

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет»

В. П. Иванов  
А. В. Крыленко

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ  
ОБОРУДОВАНИЯ  
НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Новополоцк  
ПГУ  
2015

УДК 620.172:620.178:620.179.12(036.3)

ББК 65.9(2)248:65.9(2)304.13

И20

Рекомендовано к изданию советом  
учреждения образования «Полоцкий государственный университет»  
(протокол № 3 от 28.11.2014)

#### РЕЦЕНЗЕНТЫ:

канд. техн. наук, инженер службы технического обслуживания, ремонта  
и диагностики оборудования производств ОАО «Нафтан» В. Л. КРАСИКОВ;  
проф., д-р техн. наук, проф. каф. технологии и оборудования машиностроительного  
производства УО «Полоцкий государственный университет» В. А. ДАНИЛОВ

#### **Иванов, В. П.**

И20      Обеспечение безопасной работы оборудования нефтехимического ком-  
плекса / В. П. Иванов, А. В. Крыленко. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – 180 с.  
ISBN 978-985-531-485-2.

В монографии определены основные направления оценки остаточного ре-  
сурса на основе мониторинга структуры и свойств материала конструкций при  
эксплуатации и обеспечении безопасной работы оборудования нефтехимическо-  
го комплекса.

Установлены зависимости между показателями старения материалов кон-  
струкций оборудования и изменением микроструктуры и, как следствие, меха-  
нических свойств материалов. Рассмотрен способ критериальной оценки ресурса  
оборудования по результатам определения качественных и количественных по-  
казателей структуры и механических свойств материала.

Для научных работников, специалистов нефтехимического комплекса и  
студентов, изучающих охрану труда и безопасность работы нефтеперерабаты-  
вающего оборудования.

**УДК 620.172:620.178:620.179.12(036.3)**

**ББК 65.9(2)248:65.9(2)304.13**

**ISBN 978-985-531-485-2**

© Иванов В.П., Крыленко А.В., 2015

© УО «ПГУ», 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
ГЛАВА 1 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	8
1.1 Оценка состояния материала и остаточного ресурса безопасной эксплуатации нефтеперерабатывающего оборудования.....	8
1.1.1 Необходимость продления срока безопасной эксплуатации нефтеперерабатывающего оборудования .....	8
1.1.2 Анализ эксплуатационных повреждений и дефектов структуры материала нефтеперерабатывающего оборудования.....	10
1.1.3 Методы оценки фактического состояния материала и остаточного ресурса нефтеперерабатывающего оборудования.....	20
1.2 Место твердости в оценке состояния материала и остаточного ресурса нефтеперерабатывающего оборудования .....	29
1.3 Взаимосвязь твердости с другими механическими характеристиками материала .....	37
1.4 Выводы.....	45
1.5 Цель и задачи исследования.....	46
ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	47
2.1 Общая методика исследования .....	47
2.2 Материалы, использованные в исследованиях .....	48
2.3 Методики исследований и испытательное оборудование .....	51
2.4 Статистическая обработка результатов экспериментов.....	58
2.4.1 Алгоритм решения полиномиальной регрессии в математических пакетах Mathcad 13.0 и Statistica 6.0 .....	58
2.4.2 Алгоритм решения линейной регрессии в математическом пакете Mathcad 13.0 .....	62
ГЛАВА 3 ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА КОНСТРУКЦИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	67
3.1 Алгоритм определения механических свойств материала нефтеперерабатывающего оборудования.....	67
3.2 Неразрушающий способ определения предела прочности, относительных удлинения и сужения материала конструкций нефтеперерабатывающего оборудования .....	68

3.2.1	Определение предела прочности материала неразрушающим способом	68
3.2.2	Определение относительного удлинения материала неразрушающим способом	77
3.2.3	Определение относительного сужения материала неразрушающим способом	81
3.3	Определение механических свойств материала на элементах конструкций нефтеперерабатывающего оборудования	82
3.3	Определение ударной вязкости материала неразрушающим способом	89
3.4	Выводы	95
<b>ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ И ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ</b>		<b>96</b>
4.1	Выбор критериев оценки старения материала нефтеперерабатывающего оборудования	96
4.2	Графическое представление взаимосвязи характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости материала	101
4.3	Карта деградации механических свойств материала	106
4.4	Границы работоспособного состояния материала на карте деградации механических свойств	109
4.5	Исследование деградации структуры и изменения механических свойств материала после искусственного деформационного старения	122
4.6	Исследование деградации структуры и изменения механических свойств материала нефтеперерабатывающего оборудования	129
4.7	Способ определения скорости деградации механических свойств материала	146
4.8	Способ количественной оценки времени до достижения материалом предельного состояния	153
4.9	Выводы	157
<b>ГЛАВА 5 АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ В НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ</b>		<b>159</b>
5.1	Оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации змеевика трубчатой печи	159
5.2	Программный комплекс «Мониторинг»	166
5.3	Выводы	169
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>		<b>170</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b>		<b>172</b>

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

$HV$  – твердость по Виккерсу, МПа;

$D$  – диагональ пирамидального отпечатка, полученного при измерении твердости по Виккерсу, мм;

$S$  – ширина пирамидального отпечатка, полученного при измерении твердости по Виккерсу, мм;

$\sigma_{0,2}$  – предел текучести (условный), МПа;

$\sigma_B$  – предел прочности, МПа;

$\delta_5$  – относительное удлинение, %;

$\psi$  – относительное сужение, %;

$KCU$  – ударная вязкость образцов Менаже (с U-образным концентратором напряжений), МДж/м<sup>2</sup>;

$A_y^{c.n.}$  – удельная работа разрушения при статическом нагружении материала, МДж/м<sup>3</sup>;

$A_y^{d.n.}$  – удельная работа разрушения при динамическом нагружении материала, МДж/м<sup>2</sup>;

$B$  – комплексный показатель взаимосвязи механических свойств ( $\sigma_B$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$ ), м<sup>-1</sup>;

$V_{deg}$  – скорость деградации механических свойств материала, м<sup>-1</sup>/год;

НПО – нефтеперерабатывающее оборудование;

НПЗ – нефтеперерабатывающий завод;

ТНПА – технический нормативный правовой акт.

## ВВЕДЕНИЕ

Нефтехимический комплекс играет важную роль в экономике Республики Беларусь. Нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) формируют значительную долю бюджета. Доля технологического оборудования в структуре основных фондов НПЗ составляет около 63 %.

Оборудование НПЗ перерабатывает взрывопожароопасные и агрессивные высокотоксичные вещества при высоких температуре (до 550 °С) и давлении (до 10 МПа). Работа этого оборудования отличается возрастающей интенсивностью технологических процессов с повышением их основных параметров. Более 60 % опасного в технологическом отношении нефтеперерабатывающего оборудования (НПО), подконтрольного органам Госпромнадзора, эксплуатируется свыше 20 лет и выработало нормативный срок службы [1]. Замена сложного и дорогостоящего оборудования новым не представляется возможным по причине нехватки финансовых средств. Поэтому для такого оборудования определяется остаточный ресурс его безопасной эксплуатации.

Чрезвычайные ситуации, обусловленные разрушением конструкций НПО, приводят к экономическим издержкам, связанным с дорогостоящим ремонтом и неиспользуемой выгодой от реализации продукции, человеческим травмам и жертвам, а также к загрязнению окружающей среды. Среди причин инцидентов на нефтеперерабатывающих заводах 43 % связаны с эксплуатационным повреждением материала НПО. Около 10 % причин травматизма связано с разрушением конструкций оборудования. Одним из основных направлений решения задачи безопасной работы нефтеперерабатывающего оборудования является мониторинг структуры и свойств материала при эксплуатации.

Причины остановок оборудования на НПЗ можно разделить на три группы [2]:

- отказы, связанные с дефектами материала, обусловленными загрязнением его неметаллическими включениями, нарушениями условий и режимов термической обработки на стадии изготовления, составляющие 28 % от общего количества случаев;

- разрушения, связанные со снижением механических свойств материала и потерей несущей способности конструкции во время эксплуатации из-за старения материала, в том числе по причине его коррозии, обуславливают 50 % от общего количества повреждений;

- поломки по прочим причинам составляют 22 % от общего количества повреждений.

Наиболее распространенной причиной отказов оборудования является старение материала. Можно предположить, что без принятия необходимых мер количество отказов оборудования будет увеличиваться. Опыт эксплуатации установок НПЗ показывает, что увеличение срока службы без научного обоснования может приводить к аварийным разрушениям. Старение материалов в эксплуатации проявляется в виде изменения микроструктуры и, как следствие, механических свойств, что приводит к возникновению потенциаль-

но опасных зон в материале и исчерпанию ресурса оборудования. Для критериальной оценки ресурса необходимо располагать качественными и количественными показателями структуры и механических свойств материала. Деградационные изменения материала конструкций НПО должны быть выявлены на ранней стадии их проявления путем контроля этого материала.

Применяемые стандартные методы испытаний, которые позволяют оценить изменения механических свойств материала конструкций, требуют изготовления образцов, вырезанных из этих конструкций, что делает объект непригодным к дальнейшей эксплуатации без проведения ремонтных работ. Хотя способ вырезания образцов стандартизирован, однако техническими нормативными правовыми актами (ТНПА) места вырезки проб не установлены. При взятии проб на оборудовании после длительной эксплуатации с целью оценки качества (состояния) материала специалисты дают заключение о состоянии металла только в месте взятия пробы. Результаты этого заключения можно отнести на весь материал объекта контроля только косвенно. Поэтому в настоящее время все большую актуальность приобретают малоразрушающие и неразрушающие методы контроля текущего состояния металла, способные давать общую оценку механических свойств материала конструкций.

Практика показывает, что, несмотря на развитие методов и средств обеспечения промышленной безопасности объектов НПЗ, количество отказов по причине недостаточной конструкционной прочности материала сохраняется на высоком уровне. При большом объеме исследований структуры и свойств сталей, применяемых для изготовления оборудования НПЗ, практически отсутствуют сведения по контролю за изменением механических свойств материала при эксплуатации. Некоторые вопросы, касающиеся возможности определения механических свойств материала без разрушения диагностируемого оборудования и оценки его остаточного ресурса, остаются малоизученными.

Таким образом, вопросы оценки и контроля изменения структуры и свойств материала с определением момента достижения им предельного состояния во время эксплуатации оборудования являются актуальными. Обеспечение безопасной эксплуатации технологического оборудования НПЗ становится задачей эффективного контроля деградации структуры и изменения механических свойств материала при эксплуатации. В нефтеперерабатывающей промышленности необходимы научные разработки, обеспечивающие решение таких важных прикладных задач, как:

- совершенствование методов определения механических свойств материала без разрушения конструкций и оборудования;
- комплексная оценка изменения структуры и механических свойств материала при эксплуатации;
- обоснование возможности дальнейшей безопасной эксплуатации оборудования на основе анализа изменения структуры и механических свойств материала при эксплуатации.

# ГЛАВА 1

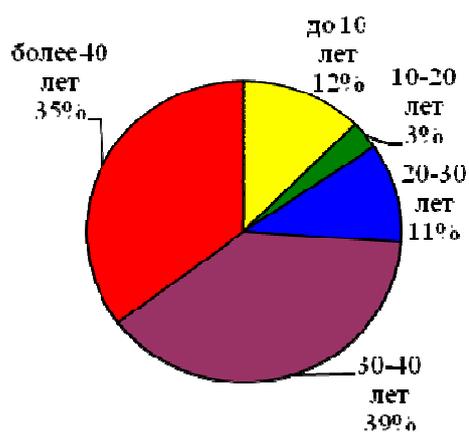
## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

### 1.1 Оценка состояния материала и остаточного ресурса безопасной эксплуатации нефтеперерабатывающего оборудования

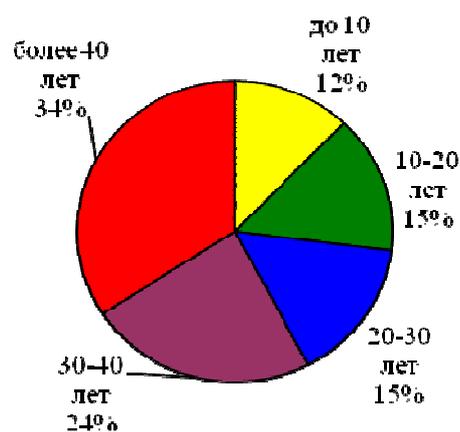
#### 1.1.1 Необходимость продления срока безопасной эксплуатации нефтеперерабатывающего оборудования

Находящееся в длительной эксплуатации НПО проектировалось на срок службы от 10 до 25 лет. Так, для реакторов и колонн нормативный срок эксплуатации составляет 20 лет, печей – 10 лет, теплообменников и конденсаторов-холодильников – 12...20 лет, емкостей – 10...12 лет, резервуаров – 25 лет. Однако фактический срок эксплуатации НПО близок к окончанию проектного, а во многих случаях – превышает его. Рассмотрение сроков службы реакторов, колонн, печей, теплообменников, емкостей и резервуаров (на примере НПЗ) показало, что более 60 % НПО выработало нормативный ресурс (срок его эксплуатации составляет более 20 лет) (рисунок 1.1). Это связано с тем, что в 1991...2001 гг. в Беларуси, России и других странах СНГ практически не проводилось обновление основных фондов НПЗ. С 2001 года, хотя и вводились в эксплуатацию новые технологические установки, имеющееся оборудование не обновлялось. В 2007 году изменились условия поставки нефти в Республику Беларусь, что привело к снижению рентабельности НПЗ до 4 % (уровень рентабельности в 2005...2006 гг. – 24 %) и, как следствие, отсутствию финансовых средств на обновление оборудования. Это поставило белорусские НПЗ в тяжелое положение с позиции финансовых возможностей замены выработавшего проектный ресурс оборудования.

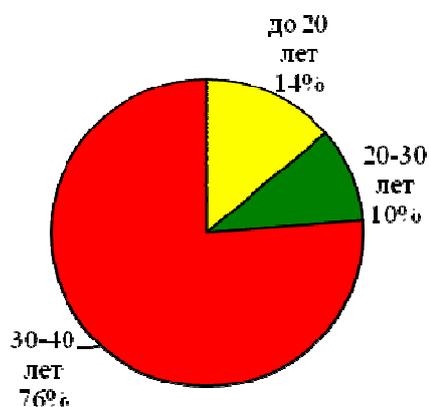
В связи с этим обновление всего парка технологического оборудования НПЗ не представляется возможным. Вместе с тем, качество и объем выпуска продукции напрямую зависят от состояния технологического оборудования, на безопасность эксплуатации которого наибольшее влияние оказывает стабильность структуры и механических свойств материала. Дальнейшая безопасная эксплуатация НПО, выработавшего проектный ресурс, возможна только при наличии остаточного ресурса оборудования, выявленного в результате контроля фактического состояния материала уполномоченными организациями. Поэтому в настоящее время необходима объективная оценка возможности дальнейшей безопасной эксплуатации НПО, ресурс которого близок к окончанию проектного или превышает его.



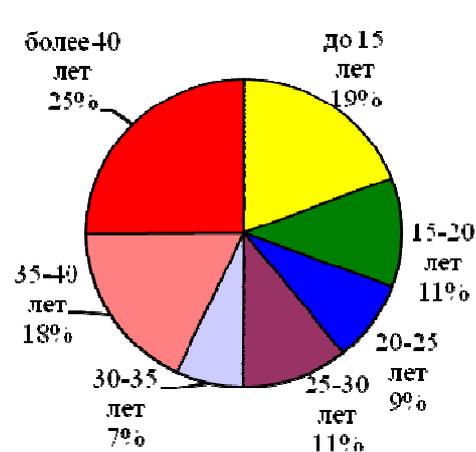
а)



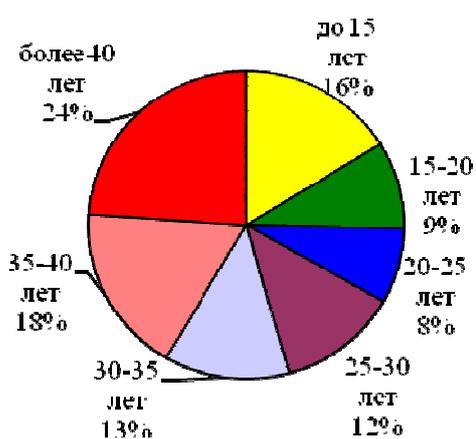
б)



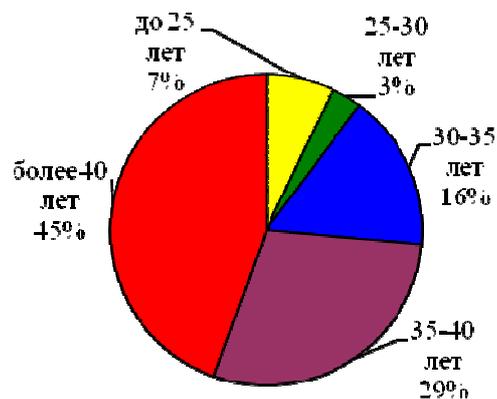
в)



г)



д)



е)

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

Рисунок 1.1 – Фактические сроки эксплуатации НПО (по состоянию на 01.01.2014)

### **1.1.2 Анализ эксплуатационных повреждений и дефектов структуры материала нефтеперерабатывающего оборудования**

Условия работы материала конструкций НПО (печных и коммуникационных труб, колонн, теплообменников, конденсаторов-холодильников, емкостей и др.) характеризуемые высокими температурой и давлением, а также агрессивностью технологической среды, чрезвычайно разнообразны. Так, значения температуры и давления среды в технологическом оборудовании составляют:

- печные змеевики – 100...550 °С и 0,2...6,0 МПа;
- трубопроводы – -20...450 °С и 0,05...10 МПа;
- колонны – 100...150 °С (верх колонны), 380...420 °С (низ колонны) и 0,05...0,5 МПа;
- теплообменники – 20...250 °С (в трубном пространстве) и 100...320 °С (в межтрубном пространстве), 1,6...2,0 и 0,8...1,2 МПа в трубном и межтрубном пространствах, соответственно.

Материал частей технологического оборудования контактирует со взрыво- и пожароопасными средами (бензином, керосином, мазутом, дизельным топливом, ксилолом, углеводородными газами и др.), а также с высокотоксичными химическими реагентами (щелочь, серная кислота, сероводород и др.).

Под воздействием высоких температуры, давления и агрессивных сред, а также с учетом длительной эксплуатации НПО в материале активно протекают процессы старения: деградация структуры и изменение механических свойств, которые отрицательно влияют на работоспособность оборудования и могут стать причиной его аварийного разрушения. Под деградацией конструкционных сталей в данном случае подразумевается изменение в худшую сторону структуры, а, следовательно, и механических свойств под воздействием эксплуатационных факторов.

В материале НПО в основном выявляют следующие повреждения, которые учитывают при оценке его состояния и определении остаточного ресурса оборудования [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] (рисунки 1.2 – 1.7):

- общая поверхностная и язвенная коррозия (рисунок 1.2);
- межкристаллитная коррозия (рисунок 1.3);
- сероводородное расслоение (рисунок 1.4);
- коррозионное растрескивание под напряжением (рисунок 1.5);
- коррозионно-щелочное растрескивание (рисунок 1.6);
- тепловая хрупкость (рисунок 1.7);
- образование и развитие макродефектов (рисунок 1.8);
- ползучесть;
- сфероидизация перлита и графитизация структуры (рисунки 1.9, 1.10).

Общая поверхностная коррозия приводит к постепенному уменьшению толщины стенки элементов НПО, язвенная коррозия – к местному повреждению материала. На рисунке 1.2 показан пример указанных повреждений: общая коррозия змеевика печи (см. рисунок 1.2 а) и язвенная коррозия плакирующего слоя (08Х13) и основного металла (Ст3) вакуумной колонны (см. рисунок 1.2 б). Срок эксплуатации оборудования ограничивается временем до достижения минимального значения толщины стенки. В развитии коррозионных процессов значительна роль химического состава и структуры сталей. При протекании электрохимических процессов коррозии гетерогенность структуры материала с разными электродными потенциалами способствует локальной коррозии.

Межкристаллитная коррозия свойственна хромоникелевым сталям и проявляется в образовании сетки трещин по границам зерен, обедненным хромом. На рисунке 1.3 показан пример межкристаллитной коррозии стали 12Х18Н10Т трубы сажеобдувателя, расположенного в камере конвекции печи. Срок службы оборудования из этих сталей определяется временем образования в стали склонности к межкристаллитной коррозии.

Сероводородное расслоение материала относится к замедленному разрушению и возникает вследствие продолжительной эксплуатации оборудования в сероводородсодержащей среде (см. рисунок 1.4). Расслоение возникает вследствие проникновения атомарного водорода в поверхностный слой материала, его диффузии вглубь толщины стенки и скопления вблизи несплошностей (поры, пустоты) и включений (сульфиды, окисульфиды и др.). Водород образуется при взаимодействии водного раствора сероводорода с железом. Время эксплуатации оборудования с таким повреждением материала ограничено предельно допустимым размером расслоений. Наибольшую склонность к образованию отдулин обнаруживают сосуды и аппараты из кремнемарганцевых (09Г2С, 16ГС) и марганцовистых (09Г2, 14Г2) сталей.

Коррозионное растрескивание под напряжением возникает под действием на материал статических растягивающих напряжений и среды, содержащей ионы хлора. При этом в микроструктуре материала наблюдаются повреждения в виде растрескивания по участкам, обладающим наименьшей коррозионной стойкостью. На рисунке 1.5 показан пример разрушения труб подогревателя вследствие коррозионного растрескивания материала. В данном случае характер распространения трещин — транскристаллитный. В процессе зарождения и развития повреждения в элементах конструкций наряду с уровнем эксплуатационных нагрузок и остаточными сварочными напряжениями весомым является вклад химического состава и структуры материала.



а)

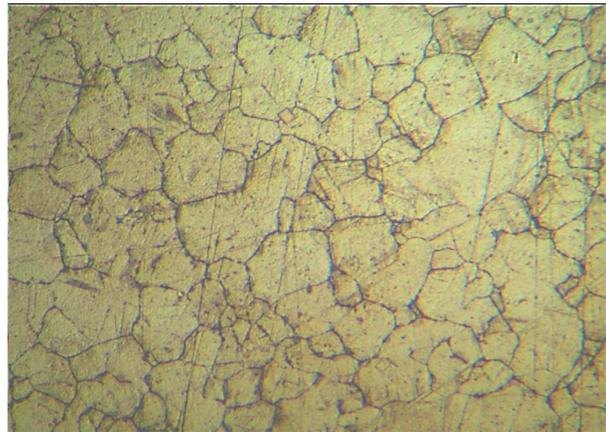


б)

**а) – общая коррозия трубы змеевика печи (сталь 20); б) – язвенная коррозия  
плакирующего слоя (08X13) и основного металла (Ст3) вакуумной колонны**  
**Рисунок 1.2 – Общая и язвенная коррозия материала**

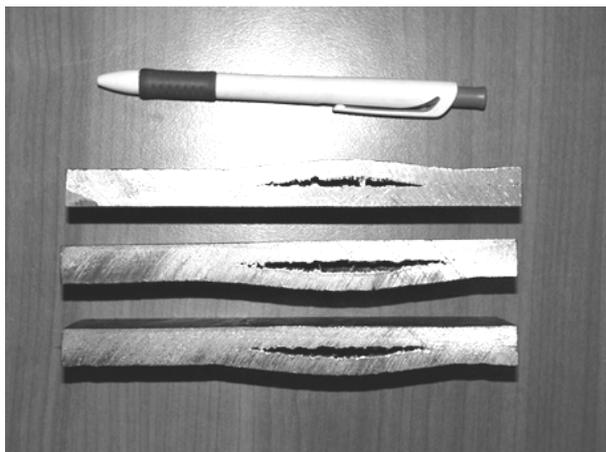


а)



б)

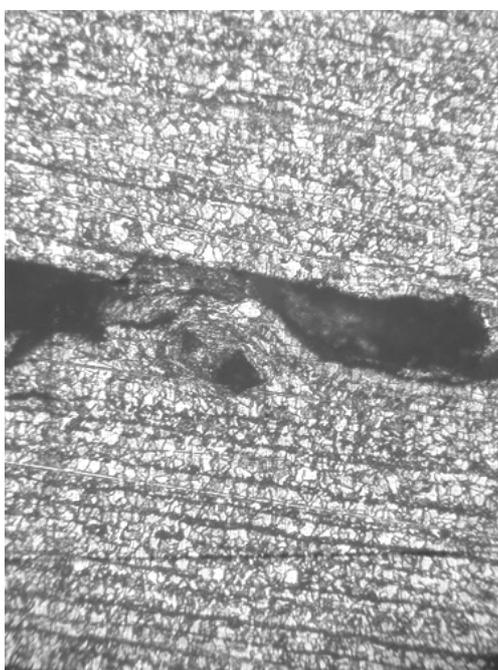
**а) – внешний вид поврежденной трубы; б) – структура стали 12X18Н10Т (×500)**  
**Рисунок 1.3 – Межкристаллитная коррозия стали 12X18Н10Т**  
**(труба сажеобдувателя)**



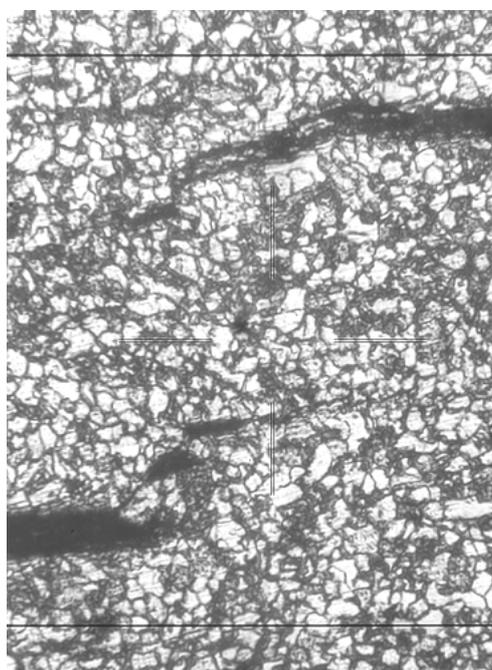
а)



б)

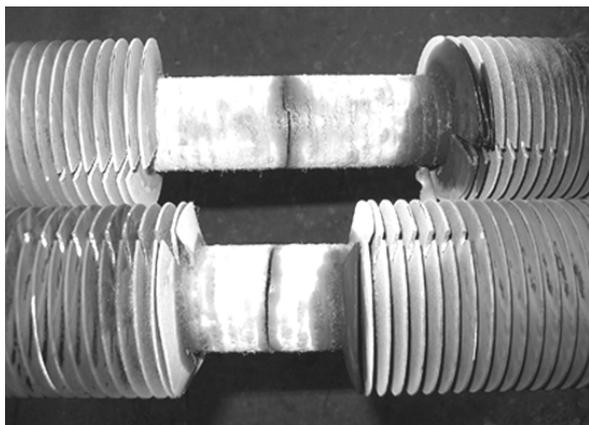


в)

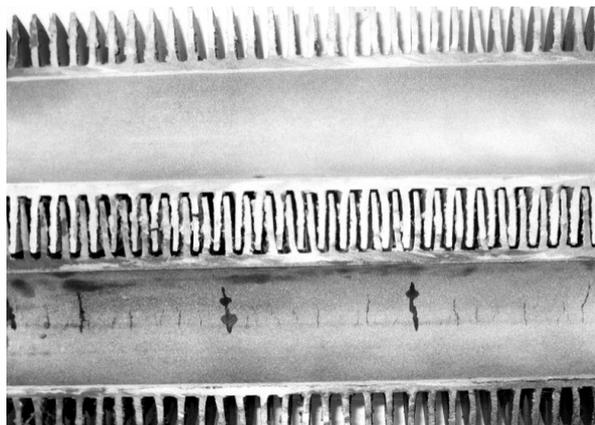


г)

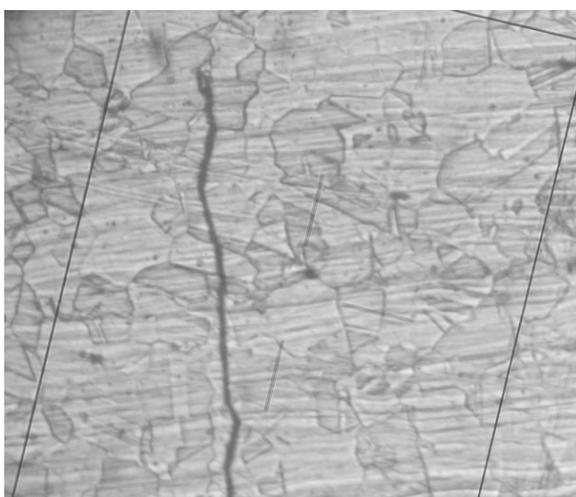
а) – поперечное сечение стенки аппарата; б) – пузырение металла;  
в), г) – микроструктура стали 09Г2С в области расслоения (в –  $\times 100$ , г –  $\times 400$ )  
Рисунок 1.4 – Сероводородное расслоение стенки пропановой емкости



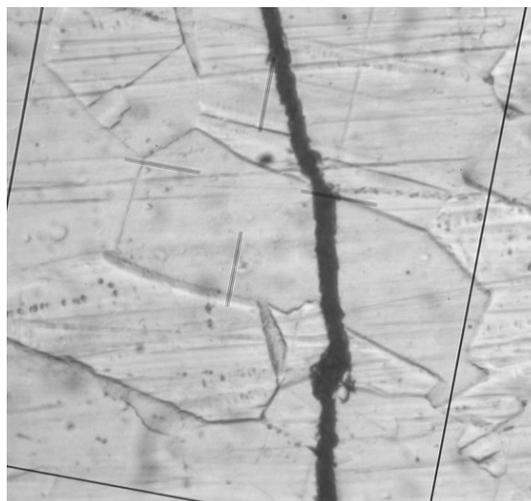
а)



б)



в)



г)

а) – внешний вид сквозных кольцевых трещин на оребренных трубах;  
б) – трещины на внутренней поверхности оребренных труб;  
в), г) – микроструктура стали 12X18Н10Т в зоне распространения трещины  
(в –  $\times 250$ , г –  $\times 1000$ )

**Рисунок 1.5 – Коррозионное растрескивание  
под напряжением труб подогревателя**



а)



б)



в)



г)

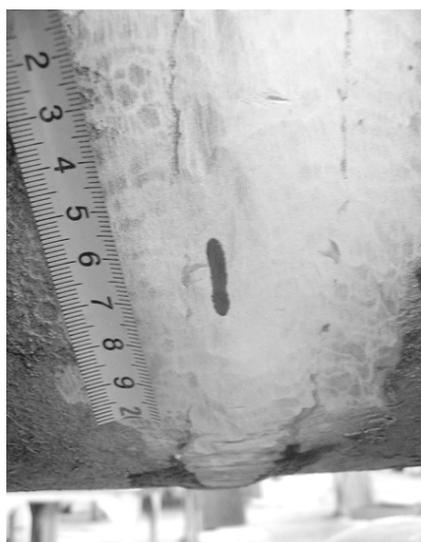


д)



е)

**а), б) – внешний вид поврежденных сварных швов;  
в), г) – трещины в сварных швах, выявленные цветной дефектоскопией;  
д), е) – микроструктура сварного соединения  
в зоне распространения трещины (×250)  
Рисунок 1.6 – Коррозионно-щелочное растрескивание сварных соединений**



а)



б)



в)



г)

- а) – внешний вид поврежденного кольцевого сварного шва трубопровода;  
 б) – трещина в околошовной зоне сварного соединения на внутренней поверхности трубы; в) – макроструктура сварного соединения в зоне распространения трещины;  
 г) – микроструктура стали (обезуглероженная зона в основном металле (15X5M) по линии сплавления со сварным швом ((Э-07Х20Н9), ×240)

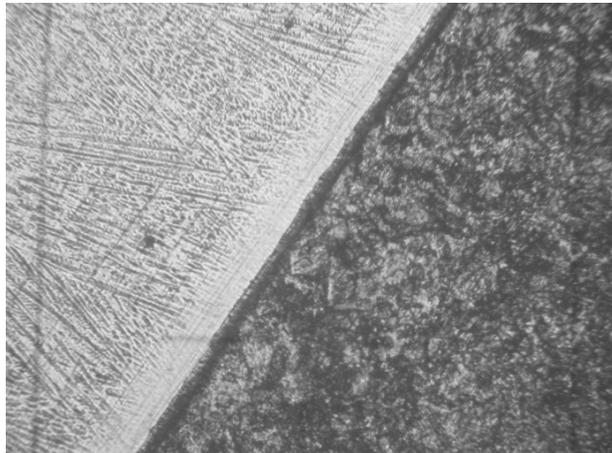
**Рисунок 1.7 – Разрушение сварного соединения трубопровода вследствие тепловой хрупкости металла**



а)



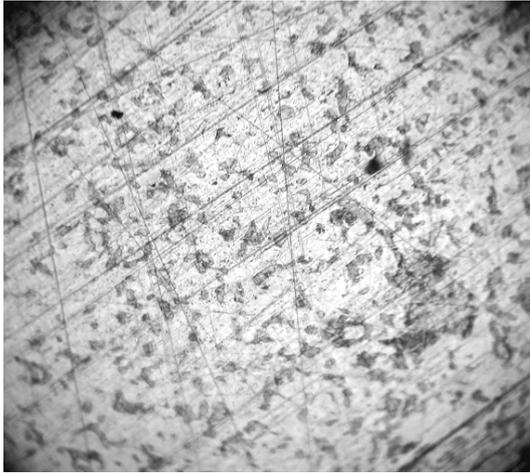
б)



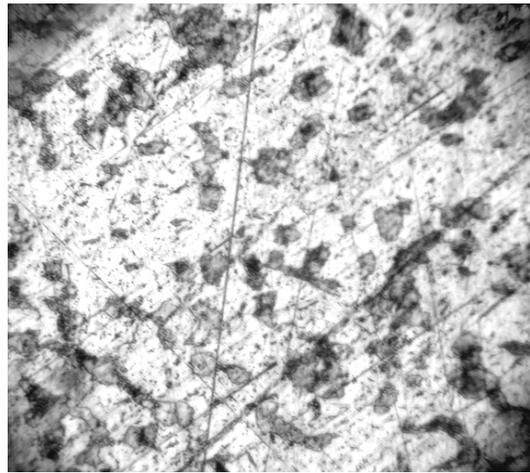
в)

**а) – сквозная трещина корпуса колонны (вид с наружной стороны корпуса);  
б) – макроструктура сварного соединения; в) – микроструктура биметалла  
(Ст3 + 08Х13,  $\times 100$ ), в стали 08Х13 наблюдается мартенситная структура**

**Рисунок 1.8 – Трещина в корпусе вакуумной колонны**

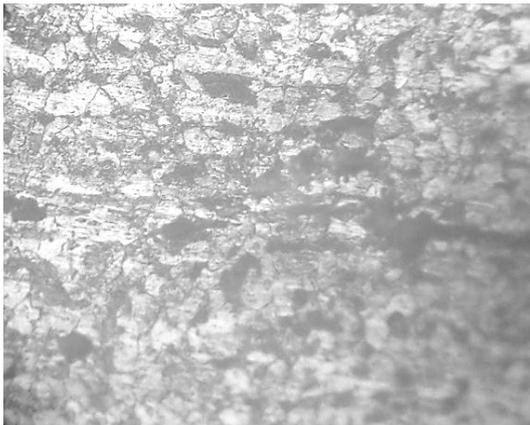


а)

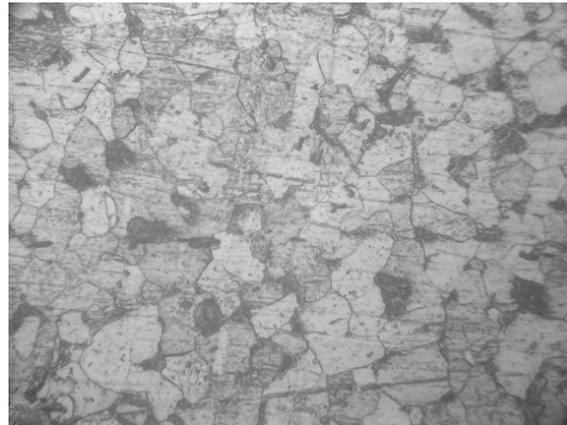


б)

а) – сталь ВСтЗсп, увеличение  $\times 100$ ; б) – сталь ВСтЗсп, увеличение  $\times 400$   
Рисунок 1.9 – Сфероидизация перлита в структуре основного металла  
ректификационной колонны (феррит + перлит) (полевая металлография)



а)



б)



в)



г)

а), б), в) – Ст3, увеличение  $\times 240$ ; г) – Ст3, увеличение  $\times 170$   
Рисунок 1.10 – Графитизация в структуре сварного соединения трубопровода

Коррозионно-щелочному растрескиванию в щелочных растворах подвержены в основном сварные соединения углеродистых и низколегированных сталей. Оно обусловлено наличием в сварных швах, соприкасающихся с раствором щелочи, внутренних остаточных растягивающих напряжений, возникших после сварки. На рисунке 1.6 приведен пример коррозионно-щелочного растрескивания сварного соединения трубопровода, транспортирующего 20 %-ный раствор щелочи. Трещины имеют межкристаллитный разветвленный характер (см. рисунок 1.6 д, е), а их зарождение происходит преимущественно по линии сплавления.

Тепловая хрупкость возникает вследствие охрупчивания материала при длительном воздействии высокой температуры (250...550 °С), вызывающей снижение прочности материала по границам зерен и выделения по этим границам частиц дисперсной фазы. На рисунке 1.7 приведен пример разрушения сварного соединения трубопровода вследствие тепловой хрупкости. В структуре сварного соединения (основной металл – 15Х5М, сварной шов – Э-07Х20Н9) наблюдаются зоны с различной степенью травимости вследствие протекания диффузионных процессов в зоне термического влияния при эксплуатации. По линии сплавления сварного шва с основным металлом наблюдается обезуглероженная зона. Трещина расположена в околошовной зоне сварного соединения, развивается по межкристаллитному (межзеренному) механизму по зоне термического влияния перпендикулярно стенке трубы с переходом в аустенитный сварной шов.

Макродефекты (трещины и другие несплошности) в материале могут появиться при изготовлении, транспортировании, монтаже и при эксплуатации конструкций. Трещины, возникшие в эксплуатации, как правило, образуются на участках с дефектной структурой материала (например, наличие мартенситной составляющей в структуре сварного шва). На рисунке 1.8 приведен пример разрушения корпуса вакуумной колонны. Очагом зарождения трещины являлась околошовная зона сварного соединения с мартенситной структурой в наплавленном металле (сталь 08Х13), образовавшейся при проведении сварочных работ.

При ползучести происходит интенсивное разупрочнение материала (снижение пределов текучести и прочности), что, в конечном счете, приводит к разрушению оборудования. Ползучесть обусловлена недостаточной стабильностью структуры и механических свойств в заданных условиях эксплуатации.

При сфероидизации происходит превращение перлитной составляющей структуры в виде выделения цементита сферической формы. При

этом границы перлитных зерен размываются, и возникает большое количество обособившихся сферических частиц цементита по границам зерен. Последствием сфероидизации перлита является развитие межзеренной хрупкости и снижение характеристик пластичности. На рисунке 1.9 приведен пример сфероидизации перлита в структуре основного металла (ВСтЗсп) ректификационной колонны, которая образовалась вследствие длительной (более 30 лет) эксплуатации.

При графитизации происходит распад цементита с образованием частиц графита в углеродистых сталях при длительном нагреве до температуры 400 °С и более. Причиной распада является неустойчивость цементита при температуре выше 400 °С. По мере образования в стали графитных включений происходит снижение ее прочности и пластичности. На рисунке 1.10 приведен пример графитизации в структуре сварного соединения трубопровода. Графитизация выявлена после длительной (более 30 лет) эксплуатации трубопровода.

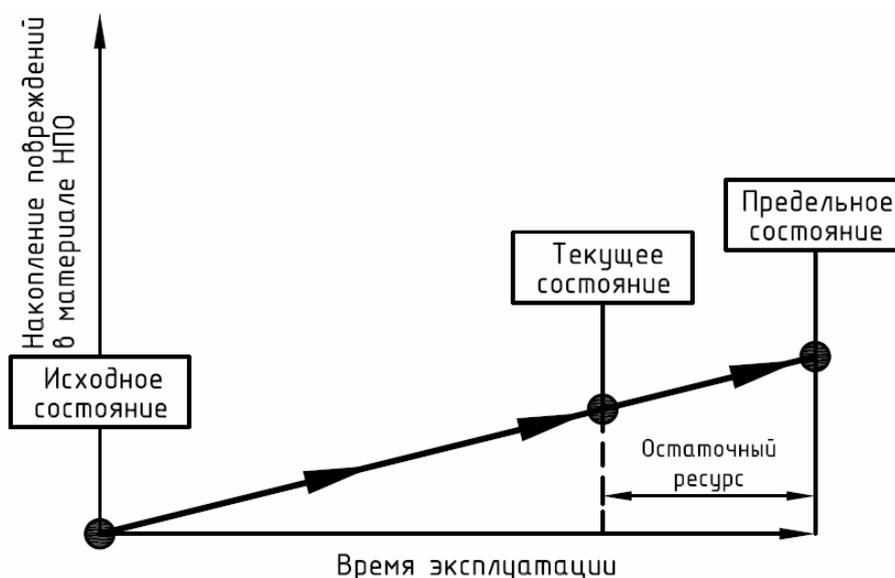
Указанные повреждения приводят к авариям оборудования и значительным материальным затратам на их устранение (на основании анализа статистических данных по НПЗ). От стабильности структуры и механических свойств зависит безопасность НПО. Опыт эксплуатации установок нефтеперерабатывающей промышленности показывает, что необоснованное увеличение сроков службы оборудования приводит к аварийным разрушениям, которые не удавалось предупредить [11]. Поэтому за состоянием материала НПО необходимо постоянное наблюдение при эксплуатации. Только всесторонний комплексный подход при диагностировании НПО обеспечивает объективную оценку состояния материала конструкций с целью обеспечения безотказной и безаварийной работы НПЗ.

### **1.1.3 Методы оценки фактического состояния материала и остаточного ресурса нефтеперерабатывающего оборудования**

Научные основы определения технического состояния технологического оборудования с целью принятия решения о возможности его дальнейшей безопасной эксплуатации включают [11, с. 9]:

- обоснование параметров, с помощью которых оценивается его техническое состояние;
- определение критериев достижения предельного состояния;
- дефектоскопический контроль материала;
- оценку напряженно-деформированного состояния конструкций;
- установление механизма деградации материала.

Качество решения поставленной задачи зависит от полноты собранной информации об объекте диагностирования, полученной при изготовлении и за все время его эксплуатации. В соответствии с работами [13, 14, 15] для НПО и технологических трубопроводов необходимо устанавливать допустимые сроки эксплуатации. Оценка остаточного ресурса НПО проводится путем экстраполяции изменения значений измеряемых характеристик, определенных при текущем диагностировании, при сохранении существующих условий эксплуатации (рисунок 1.11).



**Рисунок 1.11 – Схема определения остаточного ресурса НПО**

Остаточный ресурс определяется в том случае, когда оборудование [13, 14, 15, 16]:

- выработало установленный или расчетный ресурс, определенный предприятием-изготовителем;
- не имеет установленного или расчетного ресурса и находилось в эксплуатации 20 лет и более;
- выработало разрешенный к дальнейшей эксплуатации ресурс сверх установленного срока службы или расчетного ресурса;
- временно находилось под воздействием параметров, превышающих предельно допустимые, определяемые действующими ТНПА на материал, из которого изготовлены основные конструкции оборудования (например, при пожаре или авариях);
- требует оценки остаточного ресурса, по мнению владельца оборудования или органа Госпромнадзора.

Достоверное определение остаточного ресурса НПО возможно при надежных методах и средствах [11, с. 9]:

– диагностического выявления и контроля эксплуатационных макродефектов (коррозионные повреждения, трещины и др.) в материале элементов НПО;

– диагностирования напряженно-деформированного состояния элементов НПО в наиболее опасных его зонах;

– диагностического определения (оценки) степени деградации структуры и изменения механических свойств материала под воздействием эксплуатационных факторов.

Классический подход к анализу материала конструкций НПО предусматривает оценку во взаимосвязи изменений во времени его химического состава, структуры и механических свойств в зависимости от влияния внешних факторов (температуры, давления и воздействия агрессивных сред) [17]. Широкое применение в нефтеперерабатывающей промышленности нашли неразрушающие методы контроля материалов (рисунок 1.12) [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].

Методы оценки сплошности материала технологического оборудования (радиационный, вихретоковый, ультразвуковой, магнитопорошковый, капиллярный и др.) обеспечивают только поиск технологических и эксплуатационных дефектов (трещины, плены, закаты, непровары, расслоения и др.) для принятия необходимых решений. Возможность дальнейшей эксплуатации оборудования определяется по результатам расчета на прочность при наличии обнаруженного дефекта. На практике решение о дальнейшей эксплуатации конструкции принимается путем сравнения параметров обнаруженных дефектов с их нормативными значениями [26]. При отсутствии недопустимых дефектов конструкция считается годной к эксплуатации.

Методы определения химического состава материала предназначены для идентификации марки стали конструкции. Кроме этого, разработан способ определения механических характеристик по химическому составу стали [27], согласно которому механические свойства определяются по корреляционным уравнениям:

$$\sigma_g = 28,31 \cdot C + 13,39 \cdot Mn + 10,3 \cdot Si + 18,61 \cdot S + 57,53 \cdot P + 28,92; \quad (1.1)$$

$$\sigma_{0,2} = 24,17 \cdot C + 8,14 \cdot Mn + 8,56 \cdot Si + 2,36 \cdot S + 45,74 \cdot P + 18,19; \quad (1.2)$$

$$\delta_5 = -32,37 \cdot C - 8,05 \cdot Mn - 14,11 \cdot Si - 104,37 \cdot S - 53,96 \cdot P + 47,78, \quad (1.3)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности, МПа;

$\sigma_{0,2}$  – предел текучести, МПа;

$\delta_5$  – относительное удлинение, %;

$C, Mn, Si, S$  и  $P$  – содержание в стали углерода, марганца, кремния, серы и фосфора, соответственно.

Однако достоверность определения механических характеристик по данным уравнениям невелика (коэффициенты корреляции – 0,33; 0,44 и 0,35 [27] для уравнений (1.1), (1.2) и (1.3), соответственно).

Таким образом, методы оценки сплошности и химического состава материала НПО не предназначены для определения структурного состояния и механических свойств материала.

Среди существующих методов неразрушающего контроля состояния материала (рисунок 1.12) методы, основанные на измерении твердости, являются сравнительно простыми, доступными, и вместе с тем перспективными, содержащими еще много нераскрытых возможностей. Главное их достоинство заключается в возможности косвенной оценки некоторых механических характеристик материала конструкций НПО без вывода его из эксплуатации и вырезки образцов. В некоторых случаях указанные методы являются пока единственно пригодными для количественной оценки механических свойств малых объемов или локальных зон материала (упрочненный слой, сварные соединения, тонкие покрытия и др.). Применение полевой металлографии совместно с определением твердости позволяет выполнить экспресс-оценку структурно-механической прочности материала конструкций НПО.

Разработано много методов оценки фактического состояния материала и остаточного ресурса оборудования, подвергающихся воздействию какого-либо повреждающего фактора в эксплуатации [28 – 43].

Согласно [28, 29, 30] оценка остаточного ресурса оборудования и трубопроводов, повреждающим фактором для которых является уменьшение толщины стенок из-за общей коррозии, проводится по формуле:

$$T_{ост} = k \cdot \frac{S_{\phi} - S_{отб}}{A_{\phi}}, \quad (1.4)$$

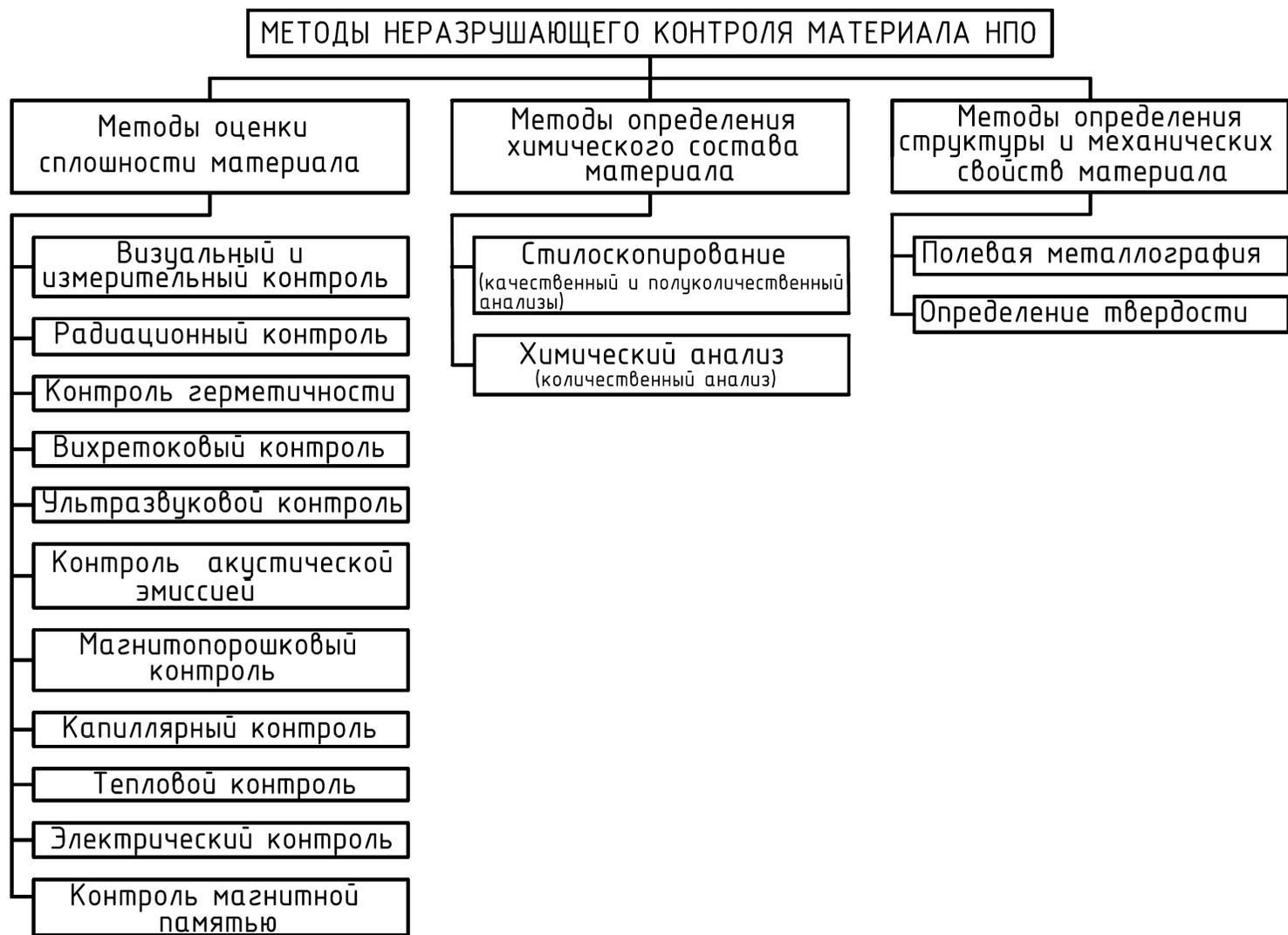
где  $T_{ост}$  – остаточный ресурс элемента, лет;

$S_{\phi}$  – фактическая толщина элемента, мм;

$S_{отб}$  – отбраковочная (предельная) толщина элемента, мм;

$k$  – коэффициент, зависящий от категории и срока службы оборудования или трубопровода ( $k = 0,9 \dots 1,0$ );

$A_{\phi}$  – скорость коррозионно-эрозионного изнашивания, мм/год.



**Рисунок 1.12 – Классификация методов неразрушающего контроля материала конструкций НПО**

Толщина элементов конструкций НПО измеряется ультразвуковыми толщиномерами во время капитального ремонта технологической установки. Следует отметить, что формула (1.4) не учитывает деградацию структуры и изменение свойств материала в эксплуатации.

Разработан метод оценки фактического состояния материала конструкций [31, 32], основанный на релаксационных испытаниях их материалов. Для испытаний используются образцы размером от  $2 \times 2 \times 4$  до  $4,5 \times 4,5 \times 9$  мм, которые подвергаются сжатию ступенчато увеличивающейся нагрузкой. После испытаний строится кривая релаксации, параметры которой используются для расчета механических характеристик материала (пределы текучести и микропластичности) и, как следствие, оценки фактического состояния материала конструкции. Однако для проведения релаксационных испытаний необходимы образцы, вырезаемые из конструкции.

Метод оценки остаточного ресурса, предложенный в работах [33, 34, 35, 36], основан на предположении о снижении способности материала сопротивляться распространению трещин при эксплуатации. Метод учитывает скорость коррозии, скорость изменения трещиностойкости и наличие трудновыявляемых дефектов в сварных соединениях. По данному методу рассчитывается напряжение в стенке аппарата:

$$G(t) = \theta \cdot [G], \quad (1.5)$$

где  $G(t)$  – напряжение в стенке аппарата, увеличивающееся со временем  $t$  вследствие коррозии материала;

$[G]$  – предельно допустимое напряжение материала, определяемое в соответствии с ТНПА;

$\theta$  – коэффициент, учитывающий охрупчивание материала, прочность сварного соединения и наличие трещин в материале.

По данному методу считается, что время, необходимое для достижения напряжений в стенке аппарата своего предельно допустимого значения, является остаточным ресурсом объекта. Особенностью указанного метода является использование для определения степени охрупчивания металла образцов размером  $(1,2 \dots 1,5) \times (5 \dots 10) \times (15 \dots 35)$  мм.

Разработан метод оценки склонности сталей к хрупкому разрушению в эксплуатации [11, с. 375]. Он основан на испытании материала на стойкость к хрупкому разрушению на образцах Шарпи (с V-образным концентратором напряжений – тип 11 по ГОСТ 9454). Склонность элементов конструкций к хрупкому разрушению оценивают на основе сопоставления

фактического значения критической температуры хрупкости  $T_{к(\phi)}^v$  с ее расчетно-нормируемым значением  $T_{к(p-n)}^v$ . Металл считается не склонным к хрупкому разрушению, если выполняется условие:

$$T_{к(\phi)}^v \leq T_{к(p-n)}^v. \quad (1.6)$$

Если  $T_{к(\phi)}^v \geq T_{к(p-n)}^v$ , то считается, что конструкция может быть допущена к дальнейшей эксплуатации только по заключению специализированной научно-исследовательской организации, либо после проведения ремонта оборудования с заменой элемента, обладающего склонностью к хрупкому разрушению.

В работе [37] для оценки фактического состояния материала введены понятия критической долговечности  $\tau_{кр}$  и коэффициента запаса времени  $K_\tau$ :

$$\tau_{кр} = 0,85 \cdot \tau_k, \quad (1.7)$$

$$K_\tau = \tau_{кр} / \tau - 1, \quad (1.8)$$

где  $\tau_k$  — время до разрушения, лет;

$\tau$  — наработка на момент диагностирования, лет.

Свыше срока службы, равного  $\tau_{кр}$ , эксплуатация элементов оборудования становится ненадежной. Расчет остаточного ресурса оборудования до критической долговечности проводится по формуле:

$$\tau_{ост} = \tau \cdot K_\tau, \text{ ч.} \quad (1.9)$$

По методу накопленной локальной деформации [38, с. 242] элементов оборудования, эксплуатирующихся в условиях ползучести, за критерий остаточного срока службы принимается время, равное длительности достижения заданного (допустимого) значения остаточной локальной деформации ползучести  $[\epsilon]$ . Остаточный ресурс службы определяется по уравнению:

$$\tau = \frac{([\epsilon] - \epsilon_{ост})}{V_{у.п.}}, \quad (1.10)$$

где  $\epsilon_{ост}$  — остаточная деформация ползучести на момент диагностирования;

$V_{у.п.}$  — скорость ползучести на установившейся стадии.

По данному методу скорость ползучести на установившейся стадии определяется в локальных наиболее термонапряженных и повреждаемых зонах.

Остаточный ресурс с учетом ползучести материала  $T$  (длительной прочности) определяется по формуле [39, с. 65]:

$$T = \frac{S_\phi - S_p}{a}, \quad (1.11)$$

где  $S_\phi$  – фактическая минимальная толщина стенки элемента, мм;  
 $S_p$  – расчетная толщина стенки элемента, определенная по допускаемым напряжениям, учитывающим предел длительной прочности материала элемента для планируемого срока службы, мм;  
 $a$  – скорость коррозионно-эрозионного изнашивания, мм/год.

Если при очередном диагностировании выявлена остаточная деформация ползучести, то ресурс сосуда определяется по формуле [39, с. 66]:

$$T_n = \frac{l}{a_n}, \quad (1.12)$$

где  $l$  – диаметр сосуда или другой фиксированный размер;  
 $a_n$  – скорость ползучести, %/год.

Остаточный ресурс сосуда в этом случае определяется по формуле [39, с. 66]:

$$T_n^0 = T_n - T_\varepsilon, \quad (1.13)$$

где  $T_\varepsilon$  – продолжительность эксплуатации сосуда.

Скорость ползучести определяется по формуле [39, с. 66]:

$$a_n = \frac{100 \cdot [L_\phi(t_1) - L_\phi(t_2)]}{L_\phi(t_1) \cdot \Delta t \cdot K_1 \cdot K_2}, \quad (1.14)$$

где  $L_\phi(t_1)$  и  $L_\phi(t_2)$  – фактический размер диаметра сосуда или другого фиксированного параметра в кольцевом направлении при первом и втором обследовании соответственно, мм;

$\Delta t$  – время между первым и вторым обследованиями, лет;

$K_1$  – коэффициент, учитывающий отличие среднеожидаемой скорости ползучести с доверительной вероятностью  $\gamma = 0,7 \dots 0,95$ ;

$K_2$  – коэффициент, учитывающий погрешность определения скорости ползучести по линейному закону от скорости ползучести, рассчитанной по более точным нелинейным законам изменения контролируемого параметра.

Для аппаратов, эксплуатирующихся в условиях циклического нагружения, ресурс циклической работоспособности металла  $T_{ц}$  определяется по формуле [39, с. 62]:

$$T_{ц} = \frac{T_{э} \cdot [N]}{N_{э}}, \quad (1.15)$$

где  $T_{э}$  – время эксплуатации аппарата с момента его пуска, лет;  
 $[N]$  – допускаемое количество циклов нагружения;  
 $N_{э}$  – количество циклов нагружения за время эксплуатации.

Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению механических свойств материала определяется по результатам испытания образцов из контрольных вырезок [39, с. 64]. По результатам испытаний проводятся прочностные расчеты. Если снижение механических свойств оказывается более 5 % от нормативных значений, то определяется скорость снижения лимитирующей механической характеристики по формуле:

$$a = \frac{\sigma_{\phi}(t_1) - \sigma_{\phi}(t_2)}{(t_2 - t_1) \cdot K_1 \cdot K_2}, \quad (1.16)$$

где  $\sigma_{\phi}(t_1)$ ,  $\sigma_{\phi}(t_2)$  – значения механической характеристики, определенные при первом и втором обследованиях, соответственно;

$t_1$ ,  $t_2$  – время от начала эксплуатации до первого и второго обследования соответственно, лет;

$K_1$ ,  $K_2$  – уточняющие коэффициенты.

После этого путем экстраполяции определяют значение механической характеристики к концу ожидаемого остаточного периода эксплуатации.

