/\text{год}$, то вблизи от момента времени τ комплексный показатель механических свойств B изменяется в 2 раза быстрее, чем время эксплуатации (на 2 м^{-1} за 1 год), а при $V_{\text{дез}}(\tau) = 0,2 \text{ м}^{-1}/\text{год}$ показатель B изменяется в 5 раз медленнее времени.

Положительное значение $V_{\text{дез}}^{\text{мгн}}$ означает увеличение показателя B при увеличении времени эксплуатации τ , отрицательное значение $V_{\text{дез}}^{\text{мгн}}$ – уменьшение показателя B при увеличении времени эксплуатации τ . Чем больше абсолютное значение $V_{\text{дез}}$, тем быстрее изменяется комплексный показатель механических свойств B с течением времени, следовательно, тем интенсивнее изменяются свойства материала под воздействием условий эксплуатации (среда, ее температура и давление).

В основе разрабатываемой методики оценки остаточного ресурса диагностируемых металлоконструкций лежит именно количественная оценка времени до достижения материалом диагностируемой металлоконструкции предельного состояния. Поэтому основные этапы методики определения остаточного ресурса совпадают с этапами оценки достижения материалом предельного состояния и приведены ниже.

Значения механических свойств материала могут быть использованы для принятия решения о возможности дальнейшей безопасной эксплуатации диаг-

¹ Прилагательное «мгновенная» относится к определенному моменту времени.

ностируемой конструкции. Основным принцип мониторинга фактического состояния материала диагностируемой конструкции заключается в:

- последовательном и систематическом определении комплекса механических свойств;
- выявлении изменений механических свойств в процессе эксплуатации и сравнении их с исходными значениями;
- прогнозировании изменения механических свойств.

Способ количественной оценки времени до достижения материалом предельного состояния справедлив для материала, претерпевающего в процессе эксплуатации изменение механических свойств (естественное старение).

Механические свойства определяют разрушающим, либо неразрушающим способами (см. раздел 4.8). Количественная оценка времени до достижения механических свойств материала предельных значений, при которых не обеспечивается безопасная эксплуатация диагностируемой конструкции, проводится поэтапно.

Рассмотрим этапы разрабатываемой методики определения остаточного ресурса (этапы оценки достижения материалом предельного состояния).

Этап 1.

Определение уравнений граничных линий на карте деградации (см. рисунок 4.6 – общие принципы для всех конструкционных сталей; рисунки 4.14–4.17 – для сталей разных групп). В общем случае применительно к сталям, используемым для изготовления ответственных металлоконструкций, указанных в главе 1, эти граничные линии описываются уравнениями:

$$\begin{cases} B_1 = \frac{A_n}{KCU} = \frac{80}{KCU}, \text{ м}^{-1}; \\ B_2 = \frac{A_n}{KCU} = \frac{220}{KCU}, \text{ м}^{-1}; \\ B_3 = \text{const} = 350 \text{ м}^{-1}; \\ B_4 = \text{const} = 70 \text{ м}^{-1}. \end{cases} \quad (4.26)$$

Следует учесть, что указанные границы можно ужесточить, в зависимости от степени ответственности конструкции и с учетом конструктивного и материального исполнения (см. рисунки 4.14–4.17).

Этап 2.

Нахождение интерполяционного многочлена $L(KCU)$ для зависимости $B(KCU)$ на карте деградации (см. рисунок 4.37).

Граничные параболы соответствуют расчетным значениям предельно допустимого состояния материала (определяются экспериментально) и характеризуют предельно допустимое сочетание механических свойств материала.

При периодическом определении механических свойств материала НПО получится последовательное расположение экспериментальных точек на карте деградации, которое описывается функцией $B(KCU)$, значения которой определены в узловых точках

$$B(KCU_0), B(KCU_1), B(KCU_2), \dots, B(KCU_m). \quad (4.27)$$

Через точки проводится полиномиальная линия. После чего находится непрерывная функция в виде многочлена, аппроксимирующая искомую зависимость $B=B(KCU)$. В качестве этой функции используется интерполяционный многочлен Лагранжа.

По значениям функции $B(KCU)$ в узловых точках находится целый многочлен $L(KCU)$ наименьшей степени, который в заданных точках KCU_i ($i = 0, 1, 2, \dots, m$) принимает те же значения, что и функция $B(KCU)$. Для любого значения KCU справедлива интерполяционная формула Лагранжа [161, с. 296]:

$$B(KCU) = L(KCU). \quad (4.28)$$

Для поиска многочлена $L(KCU)$, удовлетворяющего условиям

$$L(KCU_i) = B(KCU_i) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, m), \quad (4.29)$$

вводим многочлены m -й степени

$$l_k(KCU) = \frac{(KCU - KCU_0) \cdot (KCU - KCU_1) \cdot \dots \cdot (KCU - KCU_{k-1}) \cdot (KCU - KCU_{k+1}) \cdot \dots \cdot (KCU - KCU_m)}{(KCU_k - KCU_0) \cdot \dots \cdot (KCU_k - KCU_{k-1}) \cdot (KCU_k - KCU_{k+1}) \cdot \dots \cdot (KCU_k - KCU_m)} \quad (4.30)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, m),$$

которые, соответственно индексу, принимают значение 1 при $KCU = KCU_k$ и обращаются в 0 при $KCU = KCU_i$, если $i \neq k$.

Поэтому интерполяционный многочлен Лагранжа

$$L(KCU) = \sum_{k=0}^m B(KCU_k) \cdot l_k(KCU). \quad (4.31)$$

удовлетворяет всем условиям (4.29). Степень многочлена не выше m , поэтому условиями (4.29) он определяется однозначно.

Этап 3.

Экстраполяцией интерполяционного многочлена $L(KCU)$ находится абсцисса KCU^* его пересечения с ближайшей граничной линией (рисунок 4.39). Для этого решается система уравнений:

$$\begin{cases} L(KCU) = B_1 = \frac{A_{y1}}{KCU}; \\ L(KCU) = B_2 = \frac{A_{y2}}{KCU}; \\ L(KCU) = B_3; \\ L(KCU) = B_4. \end{cases} \quad (4.32)$$

После решения указанных уравнений находится значение KCU^* . Для дальнейшего расчета принимается значение KCU^* , которое соответствует реальному пересечению интерполяционного многочлена с граничной линией.

Этап 4.

Зная абсциссу KCU^* находится ордината B^* точки пересечения интерполяционного многочлена $L(KCU)$ с соответствующей граничной линией (см. рисунок 4.39). Для этого решается уравнение:

$$B^* = L(KCU^*) \quad (4.33)$$

Этап 5.

Построение графика в координатах «комплексный показатель механических свойств B (м^{-1}) – время эксплуатации τ (лет)» (см. рис. 4.39).

Этап 6.

Нахождение интерполяционного многочлена $L(\tau)$ для зависимости $B(\tau)$ на графике. Вводятся многочлены m -й степени:

$$l_k(\tau) = \frac{(\tau - \tau_0) \cdot (\tau - \tau_1) \cdot \dots \cdot (\tau - \tau_{k-1}) \cdot (\tau - \tau_{k+1}) \cdot \dots \cdot (\tau - \tau_m)}{(\tau_k - \tau_0) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_{k-1}) \cdot (\tau_k - \tau_{k+1}) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_m)} \quad (4.34)$$

$(k = 0, 1, 2, \dots, m),$

которые, соответственно индексу, принимают значение 1 при $\tau = \tau_k$ и обращаются в 0 при $\tau = \tau_i$, если $i \neq k$.

Интерполяционный многочлен Лагранжа:

$$L(\tau) = \sum_{k=0}^m B(\tau_k) \cdot l_k(\tau) \quad (4.35)$$

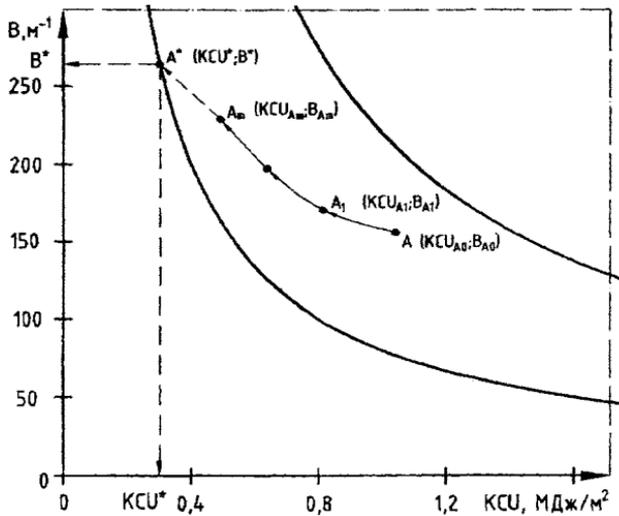


Рисунок 4.39 – Схема, иллюстрирующая определение KCU^* и B^*

Этап 7.

Определение периода времени до достижения комплекса механических свойств материала предельного значения (рисунок 4.40). Решение уравнения $B^* = L(\tau)$ в численном виде:

$$B^* = L(\tau) \quad (4.36)$$

позволяет получить значение τ , соответствующее искомому периоду времени.

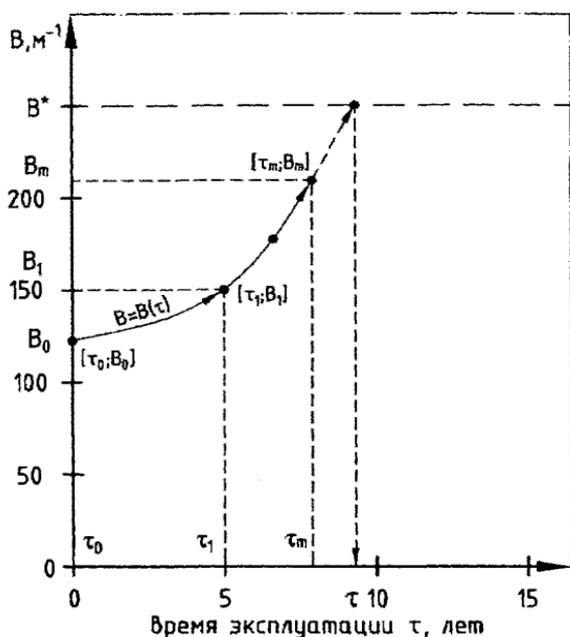


Рисунок 4.40 – Схема, иллюстрирующая определение времени до достижения комплекса механических свойств материала предельного значения

Таким образом, предложен способ оценки материалом диагностируемой конструкции предельного состояния. Указанный способ является основой для разработки комплексной методики оценки остаточного ресурса диагностируемой конструкции.

Ресурс безопасной эксплуатации диагностируемой конструкции определяется путем экстраполяции зависимости изменения комплексного показателя механических свойств материала ($B = n\sigma_B\delta_s/KCU$) от начала эксплуатации до предельного состояния. Примеры практического использования разработанного способа приведены в разделе 5.3 данной монографии.

Глава 5. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ДИАГНОСТИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ

5.1. Апробация разработанной методики оценки механических свойств металла неразрушающим способом на колонне К-5 установки «ЭЛОУ-АВТ-2» ОАО «НАФТАН»

В данном разделе дана оценка возможности и эффективности применения разработанной методики для контроля изменения механических свойств металла и сварных соединений металлоконструкции при эксплуатации, на примере корпусного оборудования нефтехимических установок, выполненного из двухслойных сталей.

В апреле 2005 г. в процессе проведения капитального ремонта и реконструкции вакуумной колонны на установке АВТ-2 ОАО «НАФТАН» на обечайке корпуса была обнаружена сквозная трещина длиной 4500 мм, развивавшаяся преимущественно перпендикулярно образующей корпуса и пересекавшая продольное (по образующей) сварное соединение (рисунок 5.1). В связи с указанным разрушением были проведены комплексные исследования металла диагностируемой конструкции [162].

Корпус колонны был выполнен из двухслойной стали Ст3сп+08Х13 (21+3 мм) и в зоне разрушения имел диаметр 8000 мм при общей толщине стенки 24 мм. К внутренней поверхности корпуса на диаметрально противоположных участках угловым швом были приварены торцы швеллеров, скрепляющих корпус по диаметру и являющихся несущими элементами для крепления тарелок колонны. Один из таких швеллеров был приварен к обечайке корпуса в зоне образовавшейся сквозной трещины. К моменту обнаружения трещины швеллер был срезан на расстоянии 8–10 мм от внутренней поверхности корпуса.

С наружной стороны корпуса для гарантированного обеспечения его жесткости на определенном расстоянии друг от друга были приварены двутавровые бандажные кольца. Одно из этих колец имело трещину в сварном шве приварки к обечайке корпуса на расстоянии от нее 400–500 мм. Сварные соединения крепления бандажного кольца (в зоне развития сквозной трещины на корпусе) также имели трещины (рисунок 5.2). Особенностью развития сквозной трещины на корпусе являлось также образовавшееся смещение кромок стенки корпуса по толщине, которое в центральной части трещины достигало 15 мм.

До реконструкции колонна эксплуатировалась около 40 лет с периодическим техническим освидетельствованием и опрессовкой внутренним давлением, в процессе проведения которых по качеству металла корпуса и его сварных соединений замечаний не возникло.

Измерения твердости (по Виккерсу, *HV*) основного металла на наружной и внутренней поверхности корпуса (в том числе вблизи трещины), результаты оценки механических характеристик основного металла в зоне трещины при неразрушающих испытаниях по разработанной методике и испытаниях специ-

ально изготовленных образцов с определением предела прочности, предела текучести, относительных удлинения и сужения, ударной вязкости и угла загиба, а также металлографического исследования показали, что металл обладает удовлетворительным качеством и свойствами. Оценка качества соединения основного и коррозионностойкого слоев биметалла Ст3сп+08Х13 и контроль качества биметалла вблизи трещины, выполненные ультразвуковым методом, также показали положительные результаты. Такое качество и свойства биметалла полностью соответствуют требованиям ОСТ 26-291-94 [163].