Известны и другие методы оценки остаточного ресурса оборудования. В работе [40] рассматривается аналитическое определение расчетного срока службы по показателю нагружения конструкции за год при условии, что в течение последующих лет характер нагружения не изменится. Авторами работы [41] дается оценка ресурса крановых конструкций с позиций математического ожидания долговечности и суммирования относительных усталостных повреждений.

Разработана четырехбалльная шкала графитизации углеродистых сталей, применяемых в энергетическом машиностроении [42, с. 10; 43]. По этой шкале графитизация стали оценивается по четырехбалльной системе [43]: балл 1 – незначительная; балл 2 – значительная; балл 3 – сильная; балл 4 – опасная. Оценка степени графитизации стали проводится методом визуального сравнения просматриваемого поля под микроскопом. При обнаружении графитизации 1-го балла конструкция допускается к дальней-

шей эксплуатации, 2-го балла — графитизированные участки подлежат восстановительной термической обработке, 3-го балла — графитизированные участки подлежат удалению из конструкции.

Разработаны также шкалы баллов микроповреждаемости структуры теплоустойчивых сталей (12ХМ, 15ХМ, 12Х1МФ, 15Х1МФ и др.) [38, с. 54; 44]. Структурные изменения в сталях разделены на три стадии деградации в зависимости от длительности эксплуатации. По результатам металлографического анализа определяется стадия деградации структуры стали и принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации конструкции.

С учетом анализа особенностей, а также преимуществ и недостатков различных методов можно отметить, что несмотря на многообразие приведенных методик, подход к оценке фактического состояния материала и остаточного ресурса с позиции контроля изменения механических свойств материала остается недостаточно разработанным. Кроме того, существующие методики редко учитывают скорость изменения механических характеристик металла в эксплуатации и возможность ее определения. Все это приводит к низкой эффективности существующих методик поверочного расчета на прочность из-за отсутствия данных о значениях фактических структурно-механических свойств металла по основным элементам оборудования. При оценке изменения механических свойств материала в основном используют стандартные методы вырезания макропроб, изготовления и испытания образцов в соответствии с требованиями ТНПА. Однако вырезка образцов из конструкции сопряжена с последующим дорогостоящим ремонтом НПО. В связи с этим актуальными являются вопросы совершенствования методов определения фактического состояния материала без разрушения оборудования. По нашей оценке, наиболее перспективным направлением по данному вопросу является развитие методов определения механических свойств по результатам определения твердости материала (применительно к НПО).

## **1.2 Место твердости в оценке состояния материала и остаточного ресурса нефтеперерабатывающего оборудования**

Обеспечение безопасной и долговечной работы НПО возможно при использовании эффективных методов контроля механических свойств материалов, которые претерпевают изменения на стадиях изготовления и эксплуатации вследствие влияния технологических и эксплуатационных факторов. При оценке изменения механических свойств материала в основном используют стандартные методы отбора проб, изготовления и испытания стандартных об-

разцов в соответствии с требованиями ТНПА. Однако такие вырезки сопряжены с последующим ремонтом конструкции, в связи с чем возникла практика использования частично разрушающих и неразрушающих методов определения механических характеристик. Среди неразрушающих методов определения механических свойств материала наиболее широкое распространение получили методы, основанные на измерении твердости.

Твердость как свойство материалов, способы и средства ее измерения с давних пор привлекают внимание исследователей. Начиная с середины XX века, интенсивно развиваются исследования по установлению связи твердости с другими механическими характеристиками материала. К настоящему времени благодаря работам Н.Н. Давиденкова, А.Ю. Ишлинского, А.А. Бочвара, В.Д. Кузнецова, Д.Б. Гогоберидзе, М.П. Марковца, Г.П. Зайцева, М.М. Хрущова, Е.С. Берковича, В.К. Григоровича, Ю.А. Киселева, М.С. Дрозда, С.С. Ваусауска, В.П. Алехина, С.И. Булычева, Ю.И. Славского, В.М. Матюнина, В.А. Рудницкого, А.В. Рабцевича и др., выполненным в странах бывшего СССР, а также работам зарубежных авторов – Г. Герца, И. Бринелля, Е. Мейера, Г. О'Нейля, Д. Тейбора, О. Шварца, Р. Хольма, К. Харди, Г. Френсиса, М. Накамуры, Ш. Кобаяси и др., были получены важные результаты при решении теоретических и прикладных задач контактного деформирования материала при внедрении индентора, установлены закономерности изменения твердости в зависимости от различных факторов, обосновано использование твердости для оценки других механических свойств, созданы различные конструкции приборов для измерения твердости.

Разработка методов и технических средств измерения твердости интенсивно ведется в Германии, США, Великобритании, Беларуси, России, Японии, Швейцарии и других странах. Создано много видов и модификаций стационарных и переносных приборов для измерения твердости, отличающихся принципом действия, конструктивными особенностями, габаритными размерами, массой и областью применения. Это объясняется не только возросшими требованиями к качеству промышленной продукции, но и преимуществами метода твердости как неразрушающего и производительного метода механических испытаний [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51].

Множество методов определения твердости, классифицированное по способу взаимодействия индентора с испытуемым материалом, приведено на рисунке 1.13. Твердость, определенная вдавливанием, характеризует сопротивление материала пластическому деформированию, по отскоку – упругие свойства материала и царапанием – сопротивление материала разрушению (для большинства материалов путем среза).

# МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛА

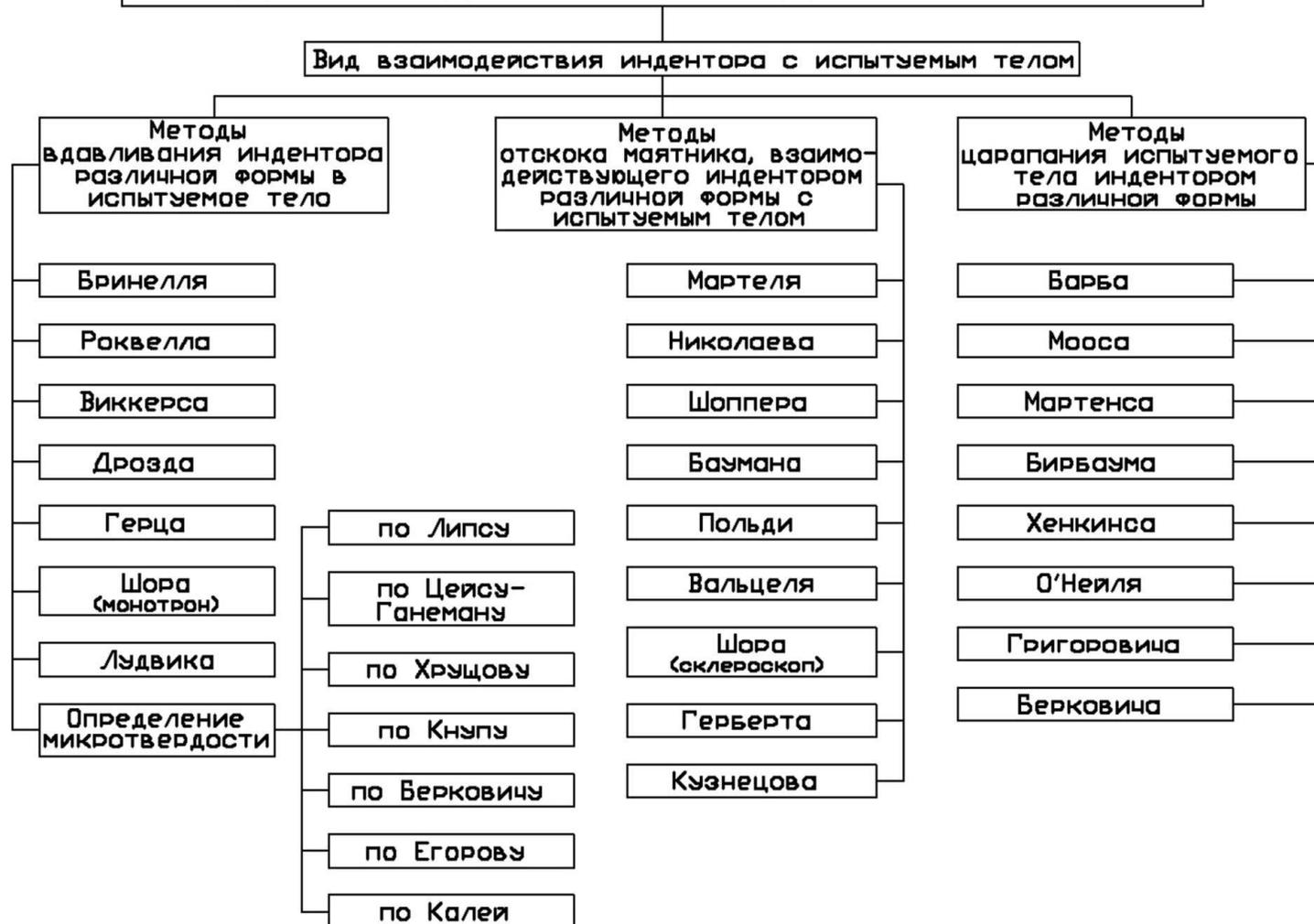


Рисунок 1.13 – Классификация методов определения твердости материала

Наиболее удобными с практической точки зрения и широко применяемыми из приведенных оказались методы Бринелля, Роквелла и Виккерса, представляющие испытание твердости путем статического вдавливания соответственно закаленного стального шарика, алмазного конуса с углом при вершине  $120^\circ$  или закаленного стального шарика и алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом между противоположными гранями  $136^\circ$ . Эти методы стандартизованы и широко применяются в исследовательских и заводских лабораториях.

Определение твердости материала НПО стационарными приборами в условиях производства затруднительно и чаще всего нецелесообразно. Особая роль в расширении возможностей определения твердости принадлежит переносным твердомерам. Эти приборы позволяют проводить определение твердости в любом пространственном положении, используют меньшие нагрузки по сравнению со стационарными приборами, а значит, могут быть использованы для измерения твердости на изделиях любой формы, размеров, в любых производственных условиях, а также на эксплуатируемых конструкциях и оборудовании [52].

Однако каждый из методов определения твердости дает результаты, зависящие не только от механических свойств испытуемого материала, но и от условий проведения этих измерений. Определение твердости должно проводиться при установленных стандартных условиях. Поэтому для измерения твердости и косвенной оценки механических свойств НПО как стационарными, так и переносными приборами следует выбрать наиболее универсальный метод, к которому следует предъявить следующие требования:

- метод определения твердости должен быть применимым ко всем без исключения объектам – из пластичного и хрупкого материала, малого и большого размера;

- значение твердости для однородного твердого тела при постоянной температуре должно быть материальной константой, независимой от значения прилагаемой нагрузки или затрачиваемой энергии;

- твердость должна иметь физический смысл и размерность, характеризующую сопротивление материала пластическому деформированию или хрупкому разрушению;

- результат измерения твердости должен быть точным и воспроизводимым, сама операция – простой, прибор – надежным и удобным в обращении;

- метод определения твердости должен удовлетворять закону механического подобия Кирпичева – Фика, который в формулировке Н.Н. Давиденкова гласит, что «два геометрически подобных тела из одного и того же материала подобны механически, если они находятся в таких механических условиях, при которых как напряженные состояния (тензоры напряжений), так и деформации (тензоры деформаций) во всех соответствующих точках тождественны» [47, с. 25].

Проанализируем указанные выше методы на соответствие данным требованиям. Метод определения твердости по Бринеллю не позволяет из-

мерять твердость высокопрочных материалов, т.к. с помощью закаленного стального шарика нельзя испытать твердость закаленной стали и более твердых материалов [53]. Этот метод не удовлетворяет закону механического подобия отпечатков, т.к. значение твердости зависит от величины прилагаемой нагрузки, а геометрически подобные отпечатки получаются только при одинаковой глубине внедрения индентора в материал.

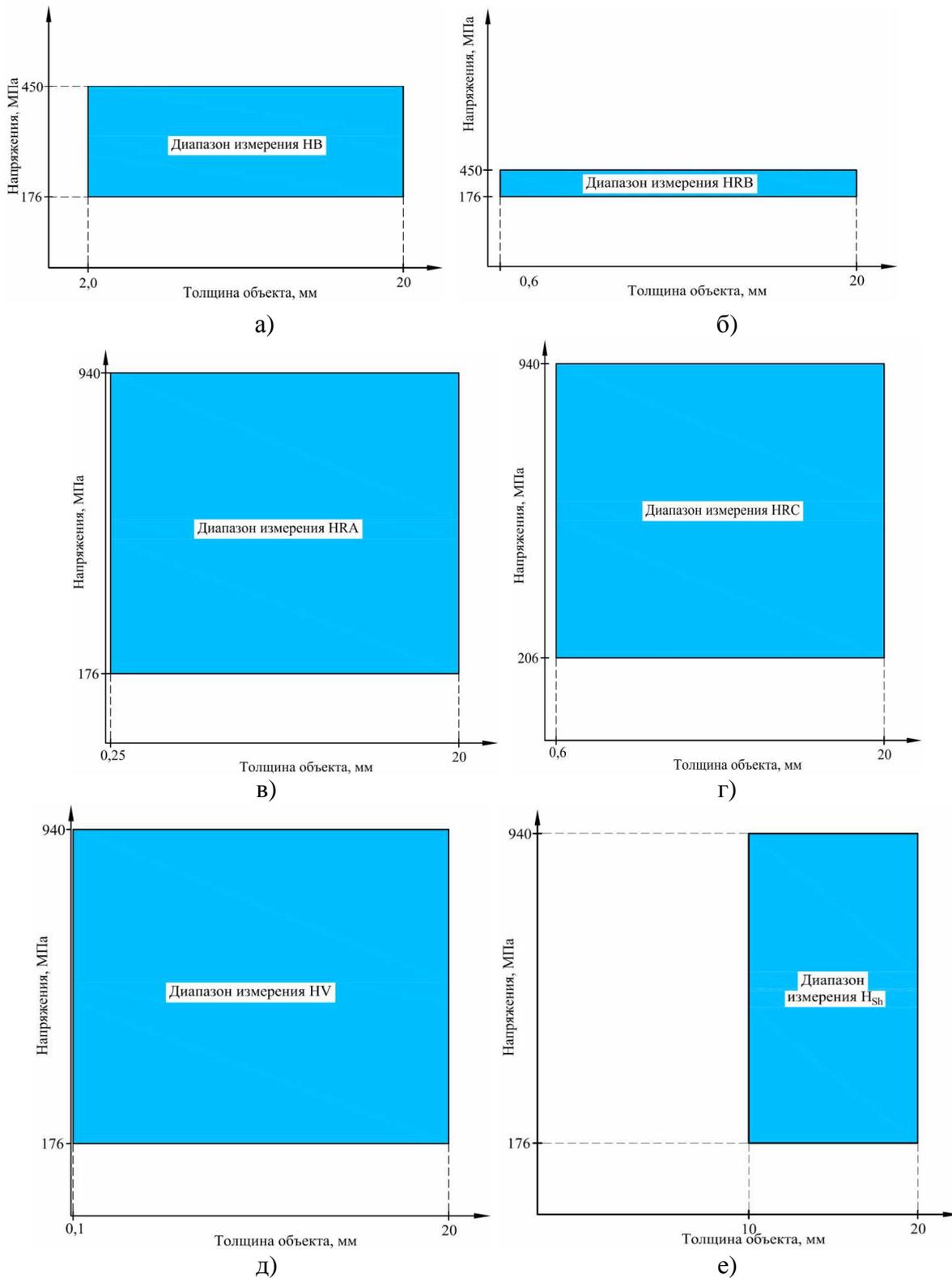
Метод определения твердости по Роквеллу [54] не позволяет измерять твердость хрупких тел (абразивные материалы, стекла, минералы) и тел микроскопического размера (структурные составляющие сплава, тонкие покрытия и пленки), потому что применяемые нагрузки слишком велики для этих целей и вызывают разрушение указанных тел. Величина твердости одного и того же материала, измеренная с помощью конического и сферического инденторов, выражается разными числами. При испытании твердости нарушается геометрическое и механическое подобие отпечатков.

При определении твердости по Шору [55; 56, с. 129] мерой твердости служит высота отскока алмазного бойка с коническим или сферическим индентором. Для измерения твердости строят кривые зависимости значений твердости от типа прибора. При измерении твердости не соблюдается закон геометрического и механического подобия получаемых отпечатков.

Метод определения твердости по Виккерсу [57] не зависит от условий нагружения. Данным методом можно измерять твердость хрупких материалов, а также тел микроскопических размеров. Отпечатки, выполненные пирамидальным индентором с разными нагрузками на одном и том же объекте, имеют подобную форму, поэтому твердость не зависит от величины прилагаемой нагрузки, т.е. отвечает закону механического подобия отпечатков.

Кроме того, отпечатки, полученные при помощи конического и шарового инденторов (как в методах Бринелля, Роквелла, Шора), и волна вокруг них имеют вертикальную ось симметрии, а проекция их на горизонтальную плоскость представляет круг. Поэтому по этим проекциям отпечатков нельзя делать дополнительных заключений о механических свойствах металла, кроме его твердости [47, с. 96]. Необходимым же условием соблюдения закона механического подобия является подобие геометрической формы отпечатков. Данному условию отвечает индентор в форме пирамиды с углом между противоположными гранями  $136^\circ$  (при определении твердости по Виккерсу), который дает подобные отпечатки при любой глубине вдавливания [47].

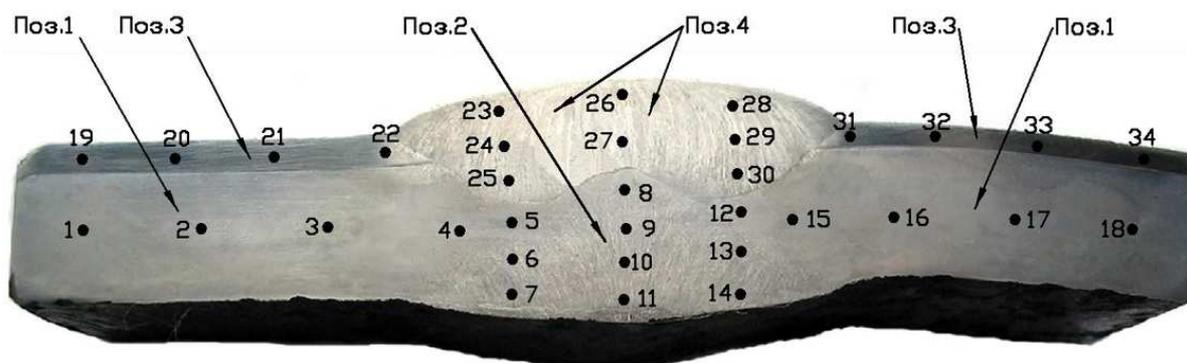
Сравнительный анализ применения основных методов определения твердости в зависимости от толщины измеряемых объектов и напряжений, возникающих в материале в области индентирования, приведен на диаграммах, изображенных на рисунке 1.14, из которого видно, что метод определения твердости по Виккерсу HV, наряду с методами определения твердости по Роквеллу HRA и HRC, имеет большую область применения среди других по диапазону измеряемых напряжений и толщины объекта.



а) – метод Бринелля HB; б) – метод Роквелла HRB; в) – метод Роквелла HRA;  
 г) – метод Роквелла HRC; д) – метод Виккерса HV; е) – метод Шора H<sub>Sh</sub>

**Рисунок 1.14 – Сопоставление областей применения различных методов определения твердости материала**

Кроме того, определение твердости по Виккерсу позволяет косвенно оценивать не только прочностные характеристики материала, но и с достаточно высокой точностью его пластические свойства. Так, например, при оценке качества вертикального стыкового сварного шва обечайки ректификационной колонны было проведено измерение твердости по сечению образца (рисунок 1.15). Размеры образца допускали применение только метода Виккерса.

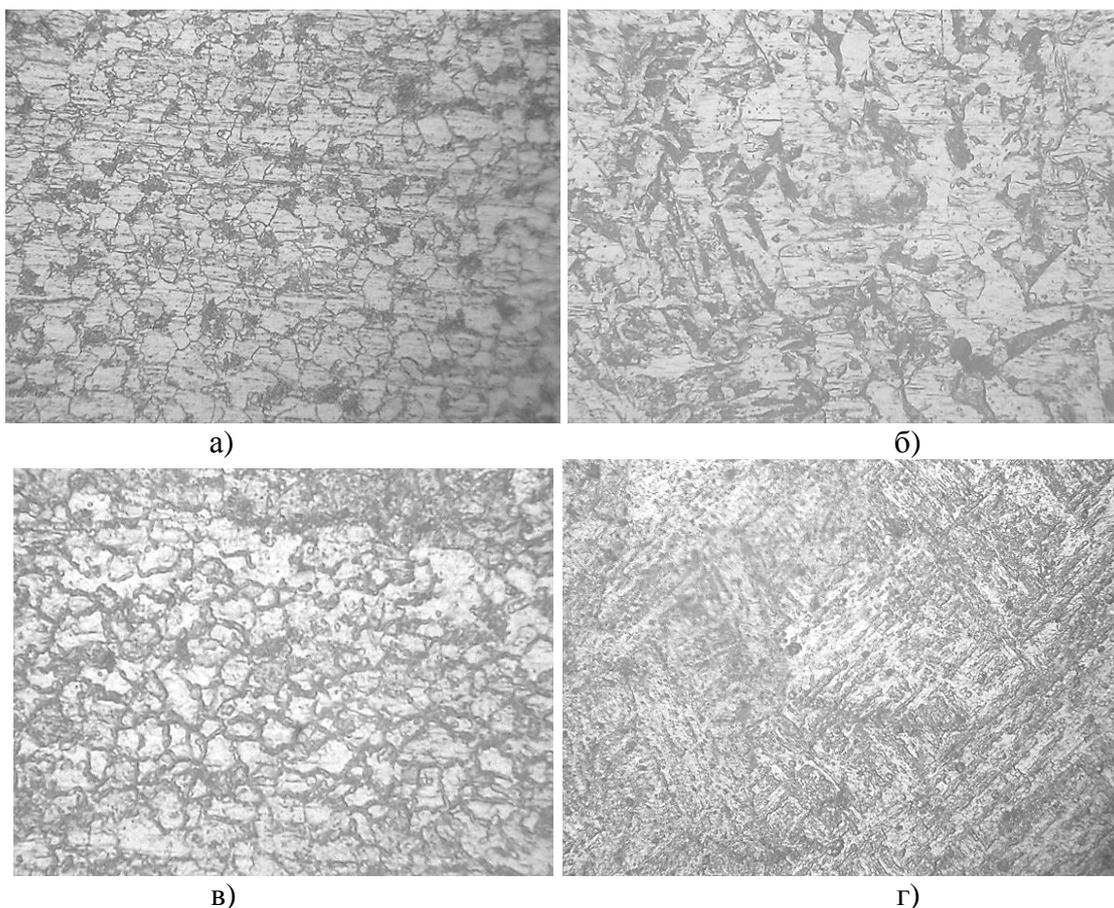


**Рисунок 1.15 – Расположение точек контроля твердости и микроструктуры сварного соединения**

Значения твердости по Виккерсу материала плакирующего слоя сварного шва составили около 400 *HV* (точки 23...30) при максимально допустимом значении 200 *HV*. Твердость остальных участков сварного соединения (точки 1...22, 31...34) не превышала допустимых значений. Это указало на наличие в металле плакирующего слоя сварного шва закалочных структур, снижающих пластические свойства и повышающих хрупкость материала.

После проведения металлографических исследований (рисунок 1.16) установлено, что металл плакирующего слоя имеет феррито-карбидную структуру, структура сварного шва плакирующего металла имеет столбчатое строение.

В наплавленном металле сварного шва была выявлена дисперсная игольчатая структура закалочного типа (мартенсит), что подтвердило предварительное заключение и показало, что по результатам определения твердости можно определить и особенности структуры материала.



**а) – основной металл поз. 1 (феррит + перлит,  $\times 240$ ); б) – сварной шов основного металла поз. 2 (феррит + перлит,  $\times 240$ ); в) – плакирующий слой основного металла поз. 3 (феррит + карбиды,  $\times 240$ ); г) – плакирующий слой сварного шва поз. 4 (мартенсит,  $\times 240$ )**

**Рисунок 1.16 – Микроструктура материала участков сварного соединения**

На основании обзора методов определения твердости, применяемых при работе с различными конструкциями общего и химического машиностроения (методы Бринелля, Роквелла, Виккерса, Шора) установлено, что метод определения твердости по Виккерсу имеет большую область применения при работе с деталями различных размеров, формы, из материала различного структурного класса и конструкционной прочности. Поскольку твердость по Виккерсу не зависит от нагрузки, а получаемые отпечатки имеют геометрическое и механическое подобие, по результатам определения твердости можно не только судить о прочностных характеристиках, но и косвенно – о пластических. Применение метода твердости для косвенной оценки механических характеристик позволит определять текущее состояние материала длительно эксплуатируемого оборудования и прогнозировать его предельное состояние, обеспечивая при этом экономию материальных и трудовых ресурсов.

### **1.3 Взаимосвязь твердости с другими механическими характеристиками материала**

При развитии в элементе конструкции каких-либо повреждений возникает вопрос о соответствии свойств материала проекту и условиям эксплуатации. Механические испытания проводятся с целью оценки качества материала и установления соответствия его механических свойств требованиям ТНПА. Все методы определения механических свойств материала делят на разрушающие и неразрушающие. На большинстве объектов НПЗ ТНПА предусматривают разрушающие методы определения механических свойств. Стандартные испытания на растяжение и ударный изгиб входят в основные способы оценки состояния материала НПО. Как правило, проведение таких испытаний трудоемко, требует больших затрат времени и средств. Это обусловлено необходимостью изготовления значительного количества образцов (как правило, не менее двух – трех для каждого вида испытаний), вырезки образцов непосредственно из конструкций с последующим их ремонтом. Для оценки состояния материала интерес представляют механические свойства в локальных участках, в которых действуют максимальные напряжения [58]. Это имеет существенное значение, поскольку, как показано в работах [49, 59], разрушение металла при изгибе, кручении и растяжении начинается именно с данных участков. Поэтому механические свойства стандартных образцов для испытаний на растяжение и ударный изгиб лишь косвенно отражают свойства материала наиболее нагруженных локальных участков конструкции. Применительно к задаче диагностирования материала оборудования особый интерес представляет возможность определения механических свойств материала неразрушающим способом.

Результаты работ последних лет открыли большие информационные возможности данных, получаемых при измерении твердости, что позволяет достаточно точно судить о механических свойствах, получаемых при испытании образцов на растяжение, сжатие, ударный изгиб и др. Кроме того, возможность получения диаграмм испытания на твердость инденторами различной формы позволяет находить корреляцию твердости с пределами текучести и прочности, пластическими характеристиками и др. [47, 49, 60, 61, 62, 63].

В работе [64] определено наличие взаимосвязей между единичными и комплексными механическими характеристиками (таблицы 1.1, 1.2). В таблице 1.1 им присвоены номера, а в таблице 1.2 приведены значения коэффициентов корреляции между различными характеристиками.

Таблица 1.1 – Механические характеристики и их сочетания, используемые для получения взаимосвязей [64]

№№ характеристик	Характеристики	№№ связей	Характеристики	№№ характеристик	Характеристики
1	$\sigma_B$	6	$\sigma_B/\sigma_{0,2}$	11	$\sigma_{0,2} \times \psi$
2	$\sigma_{0,2}$	7	$\sigma_B \times \delta_5$	12	$KCU/\psi$
3	$\delta_5$	8	$\psi/\delta_5$	13	$\sigma_B/KCU$
4	$\psi$	9	$\sigma_B \times \psi$	14	$\sigma_{0,2}/KCU$
5	$KCU$	10	$\sigma_{0,2} \times \delta_5$	15	$KCU/\delta_5$

Таблица 1.2 – Значения коэффициента корреляции между различными механическими характеристиками (нумерация – в таблице 1.1) [64]

Корреляционные связи	Коэффициент корреляции $r$	Корреляционные связи	Коэффициент корреляции $r$	Корреляционные связи	Коэффициент корреляции $r$
1 — 2	0,888	2 — 9	0,679	5 — 12	0,813
1 — 9	0,681	2 — 11	0,842	5 — 15	0,473
1 — 10	0,335	2 — 13	0,454	7 — 10	0,736
1 — 13	0,501	2 — 14	0,581	8 — 11	0,720
1 — 14	0,529	3 — 6	0,670	9 — 10	0,515
2 — 3	-0,582	3 — 7	0,831	9 — 11	0,913
2 — 6	-0,708	4 — 9	0,574	13 — 14	0,954

Связи, для которых коэффициент корреляции  $r \geq 0,7$ , являются значимыми со статистической точки зрения [65, с. 350]. Таким образом, на основании данных таблицы 1.2 можно утверждать, что между различными механическими характеристиками существует взаимосвязь. Более тесные связи между механическими характеристиками наблюдаются внутри тех групп механических свойств, которые характеризуют прочность, пластичность, упругость, а связь между этими группами свойств менее точная [66]. Ударная вязкость больше связана с пластичностью, чем с прочностью. Поэтому на практике целесообразно устанавливать связи между механическими характеристиками для:

- отдельных марок сталей;
- отдельных групп сталей одного структурного класса;
- всех марок сталей без разделения их на группы.

Однако связи между всеми марками сталей менее значимы, чем для отдельных марок или групп сталей [64].

В таблице 1.3 приведено обобщение основных существующих корреляционных уравнений, связывающих твердость с другими механическими свойствами материалов, а также механические характеристики между собой. Данные таблицы показывают, что твердость имеет корреляционную

связь с механическими характеристиками, получаемыми при испытании на растяжение, сжатие и трещиностойкость. При этом количество корреляционных уравнений, связывающих твердость с пределами текучести и прочности значительно превышает количество уравнений, связывающих твердость с относительными удлинением и сужением. Большинство уравнений устанавливают связь между значением твердости, определенной сферическим индентором ( $HV$ ,  $H$  и  $H_{0,2}$ ), и механическими характеристиками. Однако, по нашему мнению, наиболее перспективными являются уравнения, основанные на связи значения твердости по Виккерсу и параметров пирамидального отпечатка с механическими свойствами. Это связано с тем, что по результатам определения твердости по Виккерсу можно косвенно оценивать как прочностные, так и пластические характеристики материала. Данная оценка возможна вследствие того, что форма отпечатка, полученного при измерении твердости по Виккерсу, выражает взаимосвязь между величиной деформации, отражающей пластические свойства материала, и твердостью, характеризующей напряжение [47, 67]. Основа данных взглядов положена в работах В.К. Григоровича и Ю.А. Киселева.

При измерении твердости материалов, имеющих различный химический состав, сочетание механических свойств, принадлежащих к разному структурному классу, а также после различной термической обработки сталей одного структурного класса получают отпечатки, имеющие разную форму. На отпечатках наблюдается отличие их проекций от квадратных: проекции имеют вогнутые или выпуклые стороны (рисунки 1.17 и 1.18).

Отпечаток с выпуклыми гранями характерен для пластичных материалов (например, отожженной стали, меди, алюминия и др.) (см. рисунок 1.18 а) [47, 67]. Отпечаток без искажения граней характерен для материалов со средней твердостью (например, сталь после отпуска и др.) (см. рисунок 1.18 б) [47, 67]. Отпечаток с вогнутыми гранями характерен для материалов с высокой твердостью (например, сталь после пластического деформирования и др.) (см. рисунок 1.18 в) [47, 67]. Таким образом, по форме отпечатка можно оценивать особенности структурного состояния материала.

Деформации в материале при измерении твердости по Виккерсу неодинаковы по различным радиальным направлениям. Силы, действующие в вершинах ( $N_A$  и  $N_B$ ) и в центре сторон отпечатка ( $N_K$ ) (рисунок 1.19), при внедрении пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$  выражаются уравнениями [68]:

$$N_A = N_B = 0,25 \cdot N; \quad (1.17)$$

$$N_K = 0,34 \cdot N, \quad (1.18)$$

где  $N$  — усилие, действующее на пирамидальный индентор.

Таблица 1.3 – Корреляционные уравнения, выражающие связь между механическими свойствами материалов

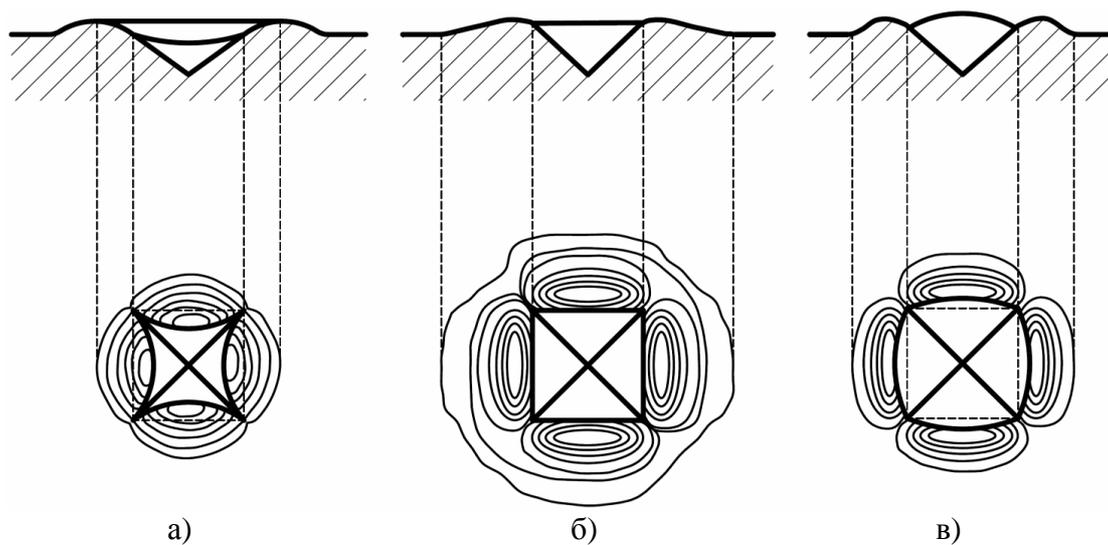
Материал	Формула	Источник
<i>Взаимосвязь твердости с пределом прочности</i>		
Конструкционные стали твердостью <i>HB</i> : – 120...175; – 175...450	$\sigma_B = 3,4 \cdot HB$ , МПа $\sigma_B = 3,5 \cdot HB$ , МПа	[45]
Сталь 20	$\sigma_B = 3,6 \cdot HB$ , МПа	[69]
Медь, латунь, бронза: – отожженная; – наклепанная	$\sigma_B = 5,5 \cdot HB$ , МПа $\sigma_B = 4,0 \cdot HB$ , МПа	[45]
Алюминий и алюминиевые сплавы твердостью <i>HB</i> 20...45	$\sigma_B = (3,3 \dots 3,6) \cdot HB$ , МПа	[45]
Дюралюминий: – отожженный; – после закалки и старения	$\sigma_B = 3,6 \cdot HB$ , МПа $\sigma_B = 3,5 \cdot HB$ , МПа	[45]
Конструкционные стали	$\sigma_B = 3,33 \cdot H_{\max}$ , МПа	[49]
Аустенитные стали (типа 08X18H10T, 12X18H10T, 10X17H13M2T и др.)	$\sigma_B = 3 \cdot H_{\max} + 8$ , МПа	[70]
Сталь 08X18H12T при диаметре отпечатка: – $d \geq 3,4$ мм – $d < 3,4$ мм	$\sigma_B = 3 \cdot HB + (10 \cdot d - 25)$ , МПа $\sigma_B = 3 \cdot HB + (10 \cdot d - 22)$ , МПа	[71]
Углеродистые и низколегированные стали (перлитного класса)	$\sigma_B = 0,365 \cdot HB^{0,989}$ , МПа	[49]
Аустенитные стали (типа 08X18H10T, 12X18H10T, 10X17H13M2T и др.)	$\sigma_B = 0,3 \cdot HB + 140$ , МПа	[49]
Сплавы нимоник	$\sigma_B = 0,28 \cdot HB + 280$ , МПа	[49]
Сталь 12MX	$\sigma_B = 0,337 \cdot HB + 21$ , МПа	[49]
Сталь 15XM	$\sigma_B = 0,337 \cdot HB + 17$ , МПа	[49]
Сталь 12MX, 15XM	$\sigma_B = 0,35 \cdot HB$ , МПа	[72]
Сталь 12X1MФ ( $HB \leq 1275$ МПа)	$\sigma_B = 0,335 \cdot HB + 17$ , МПа	[49]
Сталь 12X1MФ ( $HB 1275 \dots 1650$ МПа)	$\sigma_B = 0,35 \cdot HB$ , МПа	[72]
Сталь 15X1MФ ( $HB \leq 1600$ МПа)	$\sigma_B = 0,312 \cdot HB + 70$ , МПа	[49]
Сталь 15X1M1Ф ( $HB 1600 \dots 2000$ МПа)	$\sigma_B = 0,36 \cdot HB$ , МПа	[72]
Сталь 15X1M1ФЛ	$\sigma_B = 0,29 \cdot HB + 80$ , МПа	[49]
Сталь 20XMЛ	$\sigma_B = 0,35 \cdot HB - 11$ , МПа	[49]
Стали 20XMЛ, 20XMФЛ и 15X1M1ФЛ	$\sigma_B = 0,328 \cdot HB + 20$ , МПа	[49]
Стали 20XMЛ, 20XMФЛ, 15X1M1ФЛ ( $HB 1571 \dots 1961$ МПа)	$\sigma_B = 0,257 \cdot HB - 116$ , МПа	[72]
Сталь 09X1M ( $HB 981 \dots 1766$ МПа)	$\sigma_B = 0,3 \cdot HB + 64$ , МПа	[72]
Сталь 09X1MФ ( $HB 981 \dots 1766$ МПа)	$\sigma_B = 0,3 \cdot HB + 19$ , МПа	[72]
Конструкционные стали (аустенитного класса)	$\sigma_B \pm 50 = 3,4 \cdot HB$ , МПа	[73]
Углеродистые стали (после нормализации и отпуска)	$\sigma_B \pm 40 = 3,8 \cdot HB$ , МПа	[73]
Конструкционные стали	$\sigma_B = HV \cdot (0,285 + 0,057 \cdot S)$ , МПа	[74]
Сталь 09Г2	$\sigma_B = 2,7 \cdot HB + 80$ , МПа	[75]
Титановый сплав ВТ-22	$\sigma_B = 643 + 1,5 \cdot HB$ , МПа $\sigma_B = 1277 - 39,58 \cdot d_{\text{отп}}$ , МПа	[76]

Продолжение таблицы 1.3

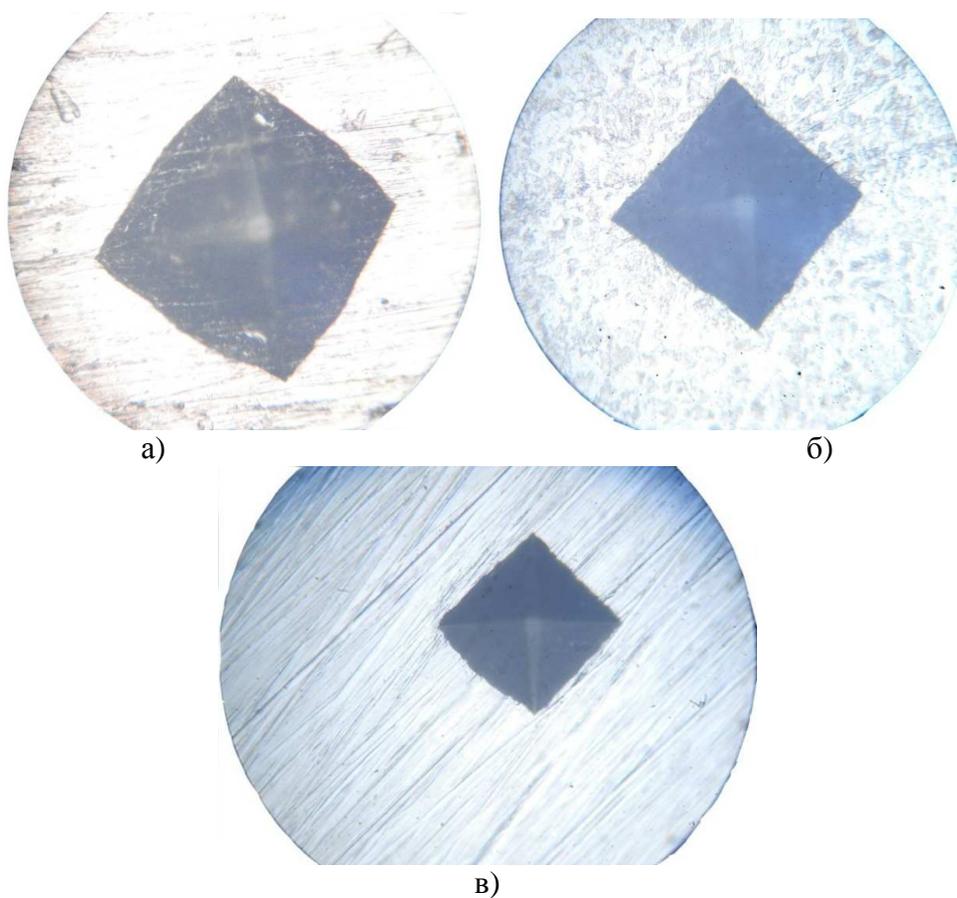
Материалы	Формула	Источник
Алюминиевые сплавы	$\sigma_B = 0,3 \cdot HV$ , МПа	[77]
Конструкционные стали	$\sigma_g = 95,5 \cdot (\sqrt{122 + H} - 12,2)$ , МПа $H = \frac{9000}{130 - HRB}$ $H = 0,82 \cdot HV$	[48]
Конструкционные стали с $HV \leq 360$	$\sigma_g = 10,55 \cdot (\sqrt{122 + HV} - 11,05)$ , МПа	[78]
Конструкционные стали с $HV > 360$	$\sigma_B = 0,32 \cdot HB$ , МПа	[78]
Стали 45X1, 35X3NM, 60	$HV = 3,16 \cdot \sigma_B$ , МПа	[79]
<i>Взаимосвязь твердости с пределом текучести</i>		
Углеродистые и низколегированные стали (перлитного класса)	$\sigma_{0,2} = 0,05 \cdot H_{0,2}^{1,37}$ , МПа $\sigma_{0,2} = 0,0496 \cdot H_{0,5}^{1,345}$ , МПа $\sigma_{0,2} = 0,367 \cdot HB - 240$ , МПа	[49]
Сталь 20	$\sigma_{0,2} = \frac{0,41 \cdot HB - 167}{1,37}$ , МПа	[72]
Стали 12MX, 15XM	$\sigma_{0,2} = 0,545 \cdot HB - 471$ , МПа	[72]
Конструкционные стали	$\sigma_{0,2} = 0,3 \cdot H_{0,2}$ , МПа	[49]
Конструкционные стали: $HB \leq 1500$ МПа $HB > 1500$ МПа	$\sigma_{0,2} = 0,2 \cdot HB$ , МПа $\sigma_{0,2} = 0,367 \cdot HB$ , МПа	[49]
Сталь 12MX	$\sigma_{0,2} = 0,25 \cdot HB - 19$ , МПа	[49]
Сталь 15XMЛ	$\sigma_{0,2} = 0,25 \cdot HB - 23,5$ , МПа	[49]
Сталь 20XM	$\sigma_{0,2} = 0,31 \cdot HB - 152$ , МПа	[49]
Сталь 12X1MФ ( $HB \leq 1275$ МПа)	$\sigma_{0,2} = 0,235 \cdot HB + 18$ , МПа	[49]
12X1MФ ( $HB 1275 \dots 1650$ МПа)	$\sigma_{0,2} = 0,545 \cdot HB - 471$ , МПа	[72]
Сталь 15X1M1Ф	$\sigma_{0,2} = 0,38 \cdot HB - 235$ , МПа	[49]
Сталь 15X1M1ФЛ: $HB \leq 2000$ МПа $HB > 2000$ МПа	$\sigma_{0,2} = 0,29 \cdot HB - 114$ , МПа $\sigma_{0,2} = 0,57 \cdot HB - 627$ , МПа	[49]
Стали 20XMЛ, 20XMФЛ, 15X1M1ФЛ ( $HB 1571 \dots 1961$ МПа)	$\sigma_{0,2} = \frac{0,33 \cdot HB - 227}{0,87}$ , МПа	[72]
Стали 20XMЛ, 20XMФЛ, 15X1M1ФЛ: $HB \leq 1600$ МПа $HB > 1600$ МПа	$\sigma_{0,2} = \frac{0,328 \cdot HB - 129}{1,21}$ , МПа $\sigma_{0,2} = \frac{0,328 \cdot HB - 231}{0,87}$ , МПа	[49]
Сталь 16ГНМ	$\sigma_{0,2} = \frac{0,3 \cdot HB - 50}{1,03}$ , МПа	[49]
Конструкционные стали	$\sigma_{0,2} = (0,182 \dots 0,220) \cdot H$ , МПа $H = \frac{9000}{130 - HRB}$ $H = 0,82 \cdot HV$	[48]
Сталь 09Г2	$\sigma_{0,2} = 0,196 \cdot H_{0,4} + 12,6$ , МПа	[75]

Окончание таблицы 1.3

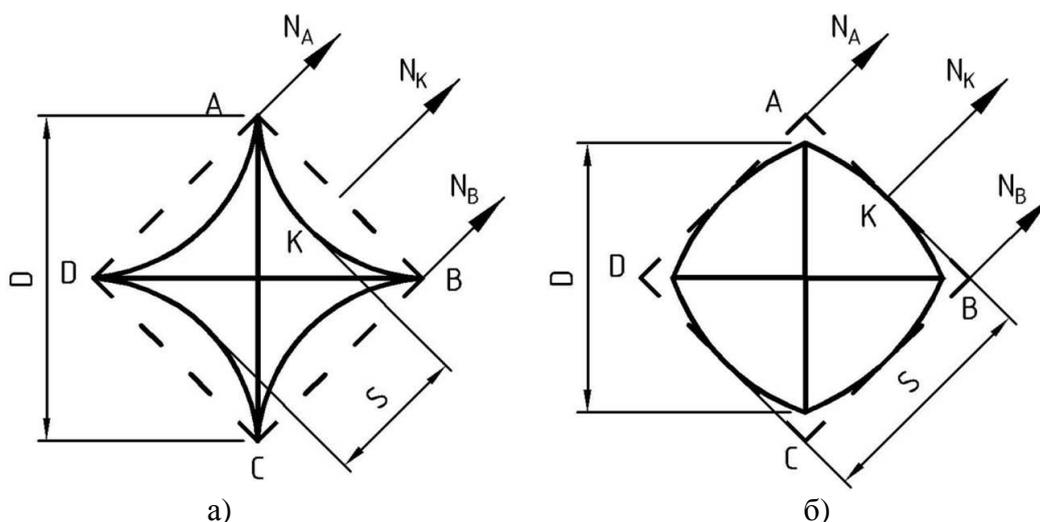
Материалы	Формула	Источник
Алюминиевые сплавы	$\sigma_{0,2} = 0,23 \cdot HV$ , МПа	[80]
Стали 45X1, 35X3НМ, 60	$HV = 3,62 \cdot \sigma_{0,2}$ , МПа	[79]
<i>Взаимосвязь твердости с относительным удлинением</i>		
Конструкционные стали	$\delta_5 = D \cdot (9,38 + 24,43 \cdot S)$ , %	[81]
Низколегированные стали	$\delta_5 = 1725 \cdot H^{-0,79}$ , %	[48, 82]
Сталь 09Г2	$\delta_5 = -0,230 \cdot HB + 67,6$ , %	[75]
<i>Взаимосвязь твердости с относительным сужением</i>		
Углеродистые стали ( $H < 200$ )	$\psi = \frac{4515}{H} + 0,333 \cdot H + 25$ , %	[48, 82]
Низколегированные стали	$\psi = \frac{6100}{H} + 36,6$ , %	[48, 82]
Конструкционные стали	$\psi = 16,4 + 80 \cdot S$ , %	[81]
<i>Прочие взаимосвязи</i>		
Конструкционные стали	$KCU = k \cdot \frac{\psi}{1 - \psi}$ , МДж/м <sup>2</sup>	[83]
Твердые сплавы	$S = 10 \cdot \frac{HV}{(c \cdot 10^{-6})}$ , МПа/м $S$ – показатель трещиностойкости, МПа/м; $c$ – длина трещины, мкм	[84]
Стали 12МХ, 15ХМ	$\delta_5 = \frac{3,17 \cdot 10^4}{\sigma_B + 2 \cdot \sigma_{0,2}}$ , %	[72]
Сталь 12Х1МФ ( $HB 1275 \dots 1650$ МПа)	$\delta_5 = \frac{2,23 \cdot 10^4}{\sigma_B + 2 \cdot \sigma_{0,2}}$ , % ( $\sigma_{0,2} \leq 314$ МПа) $\delta_5 = \frac{3,71 \cdot 10^4}{\sigma_B + 2 \cdot \sigma_{0,2}}$ , % ( $\sigma_{0,2} > 314$ МПа)	[72]
Конструкционные стали	$\delta_5 = 0,18 - \sigma_B \cdot 10^{-5}$ , %	[105, 107]
Углеродистые стали ( $\sigma_B \leq 850$ МПа)	$\sigma_B \cdot \delta_5 = 10000$	[73]
Углеродистые стали (после нормализации)	$\delta_5 = (80,16 - 1,19 \cdot \sigma_B + 0,005 \cdot \sigma_B^2) \pm 1,8$ , %	[73]
Сталь 25	$\delta_5 = (49,23 - 0,364 \cdot \sigma_B) \pm 1,71$ , %	[73]
Сталь 35	$\delta_5 = (45,03 - 0,307 \cdot \sigma_B) \pm 1,79$ , %	[73]
Сталь 55	$\delta_5 = (38,63 - 0,245 \cdot \sigma_B) \pm 2,13$ , %	[73]
Стали 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т	$\sigma_B = (140 \pm 7) - KCU$ , МПа	[73]
Стали 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т	$\sigma_B = [(140 \pm 7) \cdot (100 - \psi)] / 100$ , МПа	[73]
Сталь 10Х17Н13М2Т	$\sigma_B = (153 \pm 10) - 3 \cdot KCU$ , МПа	[73]
Сталь 10Х17Н13М2Т	$\sigma_B = [(290 \pm 10) \cdot (100 - \psi)] / 100$ , МПа	[73]
Низколегированные стали	$\sigma_B - 11,0 = \sigma_{0,2} \pm 9,6$ , МПа	[73]
Низколегированные стали	$\delta_5 = (32,6 - 0,17 \cdot \sigma_{0,2}) \pm 4,1$ , %	[73]
Низколегированные стали	$\psi = (89,7 - 0,31 \cdot \sigma_{0,2}) \pm 7,2$ , %	[73]
Низколегированные стали	$KCU = 0,1 \cdot [(37,0 - 0,25 \cdot \sigma_{0,2}) \pm 4,8]$ , МДж/м <sup>2</sup>	[73]
Конструкционные стали	$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_B - \sigma_m}{0,75 \cdot [(\delta/\psi) \cdot (7,5 - 4,167 \cdot (\delta/\psi) - 1)]}$ , МПа	[85]



а) – отпечаток с вогнутыми гранями; б) – отпечаток без искажения граней;  
 в) – отпечаток с выпуклыми гранями  
 Рисунок 1.17 – Типы отпечатков, получаемых при определении твердости по Виккерсу, с деформированной зоной материала [47]



а) – медь (×400); б) – сталь 20 (×400); в) – сталь 15X5М, закалка 900 °С (×500)  
 Рисунок 1.18 – Примеры пирамидальных отпечатков на материале



$D$  – диагональ отпечатка, мм;  $S$  – ширина отпечатка, мм;  $A, B, C, D$  – края отпечатка;  $K$  – середина стороны отпечатка;  $N_A, N_B, N_K$  – усилия, действующие в краях и в центре стороны отпечатка, соответственно

**Рисунок 1.19 – Пирамидальные отпечатки с вогнутыми (а) и выпуклыми (б) гранями до и после приложения нагрузки с усилиями, действующими в плоскости поверхности материала**

Так как сила, действующая в точке  $K$ , больше, чем силы в точках  $A$  и  $B$ , соответственно и величина деформации в этой точке больше. Следовательно, деформация металла около стороны отпечатка распределяется так, что в центре стороны она достигает максимальных значений, постепенно уменьшаясь к краям. Поэтому отпечатки пирамидального индентора имеют форму, отличающуюся от квадрата, а форма отпечатка позволяет косвенно оценивать пластичность материала, т.к. она определяется способностью материала воспринимать пластическое деформирование.

В работах [74, 81] установлены взаимосвязи твердости  $HV$  и параметров пирамидального отпечатка (ширина и диагональ) с механическими характеристиками ( $\sigma_b, \delta_5, \psi$ ) сталей общего машиностроения (стали 15, 45, 38ХА, 18Х2Н4ВА, 40ХНВА, 50ХФА, 25ХГСА и др.). Однако для изготовления НПО применяются другие материалы (например, стали 09Г2С, 15Х5М, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т и др.), которые отличаются от указанных химическим составом, структурой и сочетанием механических свойств. Поэтому актуальной является задача развития существующих представлений о связи параметров формы пирамидального отпечатка, полученного при определении твердости по Виккерсу, с механическими характеристиками для материала конструкций НПО. Установив указанную взаимосвязь для отдельных марок сталей можно проводить косвенную оценку механических характеристик по результатам измерения твердости для любого элемента конструкции НПО и тем самым определять состояние материала без вырезки образцов.

## 1.4 Выводы

1. На основе проведенного анализа сроков службы различных объектов НПЗ (реакторы, колонны, печи, теплообменники, конденсаторы-холодильники, емкости, резервуары и др.) установлено, что более 60 % НПО эксплуатируется за пределами расчетного ресурса. Прогрессирующее старение материала увеличивает риск внезапного разрушения этого оборудования. На основании анализа разрушений и дефектов материалов (на базе анализа более 70 объектов НПЗ) установлено, что отказам оборудования и разрушению конструкций предшествует деградация структуры и, как следствие, изменение механических свойств материала в эксплуатации.

2. Из множества разработанных способов оценки состояния материала более объективную оценку ресурса можно выполнить используя комплекс механических характеристик. Кроме того, более объективно оценить возможность безопасной эксплуатации оборудования можно при использовании количественного способа контроля изменения комплекса механических свойств материала в эксплуатации и прогнозирования его предельного состояния.

3. Определение механических свойств материала НПО разрушающим способом по ТНПА трудоемко, требует длительного времени, приводит к снижению несущей способности конструкции и непригодности объекта к дальнейшей эксплуатации без проведения ремонтных работ. Поэтому перспективным является неразрушающий способ определения механических свойств материала, основанный на определении твердости и ее взаимосвязи с другими механическими характеристиками. Несмотря на большое количество исследований по неразрушающему определению механических характеристик материала, данные методы еще не получили должного применения в нефтеперерабатывающей промышленности. Это объясняется недостаточным теоретическим и экспериментальным обоснованием взаимосвязи исследуемых характеристик с механическими свойствами материала, большим количеством методик и эмпирических формул, имеющих ограниченное применение.

4. При теоретическом исследовании связи напряжений при растяжении и внедрении индентора в материал изучены решения задач о вдавливании шара, конуса и пирамиды. Получено много корреляционных уравнений для определения пределов текучести и прочности материала. Гораздо меньше сведений имеется по определению пластических характеристик неразрушающим способом. Установленные уравнения применимы для отдельных марок или групп сталей.

5. Существующие подходы к установлению взаимосвязи между результатами определения твердости и механическими свойствами в большинстве основаны на использовании в расчете только диаметра или глубины отпечатка. Однако, для получения большего количества информации, простого измерения площади отпечатка и усилия на индентор недостаточно. Необходимо учитывать поведение краевой области отпечатка. По нашей оценке, перспективным направле-

нием является развитие взглядов о связи результатов определения твердости по Виккерсу (значение твердости  $HV$ , диагонали и ширины отпечатка) с механическими свойствами материала. Аргументом этому служит универсальность способа определения твердости по Виккерсу (чувствительность к изменению структуры и механических свойств (как прочностных, так и пластических), независимость от нагрузки, геометрическое и механическое подобие получаемых отпечатков). Для сталей, применяемых для изготовления НПО, необходимо развитие взглядов на взаимосвязь геометрических параметров пирамидального отпечатка с механическими свойствами и структурой материала, чтобы получить новые экспериментальные данные и выявить зависимости между параметрами пирамидального отпечатка и механическими свойствами материала.

### 1.5 Цель и задачи исследования

Цель исследования — обеспечение безопасной эксплуатации НПО, выработавшего нормативный срок службы, на основе контроля деградации структуры, изменения механических свойств и прогнозирования предельного состояния материала.

Задачи исследования:

- 1) разработать неразрушающий способ определения ударной вязкости  $KCU$  материала НПО по результатам анализа геометрических параметров пирамидального отпечатка, полученного при определении твердости по Виккерсу;
- 2) уточнить и скорректировать для объектов исследований неразрушающий способ определения предела прочности  $\sigma_b$ , относительного удлинения  $\delta_5$  и относительного сужения  $\psi$  материала;
- 3) найти критерий определения степени деградации материала и разработать способ оценки изменения механических свойств материала оборудования НПЗ по комплексному показателю;
- 4) выполнить исследования по возможности эффективной оценки фактического состояния материала НПО по степени деградации структуры. Установить зависимость между размером коагулированных карбидов и состоянием теплоустойчивых хромомолибденовых сталей с оценкой возможности их применения при эксплуатации НПО;
- 5) установить зависимость изменения комплексного показателя механических свойств материала от времени эксплуатации оборудования. Разработать способы определения скорости изменения комплекса механических свойств материала в эксплуатации, количественной оценки времени до достижения материалом НПО предельного состояния и срока его остаточной безопасной эксплуатации;
- б) апробировать применимость разработанных зависимостей и способов, результаты исследований внедрить в практику диагностирования НПО.

В работе рассмотрены вопросы оценки качества материала НПО, определения его старения под воздействием эксплуатационных факторов и прогнозирования предельного состояния материала.

## ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

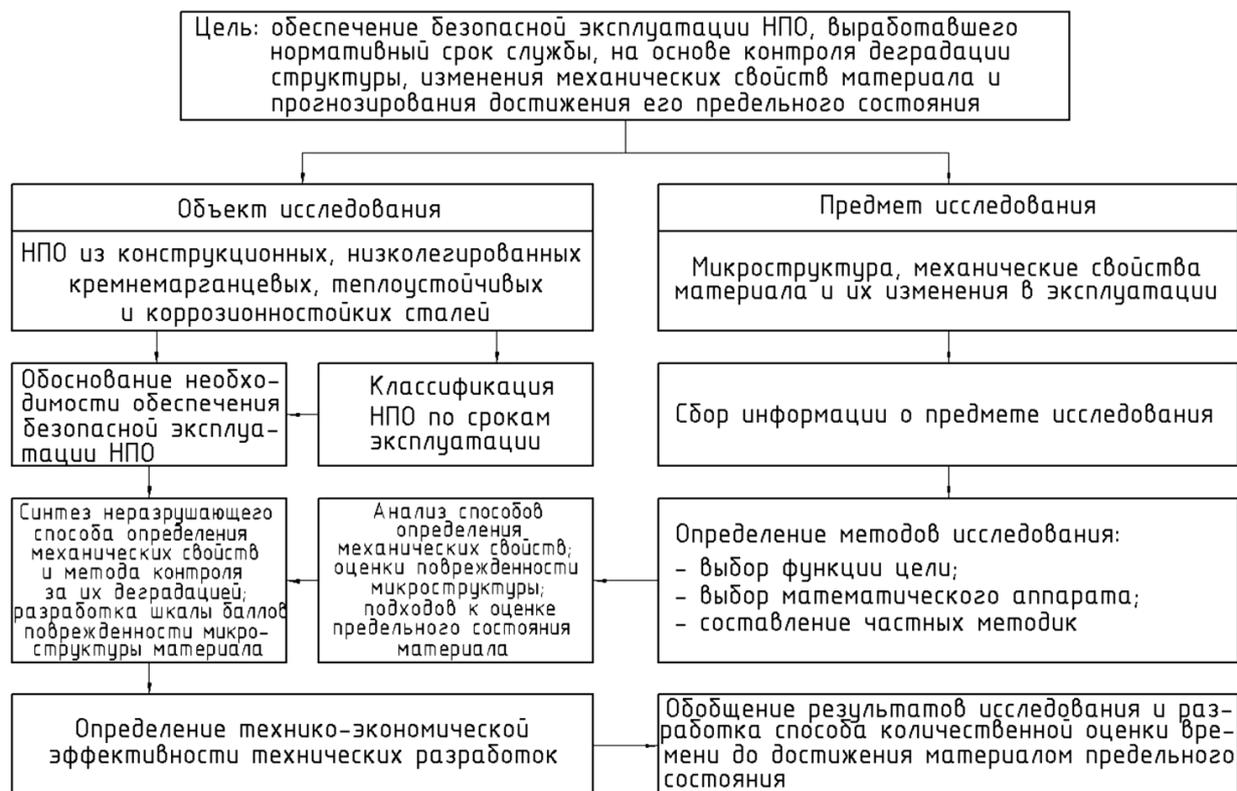
### 2.1 Общая методика исследования

Базой общей методики исследования явились положения теории познания и законы формальной логики. В соответствии с поставленной целью были определены объект и предмет исследования.

Объектом исследования было НПО и его конструкции, изготовленные из конструкционных углеродистых, низколегированных кремнемарганцевых, теплоустойчивых и коррозионностойких сталей. Выбор объекта исследований обусловлен необходимостью обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации оборудования НПЗ, выработавшего проектный срок службы.

Предмет исследования составляли структура, механические свойства материала и их изменения. Выбор предмета исследований обусловлен тем, что разрушение оборудования НПЗ в большинстве случаев происходит вследствие деградации структуры и, как следствие, изменения механических свойств материала.

Теоретические и экспериментальные исследования проводились поэтапно согласно блок-схеме (рисунок 2.1).



**Рисунок 2.1 – Блок-схема общей методики исследования**

Предварительное изучение предмета исследования показало, что перспективные методы повышения безопасности эксплуатации НПО сводятся к контролю за деградацией структуры и изменением механических свойств при эксплуатации, а также прогнозированию предельного состояния материала.

Основные исследования включали анализ способов определения механических свойств, оценки поврежденности микроструктуры, подходов к оценке фактического состояния материала и ресурса безопасной эксплуатации оборудования, разработку метода контроля за деградацией структуры и свойств, шкалы баллов поврежденности микроструктуры материала, способа количественной оценки времени до достижения материалом НПО предельного состояния.

## **2.2 Материалы, использованные в исследованиях**

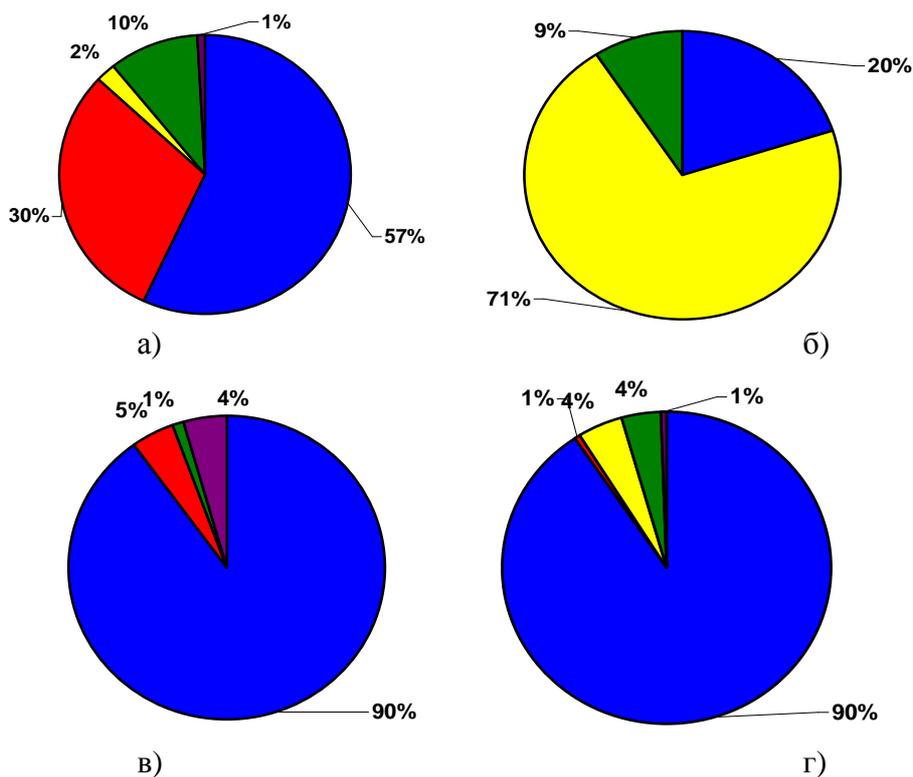
Исследования деградации структуры и изменения механических свойств материала НПО были проведены на 79 различных объектах НПЗ (теплообменники, емкости, реакторы, колонны, трубопроводы, змеевики и др., а также их элементы). При этом учитывались время использования и условия эксплуатации объектов (вид рабочей среды, ее температура и давление).

Анализ материального исполнения сосудов и аппаратов, печей, резервуаров и трубопроводов технологических установок НПЗ показал, что для изготовления указанных объектов преимущественно используется четыре группы сталей (рисунок 2.2):

- конструкционные углеродистые стали (Ст3, сталь 20 и др.);
- низколегированные кремнемарганцевые стали (16ГС, 09Г2С, 10Г2С1 и др.);
- теплоустойчивые стали (12ХМ, 15ХМ, 15Х5М, 13Х9М и др.);
- коррозионностойкие стали (08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т и др.).

Поэтому в исследованиях использованы стали указанных групп с изучением деградации их структуры и изменения механических свойств.

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 исследования проводились на указанных сталях, являющихся характерными представителями соответствующих групп. К тому же, как показали исследования, результаты, полученные для данных сталей, распространяются и на другие стали из группы. Химический состав сталей приведен в таблице 2.1. С целью получения более полных экспериментальных данных, в исследованиях дополнительно были использованы также и другие стали (например, Ст3, 16ГС, 12ХМ, 08Х18Н10Т и др.).



■ — углеродистые стали; ■ — низколегированные кремнемарганцевые стали;  
 ■ — теплоустойчивые стали; ■ — коррозионностойкие стали;  
 ■ — другие группы сталей

Рисунок 2.2 — Материальное исполнение сосудов и аппаратов (а), печей (б), резервуаров (в) и трубопроводов (г) технологических установок НПЗ

Таблица 2.1 — Химический состав сталей [86, 87]

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 может эксплуатироваться до температуры минус 40 °С. Сталь 20 применяется в горячекатаном и нормализованном состояниях для сварных корпусов аппаратов с рабочей температурой до плюс 350 °С, работающих без коррозионноактивных сред, корпусов теплообменников и емкостей, трубопроводов, крюков кранов.

Сталь 09Г2С характеризуется повышенной прочностью по сравнению с углеродистыми сталями. В горячекатаном и нормализованном состояниях сталь имеет: ферритно-перлитную структуру, высокие прочностные свойства при нормальной и повышенной температуре, в том числе высокие пластичность и вязкость в исходном состоянии, а также стабильность этих свойств и структуры после теплового воздействия на материал, 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 [88, с. 16]. В нормализованном состоянии сталь 09Г2С обладает наилучшим уровнем значений механических свойств. После 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, 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-вакуумных трубчаток, газофракционирующих, гидрогенизационного обессеривания нефтепродуктов, каталитического риформирования бензина, глубокой депарафинизации масел и др.

Изделия из стали 15Х5М (трубы, поковки, фитинги и др.) на НПЗ применяют как в отожженном, так и в улучшенном состояниях [88, с. 80]. Трубы из этой стали обладают высокой пластичностью, вязкостью, невысокой твердостью в отожженном состоянии, что обеспечивает их хорошую вальцуемость в ретурбентах и решетках теплообменников. Микроструктура отожженной стали 15Х5М – феррит с карбидами. После улучшения сталь приобретает высокую прочность как при нормальной, так и при повышенной температуре. Микроструктура стали после улучшения – сорбит. Сталь 15Х5М применяется для печных и коммуникационных трубопроводов, пучков теплообменников установок атмосферных и атмосферно-вакуумных трубчаток, термического крекинга, каталитического крекинга, гидроочистки дизельного топлива, блока риформинга установок каталитического риформинга.

Для стали 12Х18Н10Т характерно низкое отношение предела текучести к пределу прочности. Это способствует значительному упрочнению стали при холодной обработке давлением. Сталь имеет высокую коррозионную стойкость, ударную вязкость, относительные удлинение и сужение, технологичность [108, с. 84]. Микроструктура стали 12Х18Н10Т – аустенитная. Сталь применяется как конструкционный материал для НПО, подвергаемый холодной штамповке и сварке – при изготовлении обшивок, оболочек, емкостей, трубопроводов и др.

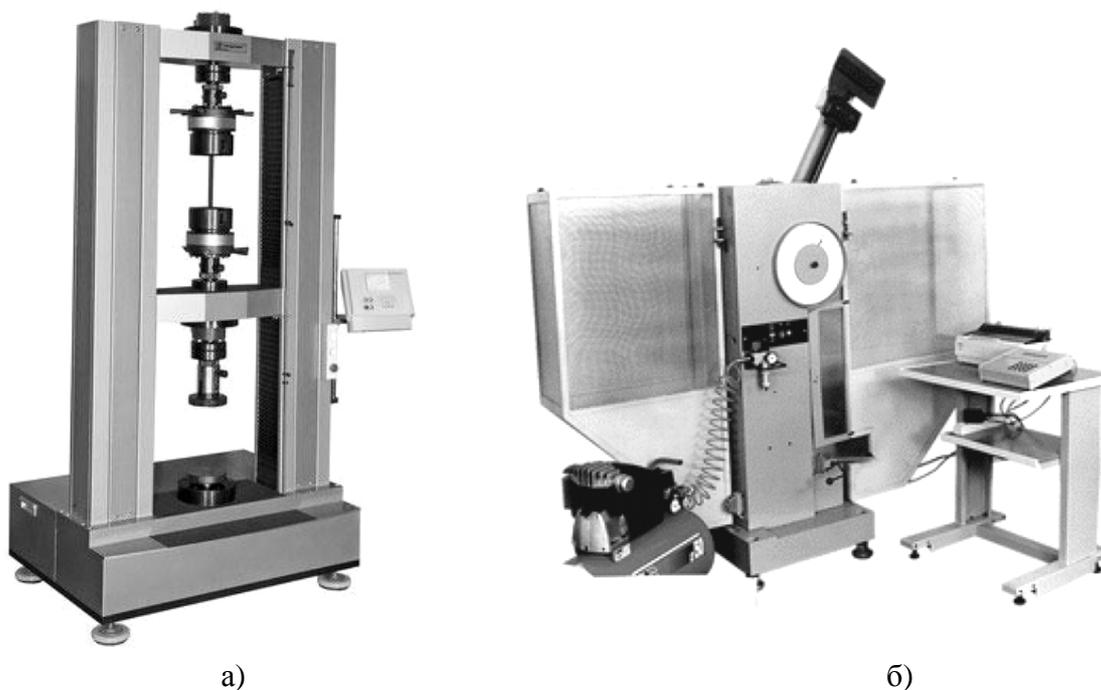
## 2.3 Методики исследований и испытательное оборудование

Отбор проб для испытаний на растяжение и ударный изгиб проводился по ГОСТ 7564 [89]. Из объектов исследования изготавливались стандартные образцы: 1) цилиндрические образцы для испытания на растяжение (образцы № 7, тип III по ГОСТ 1497 [90]); 2) образцы для испытания на ударный изгиб с U-образным концентратором напряжений (образцы № 1 по ГОСТ 9454 [91]).

Испытания на растяжение проводились по ГОСТ 1497 [90] на разрывной машине УТС-110М с разрывным усилием 20 тонн (рисунок 2.3 а). При этом определялись предел прочности  $\sigma_b$ , относительные удлинение  $\delta_5$  и сужение  $\psi$  материала. Определение предела текучести материала в задачу исследований не входило. Испытания на ударный изгиб проводились по ГОСТ 9454 [91] на маятниковом копре МК-300 (рисунок 2.3 б) с определением ударной вязкости  $KCU$  материала.

На испытанных образцах определялась твердость по методу Виккерса. Измерение твердости по Виккерсу в стационарных условиях проводилось на твердомере AFFRI 251 VRSD (рисунок 2.4) алмазной пирамидой с углом при вершине  $136^\circ$  и нагрузкой на индентор 200 Н по ГОСТ 2999 [57].

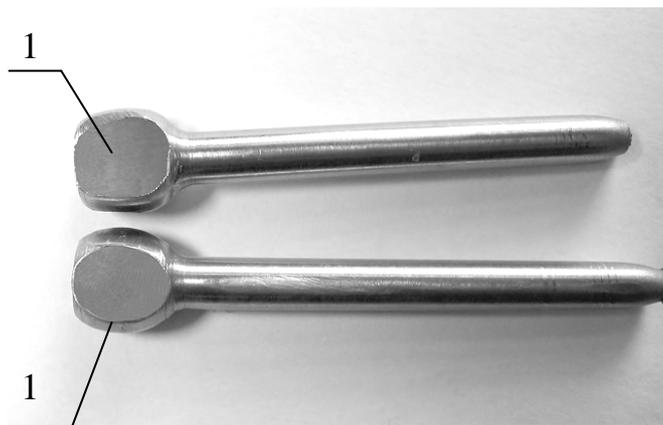
Головки цилиндрических образцов сошлифовывались на плоскость с двух сторон с последующим полированием. Затем на полученных плоских участках измерялась твердость по Виккерсу. На рисунке 2.5 приведена фотография образцов после испытания на растяжение, на которых измерялась твердость по Виккерсу.



а) – разрывная машина УТС-110М; б) – маятниковый копер МК-300  
Рисунок 2.3 – Оборудование для определения механических характеристик стандартными способами (по ГОСТ 1497 и ГОСТ 9454)



**Рисунок 2.4 – Твердомер AFFRI 251 VRSD, использованный для измерения твердости по Виккерсу в стационарных условиях**



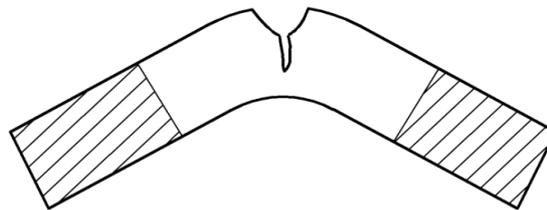
**1 – области, на которых определялась твердость по Виккерсу**

**Рисунок 2.5 – Фотография образцов после испытания на растяжение по ГОСТ 1497**

Грани призматических образцов после определения ударной вязкости также шлифовались до параллельности сторон. На полученных плоских гранях измерялась твердость по Виккерсу. На рисунке 2.6 приведена фотография одного из таких образцов. На рисунке 2.7 приведено схематичное изображение образца после испытания на ударный изгиб с заштрихованными областями, которые показывают места вдавливания пирамидального индентора. Твердость по Виккерсу определялась на поверхностях, не подверженных деформированию от испытания на ударный изгиб.



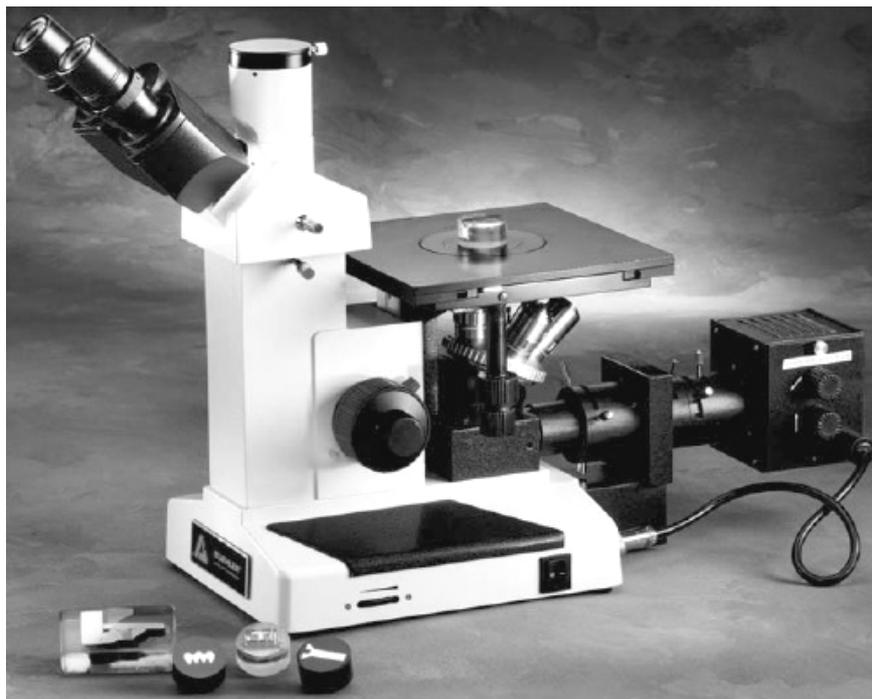
**Рисунок 2.6 – Фотография образца после испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454, на котором измерялась твердость по Виккерсу**



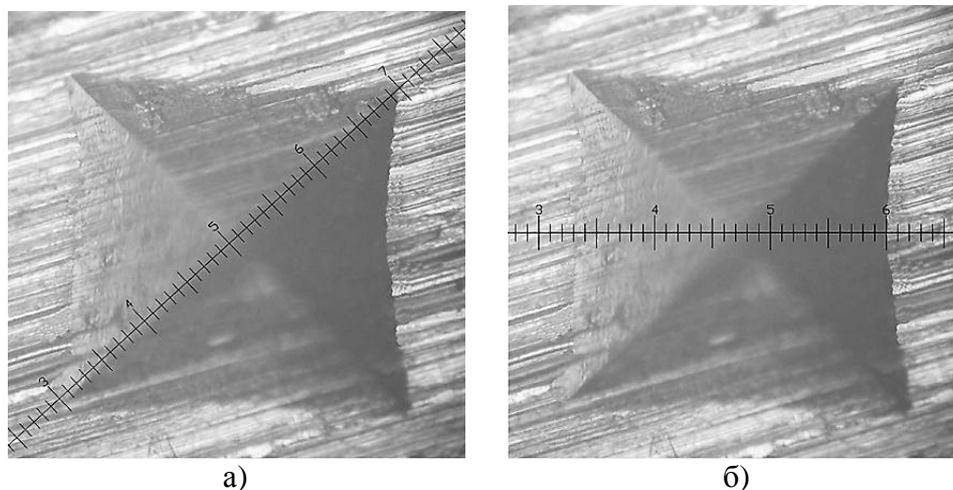
**Рисунок 2.7 – Схема образца (после испытания на ударный изгиб по ГОСТ 9454)**

В зависимости от состояния материала (вид термической обработки, наличие повреждений, возникших в эксплуатации) после измерения твердости по Виккерсу на поверхности образцов получались отпечатки различной формы: с вогнутыми гранями, с выпуклыми гранями и без искажения граней. Так, на материале после отжига и в состоянии поставки получались отпечатки с выпуклыми гранями, после закалки и охрупчивания в эксплуатации – с вогнутыми гранями, а после улучшения – практически без искажения граней. Геометрические параметры пирамидального отпечатка (ширина и диагональ) в стационарных условиях измерялись в двух взаимно перпендикулярных направлениях с использованием окуляр-микрометра на металлографическом микроскопе ViewMet (рисунок 2.8) при увеличении 100, 140 и 400 крат. Пример измерения геометрических параметров пирамидального отпечатка приведен на рисунке 2.9.

Определение механических свойств материала ( $\sigma_B$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ) без разрушения металлоконструкций проводилось по разработанному способу. Механические свойства определялись по формулам взаимосвязи геометрических параметров пирамидального отпечатка (ширина и диагональ) и значения твердости  $HV$  с механическими свойствами [92].



**Рисунок 2.8 – Металлографический микроскоп ViewMet, использованный для определения геометрических параметров пирамидальных отпечатков и исследования микроструктуры материалов**



**а) – измерение диагонали отпечатка; б) – измерение ширины отпечатка  
Рисунок 2.9 — Пример измерения геометрических параметров пирамидального отпечатка (×140, репродукция ×3)**

Определение механических свойств неразрушающим способом, а также по ГОСТ 1497 [90] и 9454 [91] проводилось на одних и тех же образцах, что позволило повысить объективность оценки применимости разработанного способа.

Апробация неразрушающего способа определения механических свойств проводилась непосредственно на конструкциях НПО (на базе нефтеперерабатывающего завода). На поверхности материала в местах, вы-

бранных для проведения контроля, шлифовались участки диаметром 25...35 мм. Для этого предварительно поверхность материала очищалась от ржавчины, окалины и различных повреждений. В качестве инструментов для механической зачистки, а также дальнейшего шлифования и полирования поверхности материала использовались переносная шлифовальная машинка и переносной шлифовально-полировальный станок «Аккурол 2.2» (рисунок 2.10). Зачищенная поверхность шлифовалась несколькими насадками с последовательно убывающей зернистостью шлифовальной бумаги от 1200 до 80. Полирование поверхностей проводилось механическим способом. При этом использовался полировальный круг с алмазной пастой зернистостью 2 мкм.



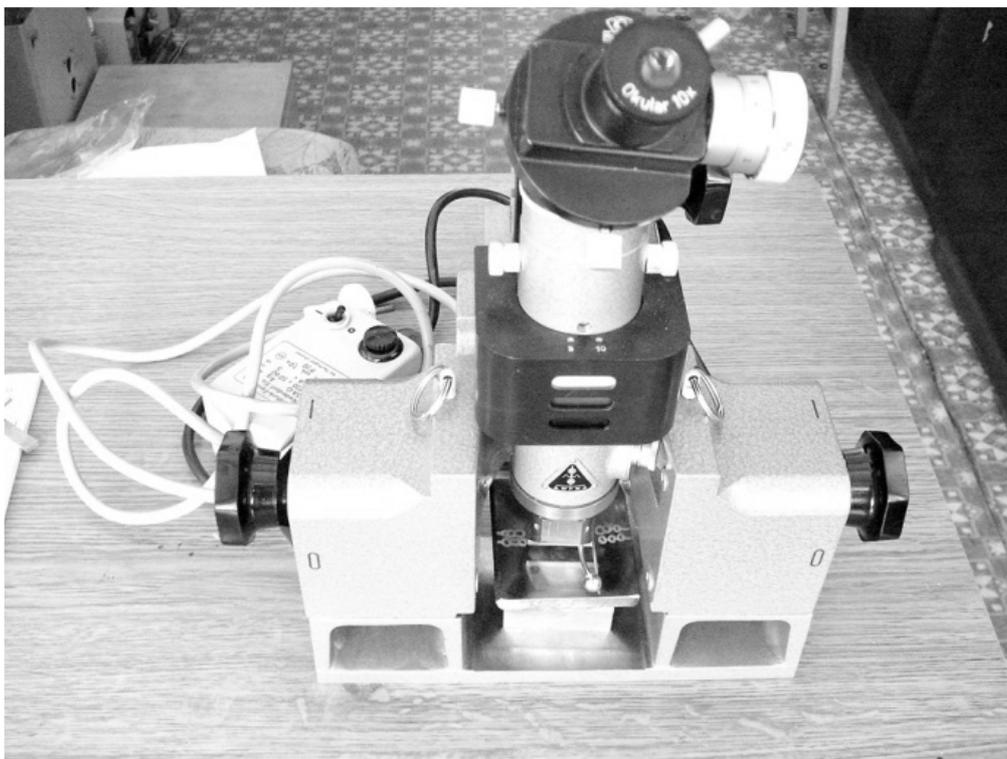
**Рисунок 2.10 – Переносной шлифовально-полировальный станок «Аккурол 2.2», использованный для подготовки поверхности**

Определение твердости по Виккерсу в полевых условиях на технологическом оборудовании проводилось с помощью переносного твердомера МИС 20 (резонансно-импедансного принципа действия) и WPM (статического принципа действия) (рисунок 2.11). Твердость по Виккерсу измерялась алмазной пирамидой с углом между противоположными гранями  $136^\circ$  при нагрузке на индентор 50 Н.

Геометрические параметры пирамидального отпечатка (ширина и диагональ) в полевых условиях измерялись в двух взаимно перпендикулярных направлениях на переносном металлографическом микроскопе ТКМ (рисунок 2.12) при увеличениях 400 крат. Закрепление микроскопа на корпусе объекта проводилось посредством магнита.



а)



б)

а) – твердомер MIC 20; б) – твердомер WPM  
Рисунок 2.11 – Переносные твердомеры, использованные для измерения твердости по Виккерсу материала конструкций НПО



**Рисунок 2.12 – Переносной металлографический микроскоп ТКМ**

Исследование микроструктуры материала в стационарных условиях проводилось на металлографическом микроскопе ViewMet (см. рисунок 2.8), в полевых условиях – на переносном металлографическом микроскопе ТКМ (см. рисунок 2.12).

Для оценки изменения механических свойств сталей, подвергнутых холодному пластическому деформированию и искусственному старению, в сравнении с характеристиками механических свойств сталей в исходном состоянии из исследуемых сталей были изготовлены заготовки размером  $12 \times 12$  мм и длиной 300 мм (по 4 единицы для каждой марки стали). Заготовки с нанесенной на них разметкой длиной 200 мм и шагом 10 мм были подвергнуты растяжению из расчета получения  $(4 \pm 0,5) \%$ ,  $(7 \pm 0,5) \%$  и  $(10 \pm 0,5) \%$  остаточного удлинения. Деформирование заготовок проводилось при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Из деформированных заготовок были изготовлены образцы для испытаний на растяжение по ГОСТ 1497 [90] (для каждой марки стали по 10 образцов) и на ударный изгиб по ГОСТ 9454 [91] (для каждой марки стали по 10 образцов). Образцы для испытаний на растяжение и ударный изгиб, изготовленные из предварительно деформированных заготовок, были подвергнуты нагреву (искусственному старению) при температуре  $(250 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$  с выдержкой 1, 2 и 3 часа при этой температуре с последующим охлаждением на воздухе.

## 2.4 Статистическая обработка результатов экспериментов

Статистическая обработка результатов экспериментов проводилась при помощи математических пакетов Mathcad 13.0 и Statistica 6.0.

### 2.4.1 Алгоритм решения полиномиальной регрессии в математических пакетах Mathcad 13.0 и Statistica 6.0

Для установления зависимостей  $\sigma_{\text{в}} = f(HV, S)$  и  $\delta_5 = f(D, S)$  применялся многомерный регрессионный анализ. Объектом исследования являлась выборка экспериментальных данных, которые представлены в виде массива, состоящего из чисел  $(\sigma_{\text{в}i}, HV_i, S_i)$  и  $(\delta_5, D_i, S_i)$ . Решалась задача аппроксимации указанных зависимостей непрерывными функциями. Эти функции позволяли представить множество экспериментальных точек поверхностью, определяемой многомерным полиномом 2-й степени. Такова постановка задачи регрессии в данном случае, которую также можно назвать сглаживанием данных.

Для решения многомерной полиномиальной регрессии экспериментальных данных в математических пакетах Mathcad 13.0 и Statistica 6.0 выполнялась следующая последовательность действий.

Задавались исходные данные в виде векторов  $X_i$ ,  $Y_i$  и  $Z_i$ . Два вектора ( $Y_i$  и  $Z_i$ ) представляли значения независимых переменных, один вектор ( $X_i$ ) – зависимой переменной.

Составлялся массив данных, значения которого соответствовали значениям независимых переменных [93]:

$$M := \text{augment}(Y, Z). \quad (2.1)$$

Составлялся вектор данных, значения которого соответствовали значениям зависимой переменной [93]:

$$V := X. \quad (2.2)$$

Задавалась степень полиномиальной функции  $n$  ( $n = 2$  – полином являлся параболой).

Задавалась регрессионная функция, и определялись ее коэффициенты [93]:

$$R := \text{regress}(M, V, n). \quad (2.3)$$

Задавалась полиномиальная функция с двумя переменными, использующая коэффициенты регрессии  $R$  [93]:

$$f(x, y) = \text{interp}\left[R, M, V, \begin{pmatrix} Y \\ Z \end{pmatrix}\right]. \quad (2.4)$$

Строилась регрессионная поверхность, проходящая на минимальном расстоянии от экспериментальных точек [93]:

$$F := \text{CreateMesh}(f, \min(Y), \max(Y), \min(Z), \max(Z), 10, 10). \quad (2.5)$$

Определялись коэффициенты каждого мономинального члена полинома при помощи функции Nterms [93]:

$$\text{Nterms}(\text{nvar}, \text{deg}) := \frac{(\text{nvar} + \text{deg})!}{\text{deg!} \times \text{nvar}!} \quad (2.6)$$

– количество переменных полинома:

$$\text{Nvars} := \text{cols}(M); \quad (2.7)$$

– количество исходных данных:

$$\text{Ndata} := \text{rows}(M); \quad (2.8)$$

– степень полиномиальной функции:

$$\text{deg} := n; \quad (2.9)$$

– коэффициенты определялись путем вызова подпрограммы COrder(Nvar, deg):

$$I := \text{COrder}(\text{Nvars}, \text{deg}); \quad (2.10)$$

$$\text{coeffs} := \text{submatrix}(R, 3, \text{rows}(R) - 1, 0, 0). \quad (2.11)$$

Вид полиномиальной функции определялся, используя сумму [93]:

$$\text{poly}(y, z) := \sum_{i=0}^{\text{last}(\text{coffs})} \left( \text{coeffs}_i \cdot y^{I_{i,0}} \cdot z^{I_{i,1}} \right). \quad (2.12)$$

Для нахождения коэффициентов полинома использована подпрограмма:

```

Step(v,Nvar,deg):=
  for i ∈ 0..deg if Nvar=1
    vi,0 ← vi,0 + 1
  for i ∈ 0..Nvar-1 if deg=1
    vi,i ← vi,i + 1
  otherwise
    inc ← Nterms(Nvar,deg-1)
    for i ∈ 0..inc-1
      vi,Nvar-1 ← vi,Nvar-1 + 1
      v ← stack(Step(submatrix(v,0,inc-1,0,cols(v)-
1),Nvar,deg-1
      )Step(submatrix(v,inc,rows(v)-1,0,cols(v)-1),Nvar-
1,deg))
    v
COrder(Nvar,deg):=
  v ← Nterms(Nvar,deg)-1, Nvar-1 ← 0
  Step(v,Nvar,deg)

```

Оценивалась погрешность, и устанавливались доверительные интервалы.

Коэффициенты парной корреляции Пирсона между величинами  $x - y$ ,  $x - z$  и  $y - z$  определялись по формулам [94]:

$$r_{xy} = \frac{\mu_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}; \quad (2.13)$$

$$r_{xz} = \frac{\mu_{xz}}{\sigma_x \cdot \sigma_z}; \quad (2.14)$$

$$r_{yz} = \frac{\mu_{yz}}{\sigma_y \cdot \sigma_z}, \quad (2.15)$$

где  $\mu_{xy}$ ,  $\mu_{xz}$  и  $\mu_{yz}$  — ковариация между величинами  $x - y$ ,  $x - z$  и  $y - z$ , соответственно;

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  — среднеквадратичные отклонения величин  $x$ ,  $y$  и  $z$ , соответственно.

Частные коэффициенты корреляции определялись по формулам [94]:

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} \cdot r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2) \cdot (1 - r_{yz}^2)}}; \quad (2.16)$$

$$r_{xz,y} = \frac{r_{xz} - r_{xy} \cdot r_{zy}}{\sqrt{(1 - r_{xy}^2) \cdot (1 - r_{zy}^2)}}. \quad (2.17)$$

Проверка значимости частных коэффициентов корреляции определялась путем вычисления величины  $t_\phi$ , имеющей  $t$ -распределение Стьюдента [94]:

$$t_\phi = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1 - r_{xy,z}^2}} \cdot \sqrt{n - l - 2}, \quad (2.18)$$

где  $n$  — количество экспериментальных данных;

$l$  — количество фиксированных переменных.

Наличие связи подтверждалось, если вычисленное значение  $t_\phi$  превышало табличное значение  $t_{кр}$  [95, с. 204]. Доверительный интервал для частных коэффициентов корреляции строился при помощи  $z$ -преобразования Фишера:

$$z - t_\phi \cdot \sqrt{\frac{l}{n - l - 3}} \leq z \leq z + t_\phi \cdot \sqrt{\frac{l}{n - l - 3}}. \quad (2.19)$$

Для определения тесноты связи между зависимой и независимыми переменными (между величиной  $x$  и величинами  $y$  и  $z$ ) рассчитывался множественный коэффициент корреляции [94]:

$$r_{x-yz} = \sqrt{\frac{r_{xy}^2 + r_{xz}^2 - 2r_{xy} \cdot r_{xz} \cdot r_{yz}}{1 - r_{yz}^2}}. \quad (2.20)$$

Значимость множественного коэффициента корреляции оценивалась с помощью критерия Фишера:

$$F_\phi [m, n - (m + 1)] = \frac{[n - (m + 1)] \cdot r_{x-yz}^2}{2 \cdot (1 - r_{x-yz}^2)}. \quad (2.21)$$

Величина  $F_\phi$  сравнивалась с табличным (критическим) значением  $F_{кр}$  – распределения Фишера, соответствующим выбранному уровню значимости  $\alpha = 0,05$ . Если  $F_\phi > F_{кр}$ , то коэффициент признавался значимым на уровне  $\alpha$ .

Фрагмент документа Mathcad с решением многомерной полиномиальной регрессии для поиска функции  $\sigma_B = f(HV, S)$  для сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т приведен на рисунке 2.13.

**mathcad data analysis**  
extension pack

**DATA ANALYSIS STATISTICS**      **MULTIVARIATE REGRESSION**

$i := 0..39$   
Массив данных, значения которого соответствуют значениям независимой переменной:  $M := \text{augment}(HV, S)$   
Вектор данных, соответствующих зависимой переменной:  $V := \sigma$   
Степень полинома:  $n := 2$  (полином является параболой)  
Регрессионная функция:  $R := \text{regress}(M, V, n)$

Коэффициенты регрессионной функции:  $R = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ 0.239 \\ 432.055 \\ -300.662 \\ 82.183 \\ 0.231 \\ 4.054 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$

Задание полиномиальной функции с двумя переменными, использующей коэффициенты регрессии  $R$ :  
 $f(hv, s) := \text{interp}\left[R, M, V, \begin{pmatrix} hv \\ s \end{pmatrix}\right]$

$F := \text{CreateMesh}(f, \min(HV), \max(HV), \min(S), \max(S), 10, 10)$   
**Определение коэффициентов каждого мономинимального члена полинома**

$$Nterms(nvar, deg) := \frac{(nvar + deg)!}{deg! \cdot nvar!}$$

Количество переменных полинома:  $Nvars := \text{cols}(M)$   
Количество данных:  $Ndata := \text{rows}(M)$   
Степень полиномиальной функции:  $deg := n$

Программа для нахождения коэффициентов полинома:

**Рисунок 2.13 – Нахождение полиномиальной функции  $\sigma_B = f(HV, S)$  для сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т (см. также с. 62)**

```

Step(v, Nvar, deg) :=
  for i ∈ 0..deg if Nvar = 1
    vi,0 ← vi,0 + 1
  for i ∈ 0..Nvar - 1 if deg = 1
    vi,i ← vi,i + 1
  otherwise
    inc ← Nterms(Nvar, deg - 1)
    for i ∈ 0..inc - 1
      vi, Nvar-1 ← vi, Nvar-1 + 1
    v ← stack(Step(submatrix(v, 0, inc - 1, 0, cols(v) - 1), Nvar, deg - 1), Step(submatrix(v, inc, rows(v) - 1, 0, cols(v) - 1), Nvar - 1, deg))
  v

```

```

COrder(Nvar, deg) :=
  vNterms(Nvar, deg) - 1, Nvar - 1 ← 0
  Step(v, Nvar, deg)

```

Показатели степеней при HV и S:  
 $I := COrder(Nvars, deg)$

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$$

Коэффициенты полинома:  
 $coeffs := submatrix(R, 3, rows(R) - 1, 0, 0)$

$$coeffs = \begin{pmatrix} 0.239 \\ 432.055 \\ -300.662 \\ 82.183 \\ 0.231 \\ 4.054 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$$

Окончательный вид полиномиальной функции:

$$poly(hv, s) := \sum_{i=0}^{last(coeffs)} \left( coeffs_i \cdot hv^{I_{i,0}} \cdot s^{I_{i,1}} \right)$$

Рисунок 2.143 – Окончание

## 2.4.2 Алгоритм решения линейной регрессии в математическом пакете Mathcad 13.0

Поскольку многомерные зависимости выражаются сложными трех-параметрическими функциями, для упрощения расчетов задача регрессии данных также сводилась к более надежной, с вычислительной точки зрения, линейной регрессии. Это было выполнено путем соответствующей замены переменных:  $(\sigma_B/HV) = f(S)$  и  $(\delta_5/D) = f(S)$ . Кроме этого устанавливалась линейная зависимость  $\psi = f(S)$ . Объектом исследования являлась выборка экспериментальных данных.

Для решения линейной регрессии экспериментальных данных в математическом пакете Mathcad 13.0 выполнялась следующая последовательность действий.

Задавались исходные данные в виде векторов  $X_i$  и  $Y_i$ .

Определялось количество экспериментальных данных:

$$n := rows(data). \quad (2.22)$$

Определялись средние значения экспериментальных данных:  
 – математические формулы [46, с. 193]:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}; \quad (2.23)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}, \quad (2.24)$$

где  $x_i$  – значение измеряемой величины;  
 $n$  – количество измерений;  
– встроенные функции Mathcad [93]:

$$\text{mean}(X), \text{mean}(Y); \quad (2.25)$$

$$\text{median}(X), \text{median}(Y). \quad (2.26)$$

Определялась дисперсия:

– математическая формула [65, с. 341]:

$$D(x) = M\left(\left(x - M(x)\right)^2\right), \quad (2.27)$$

где  $M(x)$  – математическое ожидание величины  $x$ ;  
– встроенная функция Mathcad [93]:

$$SD(x)^2 = \left( \text{stdev}(x) \cdot \sqrt{\frac{n}{n-1}} \right)^2. \quad (2.28)$$

Определялось стандартное отклонение:

– математическая формула [65, с. 345]:

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)}; \quad (2.29)$$

– встроенная функция Mathcad [93]:

$$SD(x) = \text{stdev}(x) \cdot \sqrt{\frac{n}{n-1}}. \quad (2.30)$$

Определялись угловой коэффициент  $b_0$  и коэффициент смещения линии регрессии  $b_1$ :

– математические формулы [46, с. 198]:

$$b_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.31)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \cdot \bar{x}; \quad (2.32)$$

– встроенные функции Mathcad [93]:

$$b_0 := \text{intercept}(X, Y), \quad (2.33)$$

$$b_1 := \text{slope}(X, Y). \quad (2.34)$$

Определялись коэффициенты корреляции, регрессии и ковариации:  
– математические формулы [65]:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}; \quad (2.35)$$

$$b_1 = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2}; \quad (2.36)$$

$$\text{cov}(x,y) = M(x - M(x)) \cdot (y - M(y)); \quad (2.37)$$

– встроенные функции Mathcad [93]:

$$\text{corr}(X, Y); \quad (2.38)$$

$$R^2 = \text{corr}(X, Y)^2; \quad (2.39)$$

$$\text{cvar}(X, Y). \quad (2.40)$$

Оценка погрешности полученных корреляционных уравнений проводилась путем построения доверительных интервалов. Для этого была задана надежность  $\alpha$  – доверительная вероятность, с которой гарантировалось появление погрешности, не выходящей за пределы точности оценки  $\delta$  (доверительного интервала):

$$\bar{x} - \delta < \alpha < \bar{x} + \delta. \quad (2.41)$$

Так как значения статистических критериев выражаются через уровень значимости, то значение  $\alpha$  было принято равным 0,05, что соответствовало 95 % надежности [46, с. 193].

Доверительный интервал определялся по формуле [46, с. 193; 65, с. 411]:

$$\delta = t_{\alpha m} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2.42)$$

где  $t_{\alpha m}$  – коэффициент Стьюдента;  
 $S$  – корень квадратный из выборочной дисперсии.

В математическом пакете Mathcad оценка погрешности проводилась путем определения стандартной ошибки углового коэффициента [93]

$$slope\_err = \frac{stderr(x, y)}{\sqrt{\sum(x - \text{mean}(x))^2}} \quad (2.43)$$

и стандартной ошибки коэффициента смещения линии регрессии [93]

$$int\_err = stderr(x, y) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(x)} + \frac{\text{mean}(x)^2}{\sum(x - \text{mean}(x))^2}}. \quad (2.44)$$

При уровне значимости  $\alpha = 0,05$   $t := qt\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \text{length}(x) - 2\right)$  гарантировалось на  $(1 - \alpha) = 95\%$ , что точное значение « $b_1$ » для экспериментальных данных принадлежит интервалу:  $b_1 - t \cdot slope\_err < b_1 < b_1 + t \cdot slope\_err$ . Кроме этого гарантировалось на  $(1 - \alpha) = 95\%$ , что точное значение « $b_0$ » для экспериментальных данных принадлежит интервалу:  $b_0 - t \cdot int\_err < b_0 < b_0 + t \cdot int\_err$ .

Доверительные интервалы для средних значений экспериментальных данных определялись вызовом встроенной функции confy [93]:

$$\text{confy}(x0) := t \cdot stderr(x, y) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(x)} + \frac{(x0 - \text{mean}(x))^2}{\sum(x - \text{mean}(x))^2}}. \quad (2.45)$$

Доверительные интервалы для всех значений экспериментальных данных определялись вызовом встроенной функции confm [93]:

$$\text{confm}(x0) := t \cdot stderr(x, y) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(x)} + \frac{(x0 - \text{mean}(x))^2}{\sum(x - \text{mean}(x))^2}}. \quad (2.46)$$

Фрагмент документа Mathcad с решением линейной регрессии для поиска функции  $(\sigma_B/HV) = f(S)$  для сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т приведен на рисунке 2.14.

$S := \text{data}^{(0)}$      $B := \text{data}^{(1)}$

Количество экспериментальных точек:    Регрессионная линия наименьших квадратов:

$n := \text{rows}(\text{data})$      $n = 40$      $\frac{\sigma}{HV} = B = a + b \cdot S$

	<u>Координаты по S</u>	<u>Координаты по (<math>\sigma/HV</math>)</u>
Среднее значение:	$\text{mean}(S) = 0.297$	$\text{mean}(B) = 0.33$
Медиана:	$\text{median}(S) = 0.292$	$\text{median}(B) = 0.325$
Стандартное отклонение:	$SD(S) := \text{stdev}(S) \cdot \sqrt{\frac{n}{n-1}}$ $SD(S) = 0.052$	$SD(B) = 0.014$
Дисперсия:	$SD(S)^2 = 2.71 \times 10^{-3}$	$SD(B)^2 = 1.897 \times 10^{-4}$
	<u>Результаты линейной регрессии</u>	
Угловой коэффициент:	$a := \text{intercept}(S, B)$	$a = 0.261$
Смещение линии регрессии:	$b := \text{slope}(S, B)$	$b = 0.233$
Функция регрессии:	$r(S) := a + b \cdot S$	
Коэффициент корреляции:	$\text{corr}(S, B) = 0.879$	$R^2 = \text{corr}(S, B)^2 = 0.773$
Ковариация:	$\text{covar}(S, B) = 6.145 \times 10^{-4}$	Стандартная ошибка: $\text{stderr}(S, B) = 6.654 \times 10^{-3}$
Стандартная ошибка углового коэффициента:	$\text{slope\_err} := \frac{\text{stderr}(S, B)}{\sqrt{\sum (S - \text{mean}(S))^2}}$	$\text{slope\_err} = 0.02$
Стандартная ошибка смещения линии регрессии:	$\text{int\_err} := \text{stderr}(S, B) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(S)} + \frac{\text{mean}(S)^2}{\sum (S - \text{mean}(S))^2}}$	$\text{int\_err} = 6.169 \times 10^{-3}$
	<u>Доверительные интервалы</u>	
При $\alpha := 0.05$ $t := \text{qt}\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \text{length}(S) - 2\right) = 2.024$ гарантируется на $(1 - \alpha) = 95\%$ , что точное значение "b" для экспериментальных данных принадлежит интервалу $b - t \cdot \text{slope\_err} = 0.191$ и $b + t \cdot \text{slope\_err} = 0.274$		
а также гарантируется на $(1 - \alpha) = 95\%$ , что точное значение "a" для экспериментальных данных принадлежит интервалу $a - t \cdot \text{int\_err} = 0.249$ и $a + t \cdot \text{int\_err} = 0.274$		
Доверительные интервалы для средних значений экспериментальных данных:		
$\text{confy}(S0) := t \cdot \text{stderr}(S, B) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(S)} + \frac{(S0 - \text{mean}(S))^2}{\sum (S - \text{mean}(S))^2}}$	$\text{Upper}(S0) := a + b \cdot S0 + \text{confy}(S0)$	$\text{dr} := 0.2, 0.21 \dots 0.55$
	$\text{Lower}(S0) := (a + b \cdot S0) - \text{confy}(S0)$	
Доверительные интервалы для всех значений экспериментальных данных:		
$\text{confm}(S0) := t \cdot \text{stderr}(S, B) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\text{length}(S)} + \frac{(S0 - \text{mean}(S))^2}{\sum (S - \text{mean}(S))^2}}$	$\text{Upper}(S0) := a + b \cdot S0 + \text{confm}(S0)$	
	$\text{Lower}(S0) := (a + b \cdot S0) - \text{confm}(S0)$	

**Рисунок 2.154 – Нахождение линейной функции  $\sigma_b/HV = f(S)$  для сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т**

### ГЛАВА 3

## ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА КОНСТРУКЦИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

### 3.1 Алгоритм определения механических свойств материала нефтеперерабатывающего оборудования

При диагностировании материала НПО не всегда имеется возможность вырезки темплета материала для исследования его состояния в лабораторных условиях. Кроме того, практика показывает, что чаще всего у длительно эксплуатируемого оборудования возникают разрушения именно в тех местах, где ранее была выполнена вырезка темплета материала. Поэтому актуальной задачей является совершенствование методов определения механических свойств материала без разрушения оборудования и разработка метода экспресс-контроля состояния материала НПО. К таким механическим характеристикам можно отнести  $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$  и  $KCU$ , которые широко используются в инженерной практике для оценки состояния материала. Однако экспресс-метод не может полностью исключить из практики диагностирования разрушающий способ определения механических свойств. Его следует применять только при отсутствии возможности определения механических характеристик материала в соответствии с ТНПА или как дополнение к разрушающему способу. В общем случае справедлив алгоритм, приведенный на рисунке 3.1.

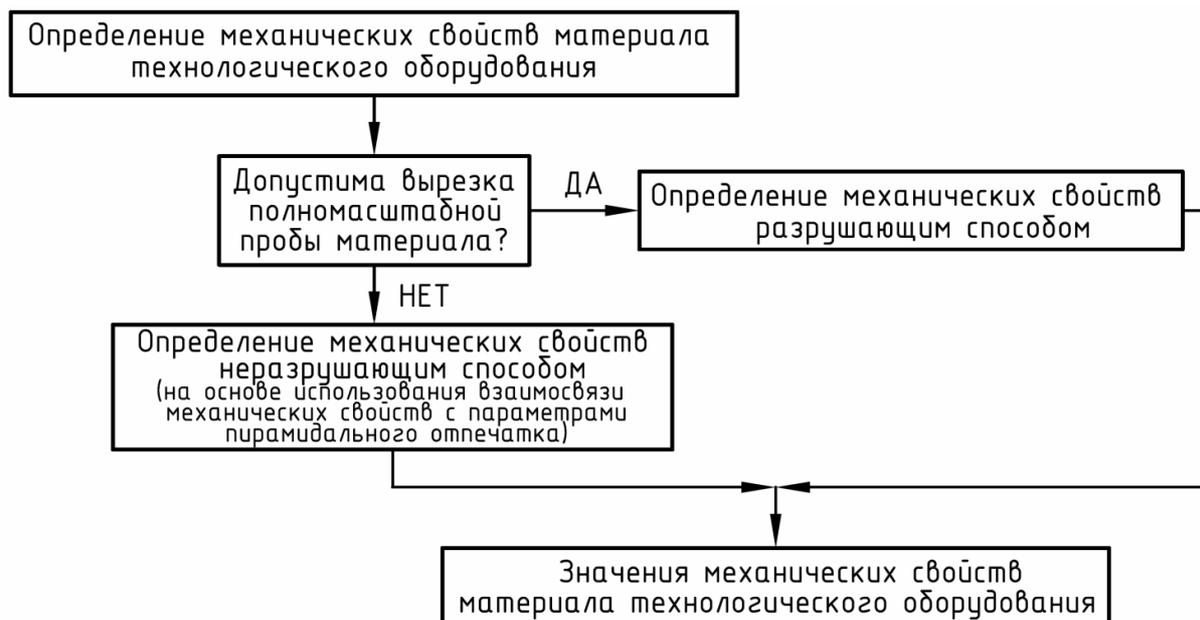


Рисунок 3.1 – Алгоритм определения механических свойств материала НПО

### 3.2 Неразрушающий способ определения предела прочности, относительных удлинения и сужения материала конструкций нефтеперерабатывающего оборудования

В работах [60, 74, 81, 96] установлены зависимости между  $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$ ,  $HV$  и параметрами пирамидального отпечатка (диагональю  $D$  и шириной  $S$ ), которые характеризуются уравнениями линейного вида (см. таблицу 1.3):  $\sigma_b = f(HV, S)$ ;  $\delta_5 = f(D, S)$ ;  $\psi = f(S)$ . Указанные зависимости справедливы только для конструкционных (углеродистых и низколегированных) сталей общего машиностроения (сталь 45, 30ХГСА, 12ХНЗА, 18Х2Н4ВА, 50ХФА и др.) [74, 81]. Однако стали, применяемые для изготовления конструкций НПО (например, 09Г2С, 15Х5М, 15Х5ВФ, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т и др.), отличаются от указанных выше по составу, структуре и конструкционной прочности (сочетанию прочностных, пластических характеристик и ударной вязкости). Нашими исследованиями установлено, что эти зависимости не всегда могут быть применимы для определения механических свойств данных материалов (наблюдается значительная погрешность в определении механических свойств). Поэтому необходимо развитие взглядов на взаимосвязь геометрических параметров пирамидального отпечатка с механическими свойствами, чтобы получить новые сведения по определению  $\sigma_b$ ,  $\delta_5$  и  $\psi$  материала конструкций НПО неразрушающим способом.

#### 3.2.1 Определение предела прочности материала неразрушающим способом

Полиномиальная зависимость между пределом прочности  $\sigma_b$ , твердостью по Виккерсу  $HV$  и шириной пирамидального отпечатка  $S$  установлена с помощью математических пакетов Mathcad 13.0 и Statistica 6.0, используя алгоритм, описанный в п. 2.4.1. В установлении данной связи использована величина  $HV$ , хотя с равной степенью соответствия результатов можно было использовать и значение диагонали отпечатка  $D$ . Между значениями  $HV$  и  $D$  существует линейная функциональная зависимость, а определение значения  $HV$  максимально автоматизировано как на стационарных, так и на переносных приборах.

Полиномиальная функция для определения  $\sigma_b$  исследованных сталей (20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т) имеет вид:

$$\begin{cases} \sigma_b = \sum_{i=1}^{i=6} \left( K_i \cdot HV^{I_{i,1}} \cdot S^{I_{i,2}} \right), \text{ МПа} \\ \sigma_b = \sum_{i=1}^{i=6} \left( K_i \cdot \left( \frac{370,88}{D^2} \right)^{I_{i,1}} \cdot S^{I_{i,2}} \right), \text{ МПа} \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $K_i$  – коэффициенты полинома ( $K_1 = 0,239$ ;  $K_2 = 432,055$ ;  $K_3 = -300,662$ ;  $K_4 = 82,183$ ;  $K_5 = 0,231$ ;  $K_6 = 4,054 \times 10^{-6}$ );

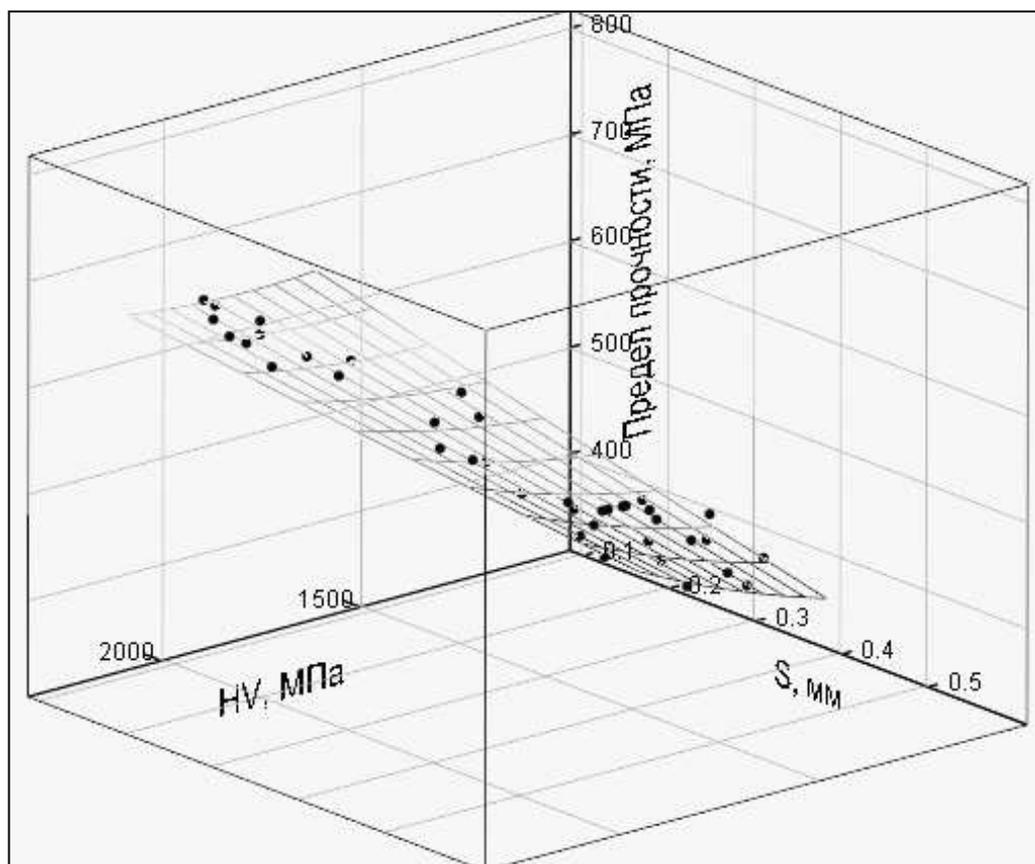
$I_{i,1}$  – показатель степени при  $HV$  ( $I_{1,1} = 1$ ;  $I_{2,1} = 0$ ;  $I_{3,1} = 0$ ;  $I_{4,1} = 0$ ;  $I_{5,1} = 1$ ;  $I_{6,1} = 2$ );

$I_{i,2}$  – показатель степени при  $S$  ( $I_{1,2} = 1$ ;  $I_{2,2} = 2$ ;  $I_{3,2} = 1$ ;  $I_{4,2} = 0$ ;  $I_{5,2} = 0$ ;  $I_{6,2} = 0$ );

$i$  – порядковый номер коэффициента или показателя степени.

Увеличение факторного признака (произведение  $HV_i \cdot S_i$ ) с положительным коэффициентом полинома  $K_i$  ( $K_1, K_2, K_4 \dots K_6$ ) приводит к увеличению  $\sigma_b$ , а увеличение факторного признака с отрицательным коэффициентом полинома ( $K_3$ ) вызывает обратное действие.

На рисунке 3.2 приведено графическое представление полученных результатов регрессии в виде поверхности отклика как геометрического места точек концов векторов  $V_{HV_i}$  и  $V_{S_i}$ .



$F, (HV, S, \sigma)$

**Рисунок 3.2 – Регрессия экспериментальных данных ( $\sigma_{bi}, HV_i, S_i$ ) полиномиальной поверхностью для сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т**

Парные коэффициенты корреляции между  $\sigma_b$ ,  $HV$  и  $S$ , определенные по формулам (2.13)...(2.15), приведены в таблице 3.1. Парный коэффициент корреляции для  $\sigma_b$  и  $HV$  больше по абсолютному значению, чем для  $\sigma_b$  и  $S$ . Отсюда можно сделать вывод о том, что значение твердости  $HV$  оказывает преимущественное влияние на  $\sigma_b$ . Связь между самими факторными признаками ( $HV$  и  $S$ ) характеризуется низким значением парного коэффициента корреляции. Однако связь между  $HV$  и  $S$  более тесная, чем между  $\sigma_b$  и  $S$ .

Таблица 3.1 — Значения парных коэффициентов корреляции между  $\sigma_b$ ,  $HV$  и  $S$

Величины	Значения коэффициентов корреляции		
	$\sigma_b$	$HV$	$S$
$\sigma_b$	1,0	0,99	-0,18
$HV$	0,99	1,0	-0,29
$S$	-0,18	-0,29	1,0

Частные коэффициенты корреляции по формулам (2.16) и (2.17)

$$r_{\sigma_b HV, S} = \frac{r_{\sigma_b HV} - r_{\sigma_b S} \cdot r_{SHV}}{\sqrt{(1 - r_{\sigma_b S}^2) \cdot (1 - r_{SHV}^2)}} = 0,9973;$$

$$r_{\sigma_b S, HV} = \frac{r_{\sigma_b S} - r_{\sigma_b HV} \cdot r_{SHV}}{\sqrt{(1 - r_{\sigma_b HV}^2) \cdot (1 - r_{SHV}^2)}} = 0,8475.$$

Частный коэффициент корреляции между  $\sigma_b$  и  $HV$  при постоянном  $S$  больше, чем соответствующий парный коэффициент корреляции (0,9973 против 0,99). Частный коэффициент корреляции между  $\sigma_b$  и  $S$  при постоянном  $HV$  также больше, чем соответствующий парный коэффициент корреляции (0,8475 против -0,18). Это объясняется тем, что частные коэффициенты корреляции устанавливают тесноту связи между двумя признаками при исключении влияния других переменных.

Проверка статистической гипотезы об отличии частных коэффициентов корреляции от нуля:

$$t_{\phi 1} = \frac{r_{\sigma_b HV, S}}{\sqrt{1 - r_{\sigma_b HV, S}^2}} \cdot \sqrt{n - l - 2} = \frac{0,9973}{\sqrt{1 - 0,9973^2}} \cdot \sqrt{40 - 2 - 2} = 83,68;$$

$$t_{\phi 1} = \frac{r_{\sigma_b S, HV}}{\sqrt{1 - r_{\sigma_b S, HV}^2}} \cdot \sqrt{n - l - 2} = \frac{0,8475}{\sqrt{1 - 0,8475^2}} \cdot \sqrt{40 - 2 - 2} = 9,71.$$

Табличное значение коэффициента Стьюдента, определенное для уровня значимости 0,05, составляет  $t_{кр} = 2,021$  [95, с. 204], т.е. при

$$t_{\phi 1} = 83,68 > t_{кр} = 2,021 \quad \text{и} \quad t_{\phi 2} = 9,71 > t_{кр} = 2,021$$

частные коэффициенты корреляции признаны значимыми.