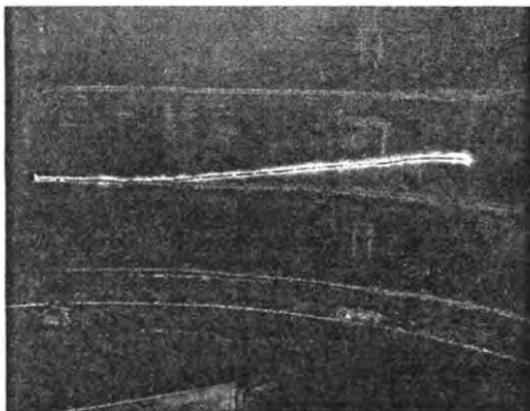


Рисунок 5.1 – Сквозная трещина корпуса колонны



Рисунок 5.2 – Трещины в сварных швах крепления бандажного кольца к корпусу колонны

Таблица 5.1 – Значения предела прочности σ_B основного металла колонны К-5, определенные разрушающим и неразрушающим способом

№ образца	Марка материала	Предел прочности σ_B , МПа (по разработанной методике)	Предел прочности σ_B , МПа (по ГОСТ 1497)
1-1	СтЗсп	388	415
2-1	СтЗсп	391	419
3-1	СтЗсп	390	416
1-2	СтЗсп	379	406
2-2	СтЗсп	375	407
3-2	СтЗсп	384	407
1-3	СтЗсп	444	427
2-3	СтЗсп	427	432
3-3	СтЗсп	430	417
1-4	СтЗсп	398	413
2-4	СтЗсп	420	411
3-4	СтЗсп	391	413

Примечание. В таблице приведены средние значения по результатам измерений

Таблица 5.2 – Значения относительного удлинения δ_5 основного металла колонны К-5, определенные разрушающим и неразрушающим способом

№ образца	Марка материала	Относительное удлинение δ_5 , % (по разработанной методике)	Относительное удлинение δ_5 , % (по ГОСТ 1497)
1-1	СтЗсп	29	34,6
2-1	СтЗсп	27	33,6
3-1	СтЗсп	27,3	33,6
1-2	СтЗсп	25	32,1
2-2	СтЗсп	25,6	31,9
3-2	СтЗсп	28	35,8
1-3	СтЗсп	32	35,1
2-3	СтЗсп	31,6	33,1
3-3	СтЗсп	34	33,0
1-4	СтЗсп	35	30,1
2-4	СтЗсп	34,6	30,9
3-4	СтЗсп	35,8	32,6

Примечание: в таблице приведены средние значения по результатам измерений

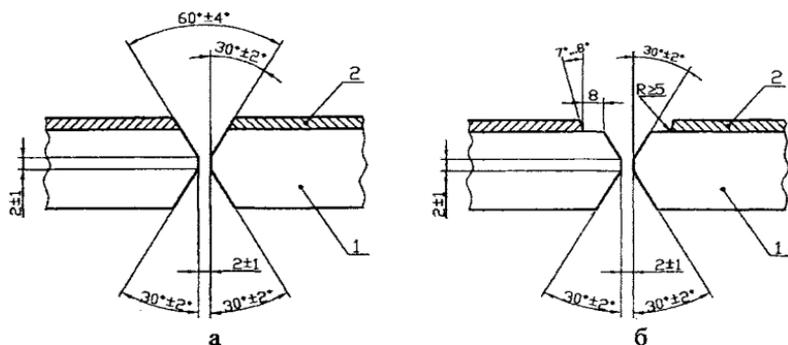
Таблица 5.3 – Значения ударной вязкости *KCU* основного металла колонны К-5, определенные разрушающим и неразрушающим (разработанным) способом

№ образца	Марка стали	Ударная вязкость <i>KCU</i> , МДж/м ² (по разработанной методике)	Ударная вязкость <i>KCU</i> , МДж/м ² (по ГОСТ 1497)
1-1	СтЗсп	0,9	1,24
2-1	СтЗсп	0,95	1,19
3-1	СтЗсп	1,0	1,22
1-2	СтЗсп	1,1	0,91
2-2	СтЗсп	1,5	0,76
3-2	СтЗсп	0,9	0,49
1-3	СтЗсп	1,5	1,20
2-3	СтЗсп	1,3	1,05
3-3	СтЗсп	1,34	1,16
1-4	СтЗсп	1,6	1,17
2-4	СтЗсп	1,53	1,15
3-4	СтЗсп	1,5	1,08
1-5	СтЗсп	1,9	2,01
2-5	СтЗсп	1,8	1,76
3-5	СтЗсп	1,82	1,61
1-6	СтЗсп	1,2	1,38
2-6	СтЗсп	1,3	1,72
3-6	СтЗсп	1,34	1,51

Примечание. В таблице приведены средние значения по результатам измерений

В отличие от этого, результаты оценки механических характеристик сварного соединения, пересекаемого трещиной, показали, что значения твердости *HV* легированного слоя шва при измерении на поперечных шлифах в два раза превышают нормативные значения и достигают 420 *HV*, а угол загиба легированного шва составляет всего 15–35° при норме 100°.

Проанализируем особенности сварки указанной выпе двухслойной стали. Сварка стыковых швов на двухслойной стали, у которой слои имеют различный химический состав, относится к сварке разнородных сталей. Основной особенностью технологии сварки двухслойной стали является раздельная сварка каждого слоя, причем в первую очередь сваривается несущий слой (СтЗсп) электродами типа Э42А, после чего наплавляется коррозионностойкий слой (08Х13). Сварные соединения стали 08Х13 длительное время, в большинстве стран мира, в том числе в России и Беларуси, до сих пор выполняются аустенитно-ферритными электродами типа Э-10Х25Н13Г2. Для выполнения указанного условия необходима специальная подготовка кромок стыка, которая в практике изготовления нефтехимической аппаратуры с применением покрытых электродов имеет варианты, показанные на рисунке 5.3 «а» и «б».



1 – несущий слой – сталь СтЗсп; 2 – шлакирующий слой – сталь 08Х13

Рисунок 5.3 - Типичная геометрия подготовки кромок при сварке двухслойной стали

Основным обстоятельством, которое может привести к образованию малопластичной структуры легированного слоя шва, при изготовлении и ремонте химнефтеаппаратуры, является применение электродов Э-07Х20Н9 вместо электродов

Э-10Х25Н13Г2 по ГОСТ 10052 [164]. Такая замена электродов имела место достаточно часто в первые десятилетия изготовления корпусов аппаратов из двухслойных сталей. Для выяснения этого обстоятельства можно рассмотреть варианты применения указанных электродов путем построения структурных областей на диаграмме Шеффлера (рисунок 5.4), которой принято пользоваться для этих целей [165, 166]. Как отмечено выше, легированный слой шва наплавляется после сварки несущего слоя из стали СтЗсп. Таким образом, состав легированного слоя шва включает в себя практически полностью перемешанные в сварочной ванне до равномерного состава части расплавленного электрода, оплавленного основного слоя шва (электроды Э42А) и оплавленного легированного слоя двухслойной стали 08Х13 (рисунок 5.5). Для режимов ручной дуговой сварки доля участия основного металла в образовании шва обычно составляет 15–20 % (5 % 08Х13 + (10–15) % СтЗсп). Остальные 80–85 % приходятся на электрод. Указанные соотношения могут быть приняты в качестве исходных данных при построении структурных областей металла легированного шва на диаграмме Шеффлера. Выполненное построение свидетельствует, что применение электродов Э-07Х20Н9 вместо Э-10Х25Н13Г2 при сварке легированного слоя приводит к образованию малопластичной мартенситной структуры с высокой твердостью на большинстве рекомендованных режимах, а уже незначительное превышение режима полностью смещает зону возможных структур в аустенитно-мартенситную и даже мартенситную область. В отличие от этого применение электродов Э-10Х25Н13Г2 на паспортных режимах гарантирует получение пластичных структур без мартенситной составляющей и требуется

большое превышение рекомендуемых значений сварочного тока для смещения состава шва в область аустенитно-мартенситных структур. В производстве такие режимы нереальны, т.к. аустенитно-ферритный электродный стержень, обладая высоким электрическим сопротивлением и малой теплопроводностью, на больших токах сильно перегревается, что приводит к растрескиванию электродного покрытия и оголению электрода, что резко нарушает стабильность сварочной дуги и качество формирования шва.

Следует отметить естественное стремление сварщика придать «товарный» вид легированному слою шва, т.к. он является последним. Поэтому на поверхности основных (заполняющих) валиков шва сварщик наплавляет так называемый облицовочный валик. Особенно этот валик стремятся выполнить в тех случаях, когда предыдущий валик (или слой шва) выполнен небрежно и даже с нарушением режима сварки. В этом случае последний облицовочный слой аустенитно-ферритного шва прикрывает предпоследний слой не только по внешнему виду, но также по составу и свойствам, что особенно важно, т.к. при этом облицовочный валик будет иметь состав и структуру с удовлетворительной твердостью.

К этому выводу приходят также при анализе возможных структур металла шва путем построения соответствующих областей на диаграмме Шеффлера. На рисунок 5.4 представлено такое построение для случая применения электродов Э-07Х20Н9.

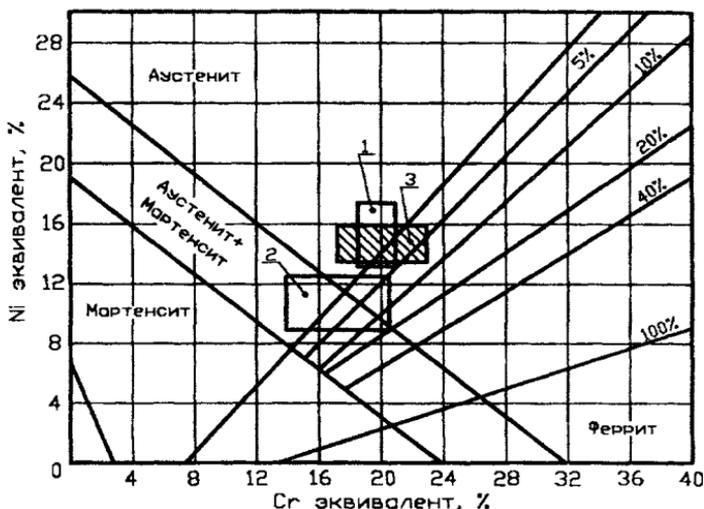
Таким образом, полученный удовлетворительный уровень твердости на поверхности облицовочного валика не гарантирует такие же твердость и характеристики пластичности по всей толщине легированного шва двухслойной стали. В этом случае измерение твердости и других механических характеристик поверхности может показать различные результаты: повышенные значения – на участках без облицовочного валика и удовлетворительные значения – на поверхности облицовочных валиков. Это обстоятельство предопределило необходимость выполнения послойного измерения твердости HV и определения основных характеристик механических свойств (σ_b , δ_s , ψ , KCU) легированного шва неразрушающим способом по разработанной методике после снятия указанного шва на соответствующую глубину на корпусе колонны со спектральным анализом химического состава металла на каждой площадке с измеряемой твердостью. При этом некоторые участки контроля имели результаты, представленные на рисунке 5.6 и в таблице 5.4, что подтверждает результаты анализа с использованием диаграммы Шеффлера. Схемы послойного измерения твердости для участков 1, 2 и 3 (см. рисунок 5.6 и таблицу 5.4) приведены на рисунке 5.7. Контролируемые участки (участок 3 на рисунке 5.6 и в таблице 5.4), выполненные без поверхностных облицовочных валиков электродами Э-07Х20Н9, имели повышенную твердость и недопустимый уровень механических свойств уже на поверхности усиления шва. Если на поверхности легированного шва (при сварке этими же электродами) был наплавлен облицовочный слой, то поверхность усиления шва имела удовлетворительную твердость и другие механические характеристики, а изменение характеристик в худшую сторону наблюдалось на некоторой глубине (участки 1 и 2 на рисунке 5.6 и в таблице 5.4) от поверхности усиления, что подтверждает результаты предварительного анализа с использованием диаграммы Шеффлера.

На внутренней поверхности корпуса была выполнена выбраковка участков сварных швов с недопустимым уровнем механических свойств (см. рисунок 5.8).

Результаты исследования позволяют определить причину образования сквозной трещины на корпусе колонны. В результате нарушения технологии проведения сварочных работ при изготовлении и монтаже колонны на отдельных участках наплавленного металла произошло образование мартенситных структур с твердостью в два и более раза превышающей допустимую. В малопластичном участке легированного слоя шва имело место зарождение трещины. Если учесть, что колонна негабаритная и ее поставка с завода-изготовителя осуществлялась отдельными свальцованными частями обечаяек и даже отдельными листами со сборкой и сваркой на монтажной площадке, то такой сборке присущи специфические особенности. Одной из таких особенностей является сложная подгонка при сборке под сварку кромок двухслойной стали, особенно при монтаже замыкающей части обечайки, когда совмещение кромок обеспечивается с помощью струбцин, клиньев и ударного инструмента. Такой метод подгонки приводит к образованию остаточных монтажных напряжений, которые по своему уровню не ниже сварочных, и если монтажные напряжения по знаку совпадают со сварочными, то даже пластичный материал не всегда может деформироваться без образования трещин.

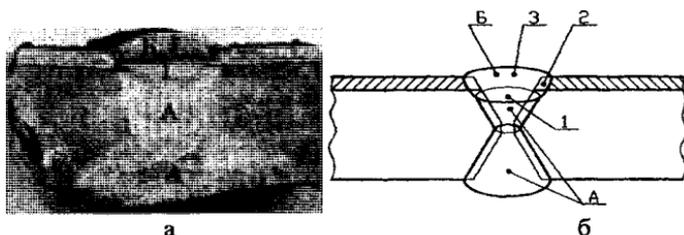
Полученная при монтаже напряженная металлическая система, зафиксированная приварными бандажными поясами с наружной поверхности корпуса и скрепляющими распорными швеллерами на внутренней поверхности корпуса в условиях эксплуатации в течении 40 лет находилась в равновесии и поэтому трещина не развивалась до разгерметизации корпуса. Снятие скрепляющих связей (за счет среза распорных швеллеров внутри корпуса и образования трещин на угловых швах крепления бандажных колец к наружной поверхности) неизбежно повышало нагрузку на сварные соединения. В результате этой нагрузки трещина из охрупченной зоны сварного соединения развилась в направлении, которое в наибольшей степени высвобождает внутреннюю энергию жесткой системы, т.е. в данном случае трещина развивалась по кольцу корпуса колонны. О высоком уровне высвобождаемой внутренней энергии свидетельствует отмеченный выше факт образования большого смещения кромок (сдвиг кромок трещины) по толщине в процессе развития трещины, а также тот факт, что развитие трещины в обе стороны по кольцу аппарата не могли остановить засверловками ее концов. Остановить трещину удалось только путем приварки перпендикулярно концам трещины толстостенных пластин из малоуглеродистой стали.

После проведения работ по диагностированию фактического состояния металла колонны с применением разработанной методики оценки механических свойств неразрушающим способом был выполнен ремонт обечайки корпуса: заменен дефектный участок размером около 5000×1500 мм в зоне образования трещины, для осуществления которой была разработана технология, отвечающая требованиям действующих нормативных документов на ремонт аппаратов [163, 167, 168].



- 1 – область возможных структур металла легированного шва при сварке на рекомендуемом режиме электродами Э-10Х25Н13Г2;
- 2 – область возможных структур металла легированного шва при сварке на рекомендуемом режиме электродами Э-07Х20Н9;
- 3 – область возможных структур металла облицовочного валика, выполненного электродами Э-07Х20Н9 по легированному слою шва, выполненного этими же электродами

Рисунок 5.4 – Построение структурных областей, получаемых при ручной дуговой сварке легированного слоя шва двухслойной стали Ст3сп+08Х13, на диаграмме Шеффлера [162]



- А – основной слой (сварка электродами Э42А);
- Б – легированный слой шва (сварка аустенитно-ферритными электродами), состоящий из:
 - 1 – расплавляемая часть основного слоя шва;
 - 2 – расплавляемая часть 08Х13;
 - 3 – металл от расплавления аустенитно-ферритного электрода

Рисунок 5.5 – Макроструктура (а) и составляющие легированного слоя шва (б)

При этом биметалл для заменяемого участка по температурным пределам применения отвечал требованиям ОСТ 26-291-94 [163], а контроль качества ремонтных сварных соединений в качестве одной из обязательных операций предусматривал контроль механических свойств путем сварки контрольного образца и проведения соответствующих испытаний.