Множественный коэффициент корреляции между  $\sigma_b$ ,  $HV$  и  $S$  по формуле (2.20)

$$r_{\sigma_b-HVS} = \sqrt{\frac{0,99^2 + (-0,18)^2 - 2 \cdot 0,99 \cdot (-0,18) \cdot (-0,29)}{1 - (-0,29)^2}} = 0,9974.$$

Значение критерия Фишера по формуле (2.21):

$$F_{\phi} [m, n - (m + 1)] = \frac{[n - (m + 1)] \cdot r_{\sigma_b-HVS}^2}{2 \cdot (1 - r_{\sigma_b-HVS}^2)};$$

$$F_{\phi} [2, 40 - (2 + 1)] = \frac{[40 - (2 + 1)] \cdot 0,9974^2}{2 \cdot (1 - 0,9974^2)} = 3617,537.$$

Табличное значение  $F_{кр}$  – распределения Фишера для уровня значимости  $\alpha = 0,05$   $F_{кр} = 3,2317$  [97]. Так как  $F_{\phi} = 3617,537 > F_{кр} = 3,2317$ , то на статистически значимом уровне признано наличие устойчивой корреляции между  $\sigma_b$ ,  $HV$  и  $S$ . Поэтому на величину  $\sigma_b$  имеет место совместное влияние значений  $HV$  и  $S$ .

Линейная зависимость между отношением ( $\sigma_b/HV$ ) и  $S$  установлена в математическом пакете Mathcad 13.0, используя алгоритм, описанный в п. 2.4.2. Линейная функция для определения  $\sigma_b$  исследованных сталей (20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т) имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\sigma_b}{HV} = 0,261 + 0,233 \cdot S, \text{ МПа;} \\ \left( \frac{370,88}{D^2} \right) = 0,261 + 0,233 \cdot S, \text{ МПа,} \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \sigma_b = HV \cdot (0,261 + 0,233 \cdot S), \text{ МПа;} \\ \sigma_b = \frac{1}{D^2} \cdot (96,8 + 86,42 \cdot S), \text{ МПа.} \end{cases} \quad (3.2)$$

Коэффициент корреляции для данной зависимости  $r = 0,879$ . Проверка статистической гипотезы об отличии коэффициента корреляции от нуля

$$T_{расч.} = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0,879 \cdot \sqrt{40-2}}{\sqrt{1-0,879^2}} = 11,364.$$

Табличное значение коэффициента Стьюдента, определенное для уровня значимости 0,05, составляет  $t_{\alpha m} = 2,021$  [95, с. 204], т.е. при

$$T_{расч.} = 11,364 > t_{\alpha m} = 2,021$$

на статистически значимом уровне признано наличие устойчивой корреляции между отношением  $(\sigma_b/HV)$  и  $S$ .

Поскольку коэффициент корреляции имеет положительный знак, то связь между отношением  $(\sigma_b/HV)$  и  $S$  прямая: чем больше  $S$ , тем больше  $(\sigma_b/HV)$  и чем меньше  $S$ , тем меньше  $(\sigma_b/HV)$ .

На рисунке 3.3 построен график распределения экспериментальных точек относительно линии регрессии. На график также нанесены значения величины ошибки для каждой пары значений, которая показывает расстояния (по вертикали) от экспериментальных точек до линии регрессии. Расположение экспериментальных точек относительно линии регрессии свидетельствует о тесной связи между  $(\sigma_b/HV)$  и  $S$ .

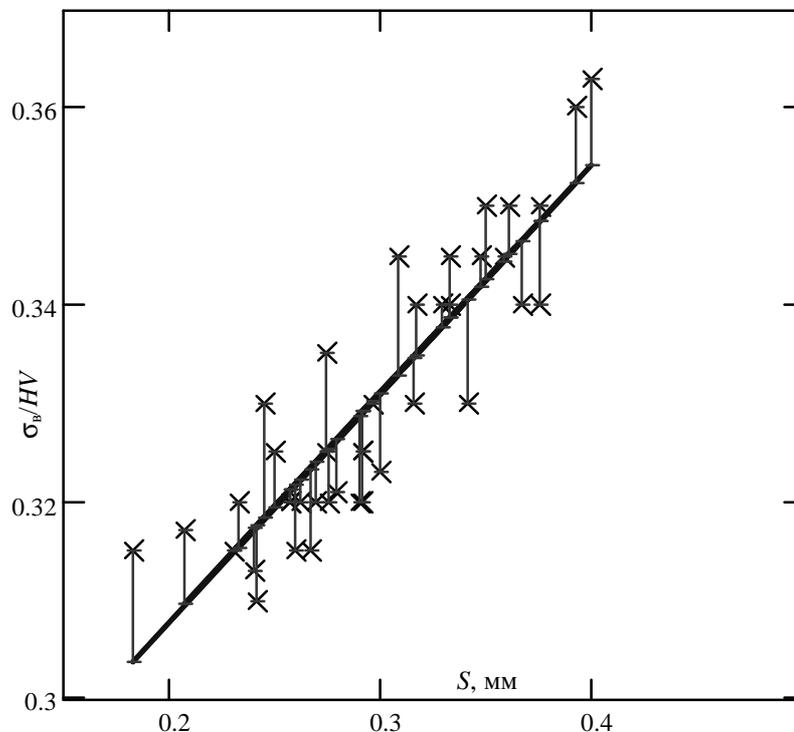
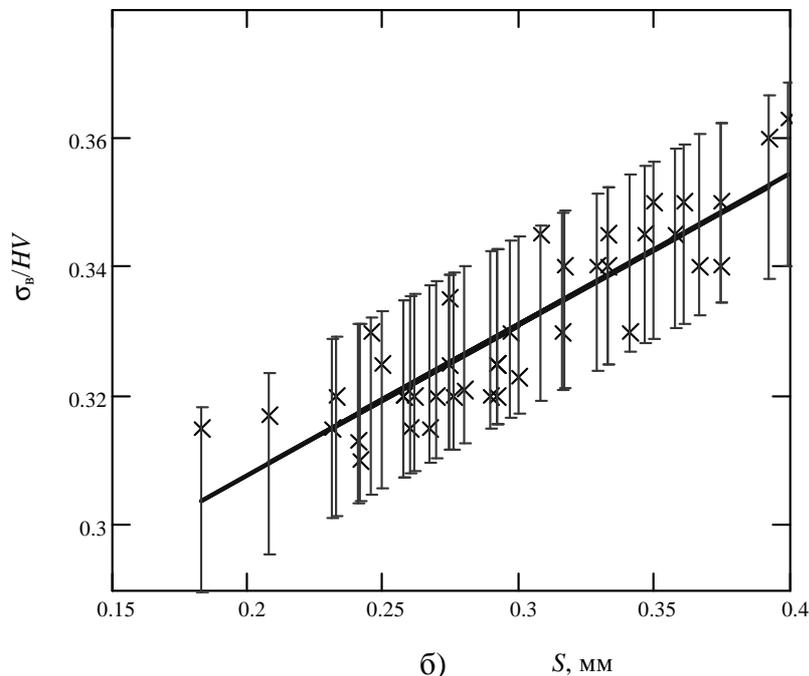
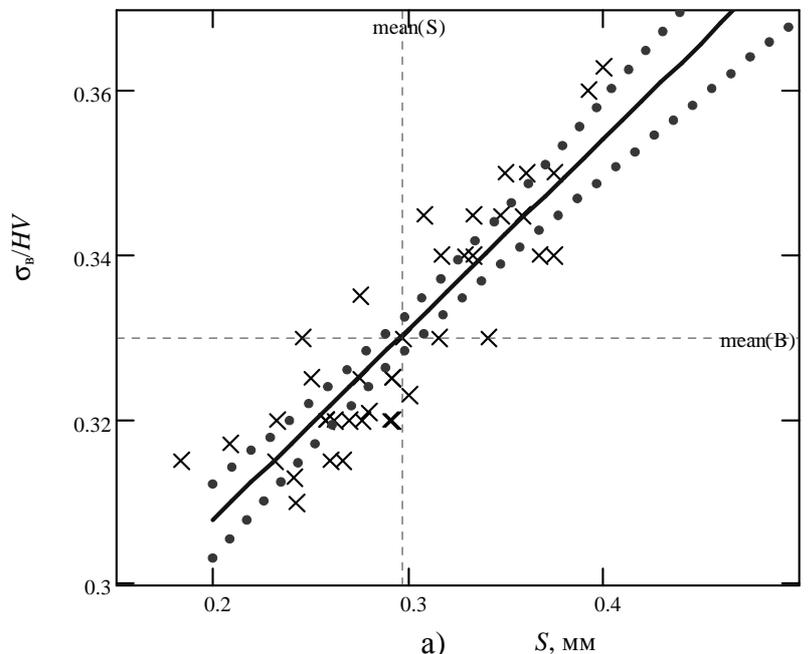


Рисунок 3.3 – Линейная регрессия экспериментальных данных  $(\sigma_{bi}/HV_i) = S_i$  для сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т

На рисунке 3.4 построены доверительные интервалы для экспериментальных точек. Для сравнения значений предела прочности исследуемых сталей, определенных по формулам (3.1) и (3.2), с базовыми по ГОСТ 1497 построены диаграммы (рисунки 3.5...3.8).



а) – доверительные интервалы для средних значений экспериментальных данных;  
 б) – доверительные интервалы для всех значений экспериментальных данных  
**Рисунок 3.4 – Доверительные интервалы линейной регрессии для сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т**

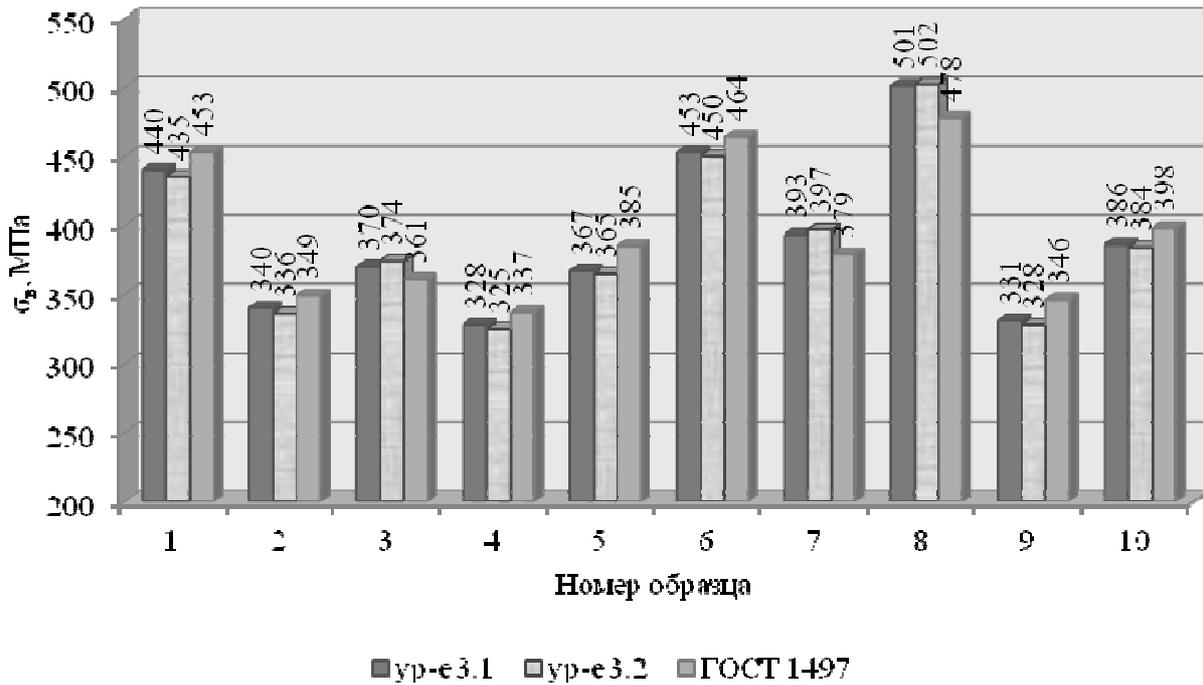


Рисунок 3.5 – Сравнение значений предела прочности стали 20, определенных по формулам (3.1), (3.2) и ГОСТ 1497

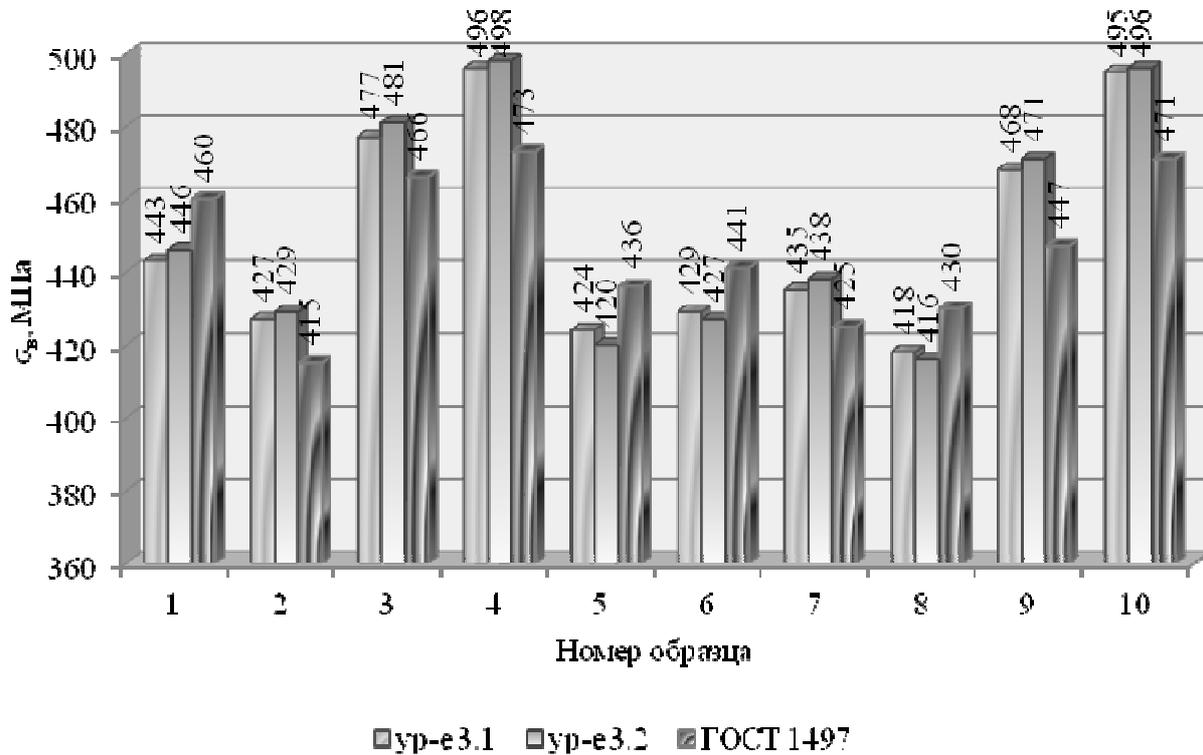


Рисунок 3.6 – Сравнение значений предела прочности стали 09Г2С, определенных по формулам (3.1), (3.2) и ГОСТ 1497

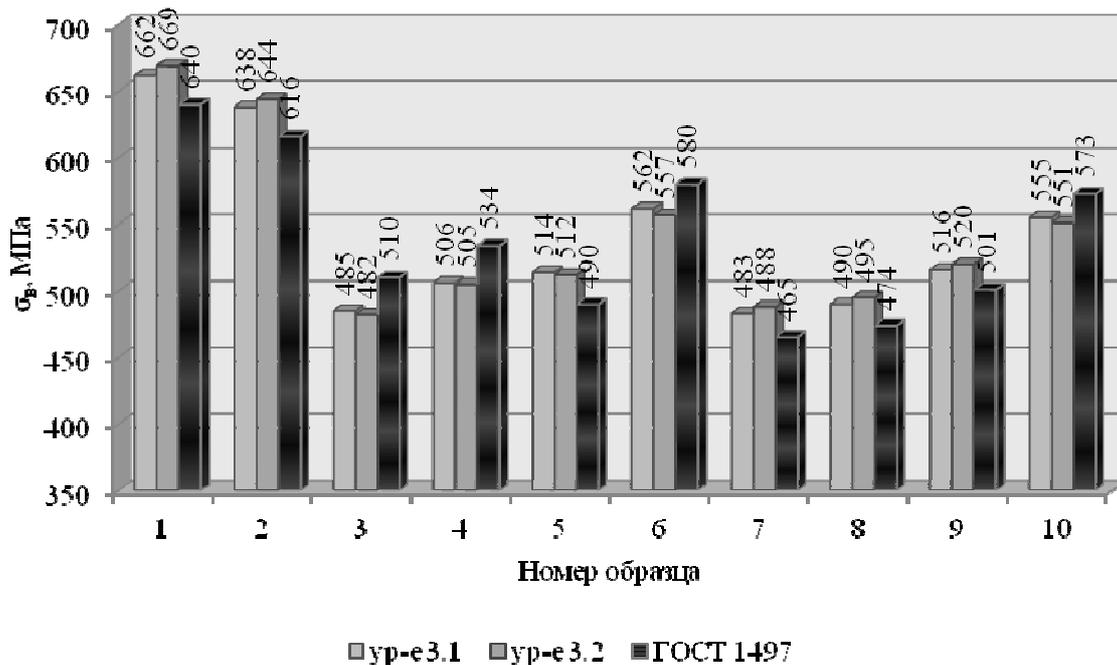


Рисунок 3.7 – Сравнение значений предела прочности стали 15X5M, определенных по формулам (3.1), (3.2) и ГОСТ 1497

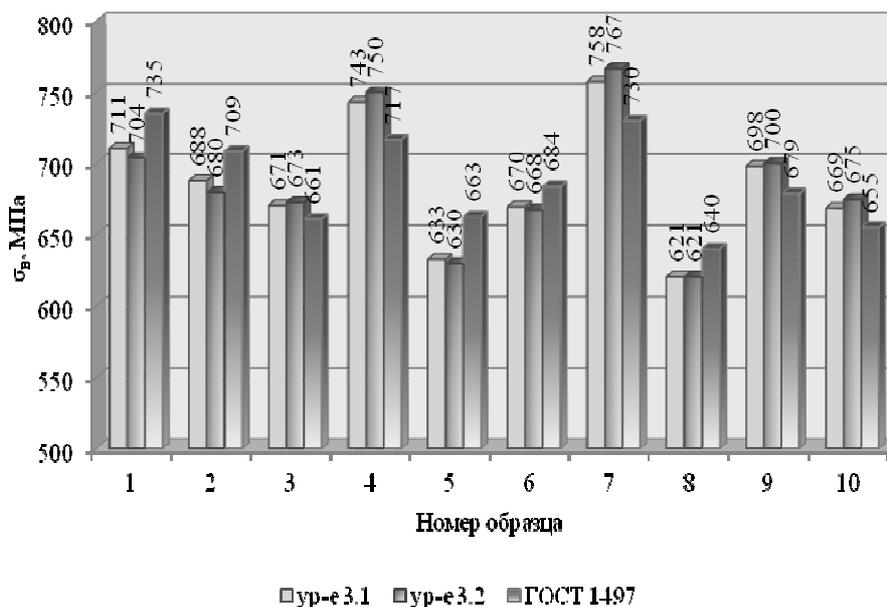
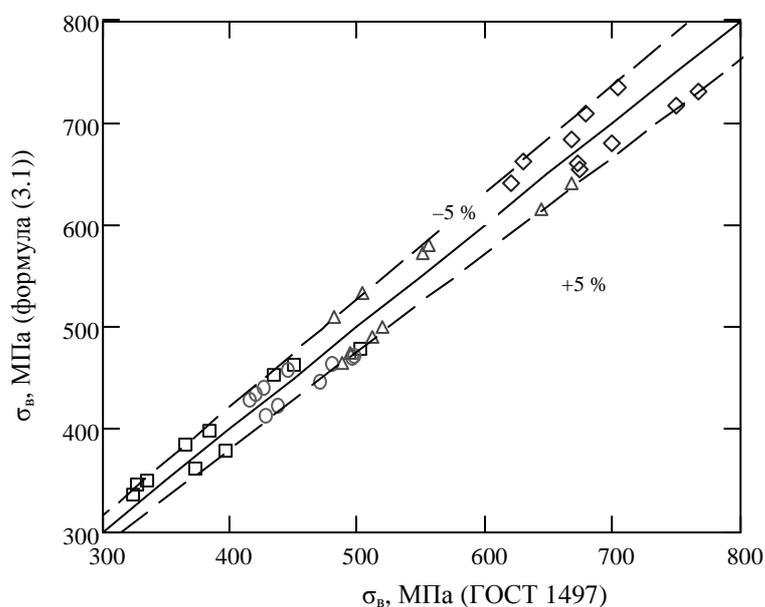


Рисунок 3.8 – Сравнение значений предела прочности стали 12X18H10T, определенных по формулам (3.1), (3.2) и ГОСТ 1497

Сопоставление результатов, полученных по уравнениям (3.1), (3.2) и ГОСТ 1497, показывает, что более близкие значения  $\sigma_b$  к базовым значениям, полученным по ГОСТ 1497, получаются при использовании уравнения (3.1). При этом более точное совпадение результатов наблюдается для сталей 20 и 12X18H10T.

Лучшее описание результатов экспериментов достигнуто при использовании полиномиальной многомерной регрессии. В полиномиальной регрессии исходная функция была заменена отрезками квадратных полиномов, проходящих через три смежные узловые точки. Перемещение триады точек вдоль координатной оси создает набор полиномов. При этом коэффициенты полиномов рассчитаны так, чтобы непрерывными были первая и вторая производная функции.

Для оценки погрешности определения предела прочности  $\sigma_b$  по формуле (3.1) в сравнении с базовыми значениями построена сводная диаграмма (рисунок 3.9). Сплошная линия проведена под углом  $45^\circ$  к координатным осям. Пунктирные линии соответствуют 5 %-му отклонению от этой линии. Различия в значениях, полученных по ГОСТ 1497 и формуле (3.1), находятся в пределах 5...6 %. Максимальные отклонения составляют: сталь 20 – 5,2 %; 09Г2С – 5,4 %; 15Х5М – 5,5 %; 12Х18Н10Т – 5,1 %.



□ – сталь 20; ○ – 09Г2С; Δ – 15Х5М; ◇ – 12Х18Н10Т

**Рисунок 3.9 – Сводная диаграмма значений предела прочности, определенных по ГОСТ 1497 и формуле (3.1)**

Абсолютное большинство экспериментальных точек расположено в области, ограниченной пунктирными линиями. Поэтому определение  $\sigma_b$  по  $HV$  и  $S$  дает удовлетворительные результаты.

По сравнению с существующими в литературе уравнениями связи предела прочности с твердостью полученные уравнение отличаются многофакторным учетом упругопластического деформирования материала. Они позволяют более точно определять предел прочности, т.к. в состав уравнений входит значение твердости  $HV$  (или  $D$ ) (характеризующей воз-

никающие в материале напряжения) и ширины отпечатка  $S$  (характеризующей способность материала к пластическому деформированию).

### 3.2.2 Определение относительного удлинения материала неразрушающим способом

Полиномиальная зависимость устанавливалась между относительным удлинением  $\delta_5$  сталей, диагональю  $D$  и шириной пирамидального отпечатка  $S$ . Линейная зависимость устанавливалась между отношением  $(\delta_5/D)$  и шириной пирамидального отпечатка  $S$ . Решение полиномиальной регрессии проводилось по алгоритму, описанному в п. 2.4.1, линейной – по алгоритму, описанному в п. 2.4.2. Установить общую зависимость для всех марок сталей не удалось. Между тем, для отдельных марок сталей (20, 09Г2С, 15Х5М, 12Х18Н10Т), принадлежащих к разным структурным классам, наблюдались устойчивые зависимости между указанными характеристиками.

Полученные уравнения полиномиальной и линейной регрессии экспериментальных данных сведены в таблицы 3.2, 3.3 и 3.4.

Увеличение факторного признака (произведение  $D_i \cdot S_i$ ) с положительным коэффициентом полинома  $K_i$  ( $K_1, K_3, K_4$  – для сталей 20 и 12Х18Н10Т;  $K_2 \dots K_4$  – для сталей 09Г2С и 15Х5М) приводит к увеличению  $\delta_5$ , а увеличение факторного признака с отрицательным коэффициентом полинома ( $K_2, K_5, K_6$  – для сталей 20 и 12Х18Н10Т;  $K_1, K_5, K_6$  – для сталей 09Г2С и 15Х5М) – к уменьшению  $\delta_5$ .

Парные коэффициенты корреляции связей  $\delta_5 - D$  и  $\delta_5 - S$  для стали 20 одинаковы (0,916). Это говорит об одинаковом влиянии величин  $D$  и  $S$  на  $\delta_5$  для этой стали. Парный коэффициент корреляции связи  $\delta_5$  и  $D$  для стали 09Г2С (0,928) больше, чем связи  $\delta_5 - S$  (0,917). Это свидетельствует о том, что значение  $D$  оказывает более значительное влияние на  $\delta_5$ , чем  $S$ . Парный коэффициент корреляции связи  $\delta_5$  и  $D$  для сталей 15Х5М и 12Х18Н10Т (соответственно 0,924 и 0,907) меньше, чем связи  $\delta_5 - S$  (0,937 и 0,929). Поэтому значение  $S$  оказывает преимущественное влияние на  $\delta_5$ , чем  $D$ . Связь между самими факторными признаками ( $D$  и  $S$ ) характеризуется высокими значениями парного коэффициента корреляции (сталь 20 – 0,96; 09Г2С – 0,98; 15Х5М – 0,99; 12Х18Н10Т – 0,985), что говорит о равнозначности этих величин и взаимном влиянии на значение  $\delta_5$ .

Коэффициенты корреляции линейной связи (см. таблицу 3.4) для всех исследованных сталей имеют положительный знак. Поэтому между отношением  $(\delta_5/D)$  и  $S$  прямая зависимость.

Таблица 3.2 – Корреляционные уравнения полиномиальной регрессии для сталей 20 и 09Г2С

Марка стали	Номер уравнения	Уравнение полиномиальной регрессии	Параметры уравнения полиномиальной регрессии						Множественный коэффициент корреляции	
									$r_{\delta_5-DS}$	оценка значимости
20	(3.3)	$\delta_5 = \sum_{i=1}^{i=6} (K_i \cdot D^{I_{i,1}} \cdot S^{I_{i,2}})$	Коэффициенты полинома $K_i$						0,9916	$F_\phi = 472,11 > > F_{кр} = 5,7861$
			$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$		
			$3,669 \cdot 10^4$	$-2,41 \cdot 10^4$	47,527	0,017	-36,153	$-1,396 \times 10^4$		
			Показатель степени при $D$ $I_{i,1}$							
			$I_{1,1}$	$I_{2,1}$	$I_{3,1}$	$I_{4,1}$	$I_{5,1}$	$I_{6,1}$		
			1	0	0	0	1	2		
			Показатель степени при $S$ $I_{i,2}$							
			$I_{1,2}$	$I_{2,2}$	$I_{3,2}$	$I_{4,2}$	$I_{5,2}$	$I_{6,2}$		
1	2	1	0	0	0					
09Г2С	(3.4)	$\delta_5 = \sum_{i=1}^{i=6} (K_i \cdot D^{I_{i,1}} \cdot S^{I_{i,2}})$	Коэффициенты полинома $K_i$						0,9691	$F_\phi = 54,132 > > F_{кр} = 5,7861$
			$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$		
			$-3,669 \cdot 10^3$	$2,33 \cdot 10^3$	23,143	0,046	-18,027	$-1,445 \times 10^3$		
			Показатель степени при $D$ $I_{i,1}$							
			$I_{1,1}$	$I_{2,1}$	$I_{3,1}$	$I_{4,1}$	$I_{5,1}$	$I_{6,1}$		
			1	0	0	0	1	2		
			Показатель степени при $S$ $I_{i,2}$							
			$I_{1,2}$	$I_{2,2}$	$I_{3,2}$	$I_{4,2}$	$I_{5,2}$	$I_{6,2}$		
1	2	1	0	0	0					

Таблица 3.3 – Корреляционные уравнения полиномиальной регрессии для сталей 15X5M и 12X18H10T

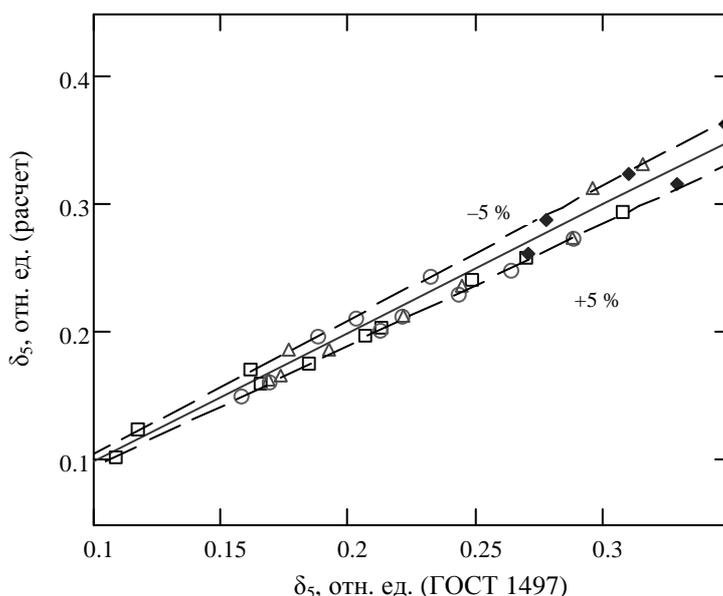
Марка стали	Номер уравнения	Уравнение полиномиальной регрессии	Параметры уравнения полиномиальной регрессии						Множественный коэффициент корреляции	
									$r_{\delta_5-DS}$	оценка значимости
15X5M	(3.5)	$\delta_5 = \sum_{i=1}^{i=6} \left( K_i \cdot D^{I_{i,1}} \cdot S^{I_{i,2}} \right)$	Коэффициенты полинома $K_i$						0,9926	$F_\phi = 534,737 > > F_{кр} = 5,7861$
			$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$		
			$-8,337 \cdot 10^4$	$5,477 \cdot 10^4$	62,095	0,046	-47,269	$3,173 \times 10^4$		
			Показатель степени при $D$ $I_{i,1}$							
			$I_{1,1}$	$I_{2,1}$	$I_{3,1}$	$I_{4,1}$	$I_{5,1}$	$I_{6,1}$		
			1	0	0	0	1	2		
			Показатель степени при $S$ $I_{i,2}$							
$I_{1,2}$	$I_{2,2}$	$I_{3,2}$	$I_{4,2}$	$I_{5,2}$	$I_{6,2}$					
1	2	1	0	0	0					
12X18H10T	(3.6)	$\delta_5 = \sum_{i=1}^{i=6} \left( K_i \cdot D^{I_{i,1}} \cdot S^{I_{i,2}} \right)$	Коэффициенты полинома $K_i$						0,9684	$F_\phi = 52,836 > > F_{кр} = 5,7861$
			$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$		
			$7,582 \cdot 10^4$	$-5,386 \cdot 10^4$	117,095	1,218	-88,991	$-2,668 \times 10^4$		
			Показатель степени при $D$ $I_{i,1}$							
			$I_{1,1}$	$I_{2,1}$	$I_{3,1}$	$I_{4,1}$	$I_{5,1}$	$I_{6,1}$		
			1	0	0	0	1	2		
			Показатель степени при $S$ $I_{i,2}$							
$I_{1,2}$	$I_{2,2}$	$I_{3,2}$	$I_{4,2}$	$I_{5,2}$	$I_{6,2}$					
1	2	1	0	0	0					

Таблица 3.4 – Корреляционные уравнения линейной регрессии для сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т

Марка стали	Номер уравнения	Уравнение линейной регрессии	Коэффициент корреляции	
			$r_{\delta_5/D-S}$	оценка значимости
Сталь 20	(3.7)	$\delta_5 = D \cdot (0,277 + 1,158 \cdot S)$ , отн. ед.	0,8495	$T_{\text{расч.}} = 4,554 >$ $> t_{\text{ам}} = 2,228$
09Г2С	(3.8)	$\delta_5 = D \cdot (0,168 + 0,937 \cdot S)$ , отн. ед.	0,9566	$T_{\text{расч.}} = 9,285 >$ $> t_{\text{ам}} = 2,228$
15Х5М	(3.9)	$\delta_5 = D \cdot (0,213 + 1,211 \cdot S)$ , отн. ед.	0,9685	$T_{\text{расч.}} = 11,001 >$ $> t_{\text{ам}} = 2,228$
12Х18Н10Т	(3.10)	$\delta_5 = D \cdot (0,346 + 2,021 \cdot S)$ , отн. ед.	0,8038	$T_{\text{расч.}} = 3,822 >$ $> t_{\text{ам}} = 2,228$

Сопоставление результатов показывает, что более близкие значения  $\delta_5$  к базовым значениям, полученным по ГОСТ 1497, получаются при использовании уравнений полиномиальной регрессии (см. таблицы 3.2, 3.3).

Для оценки погрешности определения относительного удлинения  $\delta_5$  по формулам, приведенным в таблицах 3.2 и 3.3, в сравнении с базовыми значениями построена сводная диаграмма (рисунок 3.10). Различия в значениях, полученных по ГОСТ 1497 и расчетным уравнениям, находятся в пределах 5...6 %. Максимальные отклонения составляют: сталь 20 – 5,8 %; 09Г2С – 5,6 %; 15Х5М – 5,7 %; 12Х18Н10Т – 5,8 %.



□ – сталь 20; ○ – 09Г2С; Δ – 15Х5М; ◇ – 12Х18Н10Т

Рисунок 3.10 – Сводная диаграмма значений относительного удлинения, определенных по ГОСТ 1497 и расчетным уравнениям (таблицы 3.2 и 3.3)

Расчетное значение критерия Фишера для полиномиальной регрессии экспериментальных точек исследованных сталей больше табличного (см. таблицы 3.2 и 3.3), расчетное значение коэффициента Стьюдента для линейной регрессии также превышает табличное (см. таблицу 3.4). Поэтому на статистически значимом уровне признано наличие устойчивой корреляции между  $\delta_5$ ,  $D$  и  $S$ , а также отношением  $(\delta_5/D)$  и  $S$  для отдельных марок сталей (20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т).

### 3.2.3 Определение относительного сужения материала неразрушающим способом

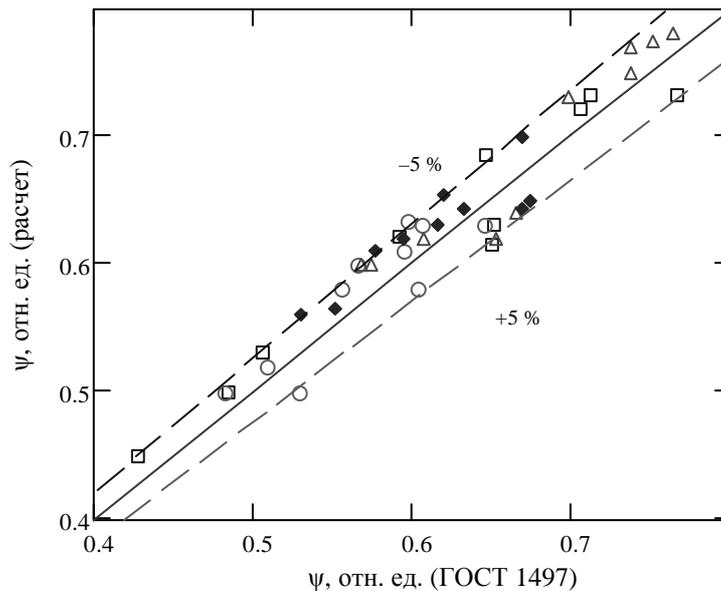
Линейная зависимость устанавливалась между относительным сужением  $\psi$  сталей и шириной пирамидального отпечатка  $S$ . Решение линейной регрессии проводилось по алгоритму, описанному в п. 2.4.2. Нами установлено, что тесная взаимосвязь между  $\psi$  и  $S$  наблюдается только для отдельных марок сталей (20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т). Регрессионный анализ проводился для каждой марки стали, что соответствовало однотипности структуры материала.

Полученные уравнения линейной регрессии экспериментальных данных сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Корреляционные уравнения линейной регрессии для сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т

Марка стали	Номер уравнения	Уравнение линейной регрессии	Коэффициент корреляции	
			$r_{\psi-s}$	оценка значимости
Сталь 20	(3.11)	$\psi = 0,164 + 1,702 \cdot S$ , отн. ед.	0,9063	$T_{\text{расч.}} = 6,065 > t_{\text{ам}} = 2,228$
09Г2С	(3.12)	$\psi = 0,113 + 1,375 \cdot S$ , отн. ед.	0,9395	$T_{\text{расч.}} = 7,757 > t_{\text{ам}} = 2,228$
15Х5М	(3.13)	$\psi = 0,16 + 1,754 \cdot S$ , отн. ед.	0,9353	$T_{\text{расч.}} = 7,476 > t_{\text{ам}} = 2,228$
12Х18Н10Т	(3.14)	$\psi = 0,16 + 1,729 \cdot S$ , отн. ед.	0,9421	$T_{\text{расч.}} = 7,946 > t_{\text{ам}} = 2,228$

Поскольку коэффициент корреляции имеет положительный знак, то связь между  $\psi$  и  $S$  прямая. Для оценки погрешности определения относительного сужения  $\psi$  по уравнениям, приведенным в таблице 3.5, построена сводная диаграмма (рисунок 3.11). Различие в значениях, полученных по ГОСТ 1497 и расчетным уравнениям, находится в пределах 5...6 %. Максимальные отклонения составляют: сталь 20 — 5,8 %; 09Г2С — 5,8 %; 15Х5М — 5,3 %; 12Х18Н10Т — 5,4 %.



□ – сталь 20; ○ – 09Г2С; Δ – 15Х5М; ◇ – 12Х18Н10Т

**Рисунок 3.11 – Сводная диаграмма значений относительного сужения, определенных по ГОСТ 1497 и расчетным уравнениям (таблица 3.5)**

Расчетное значение коэффициента Стьюдента для линейной регрессии больше табличного (см. таблицу 3.5). Поэтому на статистически значимом уровне признано наличие устойчивой корреляции между  $\psi$  и  $S$ .

### **3.3 Определение механических свойств материала на элементах конструкций нефтеперерабатывающего оборудования**

Промышленно выпускаемые переносные твердомеры Виккерса с индентором в виде пирамиды (M10, M20, TIV и др.) в основном измеряют твердость при нагрузке на индентор 50 Н. Выше установлены зависимости между геометрическими параметрами ( $D$  и  $S$ ) пирамидального отпечатка, твердостью по Виккерсу  $HV$  и механическими свойствами ( $\sigma_b$ ,  $\delta_5$  и  $\psi$ ), которые справедливы при измерении твердости с нагрузкой на индентор 200 Н. Однако размеры и параметры отпечатка, получаемого при нагрузке 200 Н, больше размеров отпечатка, получаемого при нагрузке 50 Н. Поэтому необходимо адаптировать полученные уравнения для определения механических свойств по результатам анализа отпечатков, получаемых при измерении твердости по Виккерсу переносными твердомерами, т.к. с их помощью предполагается определение механических характеристик на конструкциях НПО. Это можно сделать путем введения поправочных коэффициентов для параметров отпечатка ( $D$  и  $S$ ), потому что отпечатки, получаемые при измерении твердости по Виккерсу при различных нагрузках имеют геометрическое и механическое подобие.

Пирамидальные отпечатки, полученные при измерении твердости по Виккерсу с различной нагрузкой, имеют геометрически подобную между собой форму, следовательно, и твердость, рассчитываемая в виде отношения силы к площади поверхности отпечатка, является постоянной величиной, не зависящей от величины нагрузки [47, с. 16].

Закон механического подобия для случая статического вдавливания индентора в форме пирамиды с углом между гранями  $136^\circ$  устанавливается следующим образом. Следуя ходу классического доказательства закона механического подобия для статических нагрузок [47, с. 24] можно показать, что напряжение  $\sigma$  есть функция нагрузки  $P$ , параметра отпечатка  $D$  или  $S$  (диагональ или ширина) и коэффициента формы индентора  $\Psi$  (угол между противоположными гранями):

$$\sigma = f(P, D, \Psi). \quad (3.15)$$

Поскольку размерности левой и правой частей должны совпадать, вводя коэффициенты в степень при независимых переменных, получим

$$\sigma = f(P^\alpha, D^\beta, \Psi^\gamma), \quad (3.16)$$

где  $\alpha = 1$ ;  $\beta = -2$ ;  $\gamma = 0$ .

Тогда

$$\sigma = P^1 \cdot D^{-2} \cdot \Psi^0 = \frac{P}{D^2} \cdot f(\Psi). \quad (3.17)$$

Так как при соблюдении геометрического подобия  $\Psi$  постоянно для пирамидальных отпечатков, то  $f(\Psi)$  есть постоянная. Следовательно, для равенства напряжений в вершинах и центрах сторон пирамидальных отпечатков, полученных при различных нагрузках, отношение  $P/D^2$  должно иметь одинаковые значения:

$$\frac{P}{D^2} = Idem. \quad (3.18)$$

Таким образом, поскольку при статическом вдавливании пирамидального индентора в материал получают геометрически подобные отпечатки, то отношение вдавливающей силы к квадрату любого линейного размера отпечатка должно сохраняться постоянным, т.е.

$$\frac{P}{D^2} = Idem \quad \text{или} \quad \frac{P}{S^2} = Idem. \quad (3.19)$$

То есть должно соблюдаться уравнение [47, с. 26]:

$$P = a_1 \cdot D^2 \quad \text{или} \quad P = a_2 \cdot h^2. \quad (3.20)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – постоянные, значения которых определяются геометрической формой индентора и механическими свойствами материала.

Поскольку соблюдается подобие деформированных объемов и полей напряжений, постольку соблюдается и пропорциональность между работой деформирования ( $A$ ) и деформированным объемом материала ( $V$ ) [47, с. 25], т.е.

$$\frac{A}{V} = Idem. \quad (3.21)$$

Работа индентора при внедрении в материал на глубину  $h$

$$A = \int_0^h P dh. \quad (3.22)$$

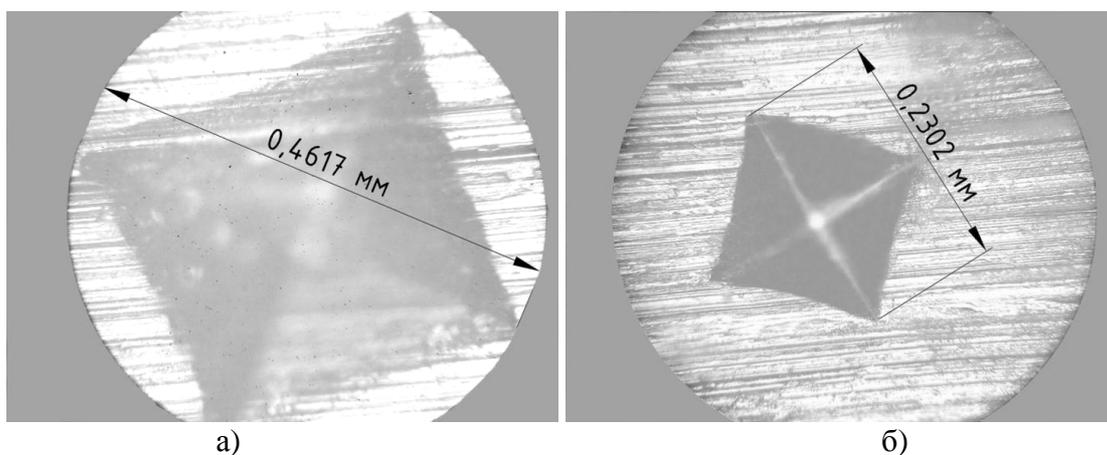
Так как  $P = a_2 \cdot h^2$  (см. уравнение (3.20)), то

$$A = a_2 \int_0^h h^2 dh = \frac{a_2}{3} \cdot h^3 = a_3 \cdot h^3 = a_4 \cdot V, \quad (3.23)$$

где  $a_3$  и  $a_4$  – постоянные, значения которых определяются геометрической формой индентора и механическими свойствами материала.

Выражение (3.23) утверждает, что произведенная работа пропорциональна объему или третьей степени линейного размера отпечатка и является математическим выражением формулировки закона механического подобия [47, с. 26].

Нами экспериментально установлено, что параметры пирамидальных отпечатков, полученных при нагрузке 50 Н, меньше параметров отпечатков, полученных при нагрузке 200 Н, примерно в 2 раза (рисунок 3.12).



а) – отпечаток, полученный при нагрузке на индентор 200 Н (×400)  
 б) – отпечаток, полученный при нагрузке на индентор 50 Н (×400)  
**Рисунок 3.12 – Сравнение размера пирамидальных отпечатков**

Таким образом, в формулах (3.1)...(3.14) перед параметрами пирамидального отпечатка ( $D$  и  $S$ ) следует подставлять коэффициент  $k \approx 2$ . Аналогичные результаты по установлению соответствия параметров отпечатка в зависимости от нагрузки получены в работе [81].

Окончательные зависимости между механическими свойствами, значением твердости  $HV$  и параметрами пирамидального отпечатка, полученного при измерении твердости с нагрузкой 50 Н (т.е. для переносных твердомеров), выражены в формулах (3.24)...(3.37) и сведены в таблицы 3.6...3.8.

Корреляционное уравнение линейной регрессии для определения предела прочности сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т (нагрузка на индентор 50 Н):

$$\begin{cases} \sigma_g = HV \cdot (0,261 + 0,233 \cdot kS), \text{ МПа;} \\ \sigma_g = \frac{1}{D^2} \cdot (24,2 + 21,604 \cdot kS), \text{ МПа.} \end{cases} \quad (3.24)$$

Корреляционные уравнения линейной регрессии для определения относительного удлинения (нагрузка на индентор 50 Н):

– стали 20

$$\delta_5 = kD \cdot (0,277 + 1,158 \cdot kS), \text{ отн. ед.;} \quad (3.30)$$

– стали 09Г2С

$$\delta_5 = kD \cdot (0,168 + 0,937 \cdot kS), \text{ отн. ед.;} \quad (3.31)$$

– стали 15Х5М

$$\delta_5 = kD \cdot (0,213 + 1,211 \cdot kS), \text{ отн. ед.;} \quad (3.32)$$

– стали 12Х18Н10Т

$$\delta_5 = kD \cdot (0,346 + 2,021 \cdot kS), \text{ отн. ед.} \quad (3.33)$$

Корреляционные уравнения линейной регрессии для определения относительного сужения (нагрузка на индентор 50 Н):

– стали 20

$$\psi = 0,164 + 1,702 \cdot kS, \text{ отн. ед.;} \quad (3.34)$$

– стали 09Г2С

$$\psi = 0,113 + 1,375 \cdot kS, \text{ отн. ед.;} \quad (3.35)$$

– стали 15Х5М

$$\psi = 0,16 + 1,754 \cdot kS, \text{ отн. ед.;} \quad (3.36)$$

– стали 12Х18Н10Т

$$\psi = 0,16 + 1,729 \cdot kS, \text{ отн. ед.} \quad (3.37)$$

Таблица 3.6 – Корреляционные уравнения полиномиальной регрессии для определения предела прочности сталей 20, 09Г2С, 15Х5М, 12Х18Н10Т (нагрузка на индентор 50 Н, переносные твердомеры)

Марка стали	Номер уравнения	Уравнение полиномиальной регрессии	Параметры уравнения полиномиальной регрессии					
20, 09Г2С, 15Х5М, 12Х18Н10Т	(3.25)	$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{\epsilon} &= \sum_{i=1}^{i=6} \left( K_i \cdot HV^{I_{i,1}} \cdot (kS)^{I_{i,2}} \right) \\ \sigma_{\epsilon} &= \sum_{i=1}^{i=6} \left( K_i \cdot \left( \frac{92,72}{D^2} \right)^{I_{i,1}} \cdot (kS)^{I_{i,2}} \right) \end{aligned} \right.$	Коэффициенты полинома $K_i$					
			$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$
			0,239	432,055	-300,662	82,183	0,231	$4,054 \times 10^{-6}$
			Показатель степени при $HV$ $I_{i,1}$					
			$I_{1,1}$	$I_{2,1}$	$I_{3,1}$	$I_{4,1}$	$I_{5,1}$	$I_{6,1}$
			1	0	0	0	1	2
			Показатель степени при $S$ $I_{i,2}$					
			$I_{1,2}$	$I_{2,2}$	$I_{3,2}$	$I_{4,2}$	$I_{5,2}$	$I_{6,2}$
			1	2	1	0	0	0

Таблица 3.7 – Корреляционные уравнения полиномиальной регрессии для определения относительного удлинения сталей 20 и 09Г2С (нагрузка на индентор 50 Н, переносные твердомеры)

Марка стали	Номер уравнения	Уравнение полиномиальной регрессии	Параметры уравнения полиномиальной регрессии								
			Коэффициенты полинома $K_i$								
20	(3.26)	$\delta_5 = \sum_{i=1}^{i=6} (K_i \cdot (kD)^{I_{i,1}} \cdot (kS)^{I_{i,2}})$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$			
			$3,669 \cdot 10^4$	$-2,41 \cdot 10^4$	47,527	0,017	-36,153	$-1,396 \times 10^4$			
			Показатель степени при $D$ $I_{i,1}$								
			$I_{1,1}$	$I_{2,1}$	$I_{3,1}$	$I_{4,1}$	$I_{5,1}$	$I_{6,1}$			
			1	0	0	0	1	2			
			Показатель степени при $S$ $I_{i,2}$								
			$I_{1,2}$	$I_{2,2}$	$I_{3,2}$	$I_{4,2}$	$I_{5,2}$	$I_{6,2}$			
			1	2	1	0	0	0			
			09Г2С	(3.27)	$\delta_5 = \sum_{i=1}^{i=6} (K_i \cdot (kD)^{I_{i,1}} \cdot (kS)^{I_{i,2}})$	Коэффициенты полинома $K_i$					
						$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$
$-3,669 \cdot 10^3$	$2,33 \cdot 10^3$	23,143				0,046	-18,027	$-1,445 \times 10^3$			
Показатель степени при $D$ $I_{i,1}$											
$I_{1,1}$	$I_{2,1}$	$I_{3,1}$				$I_{4,1}$	$I_{5,1}$	$I_{6,1}$			
1	0	0				0	1	2			
Показатель степени при $S$ $I_{i,2}$											
$I_{1,2}$	$I_{2,2}$	$I_{3,2}$				$I_{4,2}$	$I_{5,2}$	$I_{6,2}$			
1	2	1				0	0	0			

Таблица 3.8 – Корреляционные уравнения полиномиальной регрессии для определения относительного удлинения сталей 15X5M и 12X18H10T (нагрузка на индентор 50 Н, переносные твердомеры)

Марка стали	Номер уравнения	Уравнение полиномиальной регрессии	Параметры уравнения полиномиальной регрессии								
			Коэффициенты полинома $K_i$								
15X5M	(3.28)	$\delta_5 = \sum_{i=1}^{i=6} (K_i \cdot (kD)^{I_{i,1}} \cdot (kS)^{I_{i,2}})$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$			
			$-8,337 \cdot 10^4$	$5,477 \cdot 10^4$	62,095	0,046	-47,269	$3,173 \times 10^4$			
			Показатель степени при $D$ $I_{i,1}$								
			$I_{1,1}$	$I_{2,1}$	$I_{3,1}$	$I_{4,1}$	$I_{5,1}$	$I_{6,1}$			
			1	0	0	0	1	2			
			Показатель степени при $S$ $I_{i,2}$								
			$I_{1,2}$	$I_{2,2}$	$I_{3,2}$	$I_{4,2}$	$I_{5,2}$	$I_{6,2}$			
			1	2	1	0	0	0			
			12X18H10T	(3.29)	$\delta_5 = \sum_{i=1}^{i=6} (K_i \cdot (kD)^{I_{i,1}} \cdot (kS)^{I_{i,2}})$	Коэффициенты полинома $K_i$					
						$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$
$7,582 \cdot 10^4$	$-5,386 \cdot 10^4$	117,095				1,218	-88,991	$-2,668 \times 10^4$			
Показатель степени при $D$ $I_{i,1}$											
$I_{1,1}$	$I_{2,1}$	$I_{3,1}$				$I_{4,1}$	$I_{5,1}$	$I_{6,1}$			
1	0	0				0	1	2			
Показатель степени при $S$ $I_{i,2}$											
$I_{1,2}$	$I_{2,2}$	$I_{3,2}$				$I_{4,2}$	$I_{5,2}$	$I_{6,2}$			
1	2	1				0	0	0			

Таким образом, экспресс-метод определения механических свойств можно применять для определения механических характеристик материала на металлоконструкциях путем введения поправочных коэффициентов перед параметрами отпечатка ( $D$  и  $S$ ) в корреляционные уравнения. Это, в свою очередь, позволяет определять механические свойства материала конструкций НПО без вырезки образцов путем определения твердости по Виккерсу переносными твердомерами и измерения параметров пирамидальных отпечатков переносным микроскопом.

### 3.4 Определение ударной вязкости материала неразрушающим способом

Ударная вязкость занимает особое место среди других механических свойств, т.к. ее значение характеризует склонность материала к хрупкому разрушению и его поведение в условиях эксплуатации (в особенности при наличии сложных условий нагружения и ударных нагрузок).

Существующие способы определения ударной вязкости материала предусматривают вырезку образцов из конструкции для испытаний. Так, согласно ГОСТ 9454 [91] испытаниям на ударный изгиб подвергают образцы, вырезанные из деталей или конструкций, с концентраторами напряжений типов  $U$ ,  $V$  и  $T$ . Главным недостатком данного способа является то, что он разрушающий. При этом минимальные размеры образцов таковы, что требуется проведение ремонтных работ на объекте.

Наибольшую ценность представляют корреляционные уравнения взаимосвязи ударной вязкости со значениями механических свойств, полученных при испытании на растяжение или при определении твердости. В работах [64, 98] показано, что ударная вязкость и относительное сужение при растяжении согласуются между собой, т.к. обе эти характеристики определяются пластичностью материала до разрушения [99]. Ударная вязкость определяется деформацией объема материала, т.е. она пропорциональна кубу линейной деформации. Относительное сужение определяется деформацией сечения и, следовательно, пропорционально квадрату линейной деформации. Это можно выразить математически:

$$KC = \alpha_1 \delta^3; \quad \Delta KC = 3\alpha_1 \delta^2 \Delta \delta; \quad \frac{\Delta KC}{KC} = \frac{3\Delta \delta}{\delta}; \quad (3.38)$$

$$\psi = \alpha_2 \delta^2; \quad \Delta \psi = 2\alpha_2 \delta \Delta \delta; \quad \frac{\Delta \psi}{\psi} = \frac{2\Delta \delta}{\delta}, \quad (3.39)$$

где  $\delta$  – линейная деформация, мм;

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты пропорциональности;

$KC$  – ударная вязкость, МДж/м<sup>2</sup>;  
 $\Delta KC$  – приращение ударной вязкости, МДж/м<sup>2</sup>;  
 $\psi$  – относительное сужение, отн. ед.;  
 $\Delta\psi$  – приращение относительного сужения, отн. ед.  
 Следовательно,

$$\frac{\Delta KC}{KC} = \frac{3}{2} \frac{\Delta\psi}{\psi}. \quad (3.40)$$

Поэтому между ударной вязкостью и поперечным сужением материала существует физически обоснованная функциональная связь.

Заслуживает внимания способ определения ударной вязкости материала в зависимости от относительного сужения по формуле [83]

$$KCU = \gamma \cdot \frac{\Psi}{1 - \psi}, \text{ МДж/м}^2, \quad (3.41)$$

где  $KCU$  – ударная вязкость, МДж/м<sup>2</sup>;  
 $\psi$  – относительное сужение, отн. ед.;  
 $\gamma$  – коэффициент пропорциональности, значение которого зависит от значения механических свойств стали (таблица 3.9).

Особенностью указанного способа является определение ударной вязкости по математической формуле. Однако при этом относительное сужение  $\psi$  определяется путем стандартных испытаний на растяжение. Поэтому недостатком данного способа является то, что из конструкции также необходимо производить вырезку образцов для проведения испытаний на растяжение с целью определения величины относительного сужения  $\psi$ .

Таблица 3.9 – Значения коэффициента пропорциональности  $\gamma$  и разделение сталей на группы по значению механических свойств [83]

Разделение на группы по $\psi$ (%)		Разделение на группы по $\sigma_B$ (МПа)		Разделение на группы по $\sigma_B \delta_5$ (МПа×%)	
Пределы	Коэффициент $\gamma$	Пределы	Коэффициент $\gamma$	Пределы	Коэффициент $\gamma$
$\psi > 80$	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

По нашему мнению наиболее перспективным решением задачи определения ударной вязкости без разрушения конструкций является синтез указанного выше способа (формула (3.41)) и взглядов о взаимосвязи механических свойств с параметрами формы пирамидального отпечатка. Согласно предлагаемому нами способу, определение ударной вязкости следует осуществлять неразрушающим способом путем определения относительного сужения материала по параметрам пирамидального отпечатка, полученного при измерении твердости по Виккерсу, и подстановки полученных значений в формулу (3.41). При этом для определения относительного сужения используются полученные ранее уравнения (3.11)...(3.14) и (3.34)...(3.37). После подстановки данных уравнений в формулу (3.41) получим формулы для определения ударной вязкости неразрушающим способом, которые сведены в таблицу 3.10. Из формул видно, что чем больше значение  $S$ , а, следовательно, и  $\psi$ , тем при прочих равных условиях больше  $KCU$ .

Полученная взаимосвязь между  $KCU$  и  $S$  расширяет область применения способа определения ударной вязкости. Новое назначение связано с новыми для него функциями и достигаемым результатом в части неразрушающего определения ударной вязкости материала НПО.

Нашими исследованиями установлено, что для определения коэффициента  $\gamma$  в формуле (3.41) наиболее применимо разделение сталей на группы по относительному сужению  $\psi$  (см. таблицу 3.9). При этом обеспечивается максимальная объективность и близость получаемых значений ударной вязкости к базовым значениям, полученным на стандартных образцах при испытаниях по ГОСТ 9454.

Таблица 3.10 – Формулы для определения ударной вязкости  $KCU$  сталей, применяемых для изготовления НПО, неразрушающим способом

Марка стали	Уравнения для определения ударной вязкости, МДж/м <sup>2</sup>	
	при нагрузке на индентор 200 Н	при нагрузке на индентор 50 Н
Сталь 20	$KCU = \gamma \cdot \frac{0,164 + 1,702 \cdot S}{1 - (0,164 + 1,702 \cdot S)} \quad (3.42)$	$KCU = \gamma \cdot \frac{0,164 + 1,702 \cdot kS}{1 - (0,164 + 1,702 \cdot kS)} \quad (3.46)$
09Г2С	$KCU = \gamma \cdot \frac{0,113 + 1,375 \cdot S}{1 - (0,113 + 1,375 \cdot S)} \quad (3.43)$	$KCU = \gamma \cdot \frac{0,113 + 1,375 \cdot kS}{1 - (0,113 + 1,375 \cdot kS)} \quad (3.47)$
15Х5М	$KCU = \gamma \cdot \frac{0,16 + 1,754 \cdot S}{1 - (0,16 + 1,754 \cdot S)} \quad (3.44)$	$KCU = \gamma \cdot \frac{0,16 + 1,754 \cdot kS}{1 - (0,16 + 1,754 \cdot kS)} \quad (3.48)$
12Х18Н10Т	$KCU = \gamma \cdot \frac{0,16 + 1,729 \cdot S}{1 - (0,16 + 1,729 \cdot S)} \quad (3.45)$	$KCU = \gamma \cdot \frac{0,16 + 1,729 \cdot kS}{1 - (0,16 + 1,729 \cdot kS)} \quad (3.48)$

Разработанный способ был апробирован на образцах из сталей 20, 09Г2С, 15Х5М, 12Х18Н10Т. Для сравнения расчетных значений ударной вязкости (см. уравнения в таблице 3.10) исследуемых сталей с базовыми значениями, определенными по ГОСТ 9454, построены диаграммы (рисунки 3.13...3.16).

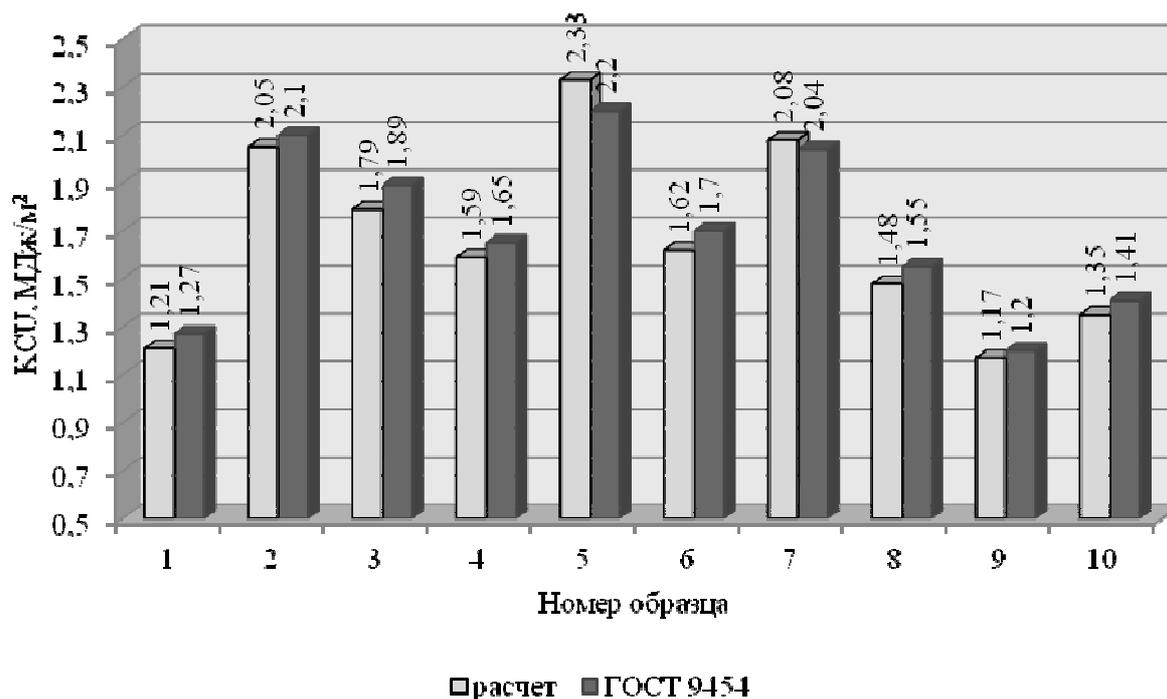


Рисунок 3.13 – Сравнение значений ударной вязкости стали 20, определенных расчетным способом и по ГОСТ 9454

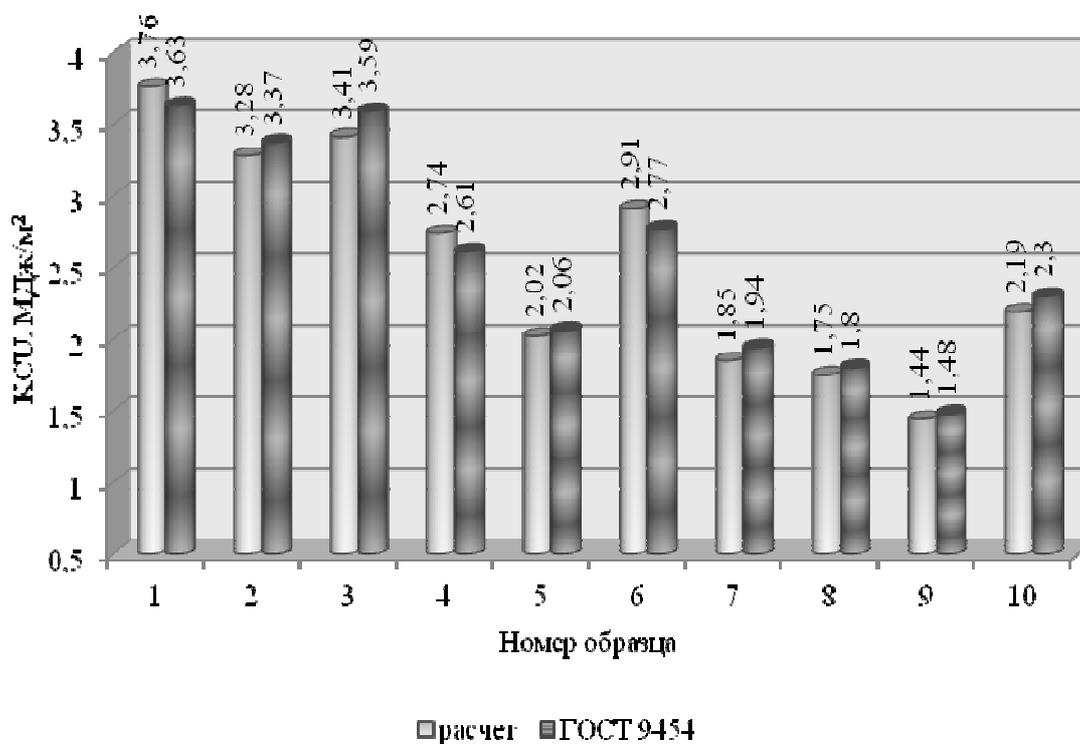


Рисунок 3.14 – Сравнение значений ударной вязкости стали 09Г2С, определенных расчетным способом и по ГОСТ 9454

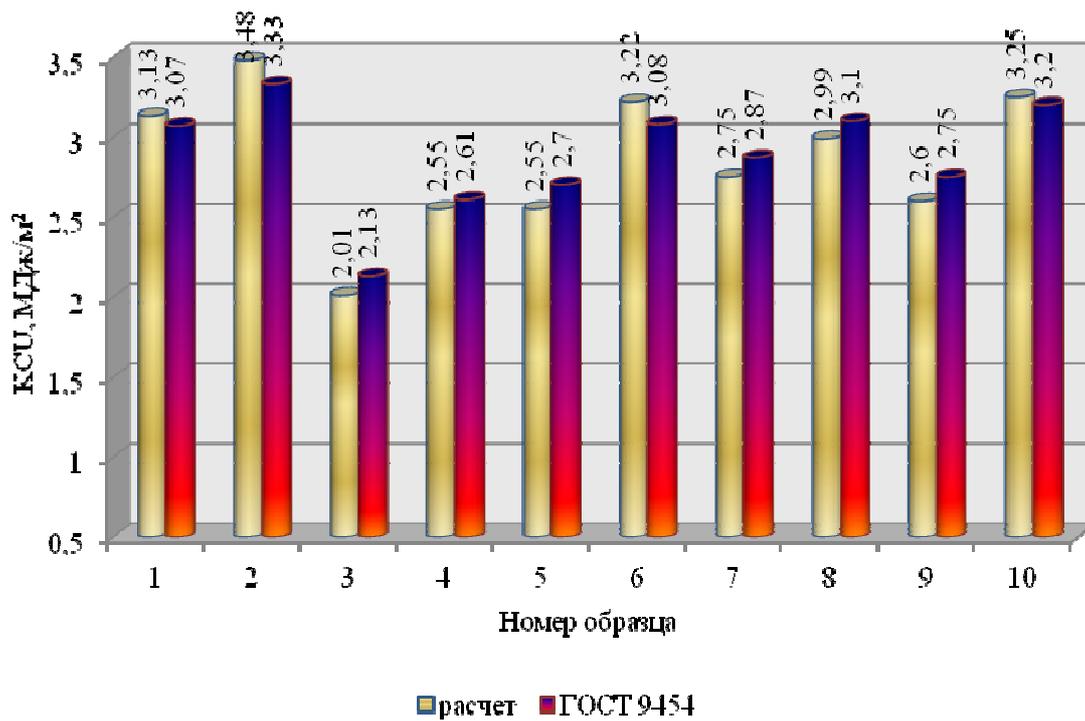


Рисунок 3.15 – Сравнение значений ударной вязкости стали 15X5M, определенных расчетным способом и по ГОСТ 9454

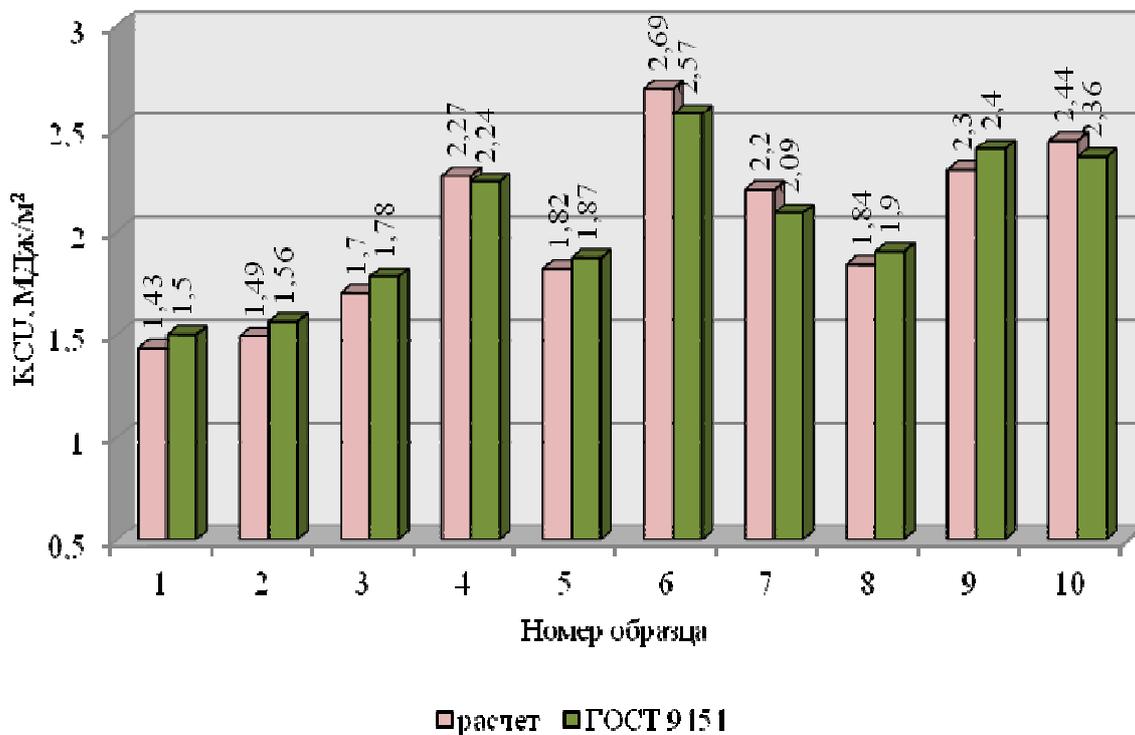
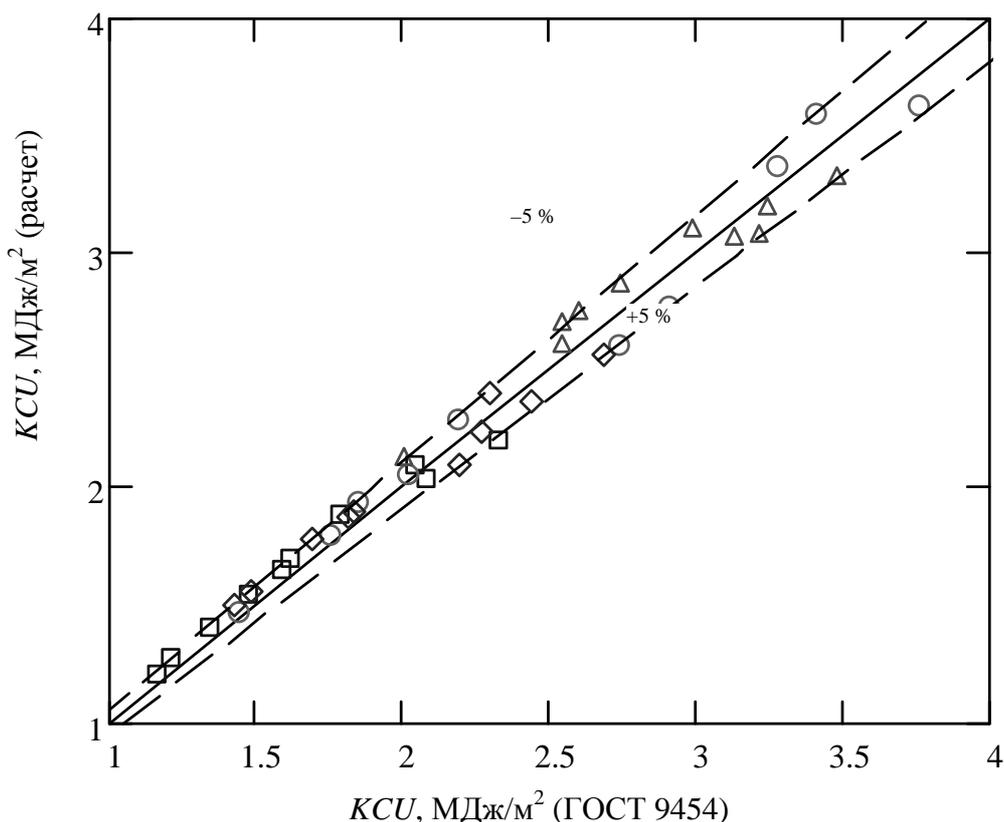


Рисунок 3.16 – Сравнение значений ударной вязкости стали 12X18N10T, определенных расчетным способом и по ГОСТ 9454

Для оценки погрешности определения ударной вязкости расчетным способом в сравнении с базовыми значениями построена сводная диаграмма (рисунок 3.17). Различие в значениях, полученных по ГОСТ 9454 и расчетным способом, находится в пределах 6 %. Максимальные отклонения составляют: сталь 20 – 5,9 %; 09Г2С – 5,1 %; 15Х5М – 5,6 %; 12Х18Н10Т – 5,3 %.



□ — сталь 20; ○ — 09Г2С; △ — 15Х5М; ◇ — 12Х18Н10Т

**Рисунок 3.17 — Сводная диаграмма значений ударной вязкости, определенных по ГОСТ 9454 и расчетным уравнениям (см. таблицу 3.10)**

Результаты исследований показывают, что значения ударной вязкости, определенные по разработанному способу, коррелируют со значениями, полученными по ГОСТ 9454. При этом положительной отличительной особенностью способа является возможность оценки ударной вязкости непосредственно на объекте практически в любом доступном месте без его разрушения и вырезки образцов.

### 3.5 Выводы

1. Установлены зависимости между геометрическими параметрами пирамидального отпечатка (диагональ  $D$  и ширина  $S$ ), полученного при определении твердости по Виккерсу при нагрузке на индентор 200 Н и 50 Н (с использованием стационарных и переносных твердомеров), и механическими свойствами ( $\sigma_b$ ,  $\delta_5$  и  $\psi$ ) сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т. Зависимость  $\sigma_b = f(HV, S)$  для сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т описывается общим уравнением, зависимости  $\delta_5 = f(D, S)$  и  $\psi = f(S)$  – отдельными уравнениями для каждой из марок сталей. Предел прочности  $\sigma_b$  в большей степени коррелирует с твердостью  $HV$ , а относительные удлинение  $\delta_5$  и сужение  $\psi$  – с диагональю  $D$  и шириной  $S$  отпечатка.

По сравнению с существующими взаимосвязями между механическими свойствами полученные уравнения отличаются многофакторным учетом пластического деформирования материала. Они позволяют более точно определять механические характеристики, т.к. в состав уравнений входят значения твердости  $HV$  (или  $D$ ) (характеризующей возникающие в материале напряжения) и ширины отпечатка  $S$  (характеризующей способность материала к пластическому деформированию). Полученные экспериментальные данные позволили углубить теоретическое и экспериментальное обоснования связи геометрических параметров пирамидального отпечатка с механическими характеристиками применительно к материалу НПО.

2. Установлена зависимость между шириной пирамидального отпечатка и ударной вязкостью сталей 20, 09Г2С, 15Х5М и 12Х18Н10Т. Для исследованных сталей получены корреляционные уравнения, которые позволяют определять ударную вязкость материала неразрушающим способом путем измерения геометрических параметров пирамидального отпечатка, полученного при определении твердости по Виккерсу, и расчета значения ударной вязкости с использованием указанных уравнений.

3. Выявленные зависимости имеют устойчивую корреляционную связь на статистически значимом уровне. Погрешность определения механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ) неразрушающим способом не превышает 6 % по сравнению с базовыми значениями, определенными по ГОСТ 1497 и 9454. Такая точность вполне приемлема в инженерной практике при контроле состояния материала конструкций НПО. Поэтому полученные уравнения могут быть использованы в качестве экспресс-метода контроля состояния материала НПО.

## ГЛАВА 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ И ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

#### 4.1 Выбор критериев оценки старения материала нефтеперерабатывающего оборудования

С начала XX века установлены и существуют по настоящее время критерии оценки надежности конструкций, основанные на предположении о том, что величина действующих в конструкции напряжений не должна превышать пределы текучести  $\sigma_{0,2}$  и прочности  $\sigma_b$ . Однако практическое использование такого подхода не позволяет оценить реальное состояние материала, вследствие чего время от времени происходят разрушения конструкций при напряжениях значительно меньших, чем  $\sigma_b$  и даже  $\sigma_{0,2}$ .

В механике разрушений научно обосновывается оценка надежности конструкций, по которой напряжение в вершине трещины  $K_c$  не должно превышать критической величины  $K_{Ic}$  [100, с. 127]. Наравне с этим критерием в механике разрушений используются деформационные критерии – критические значения раскрытия трещины в условиях плоской деформации ( $\delta_{Ic}$ ) и плосконапряженного состояния ( $\delta_c$ ) и энергетические критерии – критические значения  $J$ -интеграла в условиях плоской деформации ( $J_{Ic}$ ) и плосконапряженного состояния ( $J_c$ ) [11, с. 102]. Для экспериментального определения  $K_{Ic}$  необходимо дорогостоящее оборудование, при этом реальные размеры исследуемых конструкций не всегда позволяют изготовить образцы по ГОСТ 25.506 [101]. У всех определяемых характеристик имеет место большой разброс значений, а для того, чтобы получить среднее значение необходимо провести большое количество испытаний.

Существуют более точные методы исследований механизмов старения материала, в основу которых положены исследования его поведения при жестком нагружении на сжатие (релаксационные испытания). Исследователи утверждают [31, 32, 102], что предел микропластичности  $\sigma^0$  более чувствителен к изменениям структуры материала, чем указанные выше характеристики механики разрушения. Однако для определения  $\sigma^0$  необходимо уникальное оборудование, которое, по сути, существует в единичном экземпляре. В связи с этим в качестве критериев оценки старения материала нами использованы механические характеристики, получение которых широко освоено в инженерной практике.

Традиционно оценку текущего состояния материала оборудования и конструкций проводят путем определения его механических свойств и сравнения их с минимально допустимыми значениями, регламентированными ТНПА. В ТНПА не предусматривается строго определенных интервалов значений характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости материала. В большинстве случаев требуется, чтобы эти характеристики были не менее некоторого нормативного значения (например, для труб из стали 20 по ГОСТ 550:  $\sigma_{0,2} \geq 255$  МПа,  $\sigma_b \geq 431$  МПа,  $\delta_5 \geq 22$  %,  $\psi \geq 55$  %,  $KCU \geq 0,78$  МДж/м<sup>2</sup> [103, с. 106]).

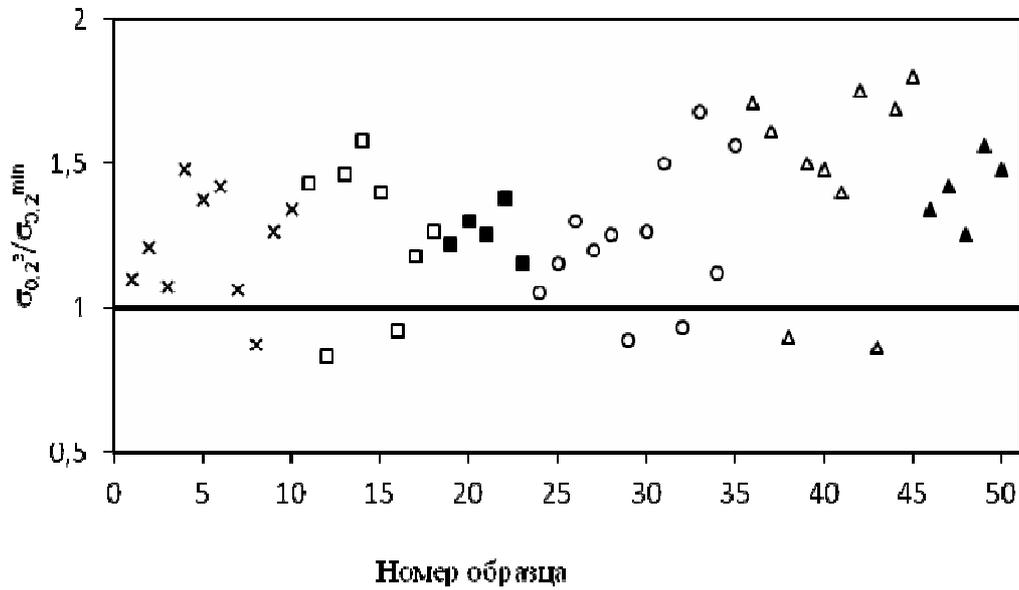
В связи с этим для оценки старения материала использованы отношения значений  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$ , определенных при стандартных испытаниях на растяжение и ударный изгиб (по ГОСТ 1497 [90] и 9454 [91]) к минимально допустимым значениям, предусмотренным ТНПА (рисунки 4.1 и 4.2). Для материала, который по данной характеристике удовлетворяет требованиям ТНПА, указанное отношение  $\geq 1$ . Экспериментальные точки, лежащие выше номинальной линии (проходящей на уровне ординаты, равной единице), соответствуют пригодному материалу, а точки, находящиеся ниже указанной линии, характеризуют непригодный материал. Индексами «э» и «min» на рисунках 4.1 и 4.2 обозначены значения соответствующей характеристики, полученные экспериментально при растяжении или ударном изгибе (индекс «э») и предусмотренные ТНПА (минимально допустимое значение) (индекс «min»).

Пониженные значения пределов текучести  $\sigma_{0,2}$  и прочности  $\sigma_b$ , относительного удлинения  $\delta_5$  и ударной вязкости  $KCU$  обусловлены старением материала в течение длительной эксплуатации.

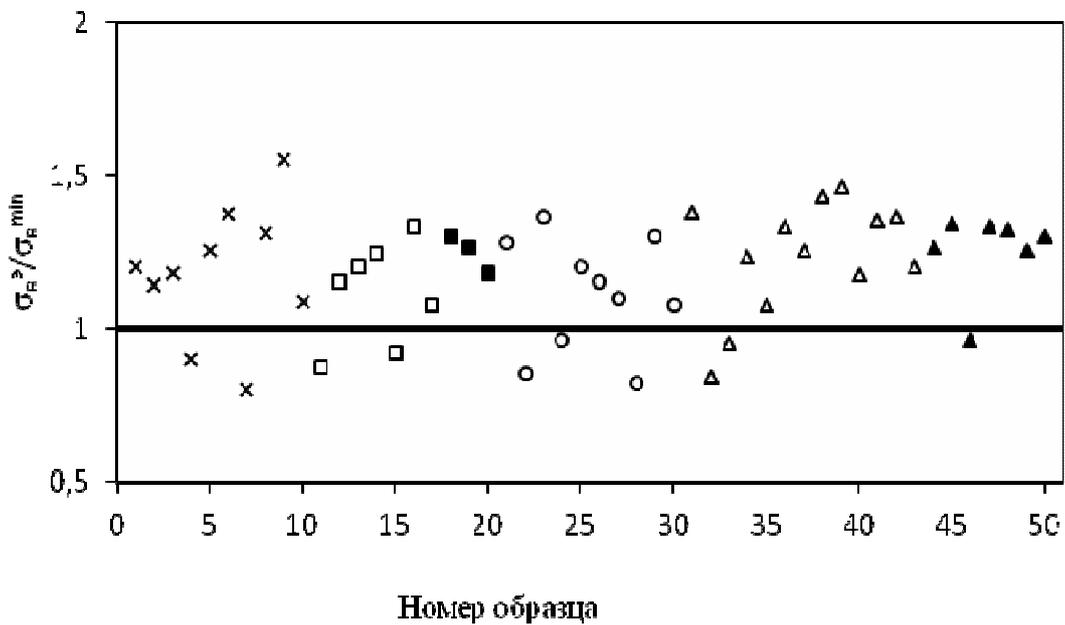
Из представленных графиков (см. рисунки 4.1 и 4.2) видно, что при оценке старения сталей по пределу прочности 20 % экспериментальных точек располагаются ниже номинальной линии, по пределу текучести – 14 %, относительному удлинению – 28 %, а по ударной вязкости – 46 %.

Таким образом, видно, что ударная вязкость (которая не учитывается в расчетах на прочность и определении остаточного ресурса) занимает особое место среди других механических характеристик и является определяющей при оценке старения материала. Это связано с тем, что она наиболее объективно отражает деградационные процессы, происходящие в материале, и свидетельствует об эксплуатационных повреждениях основного металла и сварных соединений конструкции. Вместе с тем оценка старения материала по пределу текучести, значения которого используются в расчетах конструкций на прочность, не выявляет видимого старения

материала. В связи с этим логично использовать ударную вязкость в качестве основной характеристики для разработки способа, позволяющего определять динамику деградации механических свойств материала НПО.



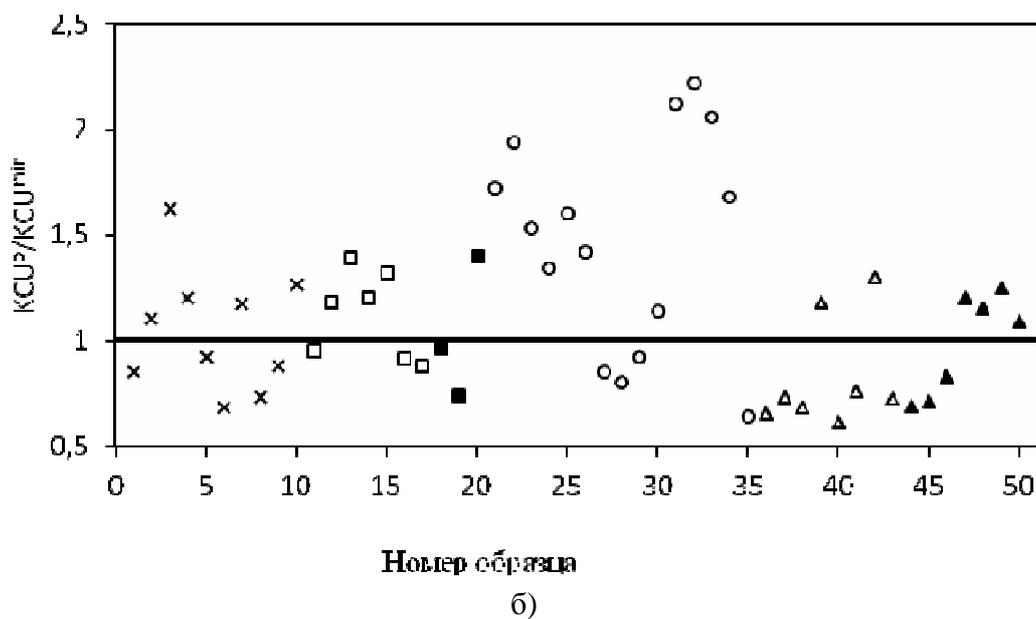
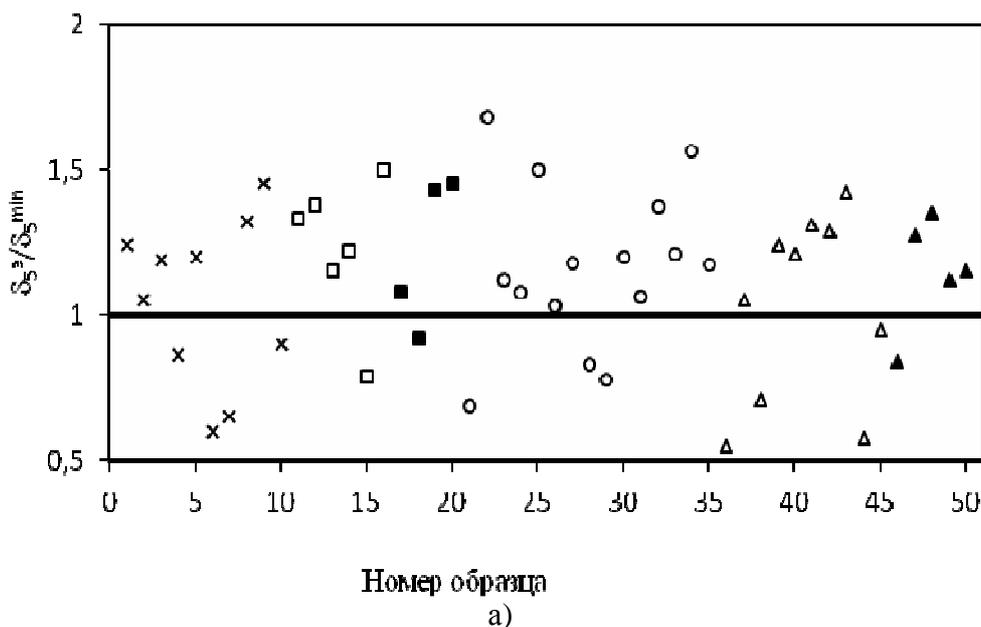
а)



б)

× – сталь 20; □ – 09Г2С; ■ – 16ГС; ○ – 15Х5М; △ – 12Х18Н10Т; ▲ – 08Х18Н10Т  
 Рисунок 4.1 – Результаты оценки старения сталей отношениями значений

пределов текучести  $\frac{\sigma_{0,2}^{\exists}}{\sigma_{0,2}^{\min}}$  (а) и прочности  $\frac{\sigma_B^{\exists}}{\sigma_B^{\min}}$  (б)



× – сталь 20; □ – 09Г2С; ■ – 16ГС; ○ – 15Х5М; Δ – 12Х18Н10Т; ▲ – 08Х18Н10Т  
 Рисунок 4.2 – Результаты оценки старения сталей отношениями значений  
 относительного удлинения  $\frac{\delta_5^{\text{ж}}}{\delta_5^{\text{min}}}$  (а) и ударной вязкости  $KCU^{\text{ж}}/KCU^{\text{min}}$  (б)

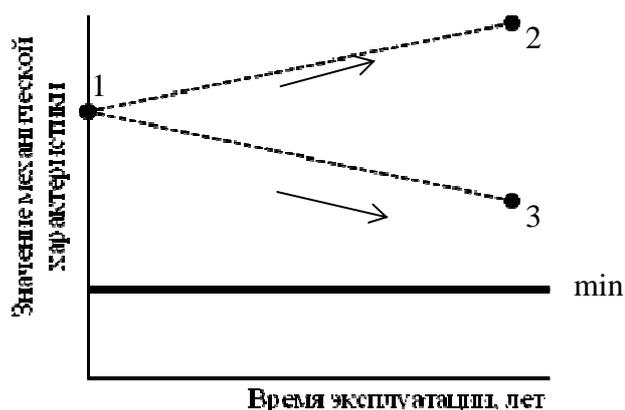
Из графиков (см. рисунки 4.1 и 4.2) также следует, что одна и та же сталь характеризуется четырьмя точками, соответствующими значениям механических характеристик, на разных графиках. Так, для экспериментально определенных механических свойств аустенитных сталей 08Х18Н10Т и

12X18H10T отношения  $\frac{\sigma_{0,2}^{\text{Э}}}{\sigma_{0,2}^{\text{min}}}$  и  $\frac{\sigma_{\text{В}}^{\text{Э}}}{\sigma_{\text{В}}^{\text{min}}}$  больше единицы. Однако, отношение

$KCU^{\text{Э}}/KCU^{\text{min}}$  меньше единицы. Отношение  $\frac{\delta_5^{\text{Э}}}{\delta_5^{\text{min}}}$  принимает значения как

больше, так и меньше единицы. Аналогичная ситуация наблюдается и для других исследованных сталей.

Таким образом, по пределам прочности и текучести материал может относиться к пригодному металлу, по ударной вязкости – к непригодному, а относительному удлинению – как к пригодному, так и к непригодному. То есть материал по различным характеристикам может находиться в различных областях годности (см. рисунки 4.1 и 4.2). Поэтому исследование старения материала 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, при снижении ударной вязкости стандартные характеристики при статических испытаниях на растяжение могут не изменяться [11]. Если значение одной из характеристик на графике будет приближаться к критической границе, то это не значит, что ресурс работоспособности материала до достижения предельного состояния минимален, т.к. лимитирующей для каждого конкретного случая напряженно-деформированного состояния является своя характеристика. Схема возможных направлений изменения значений конкретной механической характеристики приведена на рисунке 4.3.



1 – значение до эксплуатации; 2 и 3 – возможные значения после длительной эксплуатации; min – минимально допустимое значение механической характеристики по ТНПА

Рисунок 4.3 – Схема возможных направлений изменения значений конкретной механической характеристики

Таким образом, анализ изменения механических свойств, а тем более определение состояния материала при помощи данных графиков весьма затруднителен, т.к. изменение механических свойств можно оценить только по отдельной характеристике, а для оценки старения материала по нескольким характеристикам необходимо анализировать несколько графиков, что трудоемко и необъективно.

Установленная высокая чувствительность ударной вязкости к деградации материала открывает перспективы для дальнейшей разработки графического способа фиксирования изменения комплекса механических свойств материала, основанного на ударной вязкости. Актуальной остается задача поиска графической зависимости, позволяющей устанавливать динамику изменения комплекса механических свойств материала НПО.

#### 4.2 Графическое представление взаимосвязи характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости материала

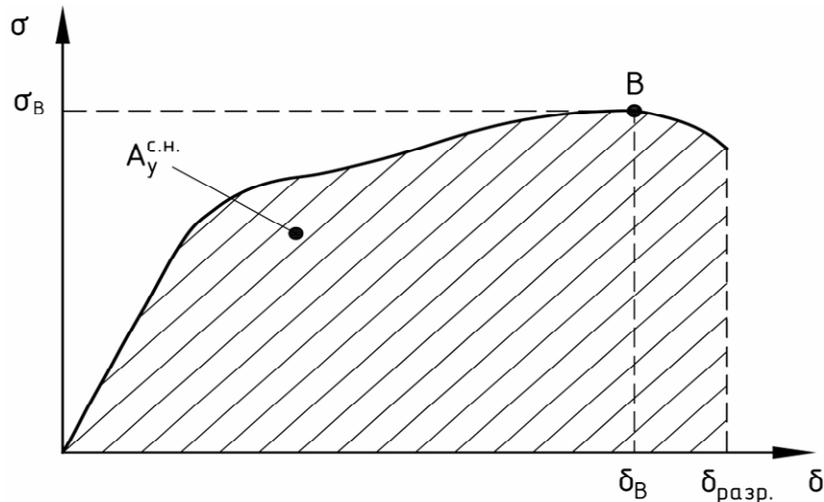
Исходным теоретическим положением для установления взаимосвязи между механическими свойствами (прочностные и пластические характеристики, ударная вязкость) материала является сопоставление двух характеристик: удельной работы разрушения при динамическом нагружении и удельной работы разрушения при статическом нагружении материала. Удельная работа разрушения при динамическом нагружении  $A_y^{\text{д.н.}}$  определяется ударной вязкостью, т.е. равна частному от деления работы  $A_p$ , затраченной на разрушение образца, к площади его поперечного сечения  $F_0$ :

$$A_y^{\text{д.н.}} = KCU = \frac{A_p}{F_0}, \text{ МДж/м}^2. \quad (4.1)$$

Удельная работа разрушения при статическом нагружении  $A_y^{\text{с.н.}}$  вычисляется по диаграмме растяжения (рисунок 4.4) путем нахождения площади под диаграммой:

$$A_y^{\text{с.н.}} = \int_0^{\delta_{\text{разр.}}} \sigma(\delta) d\delta = n \cdot \sigma_g \cdot \delta, \text{ МПа}, \quad (4.2)$$

где  $n$  – коэффициент заполнения диаграммы растяжения ( $n \approx 0,9$ ).



$\sigma_B$  – предел прочности, МПа;  $\delta_B$  – относительное удлинение при  $\sigma_B$ , %;  
 $\delta_{разр.}$  – относительное удлинение при разрушении образца, %

**Рисунок 4.4 – Нахождение удельной работы разрушения  $A_y^{c.n.}$  при статическом нагружении материала (заштрихованная область)**

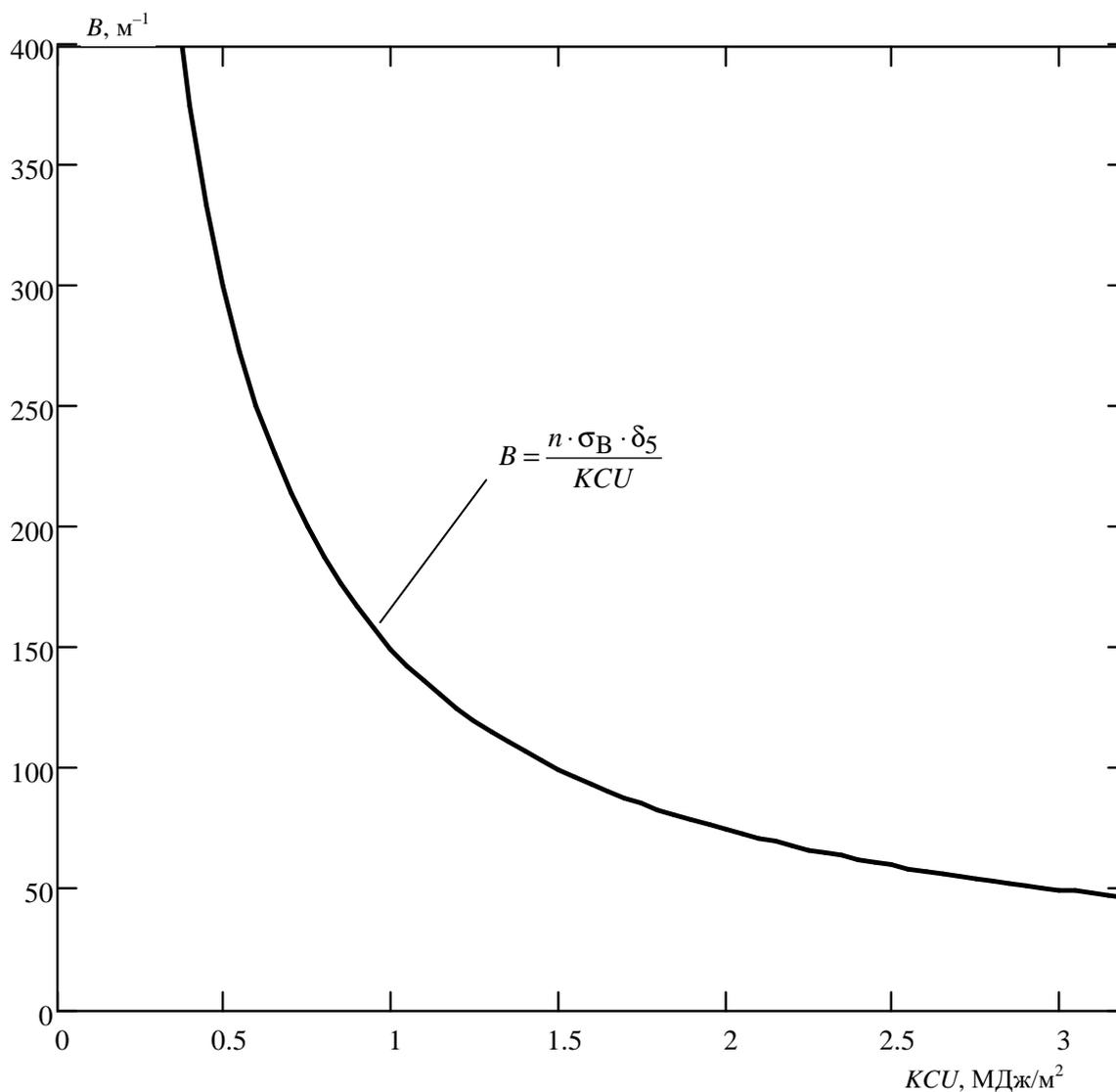
В работах [104, 105, 106] предложено рассматривать соотношение между удельными работами разрушения при статическом ( $A_y^{c.n.}$ ) и динамическом ( $A_y^{д.н.}$ ) нагружениях материала:

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

Величину  $B$  можно назвать комплексным показателем механических свойств материала, т.к. он основан на учете трех основных механических характеристик ( $\sigma_B$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$ ).

Произведение « $\sigma_B \cdot \delta_5$ » при изменении величин  $\sigma_B$  и  $\delta_5$  (например, при термической обработке) для каждой марки стали сохраняется практически постоянным [104, 105]. Поэтому в графическом представлении зависимость (4.3) имеет вид гиперболы (рисунок 4.5).

Приведенная взаимосвязь механических свойств использовалась [105, 107] для определения  $\delta_5$  не по испытаниям на растяжение, а по результатам испытания на ударный изгиб и определения твердости (с последующим определением  $\sigma_B$ ), а также для определения  $KCU$  по результатам испытания на растяжение с учетом показателя  $B$  (без испытания на ударный изгиб). Однако оценка состояния материала конструкций на основе графического представления значений комплекса механических свойств материала требует дальнейшего развития.



**Рисунок 4.5 – Графическая взаимосвязь характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости сталей [104, 105]**

Все стали характеризуются определенным сочетанием механических свойств, которые определяются их химическим составом и структурой. Значения механических свойств регламентируются ТНПА. Минимальные [86, 87] и максимальные (из нашего опыта испытания материалов в лаборатории неразрушающих методов контроля, испытания материалов, акустической эмиссии и технической диагностики) значения механических характеристик материала и соответствующие им значения удельной работы разрушения при статическом деформировании и комплексного показателя механических свойств приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Максимальные и минимальные значения  $\sigma_B$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$ ,  $A_y^{c.H.}$  и  $B$

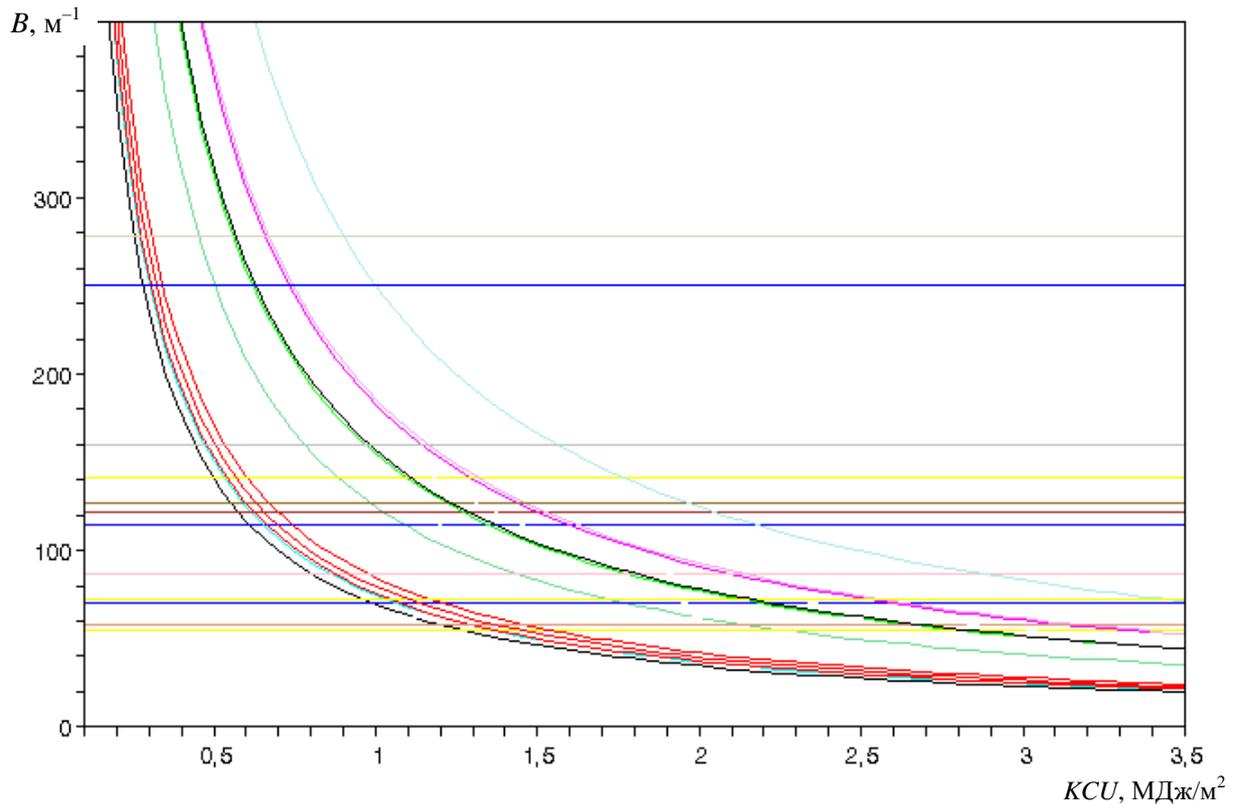
Материал	$\sigma_B$ , МПа		$\delta_5$ , %		$KCU$ , МДж/м <sup>2</sup>		$A_y^{c.H.}$ , МПа		$B$ , м <sup>-1</sup>	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Ст3	370	530	21	26	0,6	1,8	70	125	70	115
Сталь 20	370	550	22	28	0,6	2,5	75	138	55	122
09Г2С, 16ГС, 10Г2С1	450	590	21	29	0,6	2,5	85	155	62	141
12МХ, 12ХМ, 15ХМ	450	600	21	34	0,6	2,1	85	183	87	141
15Х5М	470	690	18	30	0,6	3,2	76	186	58	127
08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т	530	700	25	40	0,6	3,5	167	256	72	280
20Х1М1Ф1ТР, 18Х12ВМБФР, 45Х14Н14В2М	750	870	12	20	0,5	1,2	80	157	160	250

На рисунке 4.6 построены зависимости в виде гипербол, соответствующих максимальным и минимальным значениям  $A_y^{c.H.}$  сталей, применяемых для изготовления конструкций НПО. Также проведены ординаты, соответствующие показателю  $B$  при максимальном и минимальном значениях  $KCU$  материала.

Для конкретной стали или группы сталей, принадлежащих одному структурному классу, граничные линии имеют координаты, отличающиеся значениями от граничных линий для других сталей. Это связано с различным значением работ разрушения разных сталей при статическом и ударном нагружениях.

Наибольшие значения удельной работы разрушения при статическом нагружении наблюдаются у сталей 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 15Х5М, наименьшие – у сталей Ст3, 20. Наибольшие значения показателя  $B$  наблюдаются для сталей 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 20Х1М1Ф1ТР, 18Х12ВМБФР, 45Х14Н14В2М, наименьшие – для сталей 20, 15Х5М.

Используя максимальные и минимальные значения  $A_y^{c.H.}$  и  $B$  для приведенных сталей можно установить граничные линии на графике для общего случая:  $A_{y\max}^{c.H.} = 256$  МПа,  $A_{y\min}^{c.H.} = 70$  МПа,  $B_{\max} = 280$  м<sup>-1</sup>,  $B_{\min} = 55$  м<sup>-1</sup>. В пределах полученной области находятся значения комплекса механических свойств ( $\sigma_B$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$ ) сталей, применяемых для изготовления конструкций НПО. Ограничение значений конструкционной прочности стали на графике в виде двух прямых линий (в общем случае сверху при  $B = 280$  м<sup>-1</sup> и снизу при  $B = 55$  м<sup>-1</sup>) имеет определенный смысл. Ограничение сверху снижает вероятность трещинообразования и хрупкого разрушения. Ограничение снизу гарантирует для каждой марки стали расчетное значение ее прочностных характеристик и соответственно конструкционную прочность несущих элементов конструкции.



- |  |  |
|--|--|
| — Ст3 ( $A_{y}^{с.н.} = 125$ МПа)                                    | — Ст3 ( $B = 115$ м <sup>-1</sup> )                                    |
| — Ст3 ( $A_{y}^{с.н.} = 70$ МПа)                                     | — Ст3 ( $B = 70$ м <sup>-1</sup> )                                     |
| — сталь 20 ( $A_{y}^{с.н.} = 138$ МПа)                               | — сталь 20 ( $B = 122$ м <sup>-1</sup> )                               |
| — сталь 20 ( $A_{y}^{с.н.} = 75$ МПа)                                | — сталь 20 ( $B = 55$ м <sup>-1</sup> )                                |
| — 09Г2С, 16ГС, 10Г2С1 ( $A_{y}^{с.н.} = 155$ МПа)                    | — 09Г2С, 16ГС, 10Г2С1 ( $B = 141$ м <sup>-1</sup> )                    |
| — 09Г2С, 16ГС, 10Г2С1 ( $A_{y}^{с.н.} = 85$ МПа)                     | — 09Г2С, 16ГС, 10Г2С1 ( $B = 62$ м <sup>-1</sup> )                     |
| — 12МХ, 12ХМ, 15ХМ ( $A_{y}^{с.н.} = 183$ МПа)                       | — 12МХ, 12ХМ, 15ХМ ( $B = 141$ м <sup>-1</sup> )                       |
| — 12МХ, 12ХМ, 15ХМ ( $A_{y}^{с.н.} = 85$ МПа)                        | — 12МХ, 12ХМ, 15ХМ ( $B = 87$ м <sup>-1</sup> )                        |
| — 15Х5М ( $A_{y}^{с.н.} = 186$ МПа)                                  | — 15Х5М ( $B = 127$ м <sup>-1</sup> )                                  |
| — 15Х5М ( $A_{y}^{с.н.} = 76$ МПа)                                   | — 15Х5М ( $B = 58$ м <sup>-1</sup> )                                   |
| — 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т,<br>10Х17Н13М2Т ( $A_{y}^{с.н.} = 250$ МПа)   | — 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т,<br>10Х17Н13М2Т ( $B = 280$ м <sup>-1</sup> )   |
| — 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т,<br>10Х17Н13М2Т ( $A_{y}^{с.н.} = 167$ МПа)   | — 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т,<br>10Х17Н13М2Т ( $B = 72$ м <sup>-1</sup> )    |
| — 20Х1М1Ф1ТР, 18Х12ВМБФР,<br>45Х14Н14В2М ( $A_{y}^{с.н.} = 157$ МПа) | — 20Х1М1Ф1ТР, 18Х12ВМБФР,<br>45Х14Н14В2М ( $B = 250$ м <sup>-1</sup> ) |
| — 20Х1М1Ф1ТР, 18Х12ВМБФР,<br>45Х14Н14В2М ( $A_{y}^{с.н.} = 80$ МПа)  | — 20Х1М1Ф1ТР, 18Х12ВМБФР,<br>45Х14Н14В2М ( $B = 160$ м <sup>-1</sup> ) |

**Рисунок 4.6 – Максимальные и минимальные значения  $A_{y}^{с.н.}$  и  $B$  сталей, применяемых для изготовления конструкций НПО**



Если экспериментальные точки, характеризующие механические свойства, располагаются в *области 1*, то материал обладает хорошим сочетанием механических характеристик, определяющих его работоспособность в конструкции при существующих условиях эксплуатации. Материал имеет высокое сопротивление деформированию и разрушению. В этой области надежность против внезапных хрупких разрушений высокая. В ней, как правило, располагаются точки, характеризующие комплекс механических свойств материала после закалки и высокого отпуска.

*Область 2* является областью работоспособного состояния материала, а *область 3* – неработоспособного. В области 2 материал имеет высокие значения удельных работ разрушения при статическом и динамическом нагружении, а в области 3 – низкие. Вместе с тем, в инженерной практике для конкретного материала не достигается подобного максимального (*область 2*) и минимального (*область 3*) сочетания механических характеристик.

Граница между областями 1 и 2 характеризует наибольшую конструкционную прочность материала. Точки, расположенные вблизи границы, свидетельствуют о том, что материал обладает высокими прочностными и пластическими характеристиками и, как следствие, высокими удельными работами разрушения при статическом и ударном нагружении.

Граница между областями 1 и 3 характеризует наименьшую конструкционную прочность материала. Точки, расположенные вблизи границы, свидетельствуют о том, что материал обладает низким значением удельных работ разрушения как при статическом, так и динамическом нагружении. Как правило, такие свойства имеет материал в состоянии поставки (без термической обработки).

*Область 6* является областью склонности материала к хрупкому разрушению. Она характеризует материал с низкой надежностью, т.е. низкой способностью противостоять хрупкому разрушению. Если экспериментальные точки, характеризующие свойства материала, расположены в области 6, то возможно его хрупкое разрушение, которое обусловлено высоким сопротивлением пластическому деформированию (высокие значения  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$  и низкие значения  $\delta_5$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ). Подобные свойства характерны для материала после закалки с низким отпуском, а также после охрупчивания в эксплуатации.

На границе областей 1 и 6 материал уже не обладает достаточной пластичностью и ударной вязкостью, а его дальнейшая эксплуатация небезопасна.

*Область 7* характеризует низкие прочностные свойства материала. Если механические свойства материала характеризуются точками, расположенными в области 7, это свидетельствует о недопустимом разупрочнении, изменении поведения материала под нагрузкой и, как следствие, об уменьше-

нии срока службы конструкции, т.к. разрушение может развиваться по разупрочненному материалу. Подобные свойства характерны для материала после отжига, а также длительной эксплуатации в условиях ползучести.

На границе между областями 1 и 7 надежность материала уже не характеризуется опасностью хрупкого разрушения. При сохранении требуемой величины ударной вязкости разрушение может произойти вследствие развития ползучести или пластического деформирования.

При длительной эксплуатации материала конструкций НПО происходит неизбежная деградация его структуры, а, следовательно, и изменение механических свойств. В связи с этим возникает необходимость анализа изменений структуры и свойств материала. При указанных изменениях точки, характеризующие комплекс механических свойств, будут смещаться из одной области (соответствующей началу эксплуатации) в другую. Вектор смещения несет информацию о механизме деградации, протекающей в материале. При регулярном отслеживании свойств можно прогнозировать изменение механических характеристик материала.

Карту деградации механических свойств материала конструкций НПО следует строить в следующей последовательности.

*Этап 1.* Обобщение данных, относящихся к условиям эксплуатации НПО: вид среды, ее температура и давление, рабочие напряжения в материале и др.

*Этап 2.* Выявление свойств материала, определяющих развитие механизма деградации (хрупкое состояние, ползучесть и др.).

*Этап 3.* Обобщение данных по исходным механическим свойствам ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ,  $HB$ ,  $HV$ ) и термической обработке материала (используется паспорт объекта или ТНПА на материал).

*Этап 4.* Построение начального варианта карты деградации на основании исходных значений механических свойств материала.

*Этап 5.* Определение фактических значений механических свойств материала после эксплуатации объекта в течении определенного времени (например, три года). Для этого могут быть применены разрушающие (если допустима вырезка пробы металла), малоразрушающие или неразрушающие (экспресс-метод) испытания.

*Этап 6.* Построение окончательного варианта карты деградации на основании экспериментальных данных, характеризующих фактические механические свойства материала. При этом весь массив данных разделяется на отдельные группы (соответствующие началу и концу эксплуатации за рассматриваемый отрезок времени).

*Этап 7.* Анализ степени соответствия расположения на карте деградации значений комплекса механических свойств (в начале эксплуатации и на момент диагностирования); установление наличия и скорости деградации механических свойств материала.

*Этап 8.* Повторение этапов 5...7 после следующего периода эксплуатации.

Наиболее перспективные случаи применения карты деградации механических свойств следующие:

– в качестве приложения к паспорту ответственных деталей и технологического оборудования. В карты деградации следует заносить результаты определения механических свойств (соответствующие началу эксплуатации и после установленного отрезка времени);

– при выполнении работ по диагностированию материала НПО в период проведения капитальных ремонтов технологических установок, поскольку можно в доступной форме представить достаточно полную и подробную информацию о состоянии материала конструкции;

– установление механизма деградации и воссоздание условий эксплуатации материала НПО;

– определение скорости деградации механических свойств материала в процессе эксплуатации;

– прогнозирование состояния материала в будущем;

– оценка предельного состояния материала НПО (по времени достижения механическими свойствами критического уровня).

#### **4.4 Границы работоспособного состояния материала на карте деградации механических свойств**

С целью применения карт деградации для анализа состояния материала необходимо знать координаты области его работоспособного состояния. Значения координат определяются сочетанием механических свойств диагностируемого материала. Установим координаты данной области для четырех групп сталей, выбранных ранее с учетом материального исполнения НПО (см. п. 2.2): конструкционных углеродистых; низколегированных кремнемарганцевых; теплоустойчивых и коррозионностойких.

На карту деградации наносили значения комплекса механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$ ) материалов. Источниками значений механических свойств являлись справочные данные [86, 87, 88, 108, 109] и собственные

экспериментальные данные, полученные при исследовании свойств материала конструкций НПО. Для каждой группы сталей (конструкционные углеродистые, низколегированные кремнемарганцевые, теплоустойчивые и коррозионностойкие) на карту деградации нанесены значения механических свойств с учетом вида термической обработки и состояния материала. При этом для установления границ области работоспособного состояния материала были использованы значения механических свойств, удовлетворяющие требованиям ТНПА, т.е. материалы являлись пригодными для эксплуатации. Результаты представлены на рисунках 4.8, 4.12, 4.16 и 4.20. Значение комплекса механических свойств (сочетание  $\sigma_b$ ,  $\delta_5$  и  $KCU$ ) материала на карте деградации обозначается одной точкой, имеющей координаты [ $KCU$ ;  $B$ ].

Рассчитывались числовые характеристики экспериментальных данных. В теории вероятности доказано, что сумма различных независимых случайных слагаемых (независимо от их закона распределения) оказывается случайной величиной, распределенной согласно нормальному закону (так называемая центральная предельная теорема) [65, 110]. Поэтому для анализа принимался нормальный закон распределения исходных данных ( $B$ ,  $KCU$  и  $A_y^{c.H.}$ ).

Строились гистограммы значений  $B$ ,  $KCU$  и  $A_y^{c.H.}$ . При этом область значений случайной величины разбивалась на некоторое количество сегментов, а затем подсчитывался процент попадания данных в каждый сегмент. Для построения гистограмм с равными интервалами использована встроенная функция математического пакета Mathcad – histogram [93, с. 412]:

$$\text{histogram}(\text{bin}, x), \quad (4.4)$$

где  $\text{histogram}(\text{bin}, x)$  – матрица гистограммы размера  $\text{bin} \times 2$ , состоящая из столбца сегментов разбиения и столбца частоты попадания в них данных;

$\text{bin}$  – количество сегментов построения гистограммы;

$x$  – вектор случайных данных.