Кроме этого была выполнена выбраковка участков сварных соединений корпуса колонны с недопустимой твердостью и их ремонт: выборку и последующую заварку выбракованных участков сварных соединений по технологии, предусматривающей удаление безогневым способом наплавленного металла, имеющего недопустимую твердость, контроль полноты удаления дефектного металла, заварку выбранных участков и контроль качества выполненных работ.

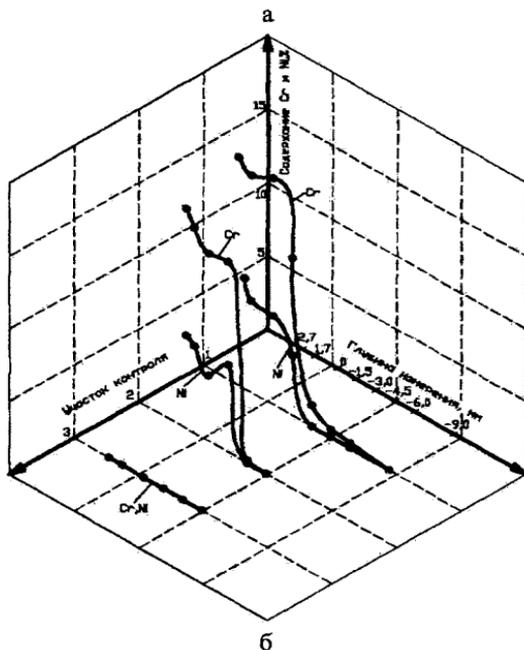
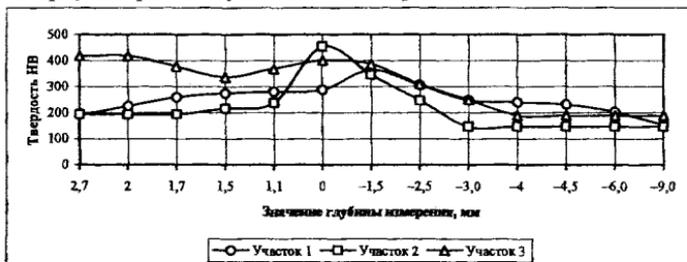


Рисунок 5.6 – Результаты послыного измерения твердости легированного шва

Пояснения к рисунку 5.6, а:

– для участка 1 (цифрами обозначены значения глубины измерения, мм):

+2,7 – облицовочный слой при сварке Э-07Х20Н9; +1,7 – легированный шов при сварке Э-07Х20Н9 на повышенных режимах; 0,0 – легированный шов при сварке Э-07Х20Н9 на повышенных режимах; –1,5 – легированный шов при сварке Э-07Х20Н9 на повышенных режимах; –3,0 – Оплавление плакирующего слоя 08Х13 при сварке основного слоя СтЗсп электродами Э42А; –4,5 – то же при сварке следующего слоя Э42А; –6,0 – то же при сварке следующего слоя Э42А; –9,0 – сварка СтЗсп электродами Э42А;

– для участка 2 (цифрами обозначены значения глубины измерения, мм):

+1,7 – облицовочный слой при сварке Э-07Х20Н9; +1,1 – легированный шов Э-07Х20Н9; 0,0 – легированный шов Э-07Х20Н9 на повышенных режимах; –1,5 – легированный шов Э-07Х20Н9 на повышенных режимах; –3,0 – сварка СтЗсп электродами Э42А с малым оплавлением 08Х13;

– для участка 3 (цифрами обозначены значения глубины измерения, мм):

+2,0 – легированный шов Э-07Х20Н9 на повышенных режимах; +1,5 – легированный шов Э-07Х20Н9 на повышенных режимах; 0,0 – легированный шов Э-07Х20Н9 на повышенных режимах; –1,5 – легированный шов Э-07Х20Н9 на повышенных режимах; –2,5 – легированный шов Э-07Х20Н9 на повышенных режимах; –4,0 – сварка СтЗсп электродами Э42А.

Таблица 5.4 – Результаты послыоного измерения твердости легированного шва

№ участ-ков	№ изме-рения	Значение глубины изме-рения, мм	Содержание основ-ных легирующих элементов, %		Твердость по Вик-керсу, HV	Примечания
			Cr	Ni		
1	2	3	4	5	6	7
1	1	+2,7	15,61	6,92	179...203	Облицовоч-ный слой при сварке Э-07Х20Н9
1	2	+1,7	14,89	6,33	218...300	Легирован-ный шов при сварке Э-07Х20Н9 на повыше-нных режимах
1	3	0,0	15,52	6,13	276...300	Легирован-ный шов при сварке Э-07Х20Н9 на повыше-нных режимах

№ участ-ков	№ изме-рения	Значение глубины изме-рения, мм	Содержание основ-ных легирующих элементов, %		Твердость по Вик-керсу, HV	Примечания
			Cr	Ni		
1	2	3	4	5	6	7
1	4	-1,5	10,82	4,14	344...385	Легирован-ный шов при сварке Э-07Х20Н9 на повышен-ных режимах
1	5	-3,0	1,45	-	227...267	Оплавление лакирующе-го слоя 08Х13 при сварке основного слоя Ст3сп электродами Э42А
1	6	-4,5	0,51	-	205...257	То же при сварке сле-дующего слоя Э42А
1	7	-6,0	0,35	-	200...203	То же при сварке сле-дующего слоя Э42А
1	8	-9,0	-	-	142...161	Сварка Ст3сп электродами Э42А
2	1	+1,7	15,1	6,42	180...205	Облицовоч-ный слой при сварке Э-07Х20Н9
2	2	+1,1	14,1	6,0	229...246	Легирован-ный шов Э-07Х20Н9
2	3	0,0	12,89	4,48	425...483	Легирован-ный шов Э-07Х20Н9 на повышен-ных режимах
2	4	-1,5	13,08	5,97	252...437	Легирован-ный шов Э-07Х20Н9 на повышен-ных режимах

№ участ-ков	№ изме-рения	Значение глубины изме-рения, мм	Содержание основ-ных легирующих элементов, %		Твердость по Вик-керсу, HV	Примечания
			Cr	Ni		
1	2	3	4	5	6	7
2	5	-3,0	0,21	-	142...150	Сварка Ст3сп электродами Э42А с малым оплавлением 08Х13
3	1	+2,0	-	-	418	Св. шов Э-07Х20Н9 на повышпнных режимах
3	2	+1,5	-	-	336	Легирован-ный шов Э-07Х20Н9 на повышпнных режимах
3	3	0,0	-	-	401	Легирован-ный шов Э-07Х20Н9 на повышпнных режимах
3	4	-1,5	-	-	387	Легирован-ный шов Э-07Х20Н9 на повышпнных режимах
3	5	-2,5	-	-	309	Легирован-ный шов Э-07Х20Н9 на повышпнных режимах
3	6	-4,0	-	-	188	Сварка Ст3сп электродами Э42А

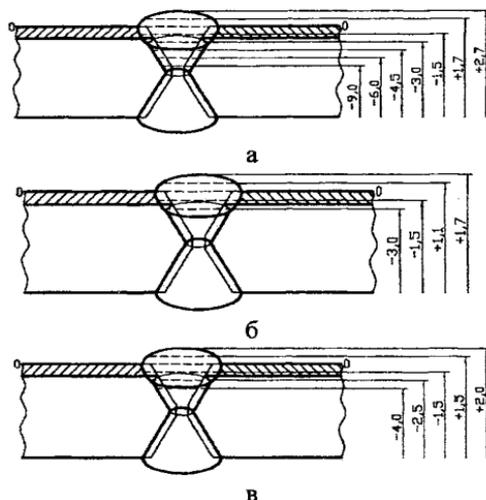


Рисунок 5.7 – Схема послойного измерения твердости HV и основных механических свойств (по разработанной методике) для участков 1 (а), 2 (б) и 3 (в) (см. рисунок 5.6 и таблицу 5.4)

При этом, учитывая, что браковочным признаком ремонтируемых участков сварных соединений является повышенная твердость и неудовлетворительный уровень механических свойств их плакирующего слоя, контроль качества ремонтной сварки предусматривал измерение твердости плакирующего слоя отремонтированных участков. По завершении всех ремонтных работ до пуска в эксплуатацию колонна была испытана пробным давлением в сопровождении акустико-эмиссионного контроля и произведена ультразвуковая дефектоскопия акустико-активных зон, выявленных в процессе испытания.

На основании проведенных работ установлено, что для повышения эксплуатационной надежности длительно эксплуатирующегося оборудования нефтехимической промышленности при проведении капитальных ремонтов необходимо максимально четко соблюдать технологию проведения сварочных работ при изготовлении, монтаже и ремонте оборудования [162]. Также указанные работы показывают, что в выборочном порядке целесообразно проводить оценку качества основного металла и металла сварных соединений неразрушающими методами контроля (по разработанной методике – см. главы 3 и 4), включающую неразрушающий контроль механических свойств сварных соединений, измерение твердости и металлографию – для выявления участков сварных швов с повышенными значениями твердости, деградировавшими механическими свойствами и малопластичной мартенситной структурой с целью последующего ремонта выявленных дефектных участков.

Указанный пример показывает эффективность применения разработанной методики оценки фактического уровня механических свойств металла неразрушающим способом. При этом анализ полученных данных (таблицы 5.1–5.3) по-

казывает хорошую корреляцию значений механических свойств металла диагностируемой конструкции, полученных косвенным способом (по эмпирическим формулам, связывающим параметры пирамидального отпечатка с характеристиками механических свойств), со значениями, полученными на образцах из конструкции по результатам стандартных испытаний.

5.2. Апробация разработанной методики оценки состояния материала на крановых конструкциях ОАО «Управление механизации № 79»

Одной из основных причин разрушений металлоконструкций грузоподъемных кранов является деградация и старение металла, в первую очередь, сварных соединений, определяющих эксплуатационные характеристики крана. Изменение физико-механического состояния металла при длительной эксплуатации, его старение и охрупчивание под воздействием ряда факторов, в том числе за счет знакопеременных циклических нагрузок и термоциклирования, происходят как в основном металле так и в сварных соединениях, как правило, в зоне термического влияния, что приводит к резкому снижению надежной и безопасной работоспособности всей конструкции. В связи с этим контроль свойств металла и его текущего состояния имеет важнейшее значение при оценке возможности эксплуатации различных конструкций и объектов, в том числе кранов [7, 8, 62], как характерного представителя ответственных сварных металлоконструкций.

Одним из направлений решения поставленных вопросов, как уже отмечалось ранее, является проведение научных исследований и разработка системы и методики диагностики, позволяющей обеспечить проведение объективного мониторинга состояния сварных соединений и металла кранов с прогнозированием и продлением сроков эксплуатации крановой техники, гарантированно обеспечивая при этом необходимый уровень надежности и безопасности.

Были разработаны основные элементы методики оценки фактического состояния и степени деградации сварных соединений и основного металла грузоподъемных кранов по результатам анализа существующих методик контроля, технической диагностики и оценки остаточного ресурса металлоконструкций с адаптацией выбранных элементов для работы с крановыми конструкциями.

Апробацию разработанных технологических приемов и методов на крановых конструкциях проводили на строительных объектах и ремонтном участке ОАО «Управление механизации № 79» (г. Минск).

Установлено, что для объективной оценки состояния металлоконструкций целесообразно применять комплексную методику, включающую несколько методов, в том числе следующие основные: магнитный (коэрцитиметрический), дюрOMETрический и металлографический методы.

Остановимся на них более подробно с учетом особенностей объекта – крановой конструкции. Все приведенные ниже методы контроля относятся к неразрушающим методам, позволяющим непосредственно на конструкции без вырезки образцов из конструкции, определять фактическое состояние металла в любом доступном месте диагностируемой конструкции.

1-й метод – магнитный (коэрцитиметрический). Основан на возможности определения фактического уровня напряженно-деформированного состояния металла по значению коэрцитивной силы [3, 4]. Для ряда сталей установлены максимально допустимые значения коэрцитивной силы, соответствующие пределу текучести конкретного материала. Таким образом, если фактическое значение, определенное на конструкции, превышает указанные значения, то эксплуатация конструкции запрещается, по уровню внутренних напряжений, превышающих предел текучести, что, естественно, не допустимо. Для проведения указанных работ используется серийно выпускаемый магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М (НПО «Спецтехнологии» г. Харьков).

2-й метод – дюрометрический (метод косвенного определения механических свойств материала). Основан на возможности определения характеристик механических свойств: пределов прочности, текучести; относительного удлинения и сужения, а также ударной вязкости по параметрам пирамидального отпечатка на поверхности материала после определения твердости по Виккерсу [133–136]. Подробно указанный метод описан в главе 3 данной работы.

Расчетные уравнения:

– предел прочности σ_B :

$$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot k \cdot S), \text{ МПа};$$

– относительное удлинение δ_5 :

$$\delta_5 = D \cdot k \cdot (9,38 + 24,43 \cdot k \cdot S), \%;$$

– относительное сужение ψ :

$$\psi = 16,4 + 80 \cdot k \cdot S, \%;$$

– ударная вязкость KCU :

$$KCU = \gamma \cdot \frac{\psi}{1 - \psi}, \text{ МДж/м}^2.$$

где k – коэффициент кратности, зависящий от нагрузки на пирамидальный индентор; для нагрузки 50 Н $k = 4,472$; D – диагональ отпечатка, мм; S – ширина отпечатка, мм; γ – коэффициент, зависящий от уровня механических свойств материала (при $\psi > 80$, $60 < \psi \leq 80$, $40 < \psi \leq 60$, $20 < \psi \leq 40$, $\psi \leq 20$ коэффициент γ соответственно равен 0,61, 0,76, 0,83, 1,19, 1,66).

При этом за счет применения переносных твердомеров указанные характеристики можно определить практически в любой точке диагностируемой конструкции. Если полученные значения указанных механических свойств не соответствуют допустимому уровню значений для данной стали следует выполнять отбраковку с последующим ремонтом.

3-й метод – металлографический. Основан на возможности контроля особенностей и аномалий структуры, а также возможности косвенного определения механических свойств. Один из методов основан на возможности косвенного определения механических свойств по наличию и форме субзерен феррита [169]. Установлено, что для феррито-перлитных сталей (на примере сталей Ст3 и Ст4) при их эксплуатации при циклических нагрузках (что важно и для крановых конструкций) наблюдаются изменения в зернах феррита: чем больше циклов или

выше напряжения, тем ярче в микроструктуре видны субзерна феррита. Указанные изменения легко выявляются микроскопическим исследованием, в том числе при применении переносного микроскопа, и свидетельствуют о степени деградации металла, в том числе и его механических свойств (см. таблицу 5.5)

Таблица 5.5 – Связь механических свойств стали со структурой феррита [169]

Тип структур	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²
Исходная	268	430	26	185
Ячеистая	250	450	24	157
Фрагментированная с «ножевыми» границами	298	560	18	78

Как видно из таблицы 5.5 связь структуры со свойствами однозначна. Возникновение ячеистой структуры феррита уже свидетельствует о деградации металла и снижении, в первую очередь, ударной вязкости примерно на 15–20 %.

Отработку указанных методов оценки степени деградации металла для башенных кранов выполняли на металле стрелы башенного крана С-981, материал: сталь ВСтЗсп5.

Стрела была выведена из эксплуатации по причине значительного коррозионного износа из-за длительного срока эксплуатации (более 20 лет).

Были поставлены следующие задачи:

- установление объективности оценки напряженного состояния металла коэрцитивным методом, его чувствительности и возможности использования при диагностики кранов;

- установление влияния уровня напряженного состояниями металла на степень его деградации;

- подтверждение возможности косвенной оценки уровня механических свойств металла и степени его деградации по параметрам отпечатка при определении твердости по Виккерсу (по разработанному способу (см. главу 3);

- установление эффективного критерия отбраковки металла (по уровню коэрцитивной силы или по уровню механических свойств, определенных косвенным способом), с учетом допущения, что при низком допустимом уровне коэрцитивной силы (внутренних напряжений) возможна высокая степень деградации металла и снижение механических свойств ниже установленных допустимых значений.

Первым этапом была выполнена разметка крановой конструкции с указанием мест замера коэрцитивной силы. На несущих элементах стрелы (уголок, нижний пояс) применялся шаг замера 1 м, также выполнялись замеры по сварным швам нижнего пояса с поперечинами (рисунок 5.8).

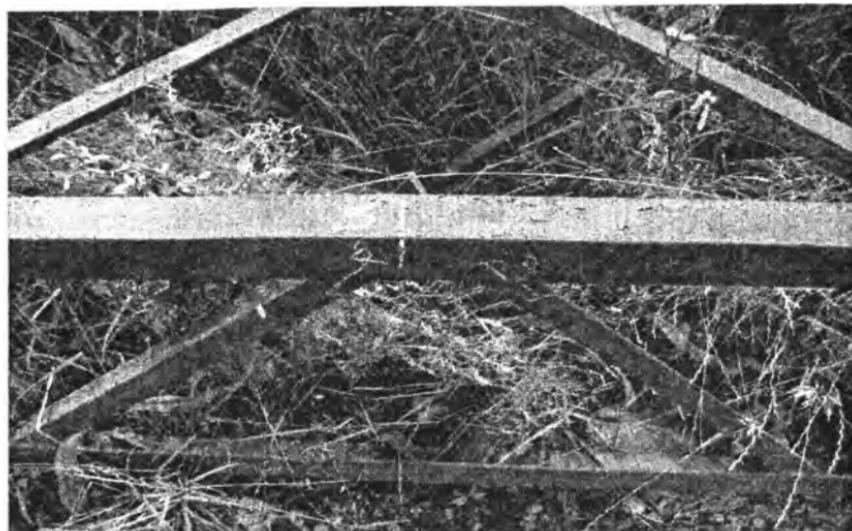


Рисунок 5.8 – Внешний вид элемента диагностируемой крановой конструкции (стрелы) с разметкой

Было выполнено 30 замеров коэрцитивной силы и установлены точки с максимальным и минимальным значением коэрцитивной силы, что соответствует максимальному и минимальному уровню напряжений в конструкции.

Максимальное значение – 5,3 А/см – металл поперечины (уголок).

Минимальное значение – 2,4 А/см – металл несущего элемента стрелы (уголок, нижний пояс).

Проведено изучение металла на контрольных участках и определение механических свойств. Участок № 1 – металл с максимальным значением коэрцитивной силы, что соответствует максимальному уровню напряжений в конструкции.

Участок № 2 – металл с минимальным значением коэрцитивной силы, что соответствует минимальному уровню напряжений в конструкции.

Предполагалось, что степень деградации металла на участке № 1 будет выше, чем на участке № 2 (также предположительно будет ниже ударная вязкость и пластичность).

На поверхности конструкции в местах, выбранных для проведения контроля, шлифовались участки диаметром 25–35 мм. В качестве инструмента для шлифования и полирования поверхности материала использовался переносной шлифовально-полировальный станок «Аккюрол 2.2» (рисунок 5.9). Зачищенная поверхность шлифовалась несколькими насадками с последовательно убывающей зернистостью шлифовальной бумаги от 80 до 1200. Полирование поверхности производилось механическим способом. При этом использовался полировальный круг с алмазной пастой.

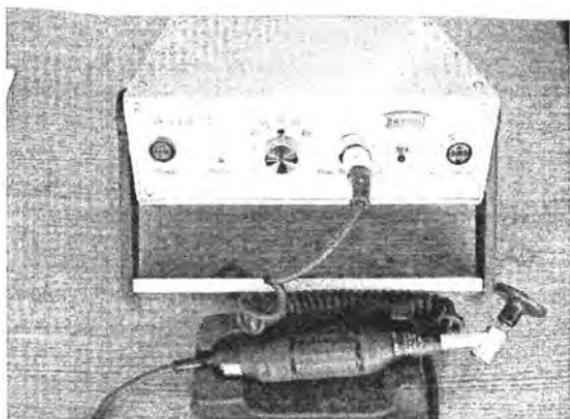


Рисунок 5.9 – Переносной шлифовально-полировальный станок «Аккропол 2.2», использованный для подготовки поверхности образцов

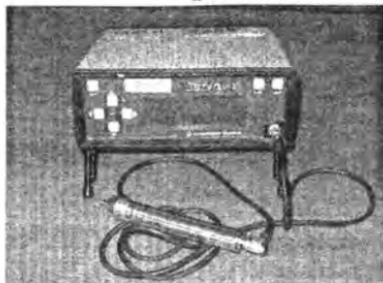
Определение твердости по методу Виккерса проводили с помощью переносных твердометров Microdur I, Microdur II (резонансно-импедансного принципа действия) и WPM (статического принципа действия) (рисунок 5.10). Твердость по Виккерсу измерялась алмазной пирамидой с углом между противоположными гранями 136° при нагрузке на индентор 50 Н.



а



б



в

Рисунок 5.10 – Переносные твердометры Microdur I (а), Microdur II (б) и WPM (в), использованные для измерения твердости по Виккерсу материала

Параметры формы пирамидального отпечатка (ширина и диагональ) измерялись в двух взаимно перпендикулярных направлениях с использованием окуляр-микрометра на переносном металлографическом микроскопе ТКМ (рисунок 5.12) при увеличении 400 крат.

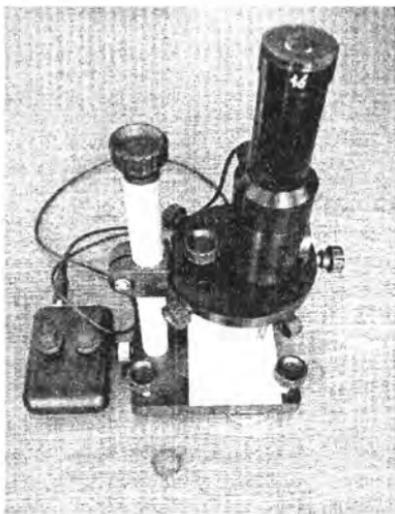


Рисунок 5.11 – Переносной металлографический микроскоп ТКМ, использованный для определения параметров формы пирамидальных отпечатков

Типичные отпечатки, получаемые на материале при измерении твердости по Виккерсу (получены с помощью цифрового фотоаппарата, совмещаемого с окуляром микроскопа), приведены на рисунке 5.12.

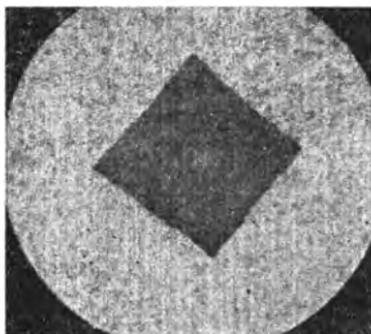


Рисунок 5.12 – Пирамидальные отпечатки на материале, полученные при измерении твердости по Виккерсу (нагрузка 50 Н) ($\times 400$)

Полученные экспериментальные результаты представлены ниже.

Участок № 1 – металл с максимальным значением коэрцитивной силы ($H_a \text{ max} = 5,3 \text{ А/см}$), что соответствует максимальному уровню напряжений в конструкции.

Типичная микроструктура металла на участке № 1 представлена на рис. 5.13: феррит (крупные светлые зерна) состоит из более мелких субзерен-ячеек.

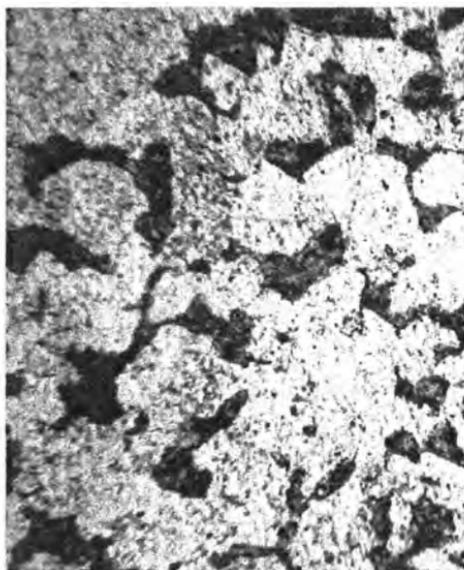


Рисунок 5.13 – Типичная микроструктура металла стрелы крана в месте с максимальным значением коэрцитивной силы (участок 1) (x400)

Средние значения параметров формы отпечатков (по результатам 10 измерений):

HV (твердость) = 1426 МПа ;

D (диагональ отпечатка) = 0,2396 мм;

S (ширина отпечатка) = 0,1692 мм.

Результат определения механических свойств.

$$\sigma_s = 1426 \cdot (0,285 + 0,057 \cdot 4,472 \cdot 0,1692) = 467,9 \text{ МПа.}$$

$$\delta_s = 0,2396 \cdot 4,472 \cdot (9,38 + 24,43 \cdot 4,472 \cdot 0,1692) = 29,8 \%$$

$$\psi = 16,4 + 80 \cdot 4,472 \cdot 0,1692 = 76,9 \%$$

$$KCU = 0,76 \cdot \frac{0,769}{1 - 0,769} = 2,53 \text{ МДж/м}^2 = 253 \text{ Дж/см}^2.$$

Участок № 2 – металл с минимальным значением коэрцитивной силы ($H_a \text{ min} = 2,4 \text{ А/см}$), что соответствует минимальному уровню напряжений в конструкции.

Типичная микроструктура металла на участке № 2 представлена на рисунке 5.14: в феррите (крупные светлые зерна) явных ячеистых субзерен не наблюдается.

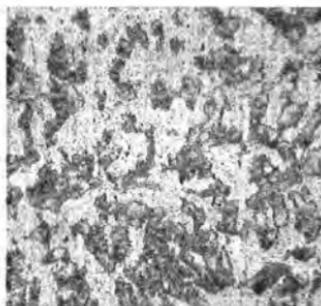


Рисунок 5.14 – Типичная микроструктура стрелы крана в месте с минимальным значением коэрцитивной силы (участок 2) (x400)

Средние значения параметров формы отпечатков (по результатам 7 измерений):

$$HV = 1346 \text{ МПа};$$

$$D = 0,2422 \text{ мм};$$

$$S = 0,1735 \text{ мм}.$$

Результат определения механических свойств.

$$\sigma_s = 1346 (0,285 + 0,057 \cdot 4,472 \cdot 0,1735) = 443,12 \text{ МПа}.$$

$$\delta_5 = 0,2422 \cdot 4,472 \cdot (9,38 + 24,43 \cdot 4,472 \cdot 0,1735) = 30,7 \%,$$

$$\psi = 16,4 + 80 \cdot 4,472 \cdot 0,1735 = 78,4 \%,$$

$$KCU = 0,76 \cdot \frac{0,76}{1 - 0,76} = 2,7 \text{ МДж/м}^2 = 270 \text{ Дж/см}^2$$

Обобщенные экспериментальные данные сведены в таблицу 5.6

Таблица 5.6 – Данные по анализу металла крановой конструкции

Параметр	Участок № 1	Участок № 2	Разница между параметрами, раз*
Коэрцитивная сила, А/см	5,3 (max)	2,4 (min)	2,2
Уровень внутренних напряжений в металле	Максимальный	Минимальный	–
Твердость, HV	142,6	134,6	1,059
Предел прочности, МПа	467,8	443,12	1,056
Относительное удлинение, %	29,8	30,7	1,030
Относительное сужение, %	76,9	78,4	1,020
Ударная вязкость, Дж/см ²	253	270	1,067

* – путем деления максимального на минимальное значение одного и того же параметра.

Проанализировав полученные экспериментальные данные (таблица 5.6), можно сделать следующие выводы

1. Определенные косвенным путем значения всех механических свойств для участков № 1 и № 2 не ниже минимальных (отбраковочных) значений для стали ВСтЗ.

2. Установлен более высокий уровень деградации металла на участке № 1, т.к. он находился под большим напряжением при эксплуатации, чем участок № 2 (характерно снижение ударной вязкости на 6,7 % и пластичности (по относительному удлинению) на 3,0 %).

3. Наиболее чувствительным параметром к уровню деградации металла (по результатам проведенных исследований на элементах стрелы башенного крана) является коэрцитивная сила (разница между контрольными участками составляет 220 %).

Таким образом, приведенные выше экспериментальные данные по анализу металла крановой конструкции показывают эффективность именно комплексной методики контроля фактического состояния металла диагностируемой конструкции.

При этом разработанный метод косвенной оценки фактических механических свойств металла по параметрам полученного пирамидального отпечатка (см. главу 3) также доказал свою работоспособность и эффективность с позиции возможности определения характеристик механических свойств непосредственно на конструкции и без ее «травмирования».

Применение указанных методов при техническом диагностировании позволит более объективно судить о фактическом состоянии металла, уровне его механических свойств, а также проводить отбраковку элементов конструкции для своевременного ремонта.