Определялись основные параметры распределения экспериментальных данных: плотность вероятности нормального распределения и функция нормального распределения. Плотность распределения задает вероятность попадания случайной величины  $x$  в малый интервал от  $x$  до  $x + \Delta x$ . Функция распределения  $F(x)$  – это вероятность того, что случайная величина примет значение, меньшее или равное  $x$ . Для их определения использованы встроенные функции математического пакета Mathcad –  $\text{dnorm}$  и  $\text{pnorm}$  [93, с. 414]:

$$\text{dnorm}(X, \mu, \sigma); \quad (4.5)$$

$$\text{pnorm}(X, \mu, \sigma), \quad (4.6)$$

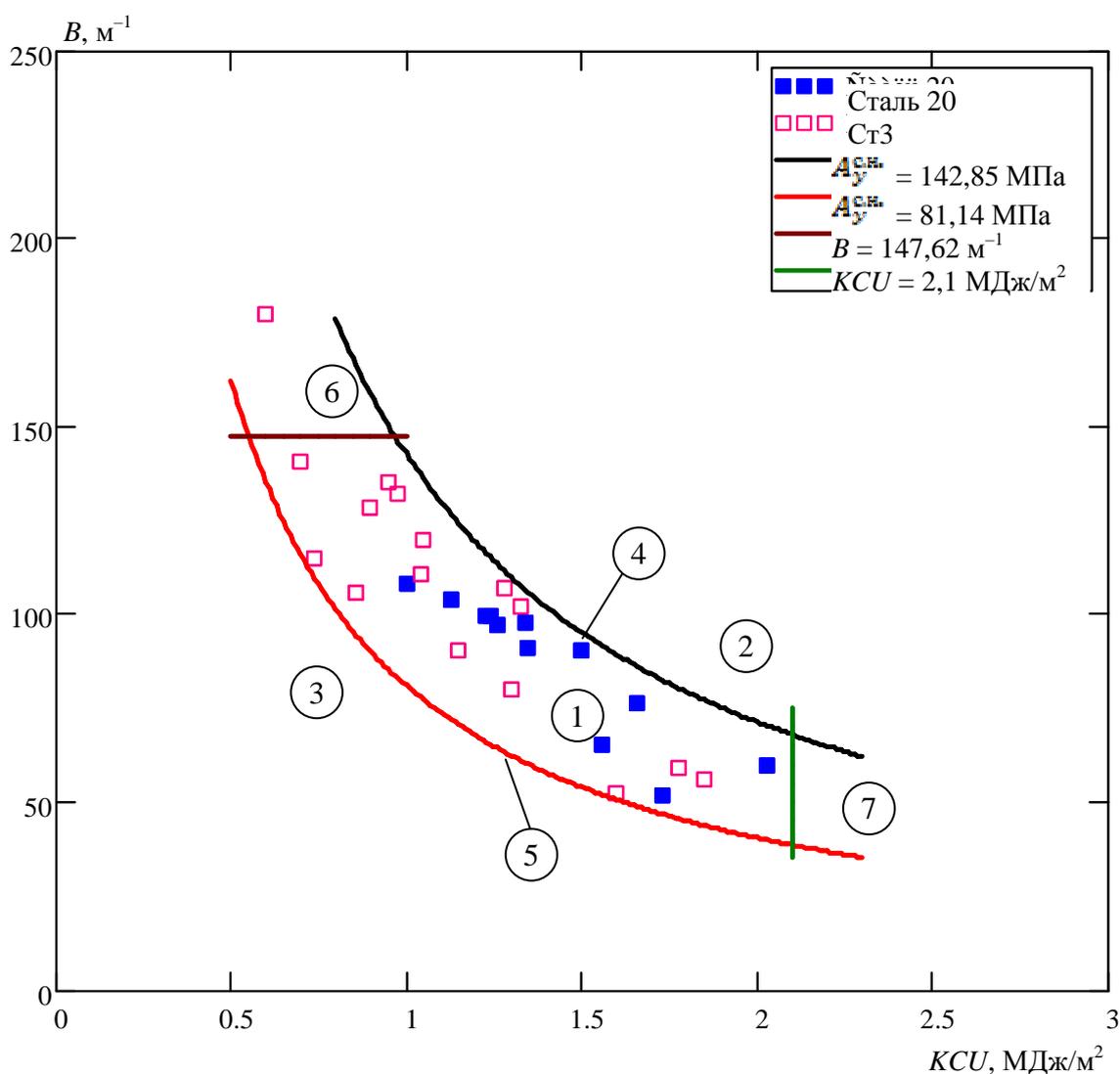
где  $X$  – значение  $B$ ,  $KCU$  или  $A_y^{c.H.}$ ;

$\mu$  – математическое ожидание;

$\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

Граничные значения  $B$ ,  $KCU$  и  $A_y^{с.н.}$  определялись путем установления доверительного интервала, внутри которого находились с вероятностью  $(1 - \alpha) = 95\%$  значения указанных величин. Границы интервала (верхний, нижний), содержащего внутри себя  $95\%$  экспериментальных данных, соответствовали получению области работоспособного состояния сталей.

На рисунках 4.9...4.11, 4.13...4.15, 4.17...4.19 и 4.21...4.23 приведены гистограммы, функции распределения и плотности вероятности значений механических характеристик для конструкционных углеродистых, низколегированных кремнемарганцевых, теплоустойчивых и коррозионно-стойких сталей, соответственно.



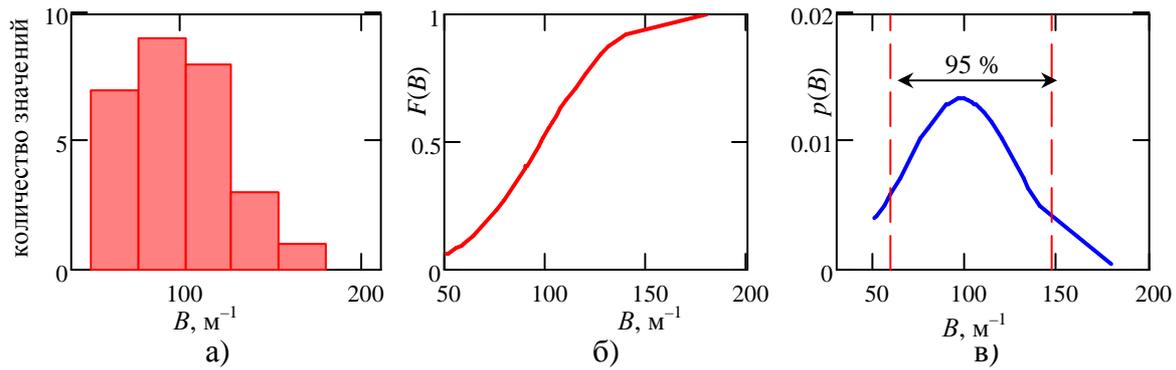
1, 2 – области работоспособного состояния сталей;

3, 6, 7 – области неработоспособного состояния сталей;

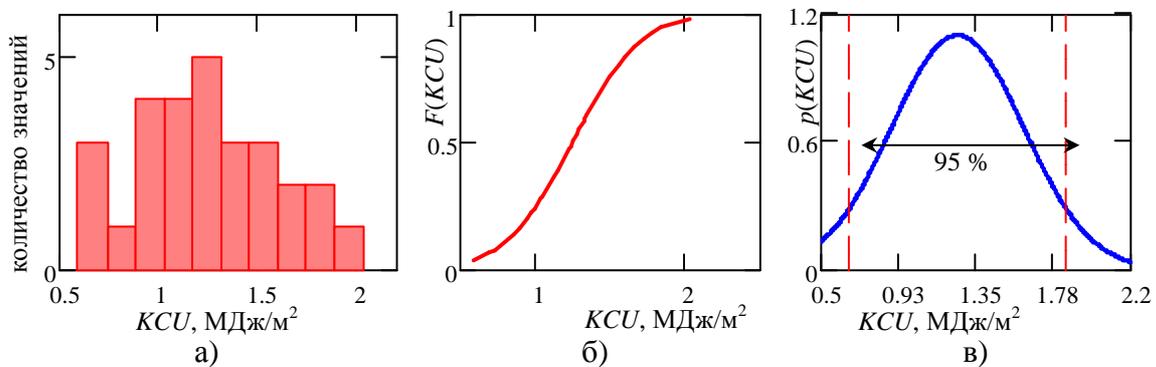
4 – граница наибольшей конструкционной прочности сталей;

5 – граница наименьшей конструкционной прочности сталей

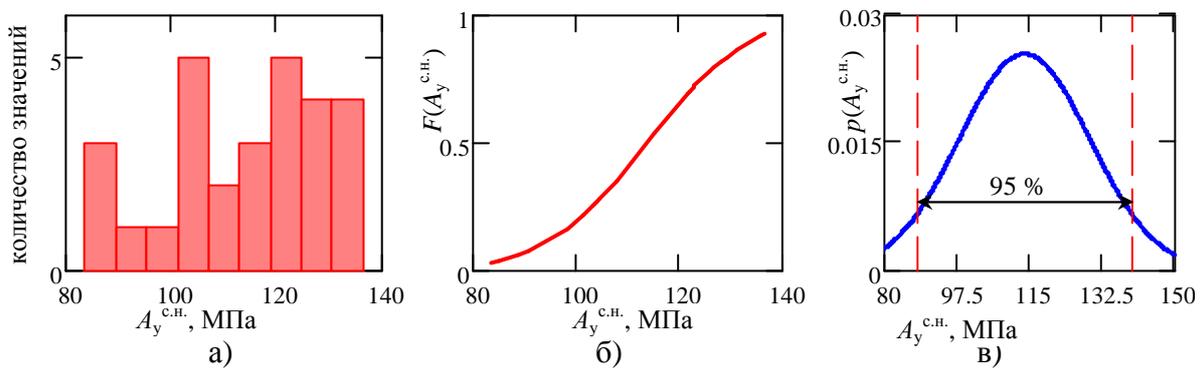
Рисунок 4.8 – Карта деградации механических свойств для углеродистых сталей



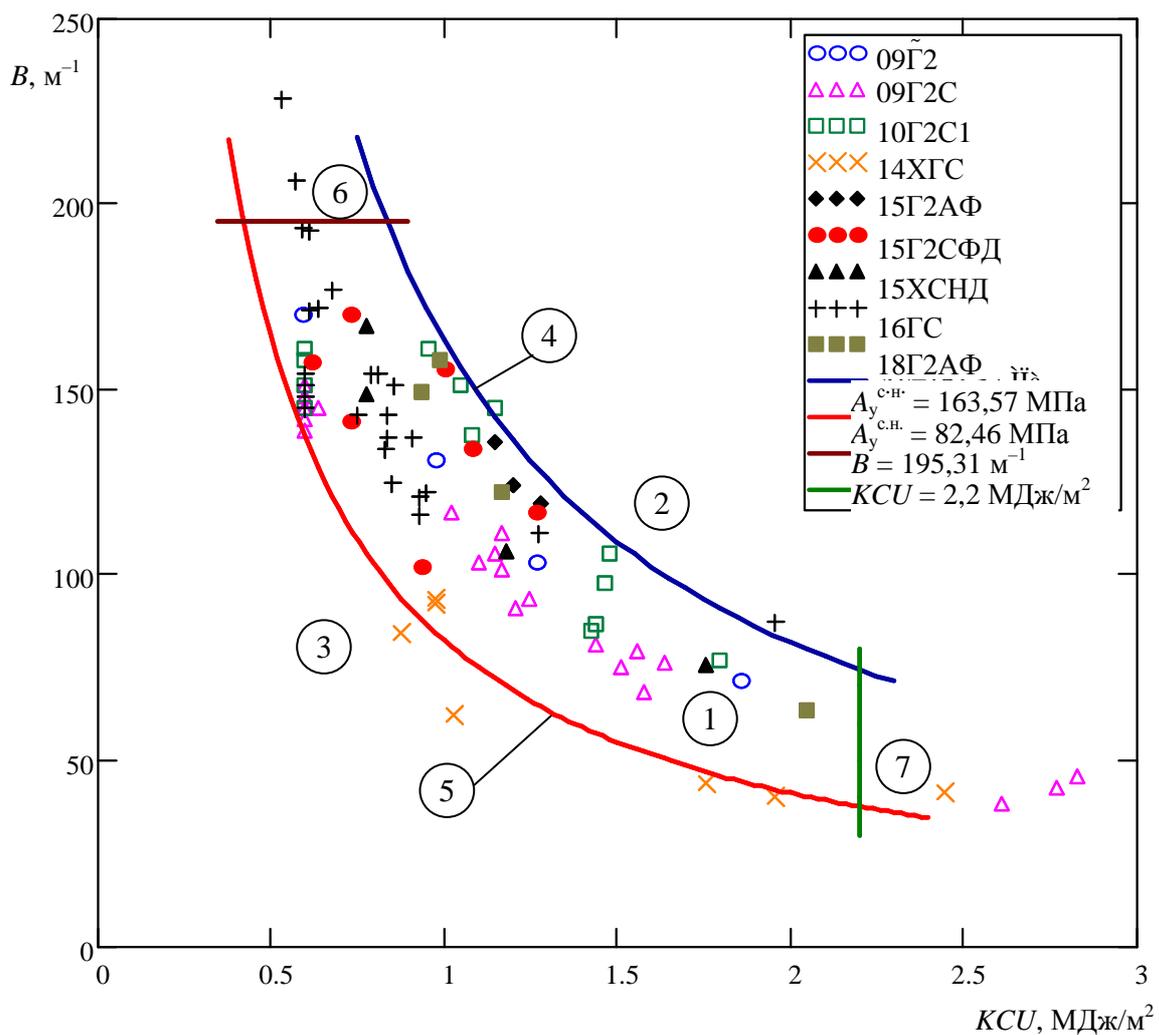
а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности  
**Рисунок 4.9 – Параметры распределения значений комплексного показателя механических свойств  $B$  углеродистых сталей**



а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности  
**Рисунок 4.10 – Параметры распределения значений ударной вязкости  $KCU$  углеродистых сталей**



а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности  
**Рисунок 4.11 – Параметры распределения значений удельной работы разрушения при статическом нагружении  $A_y^{с.п.}$  углеродистых сталей**



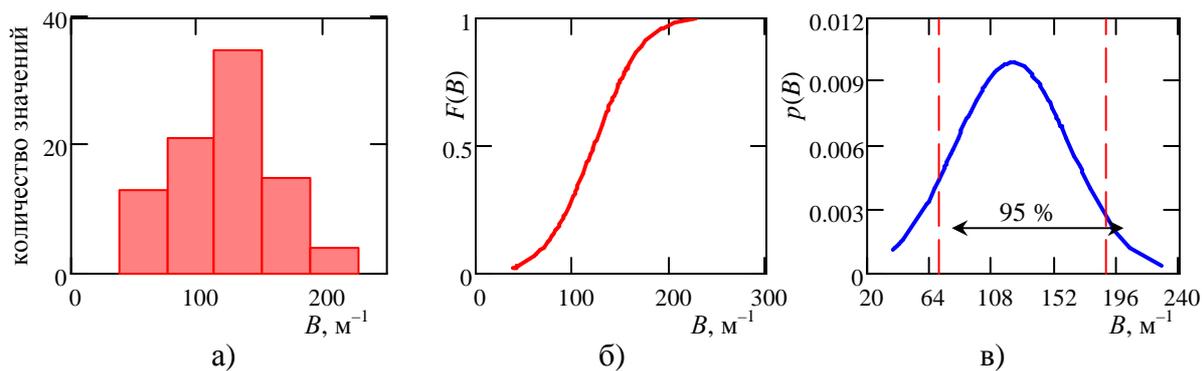
1, 2 – области работоспособного состояния сталей;

3, 6, 7 – области неработоспособного состояния сталей;

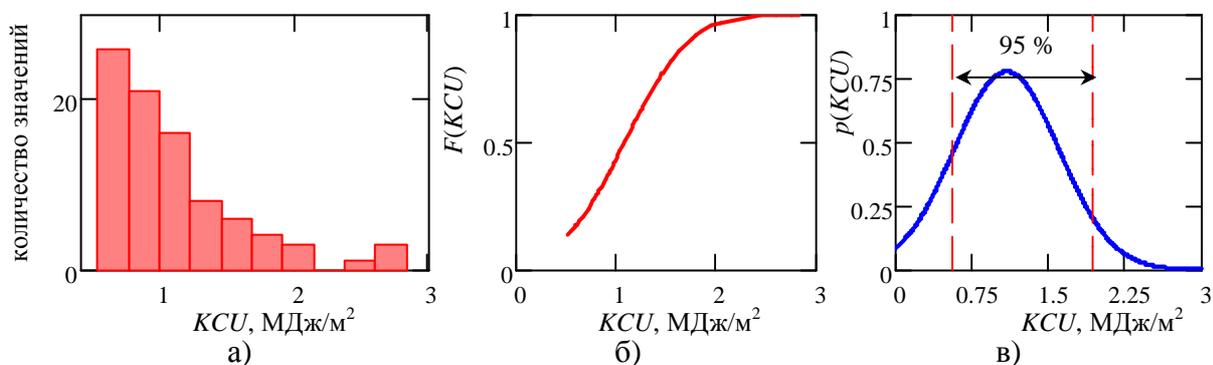
4 – граница наибольшей конструкционной прочности сталей;

5 – граница наименьшей конструкционной прочности сталей

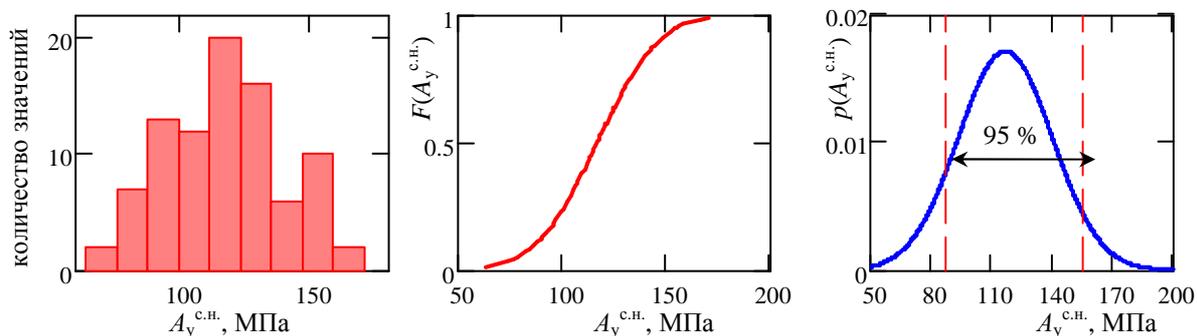
Рисунок 4.12 – Карта деградации механических свойств для низколегированных кремнемарганцевых сталей



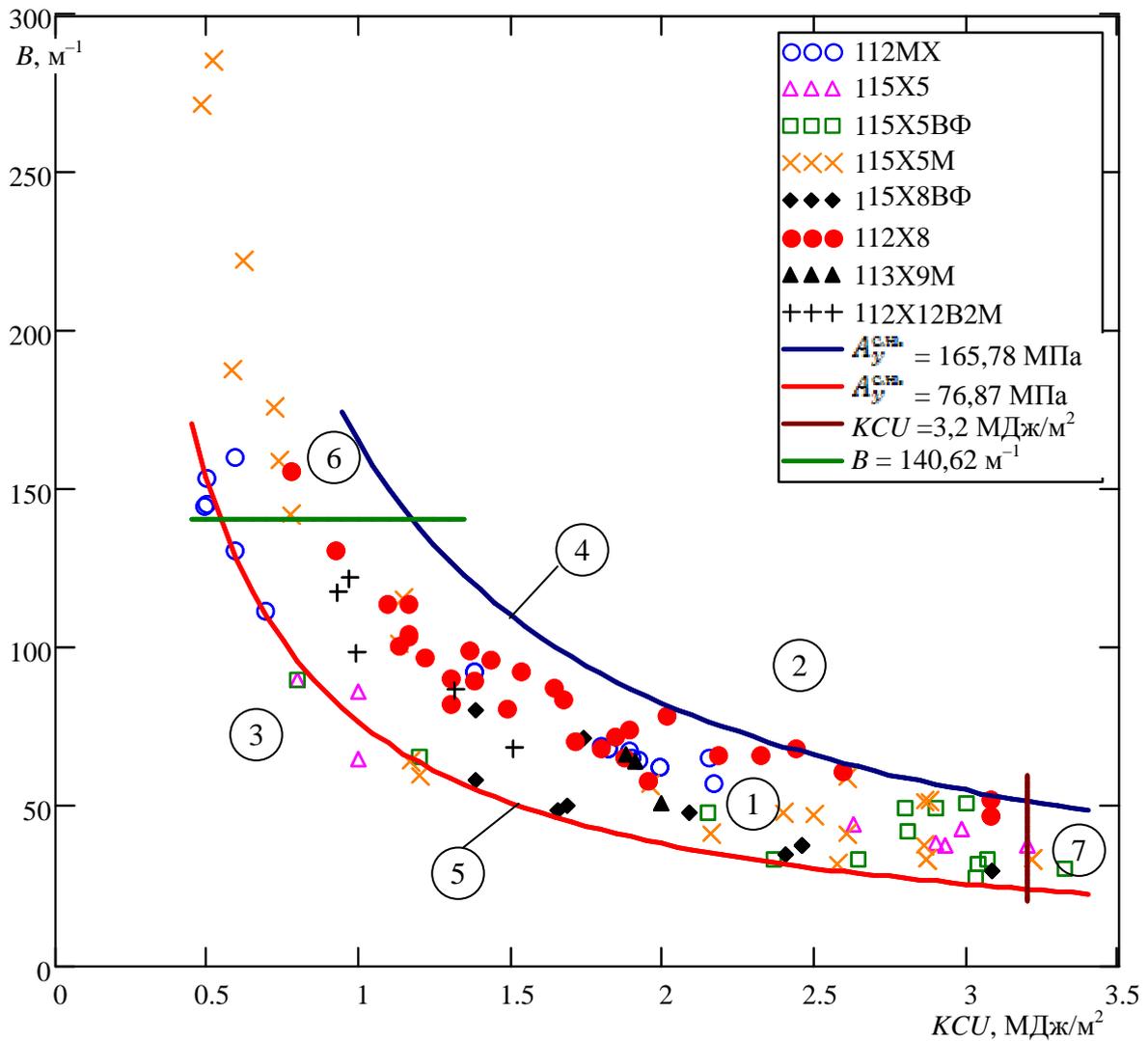
а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности  
**Рисунок 4.13 — Параметры распределения значений  $B$  низколегированных кремнемарганцевых сталей**



а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности  
**Рисунок 4.14 — Параметры распределения значений  $KCU$  низколегированных кремнемарганцевых сталей**

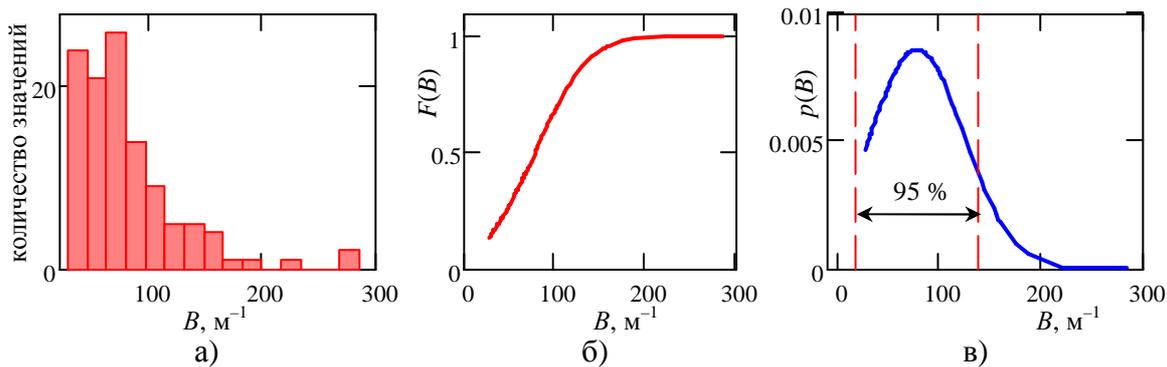


а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности  
**Рисунок 4.15 — Параметры распределения значений  $A_y^{c.n.}$  низколегированных кремнемарганцевых сталей**

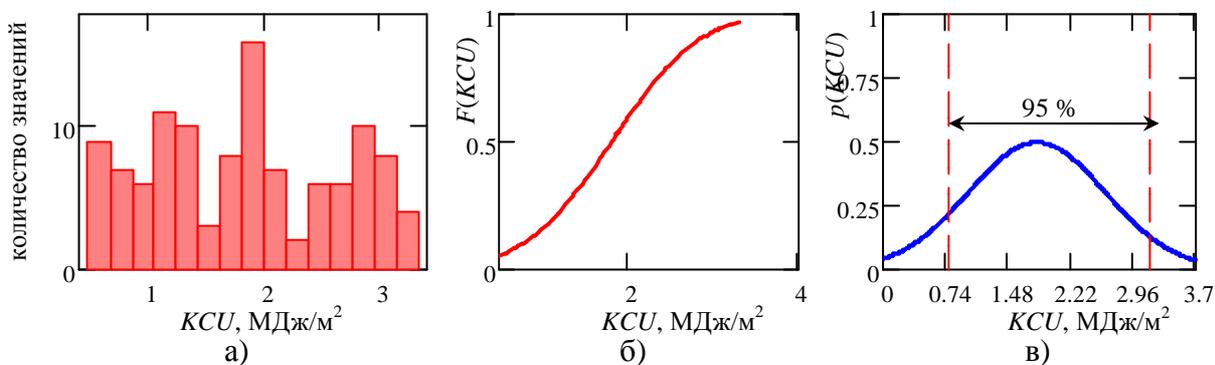


- 1, 2 – области работоспособного состояния сталей;  
 3, 6, 7 – области неработоспособного состояния сталей;  
 4 – граница наибольшей конструкционной прочности сталей;  
 5 – граница наименьшей конструкционной прочности сталей

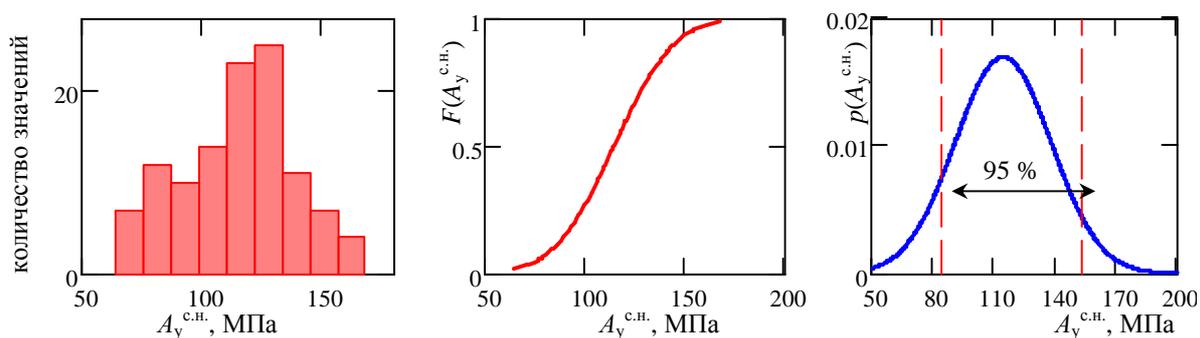
Рисунок 4.16 – Карта деградации механических свойств для теплоустойчивых сталей



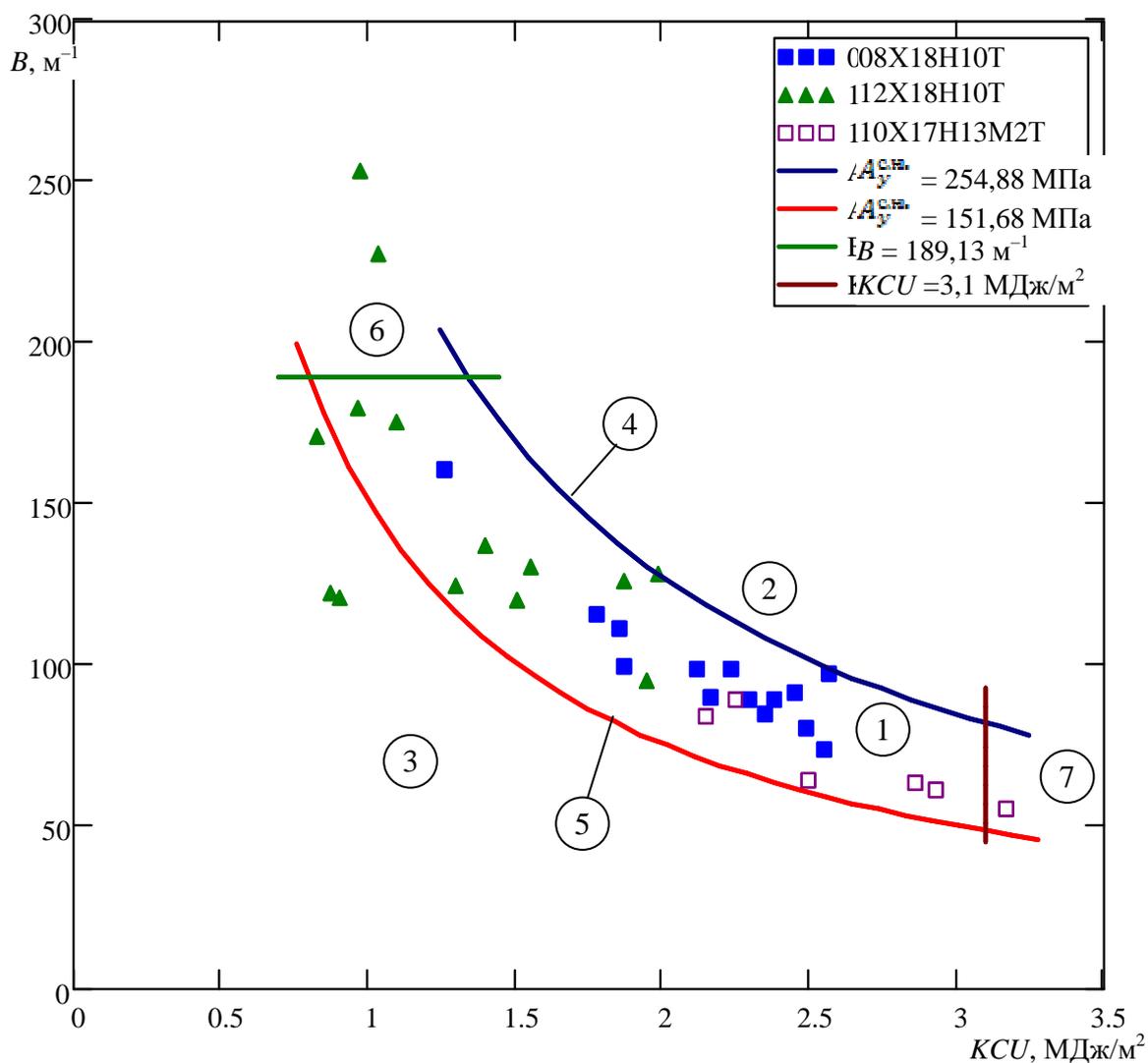
а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности  
**Рисунок 4.17 – Параметры распределения значений  $B$  теплоустойчивых сталей**



а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности  
**Рисунок 4.18 – Параметры распределения значений  $KCU$  теплоустойчивых сталей**

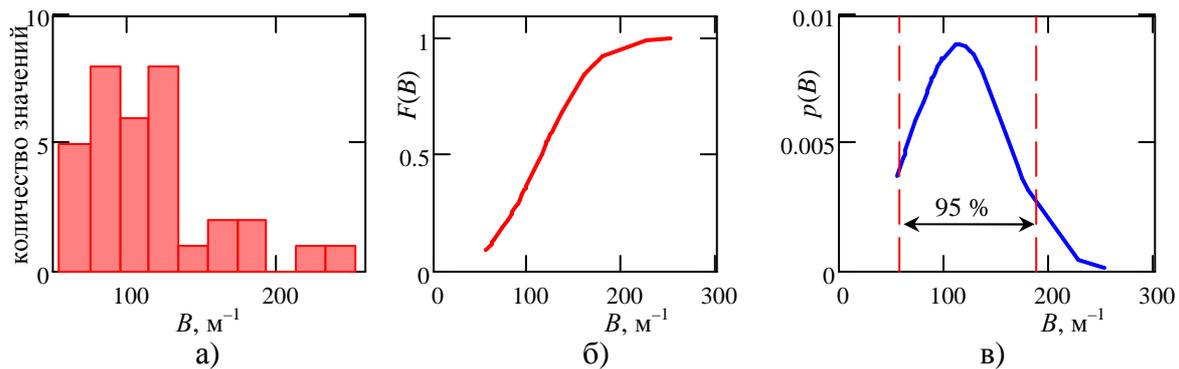


а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности  
**Рисунок 4.19 – Параметры распределения значений  $A_y^{с.н.}$  теплоустойчивых сталей**

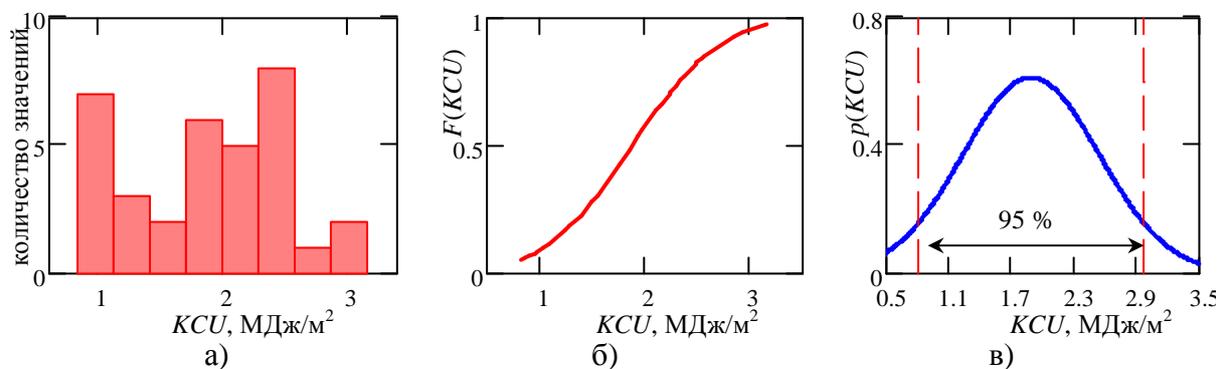


- 1, 2 – области работоспособного состояния сталей;**  
**3, 6, 7 – области неработоспособного состояния сталей;**  
**4 – граница наибольшей конструкционной прочности сталей;**  
**5 – граница наименьшей конструкционной прочности сталей**

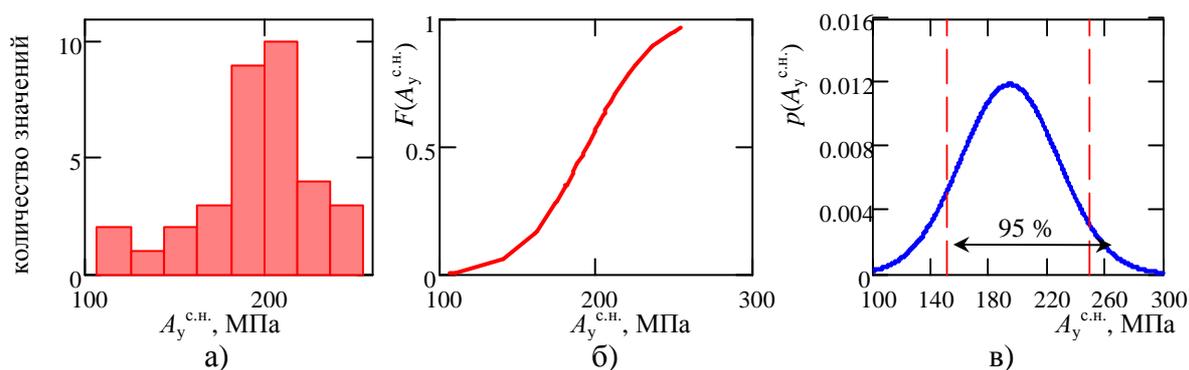
**Рисунок 4.20 – Карта деградации механических свойств  
 для коррозионностойких сталей**



**а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности**  
**Рисунок 4.21 – Параметры распределения значений  $B$  коррозионнстойких сталей**



**а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности**  
**Рисунок 4.22 – Параметры распределения значений  $KCU$  коррозионнстойких сталей**



**а) – гистограмма значений; б) – функция распределения; в) – плотность вероятности**  
**Рисунок 4.23 – Параметры распределения значений  $A_y^{\text{с.н.}}$  коррозионнстойких сталей**

Доверительные интервалы значений характеристик  $B$ ,  $KCU$  и  $A_y^{c.n.}$  приведены в таблице 4.2.

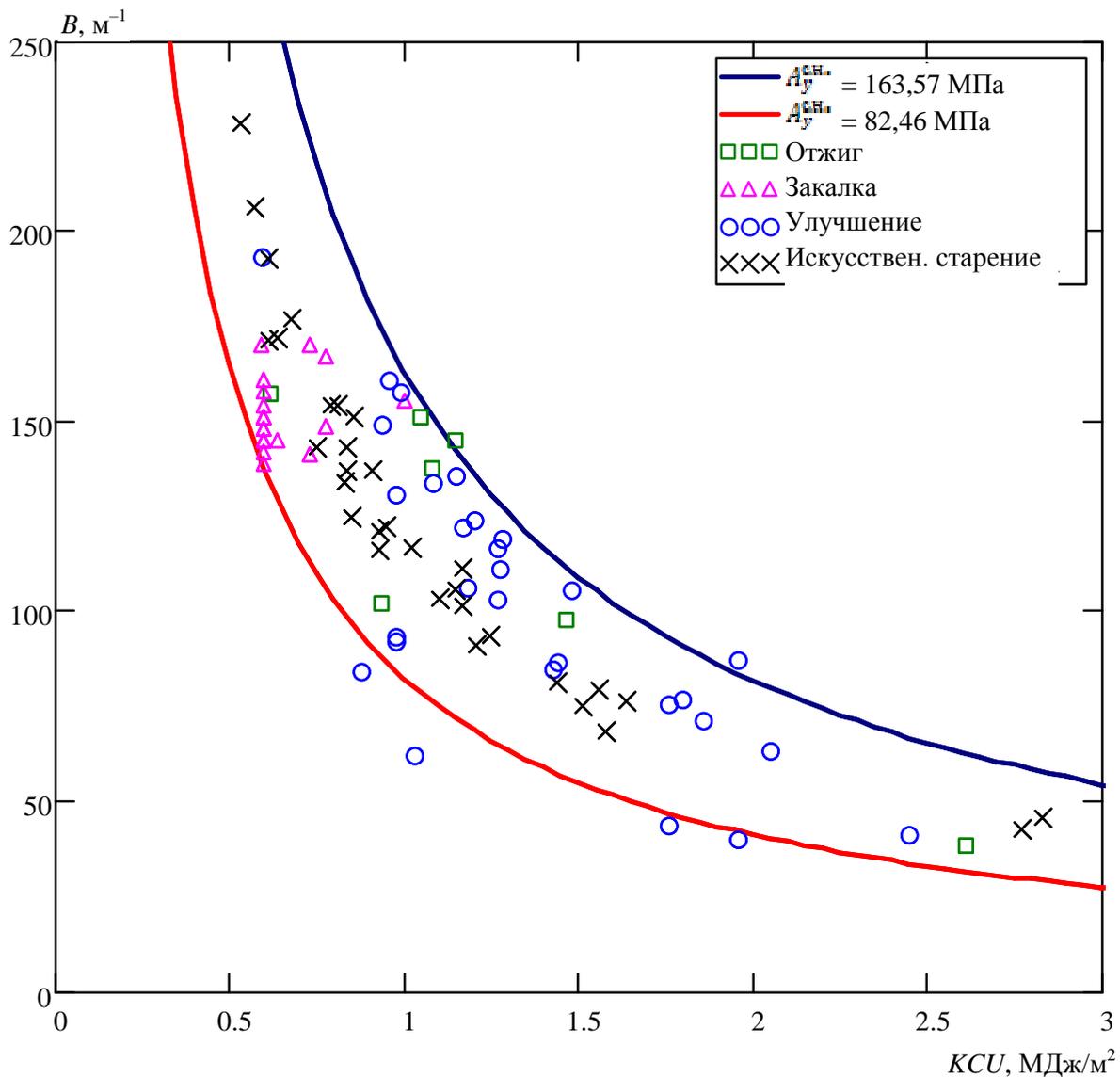
Таблица 4.2 – Результаты интервальной оценки дисперсии величин  $B$ ,  $KCU$  и  $A_y^{c.n.}$

Группа сталей	Доверительные интервалы (вероятность 95 %)					
	$B, м^{-1}$		$KCU, МДж/м^2$		$A_y^{c.n.}, МПа$	
Конструкционные углеродистые	59,98	147,62	0,65	2,1	81,14	142,85
Низколегированные кремнемарганцевые	71,18	195,31	0,63	2,2	82,46	163,57
Теплоустойчивые	19,5	140,62	0,79	3,2	76,87	165,78
Коррозионностойкие	57,41	189,13	0,824	3,1	151,68	254,88

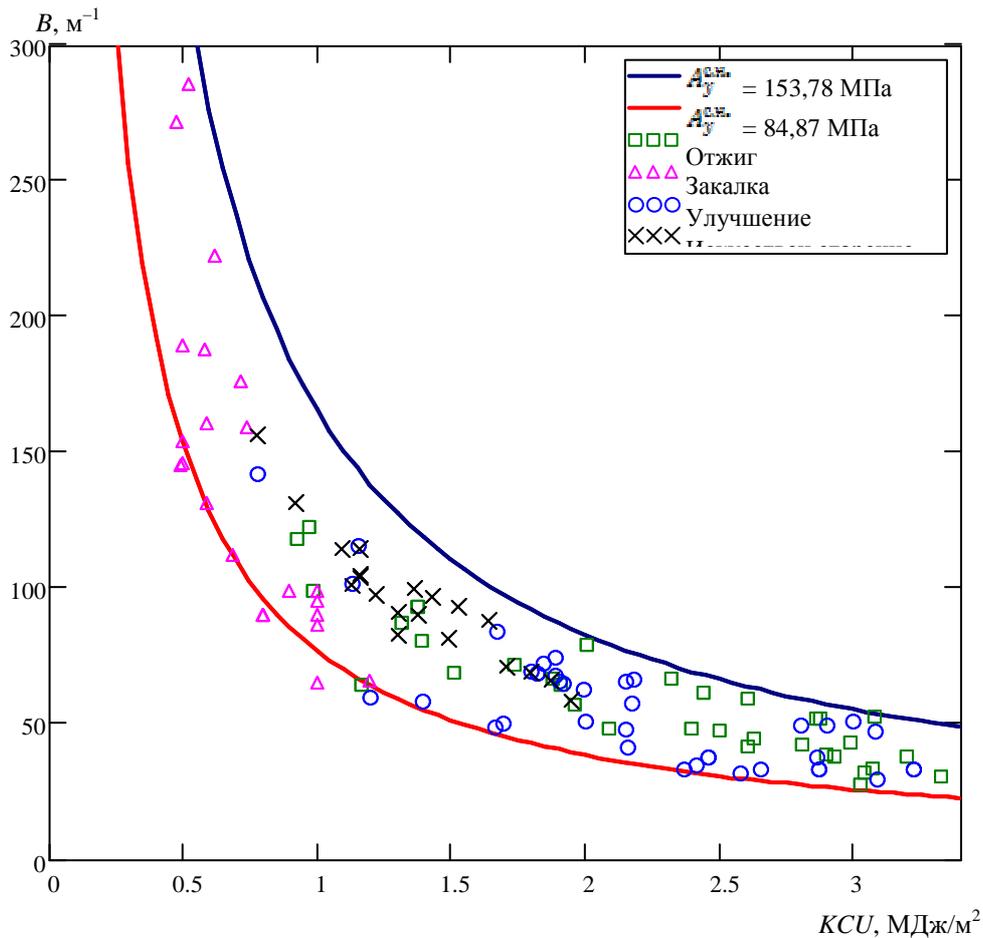
Полученные характеристики распределения экспериментальных данных позволили установить граничные значения величин комплексного показателя механических свойств  $B$ , ударной вязкости  $KCU$  и удельной работы разрушения материала при статическом нагружении  $A_y^{c.n.}$ . Из рисунков 4.8, 4.12, 4.16 и 4.20 видно, что точки, характеризующие механические свойства сталей, локализуются в определенных областях на картах деградации. При этом для каждой группы сталей указанные области могут быть ограничены гиперболами, ординатами и абсциссами. Так, для углеродистых сталей границы области работоспособного состояния материала соответствуют  $B = 147,62 м^{-1}$ ,  $KCU = 2,1 МДж/м^2$ ,  $A_y^{c.n.} = 142,85 МПа$ ,  $A_y^{c.n.} = 81,14 МПа$ ; для низколегированных кремнемарганцевых сталей  $B = 195,31 м^{-1}$ ,  $KCU = 2,2 МДж/м^2$ ,  $A_y^{c.n.} = 163,57 МПа$ ,  $A_y^{c.n.} = 82,46 МПа$ ; для теплоустойчивых сталей  $B = 140,62 м^{-1}$ ,  $KCU = 3,2 МДж/м^2$ ,  $A_y^{c.n.} = 165,78 МПа$ ,  $A_y^{c.n.} = 76,87 МПа$ ; для коррозионностойких сталей  $B = 189,13 м^{-1}$ ,  $KCU = 3,1 МДж/м^2$ ,  $A_y^{c.n.} = 254,88 МПа$ ,  $A_y^{c.n.} = 151,68 МПа$ .

Таким образом, стали, значения механических свойств которых отражены на картах деградации точками, расположенными в полученных областях, обладают высокой конструкционной прочностью, т.е. комплексом механических свойств, обеспечивающим безопасную эксплуатацию НПО.

Кроме этого для различных видов термической обработки точки также локализуются в отдельных областях на карте деградации. В качестве примера на рисунках 4.24 и 4.25 приведены карты деградации с нанесенными значениями механических свойств кремнемарганцевых и теплоустойчивых сталей после отжига, закалки, улучшения и искусственного старения.



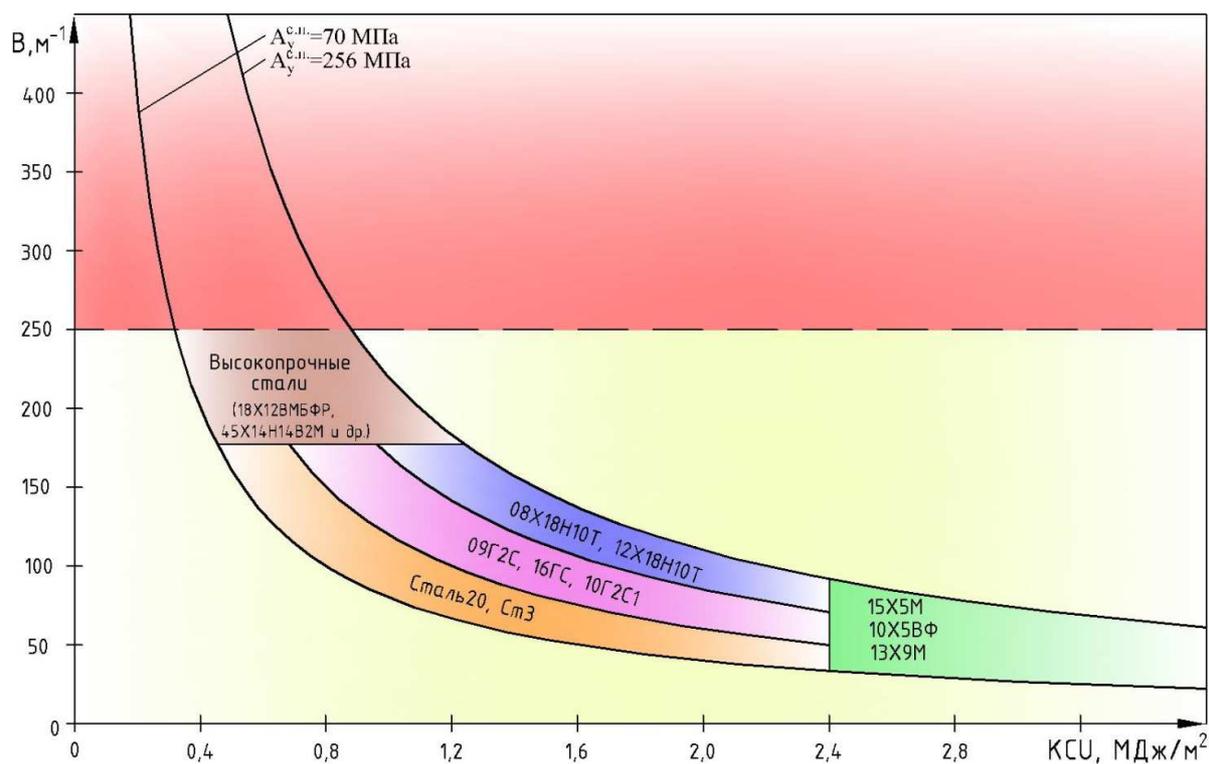
**Рисунок 4.24 – Области расположения комплекса механических свойств для характерных видов термической обработки низколегированных кремнемарганцевых сталей**



**Рисунок 4.25 – Области расположения комплекса механических свойств для характерных видов термической обработки теплоустойчивых сталей**

Таким образом, наблюдается последовательность в расположении точек на карте деградации в зависимости от вида термической обработки материала. Точки, соответствующие различным видам термической обработки, локализируются в отдельных областях. Анализ полученных данных приводит к выводу, что материалы, принадлежащие к одному структурному классу, характеризуются схожими картами деградации. Для всех сталей одного класса (по экспериментальным данным) наблюдается практически одинаковое расположение областей. Полученные результаты свидетельствуют о хорошем распределении экспериментальных точек на карте деградации, что позволяет проводить комплексные исследования изменения механических свойств материала НПО.

На основании полученных данных построена качественная карта деградации с областями сочетания механических свойств, характерными для различных сталей (рисунок 4.26). Эти области характеризуют типичное сочетание механических свойств материала НПО.



**Рисунок 4.26 – Качественный вид карты деградации механических свойств для сталей, применяемых для изготовления конструкций НПО**

#### **4.5 Исследование деградации структуры и изменения механических свойств материала после искусственного деформационного старения**

Для оценки возможности фиксирования деградационных процессов в материале с помощью разработанных карт деградации механических свойств были проведены исследования изменения механических свойств сталей 20, 09Г2С, 15Х5М, 12Х18Н10Т после искусственного деформационного старения (холодное пластическое деформирование (степень деформации:  $4 \pm 0,5 \%$ ,  $7 \pm 0,5 \%$ ,  $10 \pm 0,5 \%$ ) и выдержка 1, 2 и 3 часа при температуре  $250 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Это имитировало длительную эксплуатацию сталей с различной продолжительностью (чем выше степень деформации и меньше время выдержки, тем выше срок эксплуатации). Результаты определения механических свойств до и после деформационного старения приведены в таблицах 4.3...4.6. Карты деградации механических свойств исследованных сталей после деформационного старения построены на рисунках 4.27 и 4.28.

Таблица 4.3 — Значения предела прочности  $\sigma_B$  исследованных сталей до и после деформационного старения

Марка стали	$\sigma_B$ в исходном состоянии, МПа	$\sigma_B$ после деформационного старения, МПа								
		степень деформации 4 %			степень деформации 7 %			степень деформации 10 %		
		выдержка при 250 °С								
		1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч
Сталь 20	452,94	513,09	506,02	519,65	560,51	545,02	560,51	596,75	552,7	590,54
09Г2С	460,01	509,55	502,48	519,65	553,24	549,19	530,85	560,33	570,93	574,74
15Х5М	640,48	672,33	693,56	665,25	719,04	715,5	696,39	680,94	699,77	697,02
12Х18Н10Т	598,02	640,48	622,79	644,02	693,56	697,81	702,05	707,2	697,19	699,51

Таблица 4.4 — Значения относительного удлинения  $\delta_5$  исследованных сталей до и после деформационного старения

Марка стали	$\delta_5$ в исходном состоянии, %	$\delta_5$ после деформационного старения, %								
		степень деформации 4 %			степень деформации 7 %			степень деформации 10 %		
		выдержка при 250 °С								
		1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч
Сталь 20	16,33	11,0	18,33	16,0	12,67	12,83	13,33	10,17	7,0	11,33
09Г2С	27,67	14,33	21,0	15,33	17,5	15,17	13,7	15,0	13,33	14,67
15Х5М	13,33	7,67	10,17	8,83	8,67	7,33	7,17	9,83	9,5	7,0
12Х18Н10Т	45,0	49,67	50,0	50,33	45,83	48,67	47,83	44,17	41,83	36,0

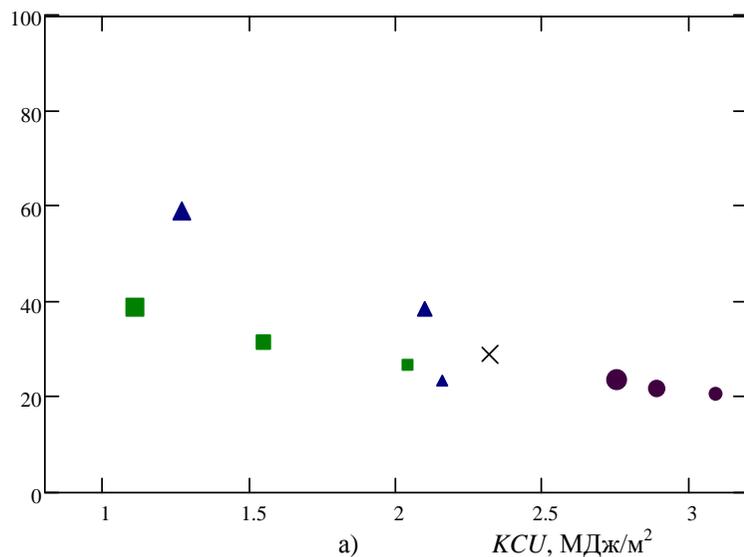
Таблица 4.5 — Значения относительного сужения  $\psi$  исследованных сталей до и после деформационного старения

Марка стали	$\psi$ в исходном состоянии, %	$\psi$ после деформационного старения, %								
		степень деформации 4 %			степень деформации 7 %			степень деформации 10 %		
		выдержка при 250 °С								
		1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч
Сталь 20	67,89	61,97	61,97	62,77	57,85	63,21	64,0	59,35	61,33	55,85
09Г2С	81,22	78,22	78,22	77,48	77,4	78,22	78,22	77,02	76,32	76,4
15Х5М	79,75	73,31	76,64	78,22	76,64	76,64	78,22	74,0	75,33	75,57
12Х18Н10Т	67,89	65,97	67,89	65,97	65,97	65,97	67,89	68,42	64,36	65,4

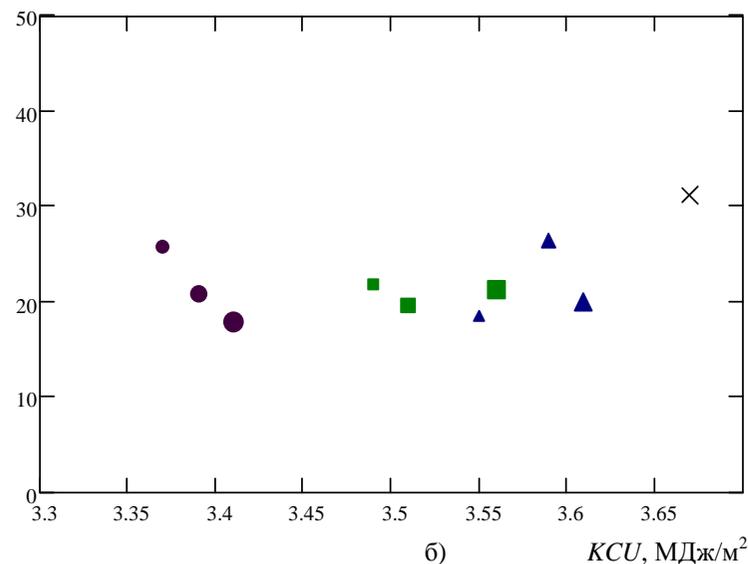
Таблица 4.6 — Значения ударной вязкости  $KCU$  исследованных сталей до и после деформационного старения

Марка стали	$KCU$ в исходном состоянии, $МДж/м^2$	$KCU$ после деформационного старения, $МДж/м^2$								
		степень деформации 4 %			степень деформации 7 %			степень деформации 10 %		
		выдержка при 250 °С								
		1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч
Сталь 20	2,32	2,16	2,1	1,27	3,09	2,89	2,75	2,04	1,55	1,11
09Г2С	3,67	3,55	3,59	3,61	3,37	3,39	3,41	3,49	3,51	3,56
15Х5М	3,57	3,47	3,54	3,57	3,44	3,29	3,52	3,43	3,46	3,38
12Х18Н10Т	3,07	3,3	3,37	3,47	3,06	3,21	3,27	3,15	3,18	3,15

$B, м^{-1}$



$B, м^{-1}$



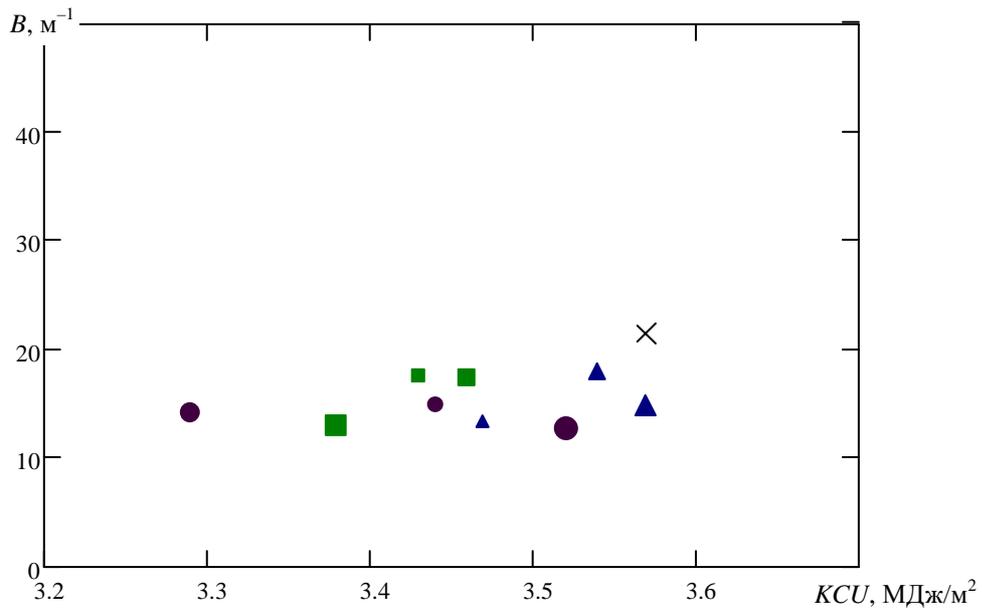
× – исходное состояние;

▲ – деформация 4 % + выдержка при 250 °С (▲ – 1 час; ▲ – 2 часа; ▲ – 3 часа);

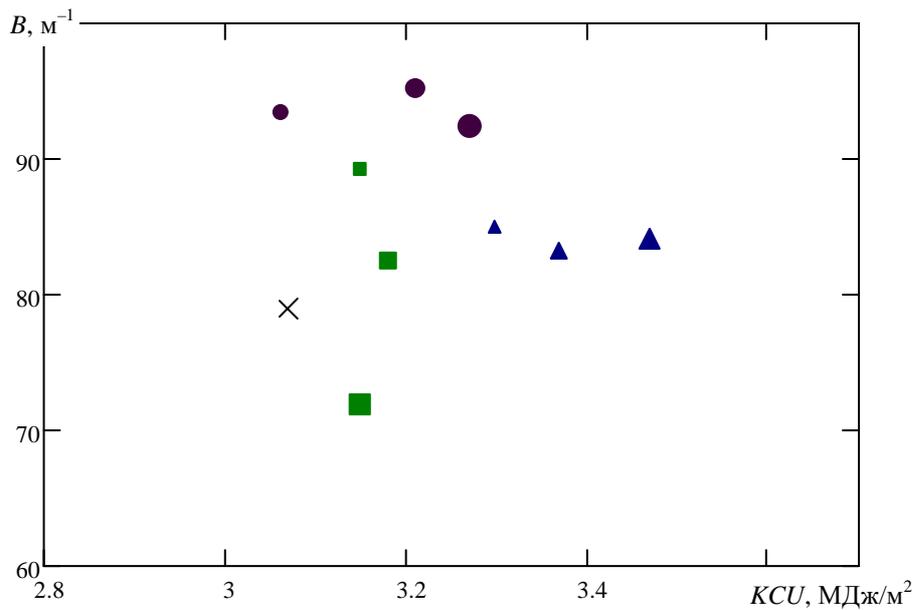
● – деформация 7 % + выдержка при 250 °С (● – 1 час; ● – 2 часа; ● – 3 часа);

■ – деформация 10 % + выдержка при 250 °С (■ – 1 час; ■ – 2 часа; ■ – 3 часа)

Рисунок 4.27 – Карта деградации механических свойств стали 20 (а) и 09Г2С (б) после искусственного деформационного старения



a)



б)

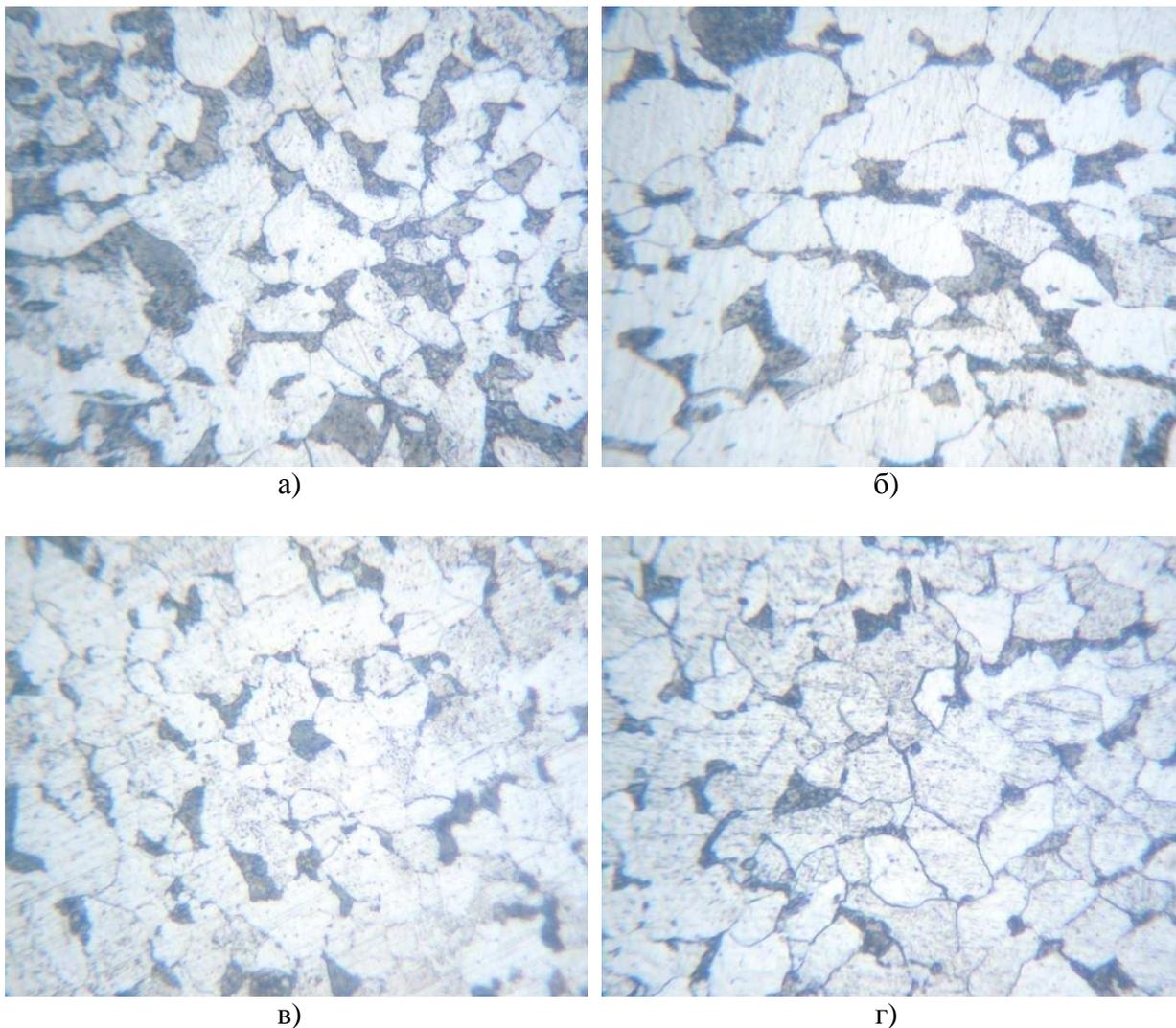
- × — исходное состояние;  
 ▲ — деформация 4 % + выдержка при 250 °С  
 (▲ — 1 час; ▲ — 2 часа; ▲ — 3 часа);  
 ● — деформация 7 % + выдержка при 250 °С (● — 1 час; ● — 2 часа; ● — 3 часа);  
 ■ — деформация 10 % + выдержка при 250 °С (■ — 1 час; ■ — 2 часа; ■ — 3 часа)
- Рисунок 4.28 — Карта деградации механических свойств стали 15X5M (а) и 12X18H10T (б) после искусственного деформационного старения

Данные таблиц 4.3...4.6 и рисунков 4.27–4.28 показывают, что значения механических свойств исследованных сталей изменяются после искусственного деформационного старения по сравнению с исходными значениями. На картах деградации наблюдается незначительное смещение экспериментальных точек, соответствующих комплексу механических характеристик, от начального положения. Отсутствие значительного смещения экспериментальных точек связано с непродолжительностью воздействия деформационного старения на свойства сталей в лабораторных условиях (в отличие от естественного старения, протекающего в материале в течение длительного времени). Несмотря на это, карты деградации эффективны при фиксировании даже незначительных (в данном случае) изменений, происходящих в материале при искусственном деформационном старении. В то же время судить о деградации комплекса механических свойств по результатам анализа таблиц значений механических характеристик затруднительно. Можно проследить только за изменением какой-либо отдельной характеристики, а не комплекса механических свойств. Графическое же представление в виде карты (см. рисунки 4.27–4.28) деградации весьма наглядно и точно характеризует деградацию материала.