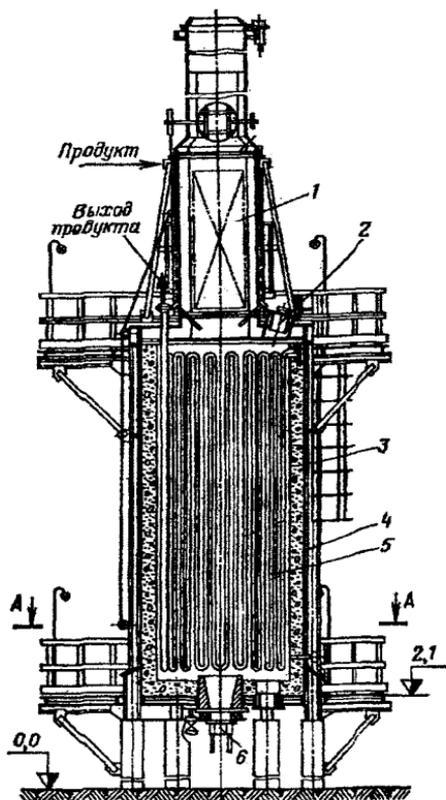
5.3. Апробация разработанной методики оценки фактического состояния материала и определения остаточного ресурса металлоконструкций на примере змеевика печи П-601 установки «Риформинг-4» ОАО «НАФТАН»

Рассмотрим результаты апробации разработанной методики оценки фактического состояния металла и определения скорости деградации механических свойств, а также возможности оценки остаточного ресурса конструкции (раздел 4.9 данной работы) на примере змеевика печи П-601 установки «Риформинг-4» ОАО «НАФТАН».

Трубчатые печи – один из основных видов оборудования технологических установок нефтеперерабатывающих заводов. С позиции безопасности эксплуатации наиболее слабым элементом печей является трубчатый змеевик. Обеспечение безопасной эксплуатации трубчатого змеевика печи, т.к. при его отказе происходит остановка не только печи, но и всей технологической установки является весьма актуальной задачей.

Печь П-601 изготовлена в 1968 г. в Чехословакии. По конструкции является вертикальной цилиндрической (рисунок 5.15). Состоит из камер радиации и

конвекции с расположенными в них вертикальными змеевиками. Материал змеевика камеры радиации (трубы $\text{Ø}152 \times 8$ мм, отводы $180^\circ \text{Ø}152 \times 8$ мм) – сталь 15Х5М. Рабочие параметры печи: давление $p_{\text{раб}} = 4,75$ МПа, температура на выходе из камеры радиации $t_{\text{раб}} = 475$ °С, среда – смесь бензиновых фракций и водородсодержащего газа. Печь введена в эксплуатацию в 1974 году и на момент диагностирования эксплуатировалась 33 года.



1 – камера конвекции; 2 – люк-лаз; 3 – футеровка; 4 – корпус;
5 – змеевик камеры радиации; 6 – горелка; 7 – смотровое окно

Рисунок 5.15 – Схема печи П-601

Оценка состояния материала змеевика проводилась путем определения его механических характеристик.

Механические свойства материала змеевика определялись неразрушающим способом. Для этого на предварительно подготовленной поверхности труб

змеевика переносным твердомером Microdur II определялась твердость по Виккерсу, переносным микроскопом ТКМ измерялись параметры пирамидальных отпечатков и по формулам рассчитывались значения механических характеристик (σ_v , δ_5 , ψ , KCU) по разработанной методике (см главы 3,4).

Значения механических свойств стали 15X5M до эксплуатации печи П-601 определены по паспорту. В 1993 и 2003 годах специализированными организациями была проведена оценка состояния материала змеевика печи П-601 с определением его механических свойств. Эти данные использованы для определения скорости деградации механических свойств материала и оценки ресурса безопасной эксплуатации змеевика. Средние значения механических свойств стали 15X5M после различного срока эксплуатации печи П-601 приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Значения механических свойств стали 15X5M в зависимости от времени эксплуатации

Время эксплуатации, лет	σ_v , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU , МДж/м ²
до эксплуатации	631	24,2	62,3	3,07
20	598	23,7	58,2	2,8
30	551	23,1	56,6	2,5
33	540	22,2	53,8	2,36

Значения комплексного показателя механических свойств B : $B_0 = 44,4 \text{ м}^{-1}$; $B_1 = 45,5 \text{ м}^{-1}$; $B_2 = 45,8 \text{ м}^{-1}$; $B_3 = 45,7 \text{ м}^{-1}$. На карту деградации механических свойств нанесены значения механических характеристик стали 15X5M до эксплуатации, а также через отрезки времени, равные 20, 30 и 33 годам (рисунок 5.16).

Значения скорости деградации комплексного показателя механических свойств определены в соответствии с алгоритмом, описанным в разделе 4.9 данной работы. Результаты приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Значения скорости деградации комплексного показателя механических свойств стали 15X5M

Отрезок времени эксплуатации / фиксированное значение момента времени	Значение $V_{дег}$, м ⁻¹ /год
Средняя скорость деградации механических свойств	
0...20 лет	1,002
20...30 лет	1,001
30...33 года	1,001
0...33 года	1,001
Мгновенная скорость деградации механических свойств	
20 лет	0,063
30 лет	-0,015
33 года	-0,053

Из данных таблицы 5.8 видно, что наиболее интенсивное изменение механических свойств стали 15X5M произошло на отрезке времени эксплуатации 30...33 года.

Оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации змеевика печи П-601 проводилась в соответствии с разработанным способом количественной оценки времени до достижения материалом диагностируемой конструкции предельного состояния (см. раздел 4.9).

Уравнения граничных линий на карте деградации для стали 15X5M (см. уточненные границы (рисунок 4.16):

$$\begin{cases} B_1 = \frac{A_{y1}}{KCU} = \frac{92}{KCU}, \text{ м}^{-1}; \\ B_2 = \frac{A_{y2}}{KCU} = \frac{158}{KCU}, \text{ м}^{-1}; \\ B_3 = \text{const} = 120 \text{ м}^{-1}; \\ KCU = \text{const} = 3,25 \text{ МДж/м}^2. \end{cases}$$

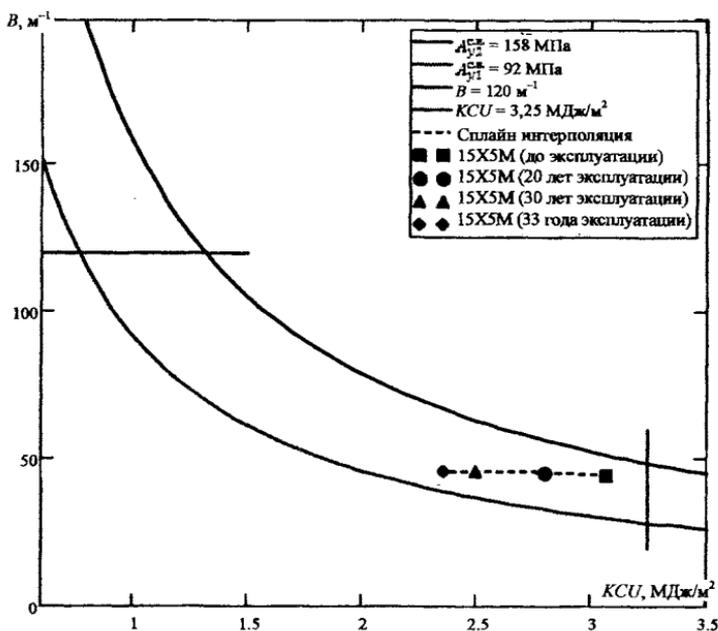


Рисунок 5.16 – Карта деградации механических свойств стали 15X5M (граничные линии взяты из рисунка 4.16 для теплоустойчивых сталей)

Для нахождения интерполяционного многочлена $L(KCU)$ для зависимости $B(KCU)$ на карте деградации составлены многочлены 3-й степени:

$$l_0(KCU) = \frac{(KCU - KCU_1) \cdot (KCU - KCU_2) \cdot (KCU - KCU_3)}{(KCU_0 - KCU_1) \cdot (KCU_0 - KCU_2) \cdot (KCU_0 - KCU_3)} = \\ = \frac{(KCU - 2,8) \cdot (KCU - 2,5) \cdot (KCU - 2,36)}{(3,07 - 2,8) \cdot (3,07 - 2,5) \cdot (3,07 - 2,36)};$$

$$l_1(KCU) = \frac{(KCU - KCU_0) \cdot (KCU - KCU_2) \cdot (KCU - KCU_3)}{(KCU_1 - KCU_0) \cdot (KCU_1 - KCU_2) \cdot (KCU_1 - KCU_3)} = \\ = \frac{(KCU - 3,07) \cdot (KCU - 2,5) \cdot (KCU - 2,36)}{(2,8 - 3,07) \cdot (2,8 - 2,5) \cdot (2,8 - 2,36)};$$

$$l_2(KCU) = \frac{(KCU - KCU_0) \cdot (KCU - KCU_1) \cdot (KCU - KCU_3)}{(KCU_2 - KCU_0) \cdot (KCU_2 - KCU_1) \cdot (KCU_2 - KCU_3)} = \\ = \frac{(KCU - 3,07) \cdot (KCU - 2,8) \cdot (KCU - 2,36)}{(2,5 - 3,07) \cdot (2,5 - 2,8) \cdot (2,5 - 2,36)};$$

$$l_3(KCU) = \frac{(KCU - KCU_0) \cdot (KCU - KCU_1) \cdot (KCU - KCU_2)}{(KCU_3 - KCU_0) \cdot (KCU_3 - KCU_1) \cdot (KCU_3 - KCU_2)} = \\ = \frac{(KCU - 3,07) \cdot (KCU - 2,8) \cdot (KCU - 2,5)}{(2,36 - 3,07) \cdot (2,36 - 2,8) \cdot (2,36 - 2,5)}.$$

Интерполяционный многочлен Лагранжа:

$$L(KCU) = B(KCU) = \sum_{k=0}^{m=3} B(KCU_k) \cdot l_k(KCU) = \\ = -2,1085 \cdot KCU^3 + 12,2547 \cdot KCU^2 - 21,4825 \cdot KCU + 55,8591.$$

Экстраполяцией полиномиальной линии $B(KCU)$ найдена абсцисса KCU^* ее пересечения с граничной линией (рисунок 5.17):

$$\left\{ \begin{array}{l} L(KCU) = B_1 = \frac{A_{y1}}{KCU}; \\ -2,1085 \cdot KCU^3 + 12,2547 \cdot KCU^2 + 55,8591 \cdot KCU - 21,4825 = \frac{92}{KCU^*}; \\ KCU^* = 2,03 \text{ МДж/м}^2. \end{array} \right.$$

Ордината B^* точки пересечения полиномиальной линии $B(KCU)$ с граничной линией:

$$B^* = L(KCU^*); \\ B^* = -2,1085 \cdot KCU^3 + 12,2547 \cdot KCU^2 + 55,8591 \cdot KCU - 21,4825; \\ B^* = 45,13 \text{ м}^{-1}.$$

График в координатах «комплексный показатель механических свойств B (м^{-1}) – время эксплуатации τ (лет)» приведен на рисунке 5.17.

$$\frac{\frac{92}{x}}{-2.1085x^3 + 12.2547x^2 - 21.4825x + 55.8591} = \frac{120}{x}$$

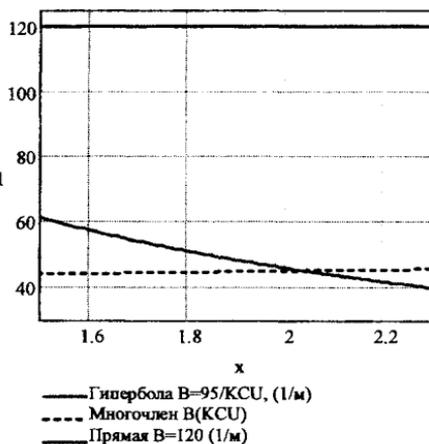


Рисунок 5.17 – Нахождение значения KCU^*

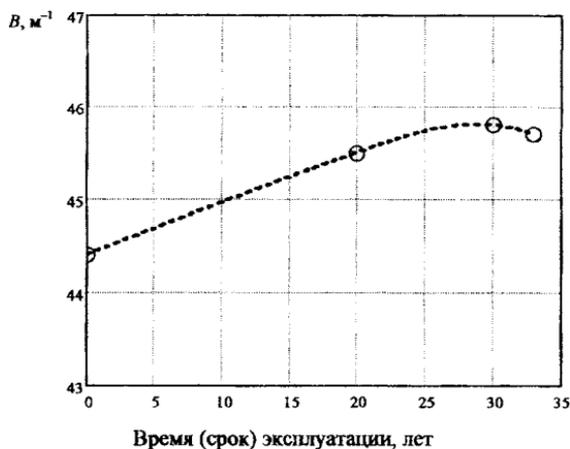


Рисунок 5.18 – Изменение показателя B от времени эксплуатации эмеевика из стали 15X5M

Для нахождения интерполяционного многочлена $L(\tau)$ для зависимости $B(\tau)$ составлены многочлены 3-й степени:

$$l_0(\tau) = \frac{(\tau - \tau_1) \cdot (\tau - \tau_2) \cdot (\tau - \tau_3)}{(\tau_0 - \tau_1) \cdot (\tau_0 - \tau_2) \cdot (\tau_0 - \tau_3)} = \frac{(\tau - 20) \cdot (\tau - 30) \cdot (\tau - 33)}{(0 - 20) \cdot (0 - 30) \cdot (0 - 33)}$$

$$l_1(\tau) = \frac{(\tau - \tau_0) \cdot (\tau - \tau_2) \cdot (\tau - \tau_3)}{(\tau_1 - \tau_0) \cdot (\tau_1 - \tau_2) \cdot (\tau_1 - \tau_3)} = \frac{(\tau - 0) \cdot (\tau - 30) \cdot (\tau - 33)}{(20 - 0) \cdot (20 - 30) \cdot (20 - 33)}$$

$$l_2(\tau) = \frac{(\tau - \tau_0) \cdot (\tau - \tau_1) \cdot (\tau - \tau_3)}{(\tau_2 - \tau_0) \cdot (\tau_2 - \tau_1) \cdot (\tau_2 - \tau_3)} = \frac{(\tau - 0) \cdot (\tau - 20) \cdot (\tau - 33)}{(30 - 0) \cdot (30 - 20) \cdot (30 - 33)}$$

$$l_3(\tau) = \frac{(\tau - \tau_0) \cdot (\tau - \tau_1) \cdot (\tau - \tau_2)}{(\tau_3 - \tau_0) \cdot (\tau_3 - \tau_1) \cdot (\tau_3 - \tau_2)} = \frac{(\tau - 0) \cdot (\tau - 20) \cdot (\tau - 30)}{(33 - 0) \cdot (33 - 20) \cdot (33 - 30)}$$

Интерполяционный многочлен Лагранжа:

$$L(\tau) = B(\tau) = \sum_{k=0}^{m-3} B(\tau_k) \cdot l_k(\tau) =$$

$$= -0,0001224 \cdot \tau^3 + 0,005285 \cdot \tau^2 - 0,00176 \cdot \tau + 44,4.$$

Решение уравнения $B^* = L(\tau)$ в численном виде:

$$B^* = L(\tau);$$

$$B^* = -0,0001224 \cdot \tau^3 + 0,005285 \cdot \tau^2 - 0,00176 \cdot \tau + 44,4;$$

$$45,13 = -0,0001224 \cdot \tau^3 + 0,005285 \cdot \tau^2 - 0,00176 \cdot \tau + 44,4;$$

$$-0,0001224 \cdot \tau^3 + 0,005285 \cdot \tau^2 - 0,00176 \cdot \tau - 0,73 = 0;$$

$$\tau \approx 39 \text{ лет.}$$

Найденное значение τ соответствует искомому периоду времени от начала эксплуатации до достижения комплекса механических свойств материала предельного значения при сохранении существующих условий эксплуатации печи (рисунок 5.19).

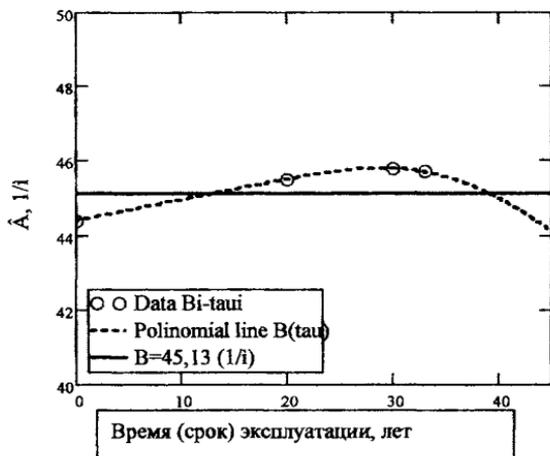


Рисунок 5.19 – Определение времени до достижения механических свойств стали 15X5M предельного значения

Таким образом, с учетом продолжительности фактической эксплуатации (33 года) печного змеевика, срок его остаточной безопасной эксплуатации составляет 6 лет.

На основании полученных результатов срок безопасной эксплуатации змеевика печи П-601 установки «Риформинг-4» ОАО «НАФТАН» может быть продлен на 6 лет, что согласуется с нормативной литературой и говорит о работоспособности разработанной и апробированной методики для оценки фактического состояния материала остаточного ресурса металлоконструкций.

Таким образом, разработанная методика оценки остаточного ресурса металлоконструкций, основанная на расчете достижения материалом диагностируемой конструкции предельного состояния по комплексному показателю механических свойств (раздел 4.9 данной работы), на данном примере доказала свою работоспособность и возможность применения для ответственных стальных металлоконструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований и проведенных обобщений полученных экспериментальных данных можно констатировать, что поставленная цель достигнута: разработана эффективная методика оценки фактического состояния материала и остаточного ресурса практически любой ответственной металлоконструкции, основанная на косвенном определении фактических механических свойств металла неразрушающим способом в любом доступном месте диагностируемой конструкции [170, 171].

При выполнении указанной цели были решены следующие задачи.

1. Выполнен анализ состояния и материального исполнения большинства ответственных металлоконструкций, имеющих широкое распространения на предприятиях и в организациях Республики Беларусь:

- оборудования и конструкции нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности (сосуды, работающие под давлением; резервуары, технологические трубопроводы и т.п.) [10, 170];
- магистральных газо-, нефте- и продуктопроводов [29, 34];
- элементов конструкций различных грузоподъемных машин и механизмов [63, 64].

Проведенный анализ выявил общие закономерности: большинство указанных конструкций эксплуатируется за пределами своего нормативного срока эксплуатации, при этом в металле начинают проявляться процессы старения и связанные с этим деградация структуры и резкое снижение механических свойств, в первую очередь, ударной вязкости.

Анализ позволил определить спектр основных сталей, применяемых для указанных ответственных конструкций:

- углеродистые конструкционные стали (обыкновенного качества и качественные): в первую очередь, сталь Ст3 и сталь 20;
- низколегированные марганцево-кремниевые стали: в первую очередь, стали 09Г2С, 16ГС, 17ГС, 13Г1С;
- легированные теплоустойчивые стали: в первую очередь, стали 12ХМ и 15Х5М;
- высоколегированные коррозионностойкие стали: в первую очередь стали 08Х18Н10Т и 12Х18Н10Т.

При этом стали первых двух групп широко применяются для большинства видов и групп ответственных металлоконструкций, поэтому именно им было уделено повышенное внимание.

2. Разработан неразрушающий способ определения ударной вязкости металла диагностируемой конструкции, основанный на эмпирических формулах взаимосвязи параметров отпечатка пирамидального индентора с основными характеристиками механических свойств [133]. Указанный способ был уточнен с учетом групп сталей и перехода на переносные твердомеры, что позволяет определять фактические механические свойства в любой доступной точке диагностируемой конструкции без вырезки образцов и «травмирования» конструкции.

При этом также разработана система критериев поиска критических «слабых» мест диагностируемой конструкции с учетом вида конструкции и особенностей ее эксплуатации [10, 171].

3. Разработан эффективный способ графической интерпретации фактических механических свойств материала диагностируемой конструкции, позволяющий их представить в виде одной точки на графике, характеризующей комплексный показатель механических свойств как функцию от ударной вязкости, предела прочности и относительного удлинения [134–136]. Применение указанного способа позволило вести речь о возможности оценки скорости изменения механических свойств металла диагностируемой конструкции.

4. Разработан способ определения скорости изменения (деградации) механических свойств материала диагностируемой конструкции [136], который позволяет определить время достижения материалом предельного состояния – своеобразной границы по уровню фактических механических свойств, выход за которую недопустим с позиции надежности и безопасности эксплуатации любой диагностируемой конструкции. При этом для каждой группы сталей были уточнены границы предельного состояния на основании анализ более 50 объектов различного материального исполнения. Указанный способ является основой предлагаемой методики оценки остаточного ресурса диагностируемой конструкции по критерию достижения материалом конструкции предельного состояния по уровню фактических механических свойств.

В работе также приведены примеры использования разработанных методов и приемов при диагностике и оценке состояния, а также определения остаточного ресурса различных металлоконструкций, которые подтверждают правомерность и эффективность их применения в области технической диагностики различных ответственных металлоконструкций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент РФ. Способ диагностики металлоконструкций сосудов и аппаратов давления и определения их остаточного ресурса / В.К. Востров, В.М. Горицкий. – № 2032163; Оpubл. 19.02.93.
2. Горицкий, В.М. Характеристики трещиностойкости сталей и техническое диагностирование конструкций и оборудования. Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: тематический сборник / В.М. Горицкий; под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Минск: Технопринт; ПГУ, 2003. – С. 47–52.
3. Безлюдько, Г.Я. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций / Г.Я. Безлюдько, В.Ф. Мужичкий, Б.Е. Попов // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. – 1999. – Т. 65, № 9. – С. 53–57.
4. Христенко, И.Н. Влияние пластической деформации на коэрцитивную силу малоуглеродистой стали / И.Н. Христенко, В.В. Кривова // Дефектоскопия. – 1984. – № 6. – С. 90.
5. Моделирование диаграммы деформирования на основе измерения ее магнитных характеристик / Э.С. Горкунов [и др.] // Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 87–95.
6. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением: утв. Министерством по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 27.12.2005 № 5 / Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь, 20.01.2006 г. за № 8/13868. – Минск: ДИЭКОС, 2006. – 203 с.
7. Методические рекомендации по проведению технического диагностирования грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы: утв. Приказом Проматомнадзора 30.12.2005 № 145. – Минск: БОИМ, 2006. – 328 с.
8. Дубов, А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А.А. Дубов // Газовая промышленность. – 2002. – № 2. – С. 58–61.
9. Корольков, Д.И. Проблемы оценки остаточного ресурса оборудования в Республике Беларусь / Д.И. Корольков // Материалы совещания «Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением». – Новополоцк: ПГУ, 1997. – С. 5–7.
10. Пантелеенко, Ф.И. Методология выявления слабых, критических мест сосудов, работающих под давлением / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский // Сб. научных трудов VII Международной НТК: в 3 т. / под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк: ПГУ. – 2009. – Т. 3. – С. 78–81.
11. Особенности диагностирования объектов повышенной опасности нефтехимического комплекса / В.И. Быкова [и др.] // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. трудов / под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Минск: Технопринт; ПГУ, 2001. – С. 591–593.

12. Даль, В.И. Толковый словарь русского языка. Современная версия. – М.: ЗАО Изд-во ЭКСМО-Пресс, 2000. – 736 с.
13. Антикайн, П.А. Эксплуатационная надежность объектов котлонадзора: справочник / П.А. Антикайн, А.К. Зыков. – М.: Metallurgia, 1985. – 328 с.
14. Чигал, В. Межкристаллитная коррозия нержавеющей сталей / В. Чигал. – М.: Химия, 1969. – 232 с.
15. Снарский, А.С. Создание боросодержащего материала для металлорежущих инструментов: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук / А.С. Снарский; БГПА. – Минск, 1988. – 18 с.
16. Рекомендации по учету старения трубных сталей при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1988. – 29 с.
17. Стали и сплавы: марочник / В.Г. Сорокин [и др.]; науч. ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 608 с.
18. Марочник сталей и сплавов / М.М. Колосков [и др.]; под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.
19. Легированные стали для нефтехимического оборудования / В.Г. Дьяков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1971. – 183 с.
20. Тутнов, И.А. Подходы к определению срока безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов // Материалы Международной практической конференции «Трубопроводный транспорт – связующее звено между производителями нефти и ее потребителями», Москва, 25–26 июня 1997 г. – С. 9–15.
21. Иванцов, О.М. Надежность и безопасность магистральных трубопроводов России // Материалы 2 Международного конгресса «Новые высокие технологии для нефтегазовой промышленности и энергетики будущего», Москва, 850 лет. – С. 26–31.
22. Технические и ландшафтные характеристики магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов Беларуси / В.К. Липский [и др.] // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2004. – № 12. – С.140–142.
23. Восстановление работоспособности труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров [и др.]. – Уфа: Башк. кн. изд-во, 1992. – 240 с.
24. Гумеров, А.Г. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Р.С. Гумеров, К.М. Гумеров. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 310 с.
25. Черняев, К.В. Разработка научных основ и создание системы безопасной и долговременной эксплуатации магистральных нефтепроводов России: Сборник научных трудов / К.В. Черняев, Е.С. Васин. – Новополоцк: ПГУ, 2000. – Вып. 1. – С. 19–33.
26. Иванцов, О.М. Надежность и безопасность магистральных трубопроводов России / О.М. Иванцов // Трубопроводный транспорт нефти. – 1997. – № 10. – С. 26–31.
27. Янушонок, А.Н. Опыт оценки технического состояния магистрального нефтепродуктопровода «Участок № 41» / А.Н. Янушонок, В.К. Липский, А.С. Снарский // Прочность и надежность магистральных трубопроводов: материалы Международной научно-технической конференции. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2008. – С. 65–66.

28. Капитальный ремонт подземных нефтепроводов / Гумеров А.Г. [и др.]. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. – 525 с.

29. Оценка фактического состояния металла магистральных трубопроводов / Янушонок А.Н. [и др.] // Вестник ПГУ. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 128–132.

30. Янушонок, А.Н. Изменение коррозионной стойкости участков сварных соединений магистральных трубопроводов, претерпевших длительную эксплуатацию, под влиянием высокотемпературного отпуска / А.Н. Янушонок, А.С. Снарский // Вестник ПГУ. Строительство, прикладные науки. – 2010. – № 6. – С. 95–103.

31. Методика исследования фактических дефектов элементов труб, выявленных по результатам диагностики магистральных нефтепродуктопроводов ОАО «АК «Транснефтепродукт» и определение их влияния на остаточный ресурс нефтепродуктопроводов: СО 11–04–АКТНП–008–2007. – М., 2007.

32. Красневский, С.М. Анализ разрушения бесшовной трубы нефтепродуктопровода // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: материалы VI международной научно-технической конференции. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2007. – 296 с.

33. Костюченко, А.А. Надежность подводных переходов: проблема и ее решение / А.А. Костюченко, А.М. Бордовский, В.В. Воробьев // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: материалы VI международной научно-технической конференции. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2007. – 296 с.

34. Липский, В.К. Методика восстановительной термической обработки магистральных трубопроводов, основанная на неразрушающей оценке фактического уровня механических свойств металла / В.К. Липский, А.Н. Янушонок, А.С. Снарский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В. Прикладные науки. – 2006. – № 12. – С. 93–96.

35. Экспериментальное измерение давления страгивания застывшей в трубопроводе нефти // Трубопроводный транспорт нефти. – 1998. – № 4. – С. 43.

36. Вьон, В.И. Система защиты от разрывов на магистральных нефтепроводах / В.И. Вьон, Б.И. Голосовкер, В.С. Чаков // Нефтяное хозяйство. – 1973. – № 9. – С. 21–23.

37. Иванцов, О.М. Надежность магистральных трубопроводов / О.М. Иванцов, В.И. Харитонов. – М.: Недра, 1978. – 166 с.

38. Бордовский, А.М. Прочностная надежность линейной части нефтепровода / А.М. Бордовский, В.В. Воробьев, Л.А. Сосновский. – Гомель: НПО ТРИБОФАТИКА, 2004. – 114 с.

39. Старение труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров [и др.]. – М.: Недра, 1995. – 218 с.

40. Курочкин, В.В. Процессы старения и накопления дефектов при длительной эксплуатации и их влияние на сопротивление разрушению металла трубопроводов / В.В. Курочкин, Г.А. Филиппов // Проблемы безопасности и надежности трубопроводного транспорта: тез. докл. II науч.-техн. конф. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – С. 57–59.

41. Воробьев, В.В. Особенности эксплуатационной надежности и повреждения линейных участков нефтепровода: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук / В.В. Воробьев; БелГУТ. – Гомель, 2002. – 20 с.

42. Бордовский, А.М. Влияние длительности эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали / А.М. Бордовский, В.В. Воробьев // Проблемы безопасности и надежности трубопроводного транспорта: тез. докл. II науч.-техн. конф. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – С. 64–65.

43. Ямалеев, К.М. Деформационное старение трубных сталей в процессе эксплуатации магистральных нефтепроводов / К.М. Ямалеев, Л.А. Абраменко // Проблемы прочности. – 1989. – № 11. – С. 125–128.

44. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06–85.

45. Трубы для магистральных нефтепроводов // Трубопроводный транспорт нефти (приложение «В помощь производителю»). – 2004. – № 3. – С. 8–18.

46. Надришин, А.С. Оценка качества труб демонтированных и действующих нефтепроводов по результатам испытаний образцов / А.С. Надришин, У.Н. Сабилов // Трубопроводный транспорт нефти. – 1996. – № 2. – С. 25–26.

47. Эксплуатационная долговечность нефтепроводов / В.В. Курочкин [и др.]. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 231 с.

48. Методика оценки работоспособности и проведения аттестации магистральных нефтепроводов: РД 153–39.4Р–119–03. – 2003.

49. Ямалеев, К.М. Старение металла труб в процессе эксплуатации нефтепроводов / К.М. Ямалеев. – М.: ВНИИОЭНГ, 1990. – 64 с.

50. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров [и др.]. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 213 с.

51. Методика определения несущей способности действующих трубопроводов и создание регламентов их функционирования: РД 153–39.4Р–135–2002. – 2003.

52. Красовский, А.Я. Опыт оценки ресурса магистральных трубопроводов, претерпевших длительные эксплуатационные воздействия / А.Я. Красовский, И.А. Маковецкая, В.М. Тороп // Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций: тез. докл. науч. конф., Киев (Украина). 6–9 июня 2000 г. / ред. В.Т. Трощенко. – Киев: ИПП НАН Украины; Логос, 2000. – С. 41–42.