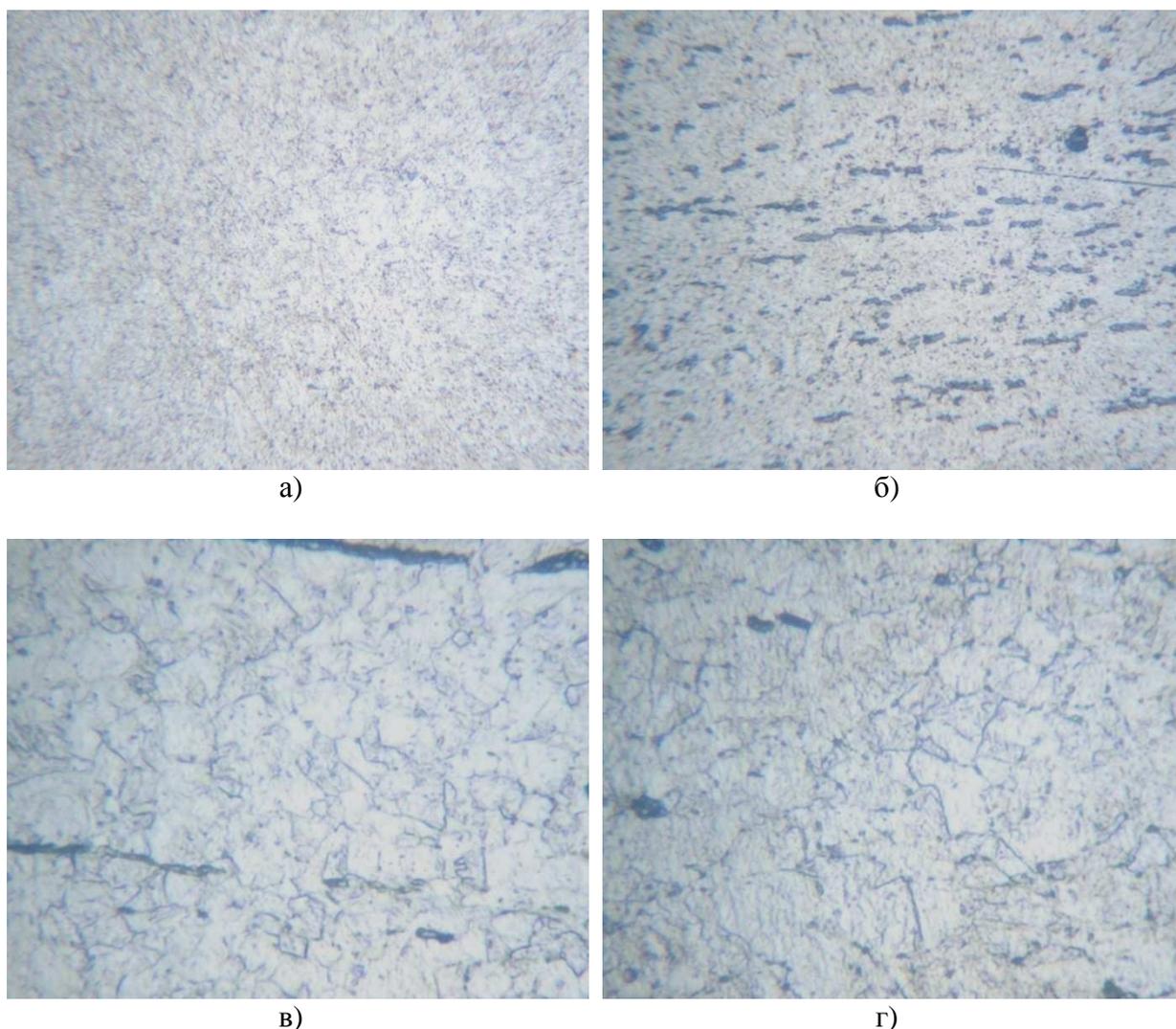
Микроструктуры сталей до и после искусственного старения приведены на рисунках 4.29 и 4.30. В явном виде (при данных увеличениях) деградации не наблюдается, что может быть объяснено непродолжительностью испытаний.

Вместе с тем при искусственном старении изменение структуры исследованных сталей заключается в деформировании зерен, их изгибе и повороте, искажении границ зерен (см. рисунки 4.29 и 4.30). Зерна вытягиваются в направлении растягивающей нагрузки. Максимальная деформация зерен наблюдается при общей деформации материала 10 %. При этом зерна деформируются неоднородно вследствие их разной ориентации по отношению к приложенной нагрузке.

В результате исследований установлено, что изменение механических свойств и деградация структуры при деформационном старении зависит от температуры, степени деформации и длительности старения. При искусственном деформационном старении с повышением температуры и времени выдержки при этой температуре прочностные характеристики снижаются, при этом деградация структуры не очень заметна. Установлено, что на склонность стали к деформационному старению в наибольшей степени влияет деформация растяжением 10 %.



**а — сталь 20 (до деформирования); б — сталь 20 (после деформирования);  
 в — сталь 09Г2С (до деформирования); г — сталь 09Г2С (после деформирования);  
 Рисунок 4.29 — Микроструктура сталей 20 и 09Г2С до и после  
 искусственного деформационного старения (×400, репродукция ×3)**



а)

б)

в)

г)

**а — сталь 15X5M (до деформирования);**

**б — сталь 15X5M (после деформирования);**

**в — сталь 12X18H10T (до деформирования);**

**г — сталь 12X18H10T (после деформирования)**

**Рисунок 4.30 — Микроструктура сталей 15X5M и 12X18H10T до и после искусственного деформационного старения ( $\times 400$ , репродукция  $\times 3$ )**

Изменения в стали 20 проявляются после деформационного старения более заметно. Наиболее значительные изменения механических свойств наблюдаются при степени пластической деформации 4 и 10 % (значительно снижаются  $\delta_5$ ,  $\psi$  и  $KCU$ , а  $\sigma_B$  повышается). При степени пластической деформации 7 % происходит увеличение  $KCU$ ,  $\sigma_B$  и снижение  $\delta_5$ . При этом деградация структуры не очень проявляется.

В результате деформационного старения стали 09Г2С ударная вязкость снизилась незначительно. Наблюдается значительное снижение от-

носительного удлинения и увеличение предела прочности. Наибольшие изменения свойств наблюдаются при 10 % деформации и выдержке 3 ч при температуре 250 °С.

Прочностные свойства стали 15Х5М после деформационного старения увеличиваются, происходит также резкое снижение относительного удлинения. Однако ударная вязкость и поперечное сужение изменяются незначительно. Наибольшие изменения свойств наблюдаются при 7 % деформации и выдержке 1 ч при температуре 250 °С. При этом деградация структуры не очень заметна.

Сравнительно высокие значения  $\delta_5$ ,  $\psi$  и  $KCU$  при испытании на деформационное старение свидетельствуют о достаточном запасе (ресурсе) пластичности стали 12Х18Н10Т. После искусственного старения происходит увеличение предела прочности. Наибольшие изменения свойств наблюдаются при 10 % деформации и выдержке 1 ч при температуре 250 °С. При этом деградация структуры не очень заметна.

Наибольший эффект деформационного старения наблюдается у сталей 20 и 09Г2С. Стали 15Х5М и 12Х18Н10Т менее склонны к деформационному старению. Из-за неблагоприятного влияния деформационного старения на свойства сталей 20 и 09Г2С для них следует предусматривать испытание на склонность к деформационному старению.

Таким образом, можно считать доказанной высокую чувствительность карт деградации даже к незначительному изменению механических свойств материала и деградации его структуры. Деградация структуры указанных сталей не так значительна, как изменение механических свойств. Поэтому для оценки ресурса материала в первую очередь следует применять карты деградации, а не анализ структуры. Это, в свою очередь, позволяет использовать карты деградации для контроля за состоянием материала НПО, выработавшего нормативный срок службы, на основе оценки изменения, в первую очередь, механических свойств материала при эксплуатации.

#### **4.6 Исследование деградации структуры и изменения механических свойств материала нефтеперерабатывающего оборудования**

Исследования деградации структуры и изменения механических свойств выполнено на материале длительно эксплуатируемого НПО. На карту деградации наносили значения механических свойств материала

после длительной эксплуатации, а также значения механических свойств до эксплуатации по паспорту объекта или ТНПА на материал. После чего устанавливали наличие деградации механических свойств и анализировали изменения, происходящие в материале. Кроме этого проводили металлографический анализ с целью установления деградации структуры материала НПО.

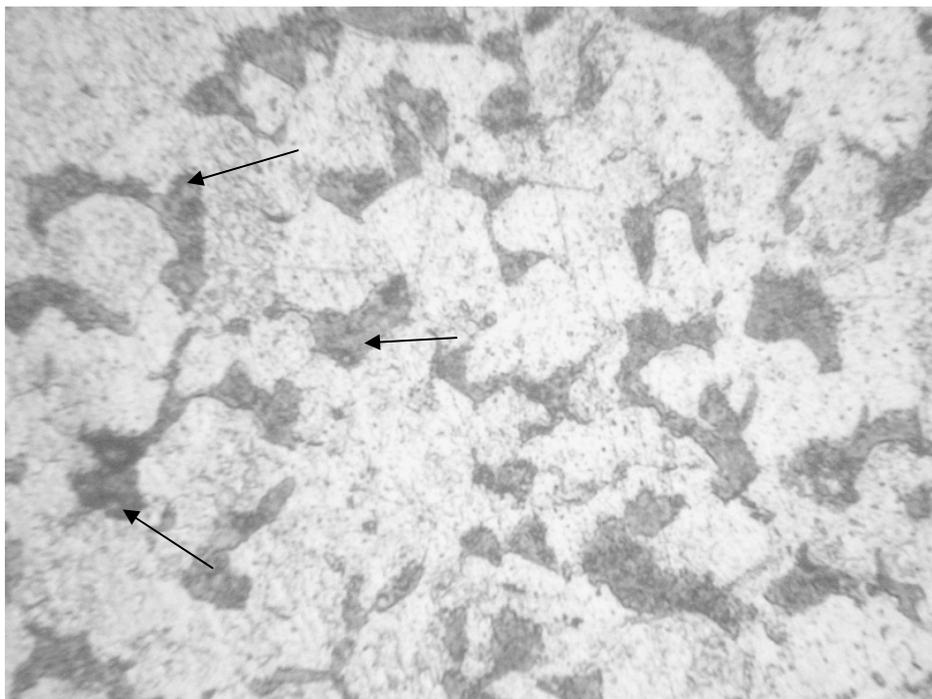
Согласно данным [111] установлено, что для феррито-перлитных сталей (на примере сталей Ст3 и Ст4) при их эксплуатации при циклических нагрузках (что важно и для конструкций НПО) наблюдаются изменения в зернах феррита: чем больше циклов или выше напряжения, тем ярче в микроструктуре видны субзерна феррита. Указанные изменения легко выявляются микроскопом, в том числе и переносным, и свидетельствуют о степени деградации металла, в том числе и его механических свойств (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Связь механических свойств стали со структурой феррита [111]

Тип структуры	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$KCU$ , Дж/см <sup>2</sup>
Исходная	268	430	26	185
Ячеистая	250	450	24	157
Фрагментированная с «ножевыми» границами	298	560	18	78

Как видно из таблицы 4.7 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 %.

Применимость метода анализа структуры была проверена на образцах, взятых из несущей строительной конструкции НПО, эксплуатировавшейся около 30 лет. Материал конструкции – сталь ВСтЗсп5. С учетом длительного срока эксплуатации объекта можно было предположить о процессах изменения в структуре ферритной составляющей: появления ячеистой структуры. Микроструктурный анализ металла действительно подтвердил данные предположения (рисунок 4.31). Феррит (крупные светлые зерна) состоит из более мелких субзерен – ячеек.



**Рисунок 4.31 – Микроструктура анализируемого металла (×400)  
(аномальная ячеистая структура феррита показана стрелками)**

Установлено появление ячеистой структуры у феррита, которое хорошо видно и в переносной микроскоп, что свидетельствует о снижении всего комплекса механических свойств металла и повышении вероятности разрушения конструкции. Однако, эффективное использование данного метода с выходом на остаточный ресурс конструкции (в годах) проблематично и требует дальнейших исследований.

Таким образом, металлографические методы действительно позволяют оценивать степень деградации металла, и даже количественное снижение механических свойств различных конструкций, в том числе НПО, без разрушения диагностируемой конструкции с использованием переносных микроскопов. Однако, их применение для оценки остаточного ресурса целесообразно только в комплексе с другими методами исследований. Поэтому в данной работе дальнейшие разработки связаны с комплексным показателем механических свойств и анализом карты деградации, как наиболее чувствительных к комплексной деградации металла.

Результаты исследований изменения структуры и механических свойств углеродистых сталей приведены на рисунке 4.32 (на примере сталей Ст3 и 20). После длительной эксплуатации углеродистых сталей наблюдается смещение экспериментальных точек на карте деградации.

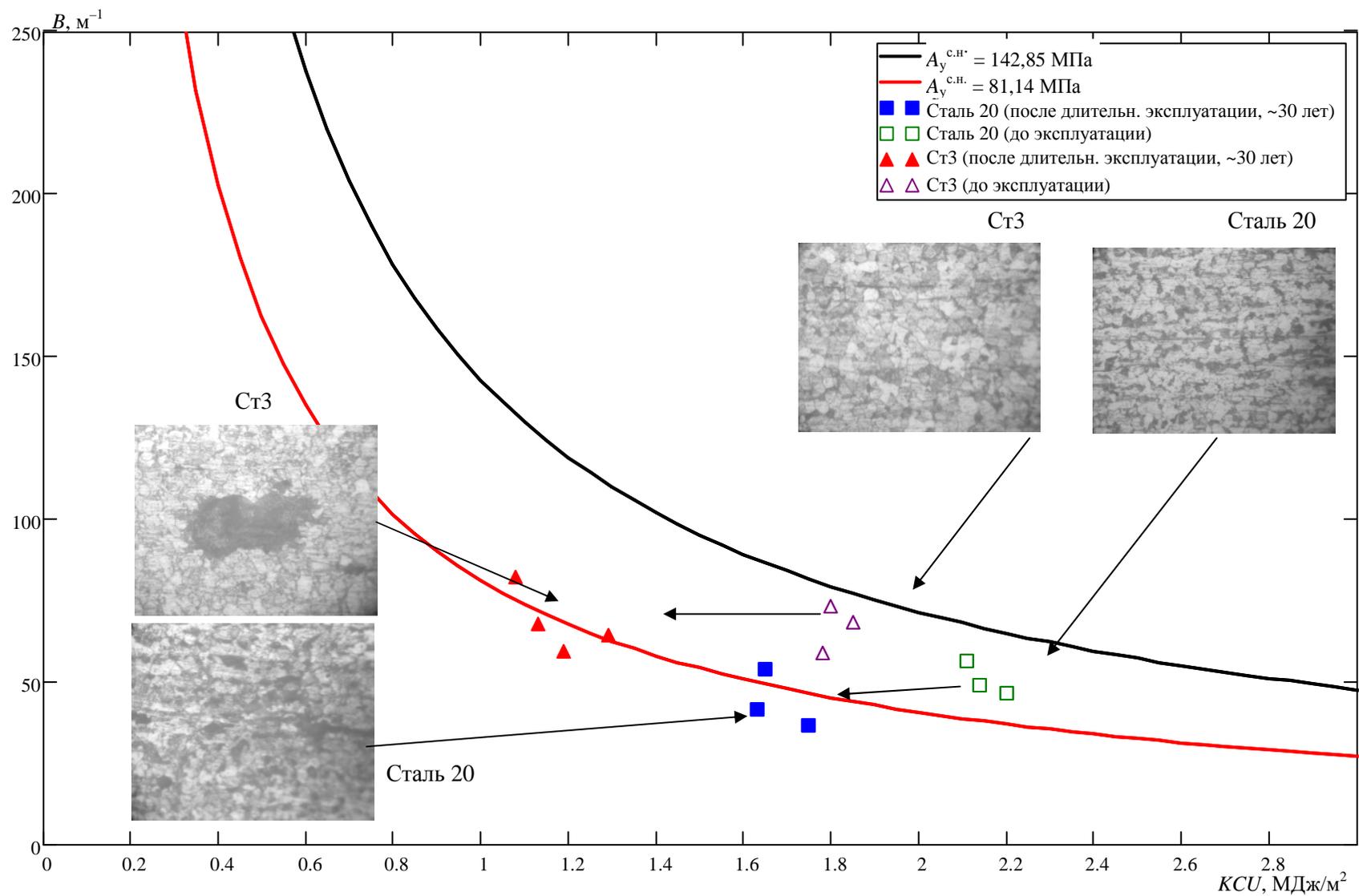
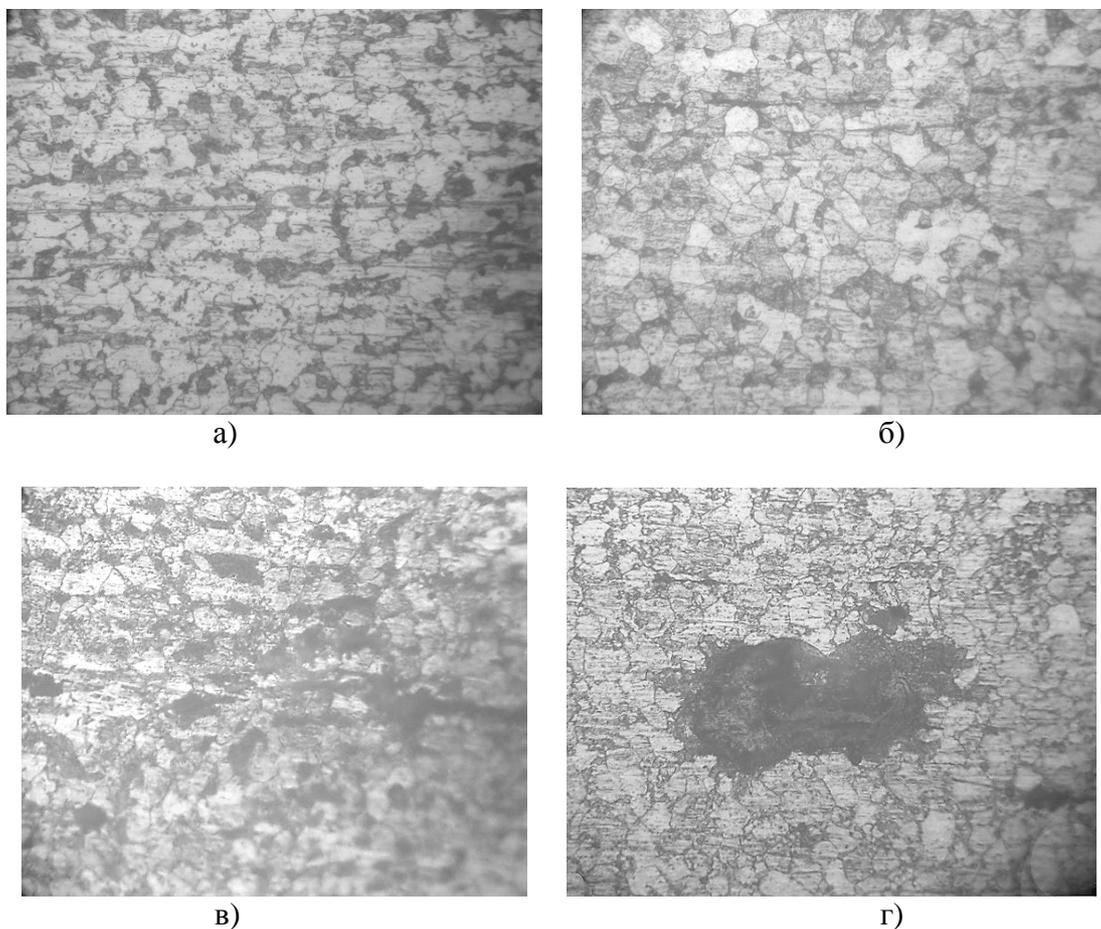


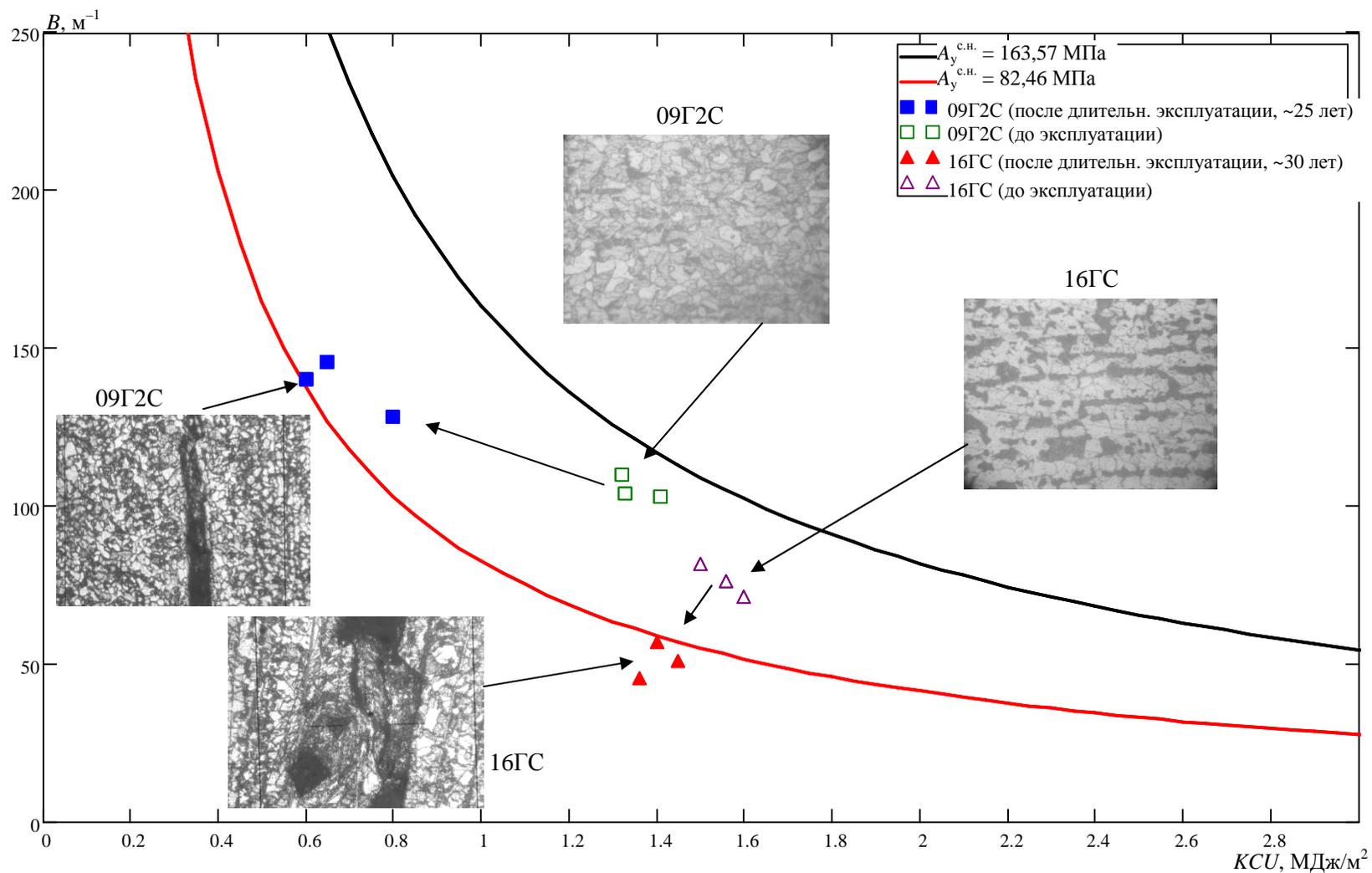
Рисунок 4.32 – Оценка изменения механических свойств углеродистых сталей после длительной эксплуатации

По сравнению с исходным положением до эксплуатации точки сместились по направлению к области 3 (см. рисунок 4.32). При этом некоторые экспериментальные точки расположены ниже границы наименьшей конструкционной прочности (при  $A_y^{с.н.} = 81,14$  МПа). Это говорит о том, что конструкционная прочность материала НПО снизилась и его дальнейшая эксплуатация небезопасна.

Структура материала после длительной эксплуатации имела микроповрежденность в виде графитизации (распада цементита  $Fe_3C$  на железо и структурно свободный графит (углерод)) (рисунок 4.33), которая вызвала снижение его механических свойств и, как следствие, конструкционной прочности.



а) – сталь 20 (исходная структура, феррит + перлит);  
 б) – Ст3 (исходная структура, феррит + перлит);  
 в) – сталь 20 (структура после длительной эксплуатации, графитизация);  
 г) – Ст3 (структура после длительной эксплуатации, графитизация)  
 Рисунок 4.33 – Микроповрежденность структуры углеродистых сталей после длительной эксплуатации (×240, репродукция ×3)



**Рисунок 4.34 – Оценка изменения механических свойств низколегированных кремнемарганцевых сталей после длительной эксплуатации**

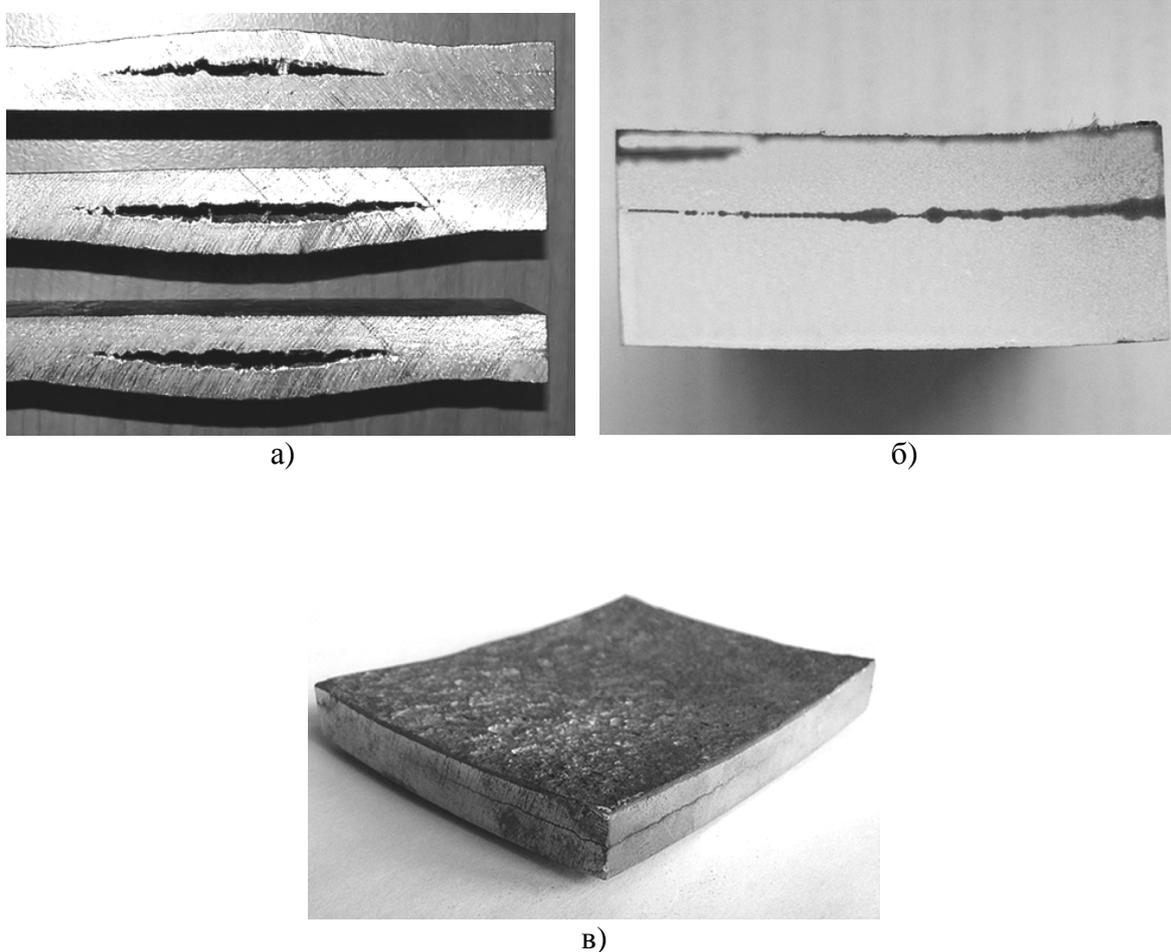
Результаты исследований изменения структуры и механических свойств низколегированных кремнемарганцевых сталей приведены на рисунке 4.34 (на примере сталей 09Г2С и 16ГС). После длительной эксплуатации произошло смещение экспериментальных точек на карте деградации. Их новое положение свидетельствует о низкой конструкционной прочности сталей и, как следствие, об изменении механических свойств в течение эксплуатации.

Материал конструкций исследованных аппаратов в течение времени, предшествующему диагностированию, длительное время эксплуатировался в сероводородсодержащей среде. При обследовании было выявлено расслоение стенок аппаратов, вызванное диффузией атомарного водорода в материал (рисунок 4.35). Микрорасслоение наблюдалось также и на образцах (рисунок 4.36). Естественно, что такой материал не обладает запасом конструкционной прочности и его дальнейшая эксплуатация является опасной с позиции внезапного разрушения. Конструкционная прочность аппарата снижается в результате исключения из работы части сечения стенки, что приводит к увеличению напряжений в ослабленном сечении примерно в 2 раза. Поэтому дальнейшую эксплуатацию такого оборудования необходимо обосновывать прочностным расчетом.

Изменение микроструктуры сталей исследованных аппаратов в области расслоения не произошло. Материал имеет феррито-перлитную строчечную структуру, типичную для сталей 09Г2С и 16ГС (рисунок 4.37). Однако в поперечном сечении стенки наблюдалось расслоение, а вблизи расслоения – многочисленные поры, располагающиеся преимущественно в центре сечения листа (см. рисунок 4.37). Поэтому в данном случае микроповрежденность материала характеризуется процессами зарождения и развития пор, в которые диффундирует водород. Образование пор объясняется диффузией атомарного водорода до участка сечения стенки (как правило, до середины сечения стенки), на котором создаются условия для образования молекулярного водорода – несплошности и внутренние полости (поры, газовые раковины, шлаковые включения, микро- и макропустоты), места скопления примесей и других дефектов, обусловленных технологией прокатки стали. Подобные дефекты обычно располагаются в середине сечения листа параллельно поверхности. При скоплении в них водорода, повышается его давление, что, в конечном счете, приводит к расслоению и растрескиванию материала.

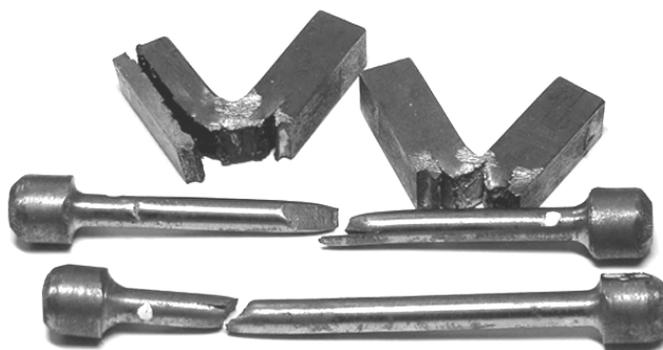
Результаты исследований изменения механических свойств коррозионноустойчивых сталей приведены на рисунке 4.38 (на примере сталей 08Х18Н10Т и

12X18H10T). После длительной эксплуатации коррозионностойких сталей 08X18H10T и 12X18H10T произошло смещение значений экспериментальных точек, характеризующих комплекс механических свойств, с исходного положения (см. рисунок 4.38). Экспериментальные точки сместились по направлению к области б (см. рисунок 4.7). Это свидетельствует о нежелательном изменении механических свойств в течение эксплуатации. При дальнейшей эксплуатации материала с такими свойствами, для которого точки расположены в крайней левой части карты деградации, возможно его хрупкое разрушение, которое обусловлено высоким сопротивлением пластическому деформированию (высокие значения  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$  и низкие значения  $\delta_5$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ).

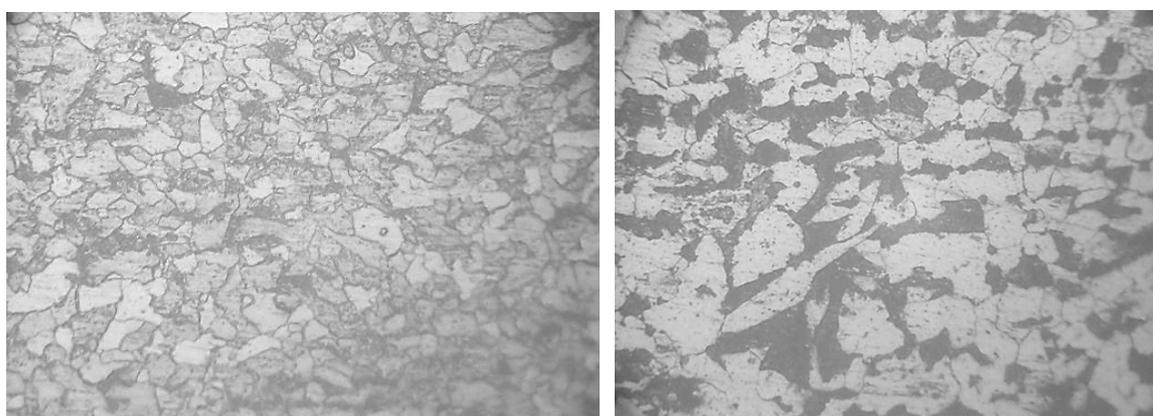


- а) – расслоение стенки пропановой емкости;
- б) – расслоение стенки стабилизационной колонны;
- в) – расслоение стенки буферной емкости

Рисунок 4.35 – Примеры сероводородного расслоения материала НПО

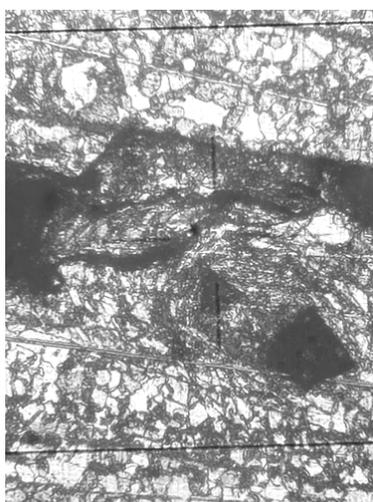


**Рисунок 4.36 – Внешний вид образцов после испытания на растяжение и ударный изгиб, изготовленных из материала с сероводородным расслоением**

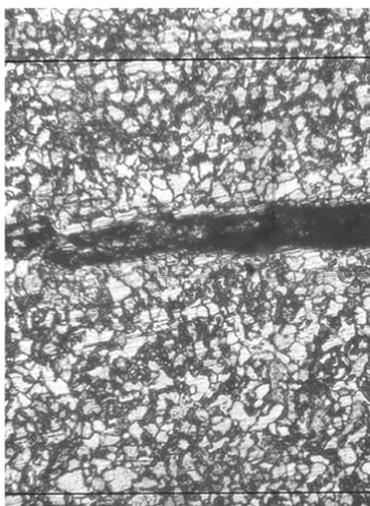


а)

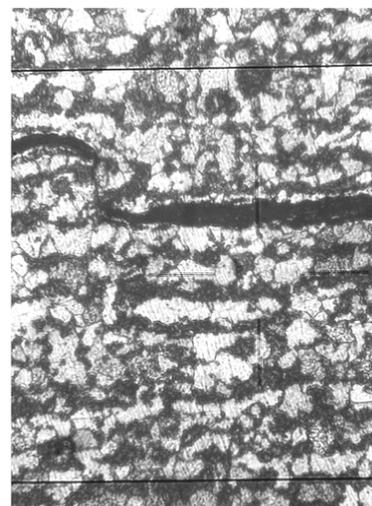
б)



в)



г)



д)

**а) – сталь 09Г2С (исходная структура, феррит+перлит, ×240);**

**б) – сталь 16ГС (исходная структура, феррит+перлит, ×240);**

**в), г) – сталь 09Г2С (структура после длительной эксплуатации, графитизация, ×400);**

**д) – сталь 16ГС (структура после длительной эксплуатации, графитизация, ×400)**

**Рисунок 4.37– Микроструктура низколегированных кремнемарганцевых сталей**

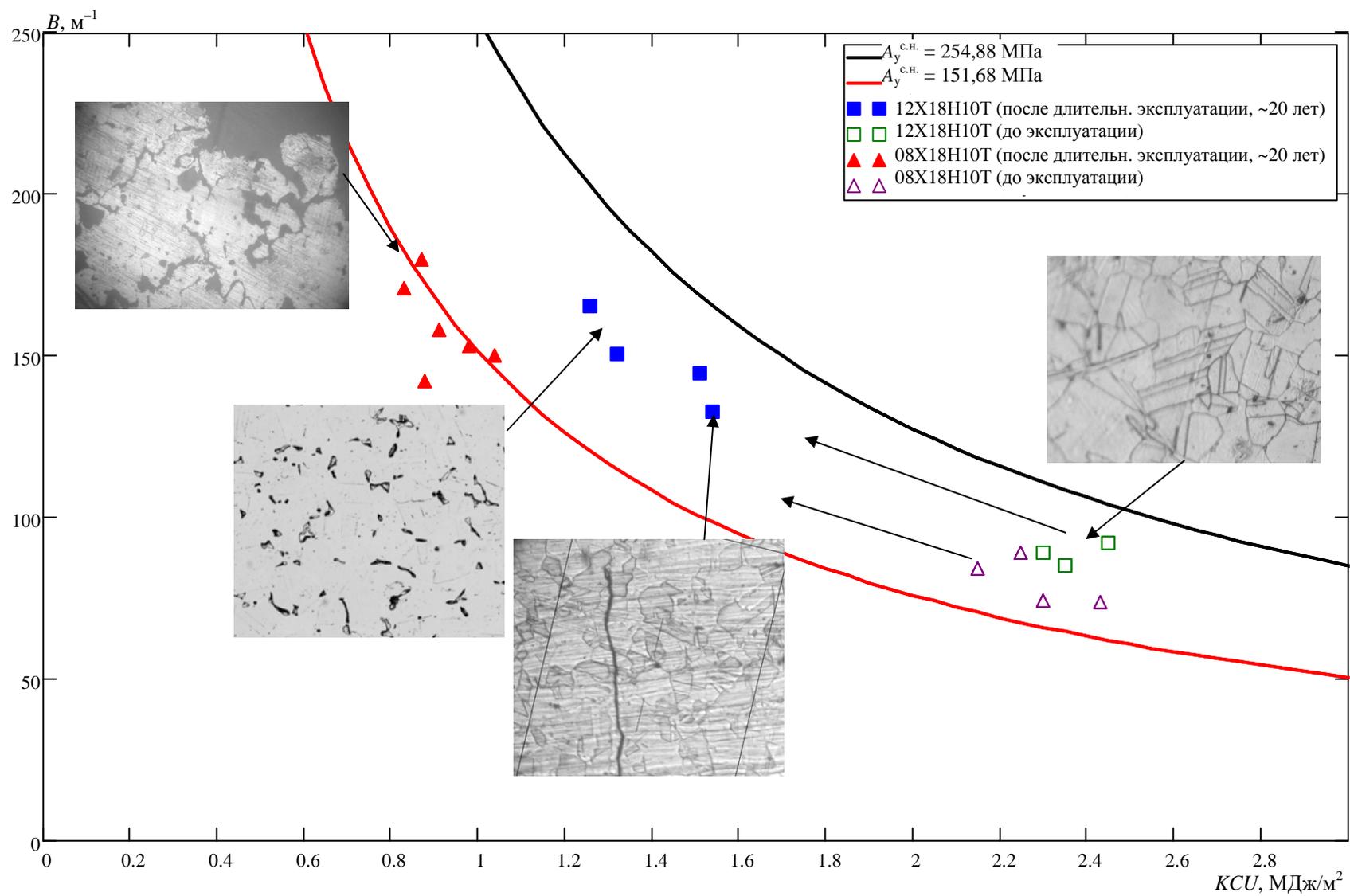
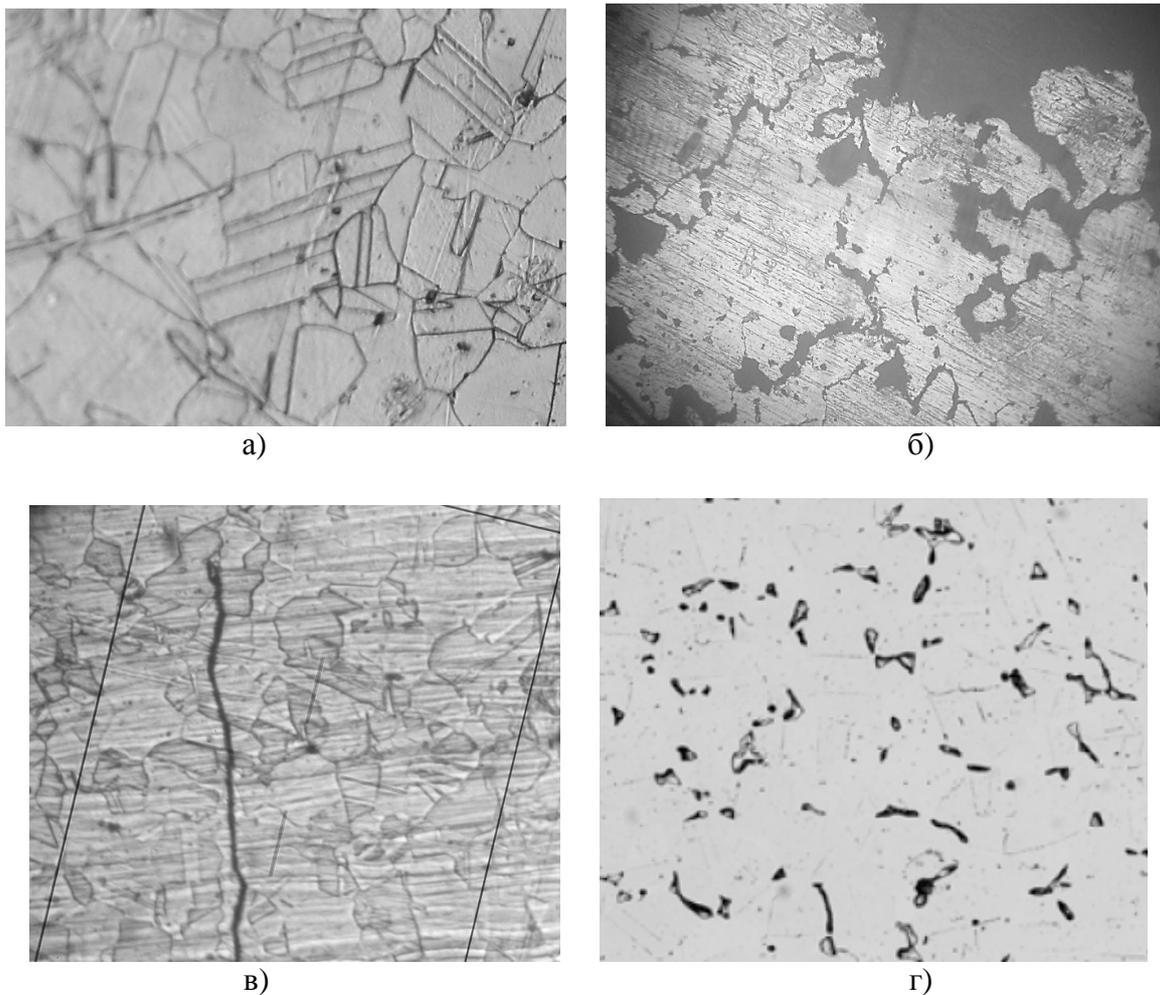


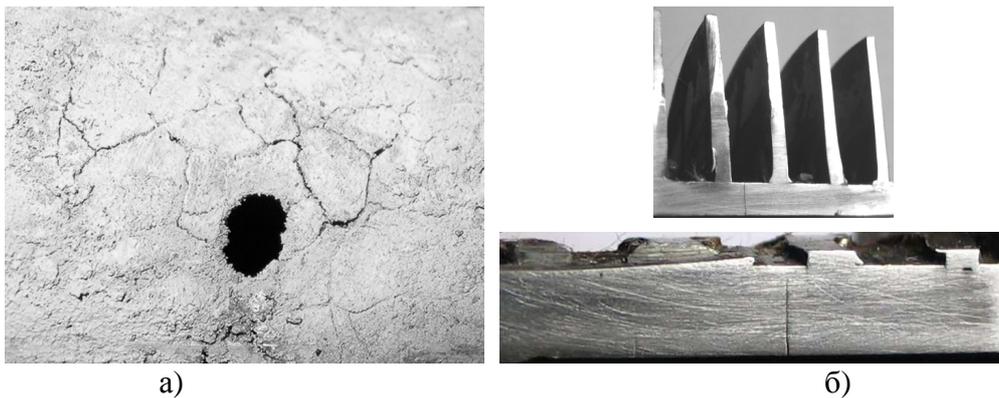
Рисунок 4.38 – Оценка изменения механических свойств коррозионностойких сталей после длительной эксплуатации

Микроструктура исследованных сталей приведена на рисунке 4.39. После длительной эксплуатации стали, для которых наблюдается наибольшее изменение механических свойств, имеют структуру с выделением  $\sigma$ -фазы по границам зерен. Это явление приводит к образованию микропор по границам аустенитных зерен в местах расположения  $\sigma$ -фазы. Указанные структурные изменения металла способствуют снижению несущей способности конструкции.



**а) – сталь 12X18H10T (исходная структура, аустенит,  $\times 400$ );**  
**б) – сталь 12X18H10T (межкристаллитная коррозия, нетравлено,  $\times 240$ );**  
**в) – сталь 08X18H10T (коррозионное растрескивание под напряжением,  $\times 250$ );**  
**г) – сталь 08X18H10T (выделение  $\sigma$ -фазы по границам зерен,  $\times 100$ )**  
**Рисунок 4.39 – Микроструктура коррозионностойких сталей**

Некоторые стали на момент диагностирования имели микроповреждения в виде межкристаллитной коррозии или коррозионного растрескивания под напряжением (рисунок 4.40), что обусловило изменение значений механических свойств.



а) – межкристаллитная коррозия печной трубы;  
 б) – коррозионное растрескивание под напряжением оребренных труб подогревателя

**Рисунок 4.40 — Примеры повреждений коррозионностойких сталей**

Результаты исследований изменения структуры и механических свойств стали 15X5M приведены на рисунке 4.41. Хромомолибденовая сталь типа 15X5M наиболее часто применяется для изготовления змеевиков трубчатых печей, которые наиболее теплонапряжены и относятся к ответственным конструкциям, работающим в очень жестких условиях. В результате длительного пребывания печных труб при высокой температуре микроструктура стали претерпевает значительные изменения, что сопровождается снижением механических свойств.

Были исследованы материалы печных змеевиков, которые испытали перегрев в течение эксплуатации. По сравнению с исходным состоянием экспериментальные точки сместились в левую часть карты деградации по направлению к области 3 (см. рисунок 4.7). Это свидетельствует о том, что конструкционная прочность змеевиков, изготовленных из стали 15X5M, снизилась и их дальнейшая эксплуатация стала небезопасной из-за возможности разрушения. Снижение значений механических свойств обусловлено деградацией структуры материала.

Деградация микроструктуры теплоустойчивых хромомолибденовых сталей 15XM, 15X5M, 13X9M, 10X12B2MФ, 10X13M1 происходит при длительной эксплуатации при высокой температуре ( $\approx 500...550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) или при кратковременных перегревах ( $> 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Она сопровождается снижением прочностных и пластических характеристик материала. Подобные изменения в материале крайне нежелательны и опасны, т.к. могут привести к разрушению труб змеевиков во время эксплуатации печей [112, с. 150; 113]. Снижение конструкционной прочности стали объясняется коагуляцией карбидной фазы типа  $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{VC}$ ,  $\text{Me}_3\text{C}$ ,  $\text{Me}_7\text{C}_3$  и  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  (Mo – атом молибдена, Cr – атом хрома, V – атом ванадия, Me – атомы молибдена, хрома и ванадия, C – атом углерода) и обеднением молибденом твердого раствора из-за перехода его в карбиды [38].

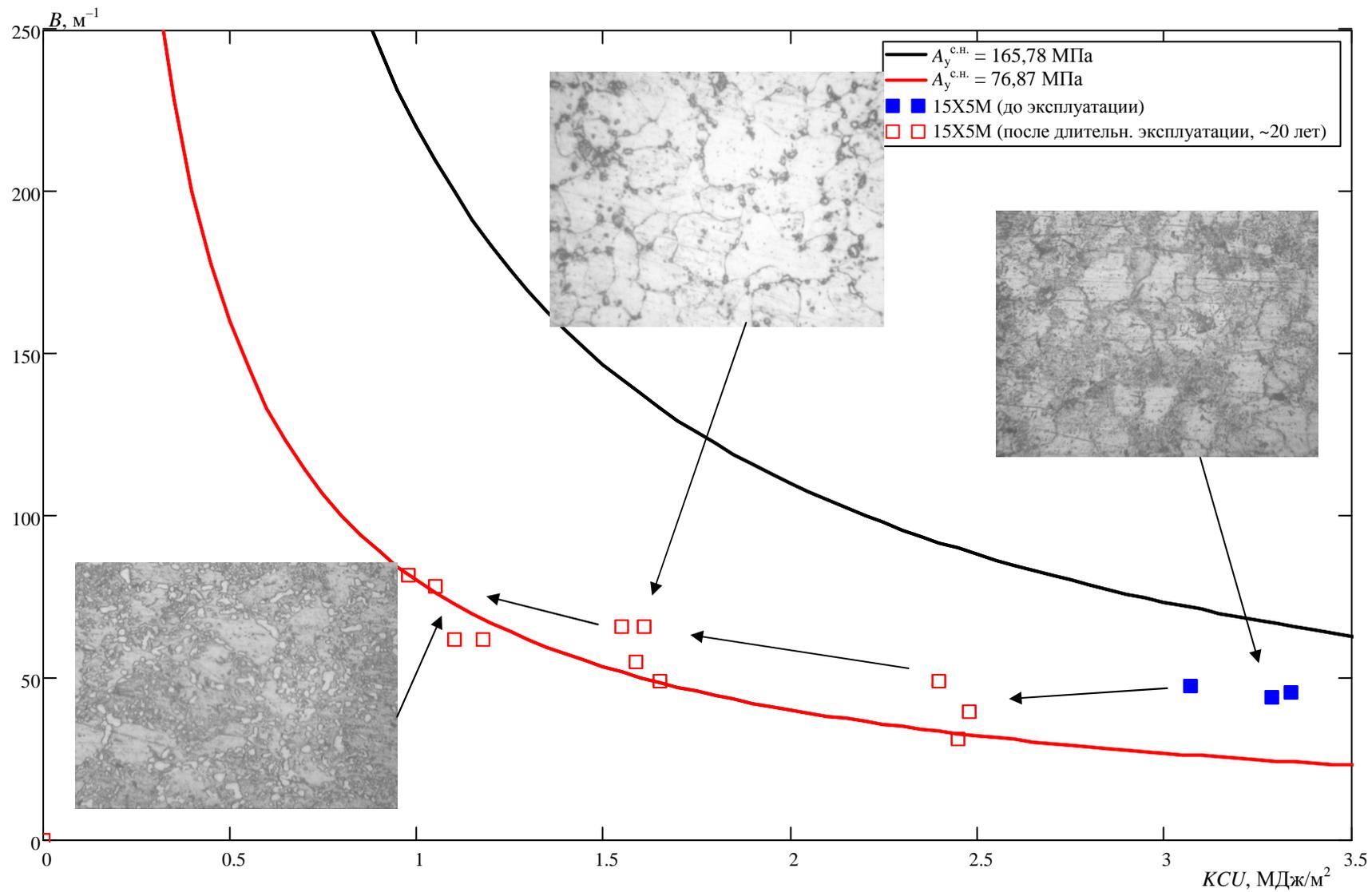


Рисунок 4.41 – Оценка изменения механических свойств стали 15X5M после длительной эксплуатации

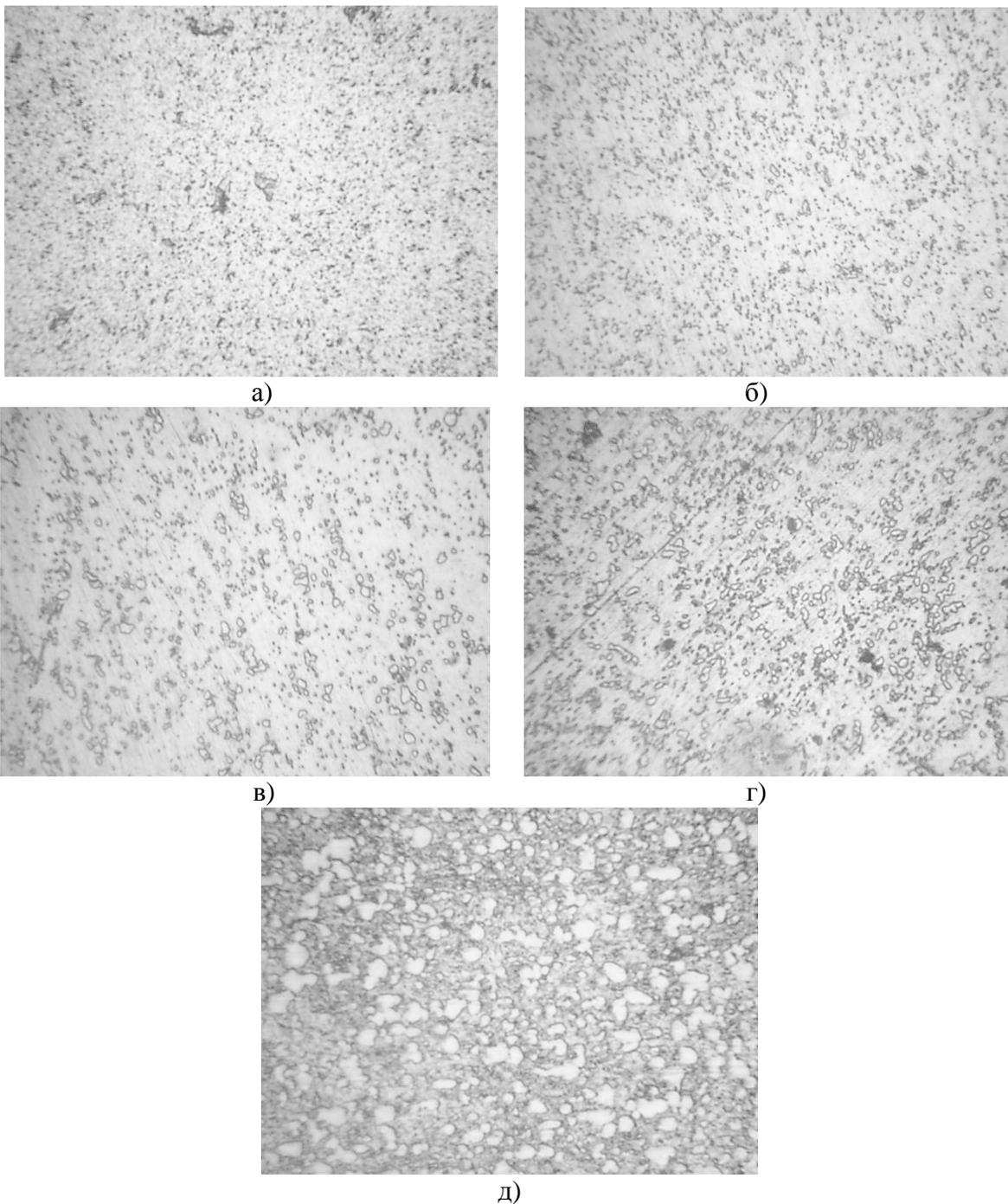
Работоспособное состояние теплоустойчивых хромомолибденовых сталей зависит не только от количества коагулированных карбидов, но и от их размера. Однако в литературе отсутствуют сведения о влиянии размера коагулированных карбидов на состояние хромомолибденовых сталей. Поэтому актуальной является разработка количественного критерия оценки безопасности эксплуатации конструкций из теплоустойчивых сталей, структура которых претерпела деградацию. В качестве такого критерия нами выбран размер коагулированных карбидов. Для оценки размера коагулированных карбидов, до которого возможна безопасная эксплуатация материала, нами исследованы печные змеевики (типичные элементы конструкций НПО) из стали 15X5M после различного срока эксплуатации и степени перегрева. Наличие коагулированных карбидов в структуре стали 15X5M и их размер выявлялись на образцах, вырезанных из труб змеевиков, а также непосредственно на трубах путем проведения полевой металлографии. Типичные микроструктуры стали 15X5M приведены на рисунке 4.42.