53. Современные испытания на ударный изгиб и их роль в оценке трещиностойкости магистральных трубопроводов / П.П. Петух [и др.] // Вести Национальной академии наук Беларуси. – 2003. – № 2. – С. 38–42.

54. Красневский, С.М. Остаточный ресурс стальных высоконагруженных конструкций после длительной эксплуатации / С.М. Красневский // Инженер-механик. – 2001. – № 1. – С. 8–11.

55. Рекомендации по учету старения трубных сталей при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов. – Уфа: ВНИИСГПнефть, 1988. – 29 с.

56. Горицкий, В.М. Характеристики трещиностойкости сталей и техническое диагностирование / В.М. Горицкий // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. тру-

дов / под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Минск: Технопринт; ПГУ, 2001. – С. 47–52.

57. Курочкин, В.В. Старение нефтепроводов и капитальный ремонт / В.В. Курочкин // Проблемы безопасности и надежности трубопроводного транспорта: тезисы докладов. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – С. 10–12.

58. Сосновский, Л.А. Живучесть линейной части нефтепровода / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович, А.М. Бордовский. – Гомель: НПО ТРИБОФАТИКА, 2004. – 112 с.

59. Бордовский, А.М. Метод частичного восстановления прочностной надежности труб нефтепровода / А.М. Бордовский // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: тезисы докладов IV Международ. науч.-практ. конф. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2003. – С. 18–19.

60. Воробьев, В.В. Критерии поврежденности линейных участков нефтепроводов / В.В. Воробьев // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: тезисы докладов IV Международ. науч.-практ. конф. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2003. – С. 22–24.

61. Недорогое и качественное жилье реально // Газета «Республика». – 2006. – 25 октября.

62. Станкевич, В. Так чем грузы поднимать? / В. Станкевич // Промышленная безопасность. – 2006. – № 5. – С. 38–39.

63. Пантелеенко, Ф.И. Новые направления в диагностике и повышении безопасности грузоподъемных кранов / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский, В.А. Писарев / Сб. материалов Международной НПК «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации», «ЧС–2008»: в 2 ч. – Гомель: Институт МЧС, 2008. – Ч. 2. – С. 12–15.

64. Пантелеенко, Ф.И. Оценка напряженно-деформированного состояния и деградационных процессов металла башенных кранов с истекшим сроком эксплуатации / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский, В.А. Писарев // Сб. материалов «Технологии, оборудование, качество», 10-й международный симпозиум. 15–18 мая 2007 г. – Минск, 2007. – С. 153–154.

65. Чувильдеев, В.Н. Новая методика оценки эксплуатационного состояния и остаточного ресурса / В.Н. Чувильдеев // Материалы Республиканского совещания «Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением». 04–06.02.1997. – Новополоцк, 1997. – С. 20–26.

66. Опыт применения методики релаксационных испытаний для оценки эксплуатационного состояния крановых металлоконструкций / Г.Д. Машковцев [и др.] / Материалы Республиканского совещания «Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением». 04–06.02.1997. – Новополоцк, 1997. – С. 31–36.

67. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов: утв. Министерством по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 03.12.2004 №45.

68. Методика оценки ресурса остаточной работоспособности технологического оборудования нефтеперерабатывающих и химических производств. – Волгоград: ВНИКТИнефтехимоборудование, 1991. – Согласована с Госгортехнадзором РФ за № 04–35 / 216 от 29.10.2002.

69. Бельский, Д.М. Исследование связи твердости с механическими свойствами / Д.М. Бельский, А.В. Русаков, А.И. Элькин // Проблемы прочности. – 1976. – № 10. – С. 49–52.

70. Методика определения остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств (МООР–98). – Волгоград, 1998. – 43 с.

71. Материаловедение / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.

72. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов: в 2 ч. / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Ч. 2. – 472 с.

73. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов: в 2 ч. / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Ч. 1. – 472 с.

74. Геллер, Ю.А. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. – М.: Металлургия, 1989. – 456 с.

75. Григорович, В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович. – М.: Наука, 1976. – 230 с.

76. Дрозд, М.С. Определение механических свойств металла без разрушения / М.С. Дрозд. – М.: Металлургия, 1965. – 171 с.

77. Марковец, М.П. Определение механических свойств металла по твердости / М.П. Марковец. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

78. Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

79. Металлы. Метод испытаний. Измерение твердости по Бринеллю: ГОСТ 9012. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 23 с.

80. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу. Шкалы А, В и С: ГОСТ 9013. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 7 с.

81. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу: ГОСТ 2999. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 29 с.

82. Металлы. Метод измерения пластической твердости: ГОСТ 18835. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 8 с.

83. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками: ГОСТ 21318.

84. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия: ГОСТ 22761.

85. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара: ГОСТ 22762.

86. Киселев, Ю.А. Влияние чистоты и формы поверхности изделий на результаты измерения твердости / Ю.А. Киселев, А.Г. Фралкензон, Ю.В. Пшеничников // Заводская лаборатория. – 1973. – Т. 39, № 4. – С. 459–461.

87. Моношков, А.Н. Измерение твердости на цилиндрических поверхностях / А.Н. Моношков, С.И. Пыхов, Л.В. Земская // Заводская лаборатория. – 1973. – Т. 39, № 2. – С. 199–201.
88. Дрозд, М.С. Определение твердости металлов по Роквеллу на образцах с криволинейной поверхностью / М.С. Дрозд, А.В. Федоров, А.Н. Вольнов // Заводская лаборатория. – 1973. – Т. 39, № 4. – С. 456–459.
89. Дрозд, М.С. Метод определения твердости HRC с учетом кривизны испытываемой поверхности / М.С. Дрозд, Ю.И. Славский, А.А. Барон // Заводская лаборатория. – 1976. – Т. 42, № 7. – С. 876–879.
90. Дрозд, М.С. Измерение твердости металлов с применением цилиндрического индентора / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин // Заводская лаборатория. – 1986. – Т. 52, № 5. – С. 77–80.
91. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия: ГОСТ 22761.
92. Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка: ГОСТ 18661.
93. Луценко, Т.И. Прибор для определения динамической твердости крупногабаритных деталей / Т.И. Луценко, М.Е. Сидоров, Л.М. Блинова // Заводская лаборатория. – 1985. – Т. 51, № 2. – С. 89–90.
94. Дрозд, М.С. Совершенствование метода определения твердости стали безэталонными приборами ударного типа / М.С. Дрозд, Г.В. Гурьев, Ю.И. Сидякин // Заводская лаборатория. – 1983. – Т. 49, № 7. – С. 70–73.
95. Приборы для измерения твердости металлов и сплавов. Методы и средства проверки: ГОСТ 8.398–83 ГСИ.
96. Григорович, В.К. Оценка способности металлов к наклепу по форме отпечатков, полученных при измерении их твердости пирамидальным наконечником / В.К. Григорович // Заводская лаборатория. – 1950. – Т. 16, № 8. – С. 980–983.
97. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1978. – 648 с.
98. Киселев, И.А. Механизм образования формы отпечатка при вдавливании пирамиды / И.А. Киселев, В.А. Ильин // Заводская лаборатория. – 1970. – Т. 36, № 10. – С. 1259–1261.
99. Киселев, Ю.А. Зависимость между твердостью по Виккерсу и пределом прочности при разрыве / Ю.А. Киселев // Заводская лаборатория. – 1968. – Т. 34, № 5. – С. 596–597.
100. Киселев, Ю.А. Исследование связи между характеристиками пластичности и формой отпечатка по Виккерсу / Ю.А. Киселев // Заводская лаборатория. – 1969. – Т. 35, № 8. – С. 974–976.
101. Гуляев, А.П. К вопросу о механических свойствах конструкционных сталей / А.П. Гуляев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – № 7. – С. 6–8.
102. Бакиров, М.Б. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора / М.Б. Бакиров, В.В. Потапов // Заводская лаборатория. – 2000. – Т. 66, № 12. – С. 35–44.

103. Хлопотов, О.Д. О возможности существования взаимосвязей механических характеристик / О.Д. Хлопотов // Заводская лаборатория. – 1973. – Т. 39, № 6. – С. 740–741.

104. Бойцов, Б.В. Статистическое исследование механических характеристик титанового сплава ВТ-22 / Б.В. Бойцов, Г.Н. Кравченко, Т.М. Орлова // Заводская лаборатория. – 1981. – Т. 47, № 3. – С. 71–73.

105. Золоторевский, В.С. Механические свойства металлов / В.С. Золоторевский. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

106. Новик, Ф.С. О корреляционных связях между свойствами некоторых жаропрочных сплавов / Ф.С. Новик, А.А. Клыпин // Заводская лаборатория. – 1972. – Т. 38, № 9. – С. 84–89.

107. Крыленко, А.В. Разработка методики косвенного определения механических свойств металла деталей и конструкций нефтехимической промышленности: диссертация на соискание ученой степени магистра технических наук / А.В. Крыленко. – Новополоцк, 2004. – 142 с.

108. Склюев, П.В. Эмпирические формулы для определения механических свойств конструкционных сталей / П.В. Склюев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1965. – № 12. – С. 40–41.

109. Васаускас, С.С. Диаграмма твердости и ее применение для определения характеристик прочности металлов / С.С. Васаускас, В.Ю. Жидонис // Заводская лаборатория. – 1962. – Т. 28, № 5. – С. 605–608.

110. Киселев, Ю.А. Зависимость между твердостью по Виккерсу и пределом прочности при разрыве / Ю.А. Киселев // Заводская лаборатория. – 1968. – Т. 34, № 5. – С. 596–597.

111. Киселев, Ю.А. Исследование связи между характеристиками пластичности и формой отпечатка по Виккерсу / Ю.А. Киселев // Заводская лаборатория. – 1969. – Т. 35, № 8. – С. 974–976.

112. Легированные стали для нефтехимического оборудования / В.Г. Дьяков [и др.]. – М: Машиностроение, 1971. – 183 с.

113. Марковец, М.П. Методика определения максимальной твердости аустенитных сталей / М.П. Марковец, В.П. Плотников // Заводская лаборатория. – 1975. – Т. 41, № 10. – С. 1267–1268.

114. Гребенюк, Я.Ф. Определение предела прочности аустенитной стали 0Х18Н12Т методом твердости / Я.Ф. Гребенюк, Т.В. Сологуб // Заводская лаборатория. – 1975. – Т. 41, № 2. – С. 232–234.

115. Славский, Ю.И. Определение временного сопротивления металлов по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора / Ю.И. Славский, М.М. Матлин // Заводская лаборатория. – 1993. – Т. 59, № 5. – С. 35–37.

116. Матлин, М.М. Аналитическое определение параметров внедрения сферического индентора по диаграмме растяжения материала контртела / М.М. Матлин, А.И. Мозгунова // Заводская лаборатория. – 2001. – Т. 67, № 11. – С. 47–51.

117. Сосновский, Л.А. О взаимосвязи между основными характеристиками механических свойств стали / Л.А. Сосновский // Заводская лаборатория. – 1991. – Т. 57, № 6. – С. 44–45.

118. О возможности оценки качества металлургической продукции с помощью чисел твердости / А.Л. Геллер [и др.] // Заводская лаборатория. – 1970. – Т. 36, № 12. – С. 1514.

119. Головачев, М.Г. К определению зависимостей между твердостью и характеристиками прочности алюминиевых сплавов / М.Г. Головачев, О.А. Голосов // Заводская лаборатория. – 1991. – Т. 57, № 4. – С. 67–68.

120. Данилин, В.И. Применение безобразцового метода контроля механических свойств сталей в условиях металлургического производства / В.И. Данилин, М.С. Дрозд, Ю.И. Славский // Заводская лаборатория. – 1972. – Т. 38, № 2. – С. 217–221.

121. Дрозд, М.С. О выборе угла конуса при контроле механических свойств стали по твердости / М.С. Дрозд, Ю.И. Славский // Заводская лаборатория. – 1970. – Т. 36, № 1. – С. 80–84.

122. Березина, Т.Г. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла тепловых энергетических установок / Т.Г. Березина, Н.В. Бугай, И.И. Трунин. – Киев: Тэхника, 1991. – 120 с.

123. Хлопотов, О.Д. Связь между ударной вязкостью и другими механическими характеристиками / О.Д. Хлопотов // Проблемы прочности. – 1971. – № 9. – С. 34–38.

124. Славский, Ю.И. Твердость стали как функция ее прочностного и структурного состояния / Ю.И. Славский, Ю.Г. Артемьев // Заводская лаборатория. – 1989. – Т. 55, № 8. – С. 88–91.

125. Щербак, Г.К. Общность во взаимосвязи характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости, ее количественное и графическое выражение / Г.К. Щербак // Проблемы прочности. – 1987. – № 5. – С. 56–59.

126. Щербак, Г.К. Взаимосвязь характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости конструкционных сталей / Г.К. Щербак // Заводская лаборатория. – 1992. – Т. 58, № 10. – С. 45–46.

127. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах: ГОСТ 9454.

128. Хлопотов, О.Д. О возможности существования взаимосвязей механических характеристик / О.Д. Хлопотов // Заводская лаборатория. – 1973. – Т. 39, № 6. – С. 740–741.

129. Новик, Ф.С. О корреляционных связях между свойствами некоторых жаропрочных сплавов / Ф.С. Новик, А.А. Клыпин // Заводская лаборатория. – 1972. – Т. 38, № 9. – С. 84–89.

130. Хлопотов, О.Д. Связь между ударной вязкостью и другими механическими характеристиками / О.Д. Хлопотов // Проблемы прочности. – 1971. – № 9. – С. 34–38.

131. Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497.

132. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент: ГОСТ 11701.

133. Способ определения ударной вязкости стальных изделий: заявка на патент Респ. Беларусь / А.С. Снарский, Ф.И. Пантелеенко, А.В. Крыленко. – № а20050386: заявл. 14.04.2005.

134. Снарский, А.С. Методы определения механических свойств металла оборудования и конструкций / А.С. Снарский, А.В. Крыленко // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2002. – Т. 1, № 2. – С. 57–62.

135. Снарский, А.С. Установление закономерности деградации механических свойств металла нефтехимического оборудования и конструкций / А.С. Снарский, А.В. Крыленко // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2004. – № 3. – С. 44 – 49.

136. Снарский, А.С. Определение физико-механических характеристик материала методом неразрушающего контроля / А.С. Снарский, А.В. Крыленко // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2005. – № 10. – С. 133–137.

137. Рекомендации по учету старения трубных сталей при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1988. – 29 с.

138. Щербак, Г.К. О прогнозировании количественных характеристик пластичности и ударной вязкости при заданной прочности стали / Г.К. Щербак // Заводская лаборатория. – 1996. – Т. 62, № 4. – С. 60–61.

139. Земзин, В.Н. Повышение ресурса сварных фасонных элементов, работающих в условиях ползучести / В.Н. Земзин, И.А. Данюшевский // Теплоэнергетика. – 1992. – № 2. – С. 5–7.

140. Стали и сплавы. Марочник / В.Г. Сорокин [и др.]; науч. ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 608 с.

141. Марочник сталей и сплавов / М.М. Колосков [и др.]; под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.

142. Станюкович, А.В. Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов / А.В. Станюкович. – М.: Металлургия, 1967. – 200 с.

143. Ползучесть и разрушение сплавов / под ред. М.А. Кришталла, И.Л. Миркина. – М.: Металлургия, 1966. – 190 с.

144. К вопросу охрупчивания сварных соединений стали 12Х18Н10Т / К.А. Юшенко [и др.] // Проблемы прочности. – 1987. – № 5. – С. 59–63.

145. Лившиц, Л.С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л.С. Лившиц, А.Н. Хакимов. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.

146. Антикайн, П.А. Эксплуатационная надежность объектов котлонадзора: справочник / П.А. Антикайн, А.К. Зыков. – М.: Металлургия, 1985. – 328 с.

147. Коррозионная стойкость оборудования химических производств. Нефтеперерабатывающая промышленность: справ. изд. / под ред. Ю.И. Арчакова, А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1990. – 400 с.

148. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного ресурса службы сосудов и аппаратов: РД 03-421-01. – СПб.: ЦОТГБСП, 2003. – 136 с.

149. Методы защиты от коррозии и выбор материалов для основных элементов и узлов аппаратов установок каталитического риформинга: РТМ 26-02-42-78. – М.: Мин-во химического и нефтяного машиностроения, 1979. – 44 с.

150. Шрейдер, А.В. Влияние водорода на нефтяное и химическое оборудование / А.В. Шрейдер, И.С. Шпарбер, Ю.И. Арчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.

151. Арчаков, Ю.И. Водородная коррозия стали / Ю.И. Арчаков. – М.: Металлургия, 1985. – 192 с.

152. Правила проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных: ПБ 03-384-00. – М.: Гос. унит. предпр. «НТЦ по безоп. в пр-ти Госгортехнадзора России», 2001. – 232 с.

153. Эксплуатация и ремонт технологических трубопроводов под давлением до 10,0 МПа (100 кгс/см²): РД 38.13.004-86 / А.Е. Фолиянц [и др.]; под ред. А.Е. Фолиянца. – М.: Химия, 1988. – 288 с.

154. Веревкин, С.И. Повышение надежности резервуаров, газгольдеров и их оборудования / С.И. Веревкин, Е.Л. Ржавский. – М.: Недра, 1980. – 284 с.

155. Беляев, Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1968. – 206 с.

156. Атлас дефектов стали / пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.

157. Инструкция по визуальному и измерительному контролю: РД 34.10.130-96. – М.: Мин-во топлива и энергетики РФ, 1996. – 112 с.

158. Стальные конструкции: СНИП 11-23-81 / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 96 с.

159. Шешуков, А.Н. О методике испытаний миниатюрных образцов / А.Н. Шешуков // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. трудов / под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Минск: Технопринт; ПГУ 2001. – 736 с.

160. Шешуков, А.Н. Обработка результатов механических испытаний. Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: сб. трудов / А.Н. Шешуков, А.А. Кунцевич; под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 431 с.

161. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: в 3 т. / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Физматлит; Лаборатория Знаний, 2003. – Т. 1. – 680 с.

162. Кириличев, Н.В. Повышение эксплуатационной надежности оборудования нефтехимической промышленности при проведении капитальных ремонтов / Н.В. Кириличев, Ф.И. Пантелеенко, А.В. Крыленко // Ремонт, восстановление и модернизация. – 2006. – № 5. – С. 32-37.

163. Сосуды и аппараты стальные, сварные. Общие технические условия: ОСТ 26-291-94.

164. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы: ГОСТ 10052.

165. Земзин, В.Н. Сварные соединения разнородных сталей / В.Н. Земзин. – М.: Машиностроение, 1966. – 209 с.

166. Земзин, В.Н. Термическая обработка и свойства сварных соединений / В.Н. Земзин, Р.З. Шрон. – Л.: Машиностроение, 1978. – 376 с.

167. Сосуды и аппараты. Общие технические условия на ремонт корпусов: ОТУ 2–92.

168. Руководящие указания по эксплуатации и ремонту сосудов и аппаратов, работающих под давлением ниже 0,07 МПа (0,7 кгс/см²) и вакуумом: РУА–93.

169. Назарова, Н.М. Исследование механизмов релаксации внутренних напряжений в стенке резервуара и их влияния на развитие процессов разрушения: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук / Н.М. Назаров; УГНТУ. – Уфа, 2000. – 24 с.

170. Методология оценки фактического состояния потенциально опасных объектов / Ф.И. Пантелеенко [и др.] // Промышленная безопасность. – 2007. – № 10. – С. 16–20.

171. Пантелеенко, Ф.И. Концепция системы неразрушающего контроля и оценки потенциальной надежности и безопасности ответственных изделий / Ф.И. Пантелеенко, А.С. Снарский // Сб. научных трудов Международной НТК «Инженерия поверхностного слоя деталей машин». – Кемерово: КузГТУ, 2009. – С. 312–318.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пример построения карты деградации механических свойств металла диагностируемой конструкции

Этап 1. Установление технических характеристик и особенностей эксплуатации диагностируемого объекта.

Технические характеристики и рабочие параметры объекта: наименование – буферная емкость «Х», Инв № 1111, Зав. № 2222 установки «У», материал – сталь 09Г2С, рабочее давление $p_{\text{раб}} = 0,5$ МПа, рабочая температура $t_{\text{раб}} = 180$ °С, среда – гудрон; срок эксплуатации ≈ 30 лет.

Этап 2. Уточнение значений механических свойств металла диагностируемой конструкции.

Значения механических свойств несут информацию об интенсивности деградации стали 09Г2С буферной емкости (для стали 09Г2С до эксплуатации по паспорту аппарата приведены в таблице П1).

Таблица П1 – Значения механических свойств стали 09Г2С до эксплуатации

Материал	Термическая обработка	Значения механических свойств				
		σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU , МДж/м ²
09Г2С	Нормализация 930 °С, воздух	586	433	26,2	73,6	1,8
		540	376	27,5	78	1,86
		528	388	25,6	71	1,76
		495	365	27,2	76	2,1
		505	373	26,4	74,3	2,0

Этап 3. Построение начального варианта карты деградации механических свойств (рисунок П1). На карту деградации нанесены: значения механических свойств стали 09Г2С до эксплуатации, граничные линии (согласно рисунку 4.15).

Этап 4. Определение текущих механических свойств диагностируемой конструкции (рекомендуется неразрушающим способом (см. разделы 3.1–3.2)). Фактические значения механических свойств стали 09Г2С приведены в таблице П2.

Таблица П2 – Фактические значения механических свойств стали 09Г2С

Материал	Срок эксплуатации	Значения механических свойств				
		σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU , МДж/м ²
09Г2С	Около 30 лет	459	353	27	63	1,6
		452	342	29	64	1,55
		452	346	27	64	1,7
		463	348	29	66	1,68
		455	348	28	66	1,63

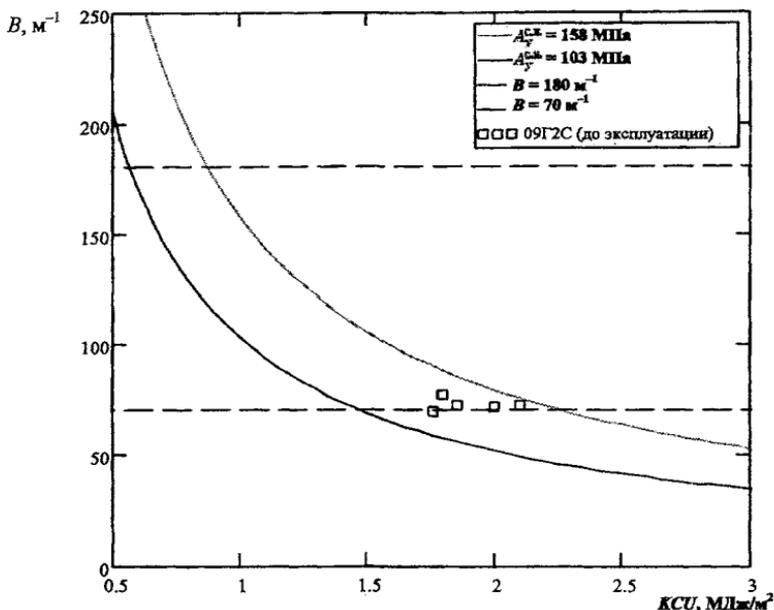


Рисунок П1 – Начальный вариант карты деградации механических свойств

Этап 5. Построение окончательного варианта карты деградации на основании фактических значений механических свойств (рисунок П2).

На карту деградации нанесены значения механических свойств стали 09Г2С до и после эксплуатации. Стрелкой указано направление изменения механических свойств стали 09Г2С после длительной эксплуатации.

По результатам данных окончательного варианта карты деградации механических свойств (см. рисунок П2) видно, что после длительной эксплуатации произошло изменение механических свойств стали 09Г2С по направлению к области 3 из области исходных значений механических свойств (область 1) (см. рисунок 4.15).

Этап 6. Анализ месторасположения всех точек на графике, полученных при текущем диагностировании.

В рассматриваемом примере он показывает, что все точки находятся в области 3 – области неработоспособного состояния сталей; т.е. за пределами критической линии 5 (см. рисунок 4.15), что недопустимо. Это свидетельствует о том, что механические свойства металла имеют недопустимо низкие значения (в первую очередь, низка ударная вязкость, что резко повышает вероятность хрупкого разрушения данной диагностируемой конструкции), поэтому все дальнейшие работы по определению остаточного ресурса конструкции прекращаются, т.к. ресурс металла исчерпан и принимается решение о выводе конструкции из эксплуатации.

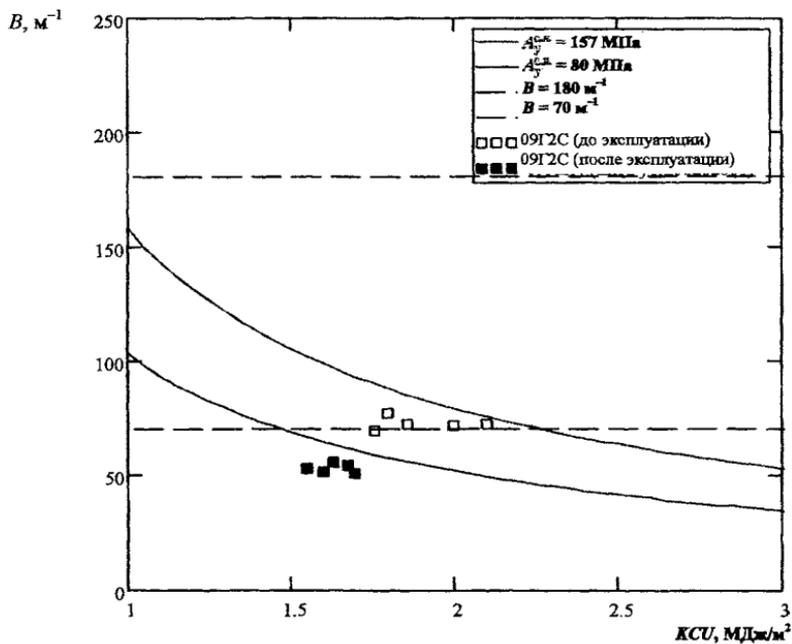


Рисунок П2 – Окончательный вариант карты деградации механических свойств

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ	6
1.1. Анализ состояния и материального исполнения оборудования и конструкций нефтеперерабатывающей отрасли	6
1.2. Анализ магистральных трубопроводов	13
1.2.1. Анализ фактического состояния	13
1.2.2. Анализ процессов старения, происходящих в металле магистральных трубопроводов	20
1.3. Состояние парка грузоподъемных машин и механизмов	26
Глава 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	29
2.1. Обзор существующих методов определения механических свойств металлов	29
2.2. Обзор и анализ существующих методов определения твердости	33
2.2.1. Классификация методов определения твердости	33
2.2.2. Особенности определения твердости при квазистатическом внедрении индентора	35
2.2.3. Особенности косвенного определения механических свойств при определении твердости на металлоконструкциях	37
2.2.4. Основные требования к универсальному методу определения твердости и анализ существующих методов определения твердости с позиции требований к универсальности метода	40
2.2.5. Обоснование косвенного определения основных характеристик механических свойств по форме и особенностям отпечатка на материале после внедрения индентора в виде алмазной пирамиды с углом при вершине 136°	42
2.3. Анализ методов определения механических свойств металла по результатам определения твердости	47
Глава 3. РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО СПОСОБА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДИАГНОСТИРУЕМЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ	63
3.1. Разработка неразрушающего способа определения ударной вязкости стальных металлоконструкций	63
3.2. Уточнение эмпирических формул взаимосвязи показателей механических свойств с параметрами пирамидального отпечатка	73

Глава 4. РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ИЗМЕНЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДИАГНОСТИРУЕМЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ.....	86
4.1. Анализ механических свойств металла диагностируемых конструкций с целью поиска эффективного метода контроля их изменений и отбраковки.....	86
4.2. Разработка основ метода графической интерпретации фактических механических свойств металла диагностируемой конструкции	91
4.3. Уточнение метода графической интерпретации характеристик механических свойств сталей	97
4.4. Установление закономерностей деградации механических свойств металла оборудования и конструкций.....	101
4.5. Разработка способа определения скорости деградации механических свойств металла.....	112
4.6. Разработка критериев выбора критических мест диагностируемой конструкции.....	120
4.7. Планирование необходимого объема контроля	129
4.8. Алгоритм методики оценки фактического состояния металла диагностируемых конструкций	134
4.9. Разработка способа оценки достижения материалом предельного состояния – основы методики оценки остаточного ресурса диагностируемой металлоконструкции	138
Глава 5. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ДИАГНОСТИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ	148
5.1. Аprobация разработанной методики оценки механических свойств металла неразрушающим способом на колонне К-5 установки «ЭЛОУ-АВТ-2» ОАО «НАФТАН»	148
5.2. Аprobация разработанной методики оценки состояния материала на крановых конструкциях ОАО «Управление механизации № 79».....	161
5.3. Аprobация разработанной методики оценки фактического состояния материала и определения остаточного ресурса металлоконструкций на примере змеевика печи П-601 установки «Риформинг-4» ОАО «НАФТАН»	169
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	177
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	179
ПРИЛОЖЕНИЕ	191

Научное издание

ПАНТЕЛЕЕНКО Федор Иванович
СНАРСКИЙ Андрей Станиславович

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ
СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА
ОТВЕТСТВЕННЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Ответственный за выпуск Т.А. Подолякова
Компьютерная верстка Д.А. Исаева

Подписано в печать 22.11.2010.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 11,39. Уч.-изд. л. 8,91. Тираж 100. Заказ 1345.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.