До эксплуатации сталь 15X5M имеет структуру, содержащую феррит и равномерно распределенные в нем структурно свободные зернистые карбиды в виде отдельных включений размером до 1 мкм (см. рисунок 4.42 а). Такая структура обеспечивает необходимую теплоустойчивость стали, т.к. основная масса молибдена находится в феррите, а хром и углерод – в карбидах. Средние значения механических свойств составляют: предел прочности  $\sigma_B \approx 530$  МПа; относительное удлинение  $\delta_5 \approx 30$  %, относительное сужение  $\psi \approx 62$  %, ударная вязкость  $KCU \approx 3,1$  МДж/м<sup>2</sup>.

В течение длительной эксплуатации при высокой температуре сталь 15X5M сохраняет феррито-карбидную структуру, однако в ней происходят структурные изменения, характеризующиеся обеднением твердого раствора  $\alpha$ -железа (феррита) молибденом, изменением фазового состава карбидов с коагуляцией карбидных частиц.

На рисунке 4.42 (б) показана микроструктура, имеющая начальную стадию деградации. Под воздействием высокой температуры происходит перераспределение молибдена в структуре стали: он выделяется из феррита с образованием карбидов. Размер карбидов составляет 1...2 мкм. Происходит снижение механических свойств:  $\sigma_B \approx 495$  МПа;  $\delta_5 \approx 26$  %,  $\psi \approx 55$  %,  $KCU \approx 2,3$  МДж/м<sup>2</sup>.

В дальнейшем происходит коагуляция карбидов и их скопление преимущественно по границам ферритных зерен. При этом по расположению карбидов можно судить о границах зерен. Размер коагулированных карбидов равен 2...4 мкм. Микроструктура стали показана на рисунке 4.42 (в). Средние значения механических характеристик:  $\sigma_B \approx 420$  МПа;  $\delta_5 \approx 23$  %,  $\psi \approx 49$  %,  $KCU \approx 1,8$  МДж/м<sup>2</sup>.



**а) – балл 0; б) – балл 1; в) – балл 2; г) – балл 3; д) – балл 4**

**Рисунок 4.42 – Примеры типичных микроструктур стали 15X5M с различной степенью коагуляции карбидов (×500, репродукция ×3)**

При дальнейшей деградации структуры происходит укрупнение карбидных частиц с образованием цепочек карбидов типа «ожерелья» по границам зерен при одновременном укрупнении карбидных частиц по телу зерен (см. рисунок 4.42 г). Средний размер карбидов равен 5...8 мкм. При этом наблюдается значительное снижение механических характеристик по

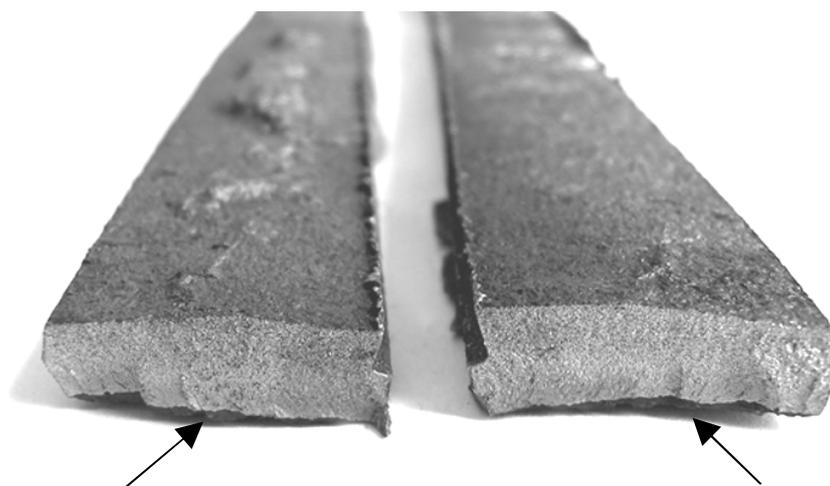
сравнению со свойствами материала до эксплуатации:  $\sigma_b \approx 368$  МПа;  $\delta_5 \approx 21,5$  %,  $\psi \approx 43$  %,  $KCU \approx 1,1$  МДж/м<sup>2</sup>.

На завершающей стадии деградации структуры молибден практически полностью переходит из твердого раствора в карбиды. При этом средний размер карбидов составляет 9...14 мкм, они расположены по всему объему материала (см. рисунок 4.42 д). Как следствие, происходит потеря пластичности и теплоустойчивости материала. При механической обработке заготовки из такого материала хрупко разрушаются (рисунок 4.43).

Таким образом, чем больше размер коагулированных карбидов в структуре стали 15X5M, тем значительнее снижение ее свойств.

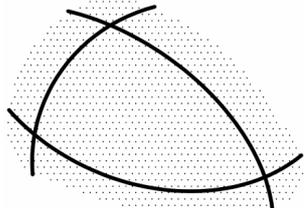
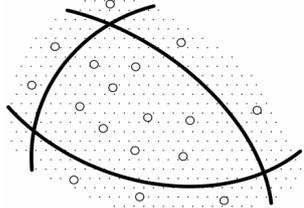
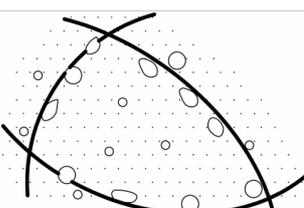
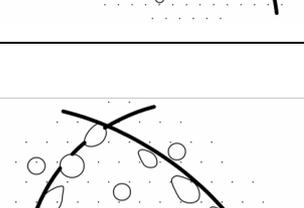
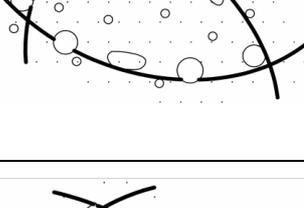
На основании обобщения полученных данных разработана шкала баллов коагуляции карбидов в структуре теплоустойчивых хромомолибденовых сталей. Микроструктуры разделены на баллы по среднему размеру коагулированных карбидов. При помощи данной шкалы можно ориентировочно оценивать степень поврежденности структуры и, как следствие, старения данных сталей. В таблице 4.8 приведены баллы микроструктур, соответствующие им размеры коагулированных карбидов, схемы структурных изменений и средние значения механических свойств материала.

При размере коагулированных карбидов в структуре стали 1...4 мкм (1 и 2 баллы) эксплуатация змеевика безопасна; 5...8 мкм (3 балл) — дальнейшая эксплуатация безопасна при условии удовлетворительных результатов механических испытаний и сокращении времени до проведения следующего диагностирования материала; более 9 мкм (4 балл) — трубы змеевика подлежат замене.



**Рисунок 4.43 – Хрупкое разрушение образцов из стали 15X5M при механической обработке (излом показан стрелками)**

Таблица 4.8 — Характеристика баллов микроструктур теплоустойчивых хромомолибденовых сталей после длительной эксплуатации (см. рисунок 4.42)

Балл микро-структуры	Вид структуры	Характеристика	Средние значения механических свойств			
			$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
Балл 0		Структура — феррит с равномерно распределенными карбидами. Размер карбидов < 1 мкм	530	30	62	3,1
Балл 1		Структура — феррит и карбиды. Средний размер карбидов — 1...2 мкм	495	26	55	2,3
Балл 2		Структура — феррит и коагулированные карбиды, расположенные по границам зерен. Средний размер карбидов — 2...4 мкм	420	23	49	1,8
Балл 3		Структура — феррит и коагулированные карбиды, расположенные по границам зерен. Укрупнение карбидов в теле зерна. Средний размер карбидов — 5...8 мкм	368	21,5	43	1,1
Балл 4		Структура — феррит и коагулированные карбиды. Карбиды расположены по всему объему стали. Средний размер карбидов — 9...14 мкм	— <sup>1</sup>	— <sup>1</sup>	— <sup>1</sup>	— <sup>1</sup>

<sup>1</sup> При эксплуатации материал охрупчивается до такой степени, что изготовить образцы для испытаний не представляется возможным (при механической обработке происходит хрупкий излом заготовок).

Анализ микроструктуры сталей непосредственно в печи с помощью переносного микроскопа является экспресс-методом контроля деградации и оценки состояния материала печных змеевиков.

Таким образом, выполненный качественный анализ изменения структуры и механических свойств исследованных сталей после длительной эксплуатации показал, что карты деградации отражают изменения, происходящие в материале при эксплуатации. При этом изменения механических свойств материала обусловлены деградацией структуры. Оценку состояния материала следует проводить путем систематического определения значений механических характеристик материала разрушающим или неразрушающим способами, нанесении их значений на карту деградации механических свойств, анализе степени соответствия расположения областей начальных и конечных значений механических свойств.

#### **4.7 Способ определения скорости деградации механических свойств материала**

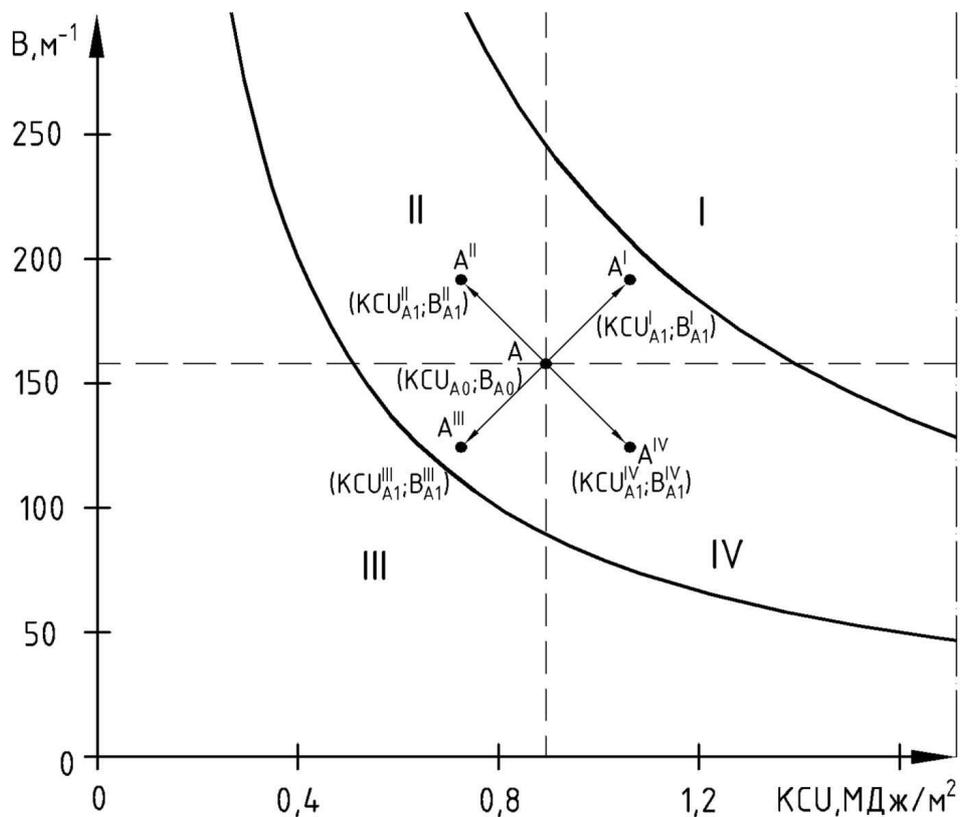
Качественной оценки деградации механических свойств недостаточно для определения фактического состояния материала НПО. Кроме этого необходимо иметь также данные количественной оценки деградации свойств. Подобная оценка может быть выполнена путем введения нового показателя, который в дальнейшем будем называть «скоростью деградации механических свойств материала» ( $V_{\text{дег}}$ ).

Для определения  $V_{\text{дег}}$  необходимо определить исходные значения механических характеристик ( $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$ ) (по паспорту оборудования или путем проведения механических испытаний) и нанести экспериментальную точку на карту деградации. 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 НПО: начало эксплуатации  $\Rightarrow$  капитальный ремонт  $\Rightarrow \dots \Rightarrow$  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

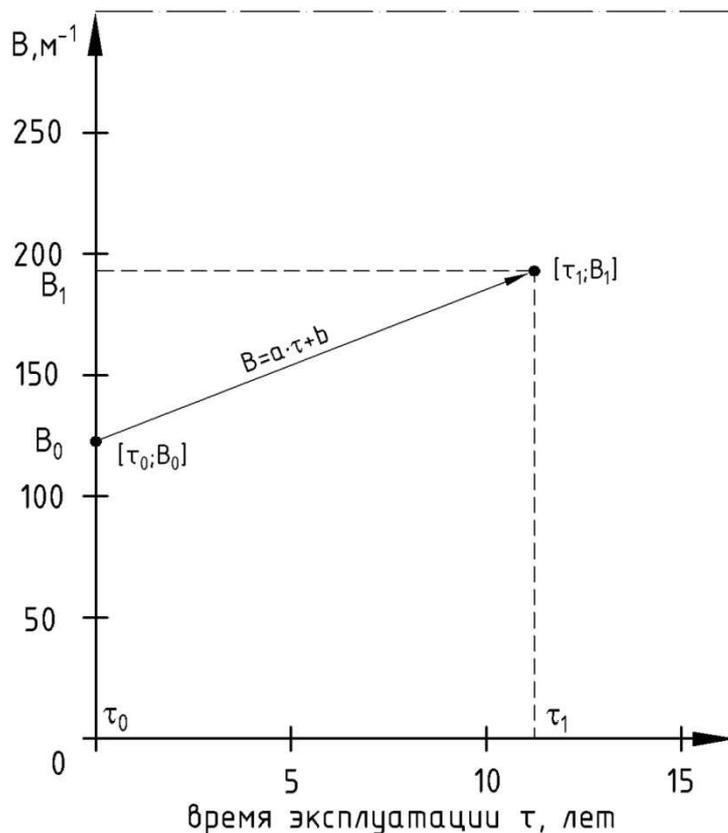
измерениях механических характеристик, соответствующие начальному и конечному этапам эксплуатации за рассматриваемый отрезок времени. В данном случае скорость деградации можно определить, используя линейную зависимость комплексного показателя механических свойств от времени. Однако изменение механических свойств материала при эксплуатации НПО, 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 и более 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 точки  $A$ , соответствующей значению комплекса механических свойств материала в начале эксплуатации, на карте деградации обозначим  $KCU_{A0}$  и  $B_{A0}$  (рисунок 4.44). Возможные направления смещения значений экспериментальных точек на карте деградации механических свойств в эксплуатации по отношению к точке  $A$  показаны на рисунке 4.44.



**Рисунок 4.44 – 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  $B$  ( $\text{м}^{-1}$ ) – время эксплуатации  $\tau$  (лет)» (рисунок 4.45).



**Рисунок 4.45 – Схема, поясняющая определение скорости деградации механических свойств материала (линейная зависимость)**

Две точки на графике соединяются прямой линией. Зная координаты точек  $[\tau_0; B_0]$  и  $[\tau_1; B_1]$  определяются параметры линейного уравнения:

$$B_0 = a \cdot \tau_0 + b, \quad (4.7)$$

$$B_1 = a \cdot \tau_1 + b, \quad (4.8)$$

$$B_1 - B_0 = (a \cdot \tau_1 + b) - (a \cdot \tau_0 + b) = a \cdot (\tau_1 - \tau_0). \quad (4.9)$$

Откуда

$$a = \frac{B_1 - B_0}{\tau_1 - \tau_0}, \quad (4.10)$$

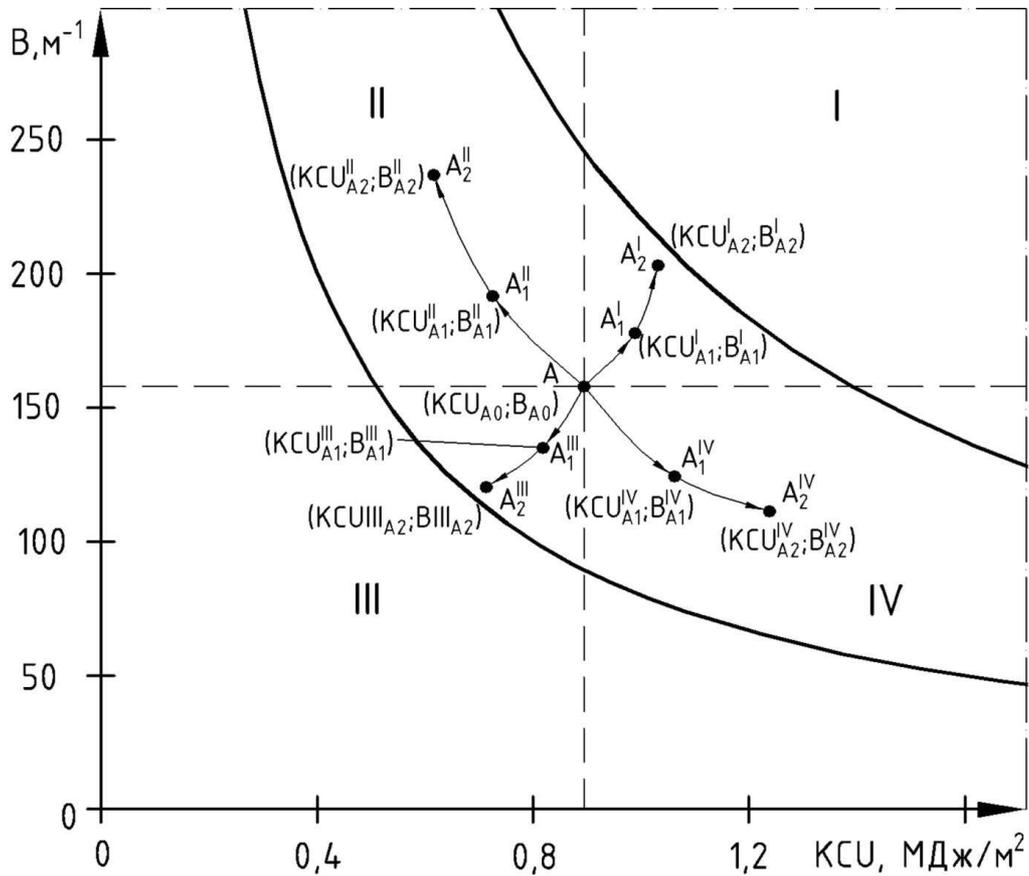
$$\begin{cases} b = B_0 - a \cdot \tau_0 \\ b = B_1 - a \cdot \tau_1 \end{cases}. \quad (4.11)$$

Средняя скорость деградации механических свойств материала на рассматриваемом отрезке эксплуатации определяется по формуле

$$V_{дег}^{cp} = \frac{\Delta B}{\Delta \tau} = \frac{B(\tau_1) - B(\tau_0)}{\tau_1 - \tau_0} = a. \quad (4.12)$$

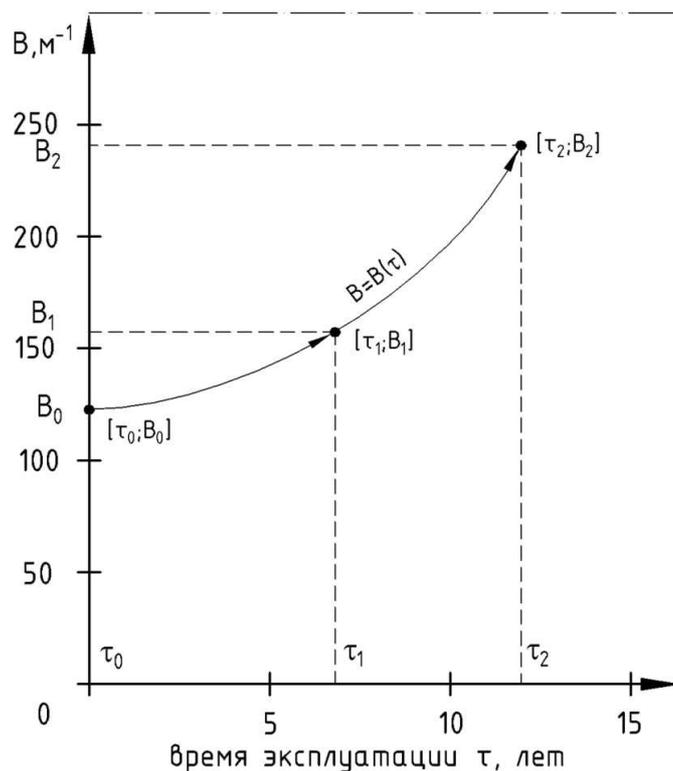
Отношение  $\Delta B/\Delta \tau$  является средней скоростью изменения функции  $B(\tau)$  на рассматриваемом интервале изменения независимой переменной (аргумента)  $\tau$ . Значение мгновенной  $V_{дег}$ , указывающей скорость изменения функции  $B(\tau)$  в узловых точках, совпадает со значением средней  $V_{дег}$ .

Рассмотрим определение  $V_{дег}$  при наличии трех измерений механических характеристик. Схема, поясняющая возможные направления деградации механических свойств материала, приведена на рисунке 4.46.



**Рисунок 4.46** – 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  $B$  ( $\text{м}^{-1}$ ) — время эксплуатации  $\tau$  (лет)» (рисунок 4.47).



**Рисунок 4.47 – Схема, поясняющая определение скорости деградации механических свойств материала (полиномиальная зависимость)**

При периодическом определении механических свойств материала получится последовательное расположение точек на графике (см. рисунок 4.47), которое описывается функцией  $B(\tau)$ , значения которой определены в узловых точках

$$B(\tau_0), B(\tau_1), B(\tau_2), \dots, B(\tau_m). \quad (4.13)$$

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.

По значениям функции  $B(\tau)$  в узловых точках находится целый многочлен  $L(\tau)$  наименьшей степени, который в заданных точках  $\tau_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, m$ ), называемых узлами интерполирования, принимает те же значения, что и функция  $B(\tau)$ . Приблизительно полагают, что для любого  $\tau$  справедлива интерполяционная формула Лагранжа [114, с. 296]:

$$B(\tau) = L(\tau). \quad (4.14)$$

Для поиска многочлена  $L(\tau)$ , удовлетворяющего условиям

$$L(\tau_i) = B(\tau_i) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, m), \quad (4.15)$$

вводим многочлены  $m$ -й степени

$$l_k(\tau) = \frac{(\tau - \tau_0) \cdot (\tau - \tau_1) \cdot \dots \cdot (\tau - \tau_{k-1}) \cdot (\tau - \tau_{k+1}) \cdot \dots \cdot (\tau - \tau_m)}{(\tau_k - \tau_0) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_{k-1}) \cdot (\tau_k - \tau_{k+1}) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_m)} \quad (4.16)$$

$(k = 0, 1, 2, \dots, m),$

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

$$L(\tau) = \sum_{k=0}^m B(\tau_k) \cdot l_k(\tau) \quad (4.17)$$

удовлетворяет всем условиям (4.15). Степень многочлена не выше  $m$ , поэтому условиями (4.15) он определяется однозначно.

Для характеристики средней скорости деградации механических свойств автором введена величина (мера), характеризующая изменение свойств материала на рассматриваемом отрезке эксплуатации:

$$V_{\text{дег}}^{\text{ср}} = \frac{1}{\tau_{\text{кон}} - \tau_{\text{нач}}} \cdot \int_{\tau_{\text{нач}}}^{\tau_{\text{кон}}} \sqrt{1 \cdot k^2 + \left( \frac{dB(\tau)}{d\tau} \right)^2} \cdot d\tau, \quad \text{м}^{-1}/\Gamma \quad (4.18)$$

где  $k$  – коэффициент ( $k = 1 \text{ м}^{-1}/\Gamma$ ), служащий для согласования размерностей, т.к. в формуле (4.18) при вычислении дифференциала длины кривой складываются величины, имеющие разную размерность.

Физический смысл формулы (4.18) в том, что она соотносит длину полиномиальной кривой (интерполяционного многочлена Лагранжа на временной оси) с отрезком времени эксплуатации и показывает, как быстро изменяется длина кривой на временной оси. Чем больше эта величина, тем через большее число состояний проходит изменение свойств материала (разные значения  $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$  и, как следствие,  $B$ ). Значение средней скорости деградации показывает среднюю скорость изменения функции  $B(\tau)$  на рассматриваемом отрезке изменения независимой переменной  $\tau$ . Из формулы (4.18) видно, что средняя скорость деградации механических свойств зависит и от самого момента времени  $\tau_{\text{нач}}$ , и от промежутка времени  $\Delta\tau$  ( $\tau_{\text{кон}} - \tau_{\text{нач}}$ ), на котором определяется.

Мгновенная<sup>2</sup> скорость деградации механических свойств материала (в любой точке  $\tau \in [0; \tau_{\text{кон}}]$ ) есть производная от интерполяционного мно-

---

<sup>2</sup> Прилагательное «мгновенная» здесь и далее относится к определенному моменту времени.

гочлена  $B(\tau)$  [ $B(\tau) = L(\tau)$ ] по времени и равна отношению дифференциала функции  $B(\tau)$  к изменению времени:

$$V_{\text{дег}}^{\text{мгн}}(\tau) = \frac{dS}{d\tau} = \frac{\sqrt{[d\tau]^2 + [dB(\tau)]^2}}{d\tau} = \frac{\left( \sqrt{1 \cdot k^2 + \left( \frac{dB(\tau)}{d\tau} \right)^2} \right) d\tau}{d\tau} =$$

$$= \sqrt{1 \cdot k^2 + \left( \frac{dB(\tau)}{d\tau} \right)^2}, \text{ м}^{-1} / \Gamma \quad (4.19)$$

где  $dS$  – дифференциал полиномиальной кривой.

Значение мгновенной указывает скорость изменения функции  $B(\tau) = L(\tau)$  в любой момент времени  $\tau$  эксплуатации оборудования при изменении независимой переменной  $\tau$ . Мгновенная скорость деградации механических свойств зависит единственно от момента времени  $\tau$ , в котором определяется производная, и выражает скорость изменения функции  $B(\tau)$  в фиксированный момент времени.

На практике (из анализа данных по различному НПО), чем выше полученное численное значение  $V_{\text{дег}}$ , тем быстрее изменяется комплекс механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$ ) материала в эксплуатации. Например, если равно 2, то вблизи от момента времени  $\tau$  комплексный показатель механических свойств  $B$  изменяется в 2 раза быстрее, чем время эксплуатации, при  $V_{\text{дег}}(\tau) = 0,2$  показатель  $B$  изменяется в 5 раз медленнее времени.

При необходимости определения отрезков времени, на которых функция  $B(\tau)$  возрастает либо убывает, достаточно определить отрезки времени, на которых производная  $dB(\tau)/d\tau$  положительна (значит  $B(\tau)$  возрастает) и на каких отрицательна (значит  $B(\tau)$  убывает). Чем больше абсолютное значение  $V_{\text{дег}}$ , тем быстрее изменяется комплексный показатель механических свойств  $B$  во времени, следовательно, тем интенсивнее изменяются свойства материала под воздействием условий эксплуатации (среда, ее температура и давление).

Апробация способа определения скорости деградации механических свойств выполнена на материале шпилек теплообменных аппаратов после эксплуатации 50 и 100 тыс. ч.

#### 4.8 Способ количественной оценки времени до достижения материалом предельного состояния

Информация о фактическом состоянии материала может быть использована для принятия решения о возможности дальнейшей безопасной эксплуатации НПО. Основным принцип мониторинга фактического состояния материала НПО заключается в:

- последовательном и систематическом определении комплекса механических свойств;
- выявлении изменений механических свойств в процессе эксплуатации и сравнении их с исходными значениями;
- прогнозировании изменения структуры и механических свойств.

Способ количественной оценки времени до достижения материалом предельного состояния справедлив для материала НПО, претерпевающего в процессе эксплуатации изменение структуры и механических свойств (естественное старение).

Механические свойства определяют либо разрушающим, либо неразрушающим способами. Количественная оценка времени до достижения механических свойств материала НПО предельных значений, при которых не обеспечивается безопасная эксплуатация НПО, проводится поэтапно. Рассмотрим этапы подробно для общего случая.

*Этап 1.*

Определение уравнений граничных линий на карте деградации. В общем случае применительно к сталям, используемым для изготовления НПО, эти граничные линии описываются уравнениями (см. рисунок 4.7):

$$\begin{cases} B_1 = \frac{A_{y1}}{KCU} = \frac{70}{KCU}, \text{ м}^{-1}; \\ B_2 = \frac{A_{y2}}{KCU} = \frac{256}{KCU}, \text{ м}^{-1}; \\ B_3 = \text{const} = 280 \text{ м}^{-1}; \\ B_4 = \text{const} = 55 \text{ м}^{-1}. \end{cases} \quad (4.20)$$

*Этап 2.*

Нахождение интерполяционного многочлена  $L(KCU)$  для зависимости  $B(KCU)$  на карте деградации (см. рисунок 4.46).

При периодическом определении механических свойств материала НПО получится последовательное расположение экспериментальных то-

чек на карте деградации, которое описывается функцией  $B(KCU)$ , значения которой определены в узловых точках

$$B(KCU_0), B(KCU_1), B(KCU_2), \dots, B(KCU_m). \quad (4.21)$$

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 [114, с. 296]

$$B(KCU) = L(KCU). \quad (4.22)$$

Для поиска многочлена  $L(KCU)$ , удовлетворяющего условиям

$$L(KCU_i) = B(KCU_i), \quad (4.23)$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots, m$ , вводим многочлены  $m$ -й степени

$$l_k(KCU) = \frac{(KCU - KCU_0) \cdot (KCU - KCU_1) \cdot \dots \cdot \times \cdot \times \dots \cdot (KCU - KCU_{k-1}) \cdot (KCU - KCU_{k+1}) \cdot \dots \times \times \dots \cdot (KCU_k - KCU_{k-1}) \cdot (KCU_k - KCU_{k+1}) \cdot \dots \times \times \dots \cdot (KCU - KCU_{k-1}) \cdot (KCU - KCU_{k+1}) \cdot \dots \cdot (KCU - KCU_m)}{(KCU_k - KCU_0) \cdot \dots \times \times \dots \cdot (KCU_k - KCU_{k-1}) \cdot (KCU_k - KCU_{k+1}) \cdot \dots \times \times \dots \cdot (KCU_k - KCU_{k-1}) \cdot (KCU_k - KCU_{k+1}) \cdot \dots \cdot (KCU_k - KCU_m)} \quad , (4.24)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots, m$ , 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

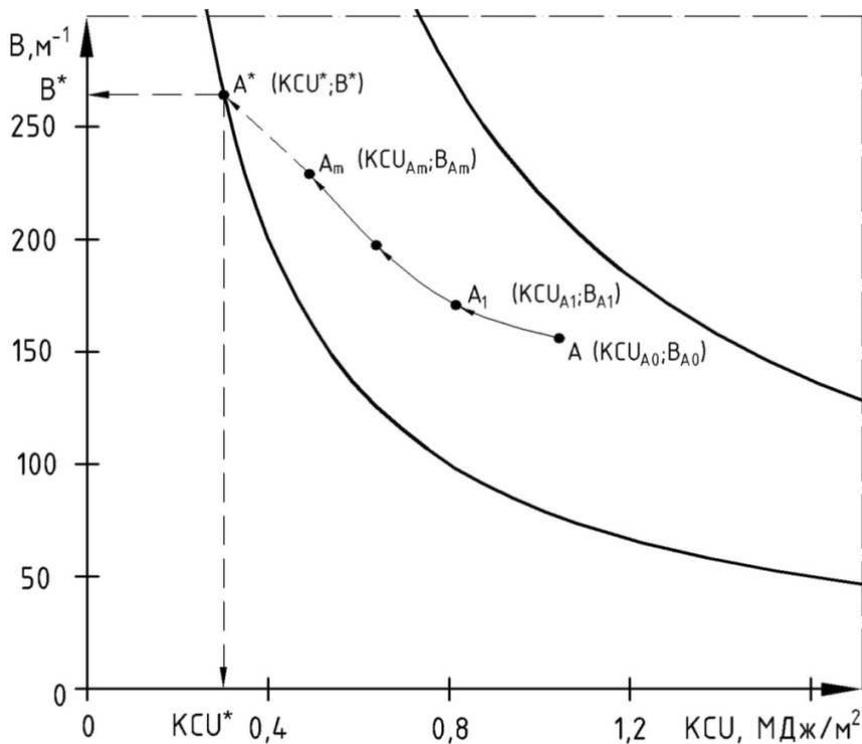
$$L(KCU) = \sum_{k=0}^m B(KCU_k) \cdot l_k(KCU) \quad (4.25)$$

удовлетворяет всем условиям (4.23). Степень многочлена не выше  $m$ , поэтому условиями (4.23) он определяется однозначно.

*Этап 3.*

Экстраполяцией интерполяционного многочлена  $L(KCU)$  находится абсцисса  $KCU^*$  его пересечения с ближайшей граничной линией (рисунок 4.48). Для этого решается система уравнений:

$$\begin{cases} L(KCU) = B_1 = \frac{A_{y1}}{KCU}; \\ L(KCU) = B_2 = \frac{A_{y2}}{KCU}; \\ L(KCU) = B_3; \\ L(KCU) = B_4. \end{cases} \quad (4.26)$$



**Рисунок 4.48** – Схема, иллюстрирующая определение  $KCU^*$  и  $B^*$

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 4.48). Для этого решается уравнение:

$$B^* = L(KCU^*). \quad (4.27)$$

Этап 5.

Построение графика в координатах «комплексный показатель механических свойств  $B$  ( $\text{м}^{-1}$ ) – время эксплуатации  $\tau$  (лет)» (см. рисунок 4.47).

Этап 6.

Нахождение интерполяционного многочлена  $L(\tau)$  для зависимости  $B(\tau)$  на графике. Вводятся многочлены  $m$ -й степени

$$l_k(\tau) = \frac{(\tau - \tau_0) \cdot (\tau - \tau_1) \cdot \dots \cdot (\tau - \tau_{k-1}) \cdot (\tau - \tau_{k+1}) \cdot \dots \cdot (\tau - \tau_m)}{(\tau_k - \tau_0) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_{k-1}) \cdot (\tau_k - \tau_{k+1}) \cdot \dots \cdot (\tau_k - \tau_m)}, \quad (4.28)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots, m$ , 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

$$L(\tau) = \sum_{k=0}^m B(\tau_k) \cdot l_k(\tau). \quad (4.29)$$

Этап 7.

Определение периода времени до достижения комплекса механических свойств материала предельного значения (рисунок 4.49). Решение уравнения  $B^* = L(\tau)$  в численном виде

$$B^* = L(\tau) \quad (4.30)$$

позволяет получить значение  $\tau$ , соответствующее искомому периоду времени.

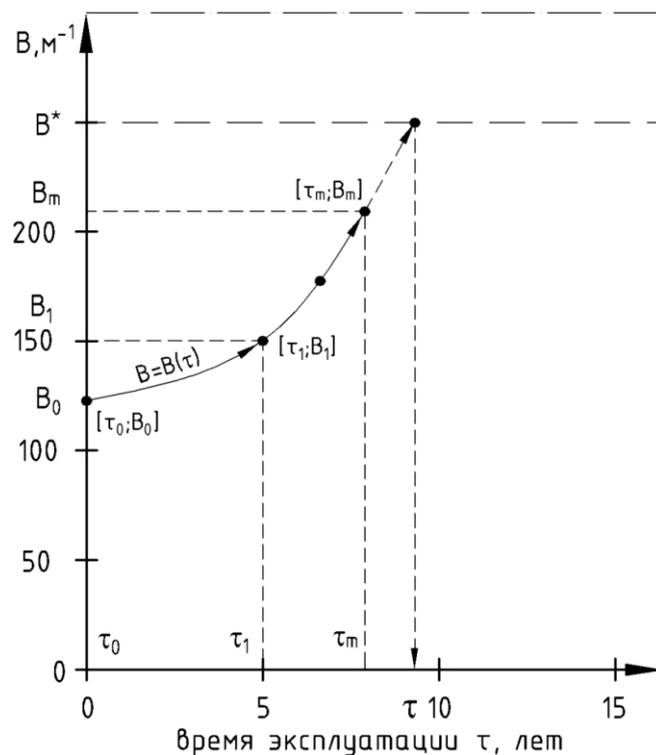


Рисунок 4.49 – Схема, иллюстрирующая определение времени до достижения комплекса механических свойств материала предельного значения

Таким образом, установлена зависимость изменения комплексного показателя механических свойств материала ( $B = n\sigma_b\delta_5/KCU$ ) от времени эксплуатации оборудования. Ресурс безопасной эксплуатации материала НПО определяется путем экстраполяции зависимости изменения комплексного показателя механических свойств материала от начала эксплуатации до предельного состояния.

#### 4.9 Выводы

1. Металлографический метод анализа позволяет оценивать степень деградации материала и даже количественное снижение механических свойств различных конструкций, в том числе НПО, без их разрушения с использованием переносных микроскопов. Однако применение металлографического анализа для оценки остаточного ресурса целесообразно только в комплексе с другими методами исследований.

2. Для оценки состояния материала предложено использовать комплексный показатель механических свойств, основанный на учете трех механических характеристик ( $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$ ), который является более эффективным критерием оценки состояния материала, чем критерий оценки по отдельным механическим характеристикам, а также критерий по деградации структуры. Деградация структуры сталей не так значительна, как изменение механических свойств, поэтому для оценки ресурса материала в первую очередь следует применять фактические значения механических свойств, а не анализ структуры.

3. Экспериментально определены граничные значения сочетания механических свойств углеродистых, низколегированных кремнемарганцевых, теплоустойчивых и коррозионностойких сталей. Для каждой группы сталей указанные границы задаются значениями удельных работ разрушения при статическом ( $A_y^{c.H.} = n\sigma_b\delta_5$ ) и динамическом ( $A_y^{d.H.} = KCU$ ) нагружениях материала или их отношением, что графически выражается областью работоспособного состояния материала, ограниченной кривыми. Если сочетание механических свойств материала находится за пределами установленных границ, то это свидетельствует о его деградации в эксплуатации и несоответствии предъявляемым к нему требованиям.

4. На основании установленных граничных значений удельных работ разрушения материала при статическом и динамическом нагружениях разработаны карты деградации механических свойств углеродистых, низколе-

гированных кремнемарганцевых, теплоустойчивых и коррозионностойких сталей, представляющие соотношение между тремя механическими характеристиками ( $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $KCU$ ) и состоянием материала. Результатом является проведение интегрированной оценки комплекса механических характеристик, наглядное представление его графически на карте деградации и определение изменений, происходящих в материале с течением времени.

5. Установлено, что значения механических характеристик сталей, принадлежащих к одному структурному классу, локализуются в характерных областях на карте деградации механических свойств. Изменения механических свойств сталей как после искусственного, так и после естественного старения четко фиксируются на карте деградации механических свойств — происходит смещение значений экспериментальных точек на карте деградации. В большинстве случаев деградация структуры, приводящая к изменению механических свойств, заключается в графитизации, сфероидизации перлита (углеродистые стали), накоплением поврежденности в виде микро- и макрорасслоений (низколегированные кремнемарганцевые стали), образования сигма-фазы (коррозионностойкие стали) или коагуляции карбидов (теплоустойчивые стали).

6. Установлена взаимосвязь между предельным состоянием теплоустойчивых сталей 15ХМ, 15Х5М, 13Х9М, 10Х12В2МФ, 10Х13М1 и размером коагулированных карбидов металлов. При размере коагулированных карбидов в структуре стали 1...4 мкм эксплуатация конструкции безопасна; 5...8 мкм – дальнейшая эксплуатация безопасна при условии удовлетворительных результатов механических испытаний и сокращении времени до проведения следующего диагностирования материала; более 9 мкм – конструкция подлежит замене. Применение экспресс-метода контроля материала, заключающегося в сравнении структуры стали со шкалой баллов коагуляции карбидов, позволяет качественно оценить состояние стали и обеспечить безопасность дальнейшей эксплуатации НПО.

7. Установлена зависимость изменения комплексного показателя механических свойств материала от времени эксплуатации оборудования. Скорость деградации комплекса механических характеристик материала имеет нелинейный характер, а ее численное значение, определенное на отрезках времени, характеризует стабильность свойств материала под воздействием на него среды, ее температуры и давления. Путем экстраполяции зависимости изменения комплексного показателя механических свойств материала от начала эксплуатации до предельного состояния прогнозируется ресурс безопасной эксплуатации диагностируемого по разработанной методике НПО.

## ГЛАВА 5 АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ В НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

### 5.1 Оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации змеевика трубчатой печи

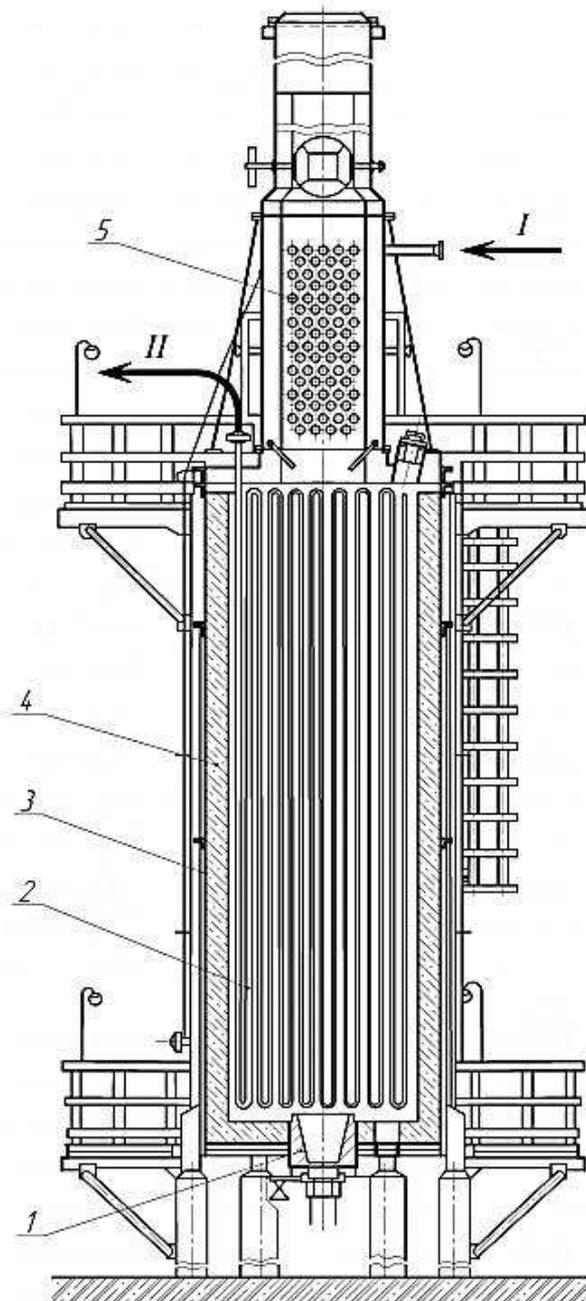
Трубчатые печи – один из основных видов оборудования технологических установок НПЗ. С позиции безопасности эксплуатации наиболее слабый элемент печей – трубчатый змеевик. Актуальной задачей является обеспечение безопасной эксплуатации трубчатого змеевика печи, т.к. при его отказе происходит остановка не только печи, но и всей технологической установки.

С целью апробации научных результатов данной работы нами была проведена оценка возможности дальнейшей безопасной эксплуатации змеевика из стали 15Х5М камеры радиации трубчатой печи.

Печь изготовлена в 1968 году. По конструкции является вертикальной цилиндрической (рисунок 5.1). Состоит из камер радиации и конвекции с расположенными в них вертикальными змеевиками. Материал змеевика камеры радиации (трубы  $\varnothing 152 \times 8$  мм, отводы  $180^\circ \varnothing 152 \times 8$  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 по разработанной методике эксплуатировалась 33 года.

Оценка состояния материала змеевика проводилась путем проведения металлографического анализа и определения его механических характеристик.

Исследование микроструктуры материала в полевых условиях проводилось переносным металлографическим микроскопом ТКМ при увеличении 500 крат. Микроструктура стали 15Х5М представлена на рисунке 5.2. Структура стали представляет собой феррит и карбиды. Средний размер карбидов составляет 2...3 мкм, что соответствует 2 баллу по разработанной шкале баллов коагуляции карбидов (см. п. 4.6). Материал трубы сохранил структуру, характерную для стали 15Х5М. Подобная структура стали обеспечивает необходимую теплоустойчивость металла трубы до максимально возможной температуры эксплуатации 600...650 °С [86, с. 280; 87, с. 253]. Поэтому по структурному критерию змеевик печи допускался к дальнейшей эксплуатации.



**1 – горелка; 2 – змеевик камеры радиации; 3 – корпус; 4 – футеровка;  
5 – змеевик камеры конвекции; I – вход среды; II – выход среды**  
**Рисунок 5.1 – Схема трубчатой печи**

Механические свойства материала змеевика определялись неразрушающим способом. Для этого на предварительно подготовленной поверхности труб змеевика переносным твердомером МІС20 определялась твердость по Виккерсу, переносным микроскопом ТКМ измерялись параметры пирамидальных отпечатков и по формулам (3.25), (3.28), (3.36) и (3.48) рассчитывались значения механических характеристик ( $\sigma_B$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ).



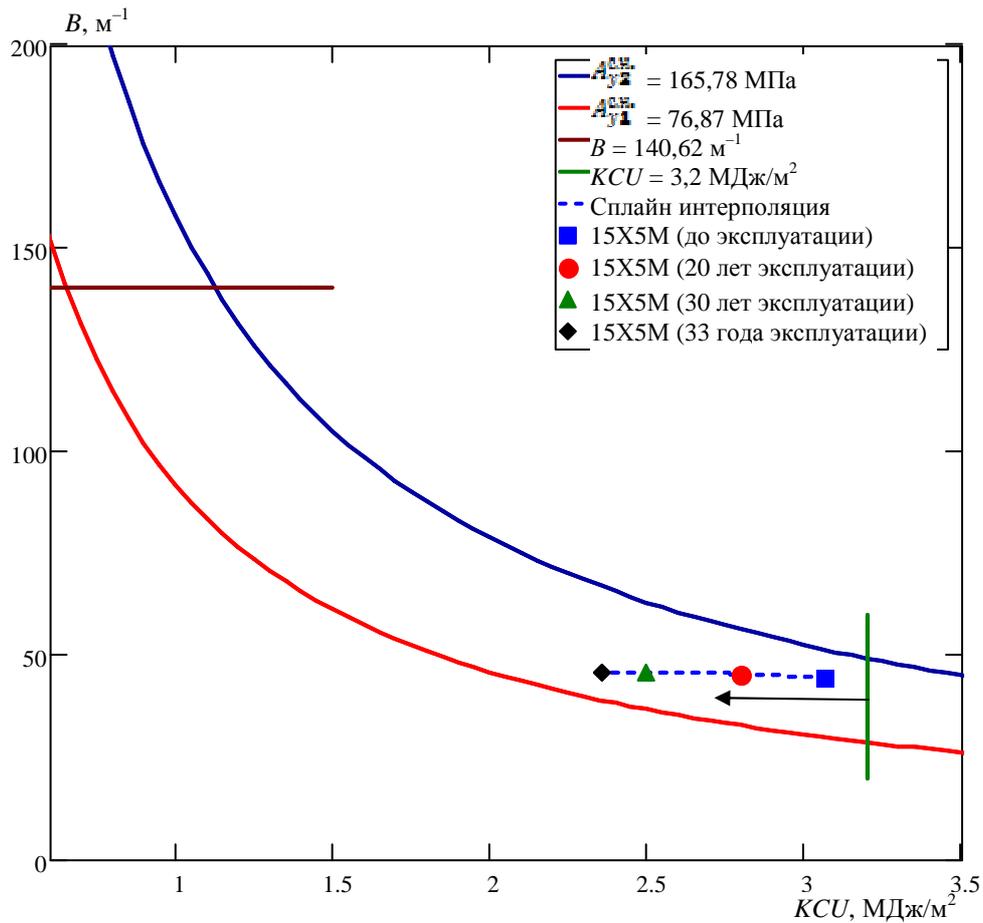
**Рисунок 5.2 – Микроструктура стали 15X5M (×500, репродукция ×3)**

Значения механических свойств стали 15X5M до эксплуатации взяты из паспорта печи. В 1993 и 2003 годах специализированными организациями была проведена оценка состояния материала змеевика печи 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 приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 — Значения механических свойств стали 15X5M в зависимости от времени эксплуатации

Время эксплуатации, лет	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	$KCU$ , МДж/м <sup>2</sup>
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 5.3).



**Рисунок 5.3 – Карта деградации механических свойств стали 15X5M**

Значения скорости деградации комплексного показателя механических свойств определены в соответствии с алгоритмом, описанным в п. 4.7. Результаты приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Значения скорости деградации комплексного показателя механических свойств стали 15X5M

Отрезок времени эксплуатации / фиксированное значение момента времени	Значение $V_{\text{дег}}$ , $\text{М}^{-1}/\text{Год}$
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 5.2 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 НПО предельного состояния (см. п. 4.8).

Уравнения граничных линий на карте деградации для стали 15X5M:

$$\begin{cases} B_1 = \frac{A_{y1}}{KCU} = \frac{76,87}{KCU}, \text{ м}^{-1}; \\ B_2 = \frac{A_{y2}}{KCU} = \frac{165,78}{KCU}, \text{ м}^{-1}; \\ B_3 = \text{const} = 140,62 \text{ м}^{-1}; \\ KCU = \text{const} = 3,2 \text{ МДж/м}^2. \end{cases}$$

Для нахождения интерполяционного многочлена  $L(KCU)$  для зависимости  $B(KCU)$  на карте деградации составлены многочлены 3-й степени:

$$\begin{aligned} l_0(KCU) &= \frac{(KCU - KCU_1) \cdot (KCU - KCU_2) \cdot (KCU - KCU_3)}{(KCU_0 - KCU_1) \cdot (KCU_0 - KCU_2) \cdot (KCU_0 - KCU_3)} = \\ &= \frac{(KCU - 2,8) \cdot (KCU - 2,5) \cdot (KCU - 2,36)}{(3,07 - 2,8) \cdot (3,07 - 2,5) \cdot (3,07 - 2,36)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_1(KCU) &= \frac{(KCU - KCU_0) \cdot (KCU - KCU_2) \cdot (KCU - KCU_3)}{(KCU_1 - KCU_0) \cdot (KCU_1 - KCU_2) \cdot (KCU_1 - KCU_3)} = \\ &= \frac{(KCU - 3,07) \cdot (KCU - 2,5) \cdot (KCU - 2,36)}{(2,8 - 3,07) \cdot (2,8 - 2,5) \cdot (2,8 - 2,36)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_2(KCU) &= \frac{(KCU - KCU_0) \cdot (KCU - KCU_1) \cdot (KCU - KCU_3)}{(KCU_2 - KCU_0) \cdot (KCU_2 - KCU_1) \cdot (KCU_2 - KCU_3)} = \\ &= \frac{(KCU - 3,07) \cdot (KCU - 2,8) \cdot (KCU - 2,36)}{(2,5 - 3,07) \cdot (2,5 - 2,8) \cdot (2,5 - 2,36)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_3(KCU) &= \frac{(KCU - KCU_0) \cdot (KCU - KCU_1) \cdot (KCU - KCU_2)}{(KCU_3 - KCU_0) \cdot (KCU_3 - KCU_1) \cdot (KCU_3 - KCU_2)} = \\ &= \frac{(KCU - 3,07) \cdot (KCU - 2,8) \cdot (KCU - 2,5)}{(2,36 - 3,07) \cdot (2,36 - 2,8) \cdot (2,36 - 2,5)}. \end{aligned}$$

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 5.4):

$$\begin{cases} L(KCU) = B_1 = \frac{A_{y1}}{KCU}; \\ -2,1085 \cdot KCU^3 + 12,2547 \cdot KCU^2 - 21,4825 \cdot KCU + 55,8591 = \frac{76,87}{KCU^*}. \end{cases}$$

$$KCU^* = 1,73 \text{ МДж} / \text{м}^2.$$

Ордината  $B^*$  точки пересечения полиномиальной линии  $B(KCU)$  с граничной линией:

$$B^* = L(KCU^*);$$

$$B^* = -2,1085 \cdot (KCU^*)^3 + 12,2547 \cdot (KCU^*)^2 - 21,4825 \cdot KCU^* + 55,8591;$$

$$B^* = 44,45 \text{ м}^{-1}.$$

График в координатах «комплексный показатель механических свойств  $B$  ( $\text{м}^{-1}$ ) — время эксплуатации  $\tau$  (лет)» приведен на рисунке 5.5.

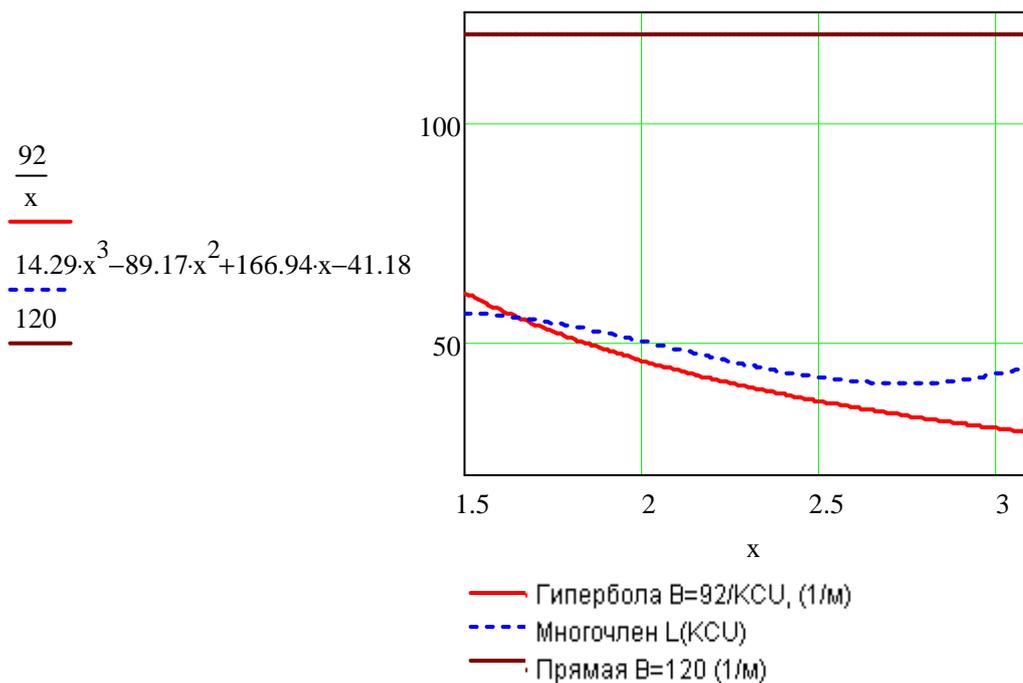
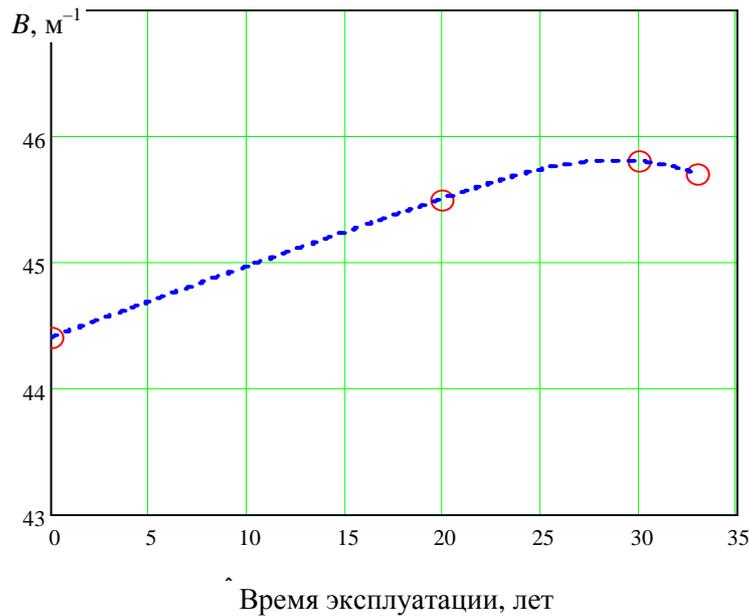


Рисунок 5.4 – Нахождение значения  $KCU^*$



**Рисунок 5.5 – Изменение показателя  $B$  от времени эксплуатации змеевика 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:

$$B^* = L(\tau);$$

$$B^* = -0,0001224 \cdot \tau^3 + 0,005285 \cdot \tau^2 - 0,00176 \cdot \tau + 44,4;$$

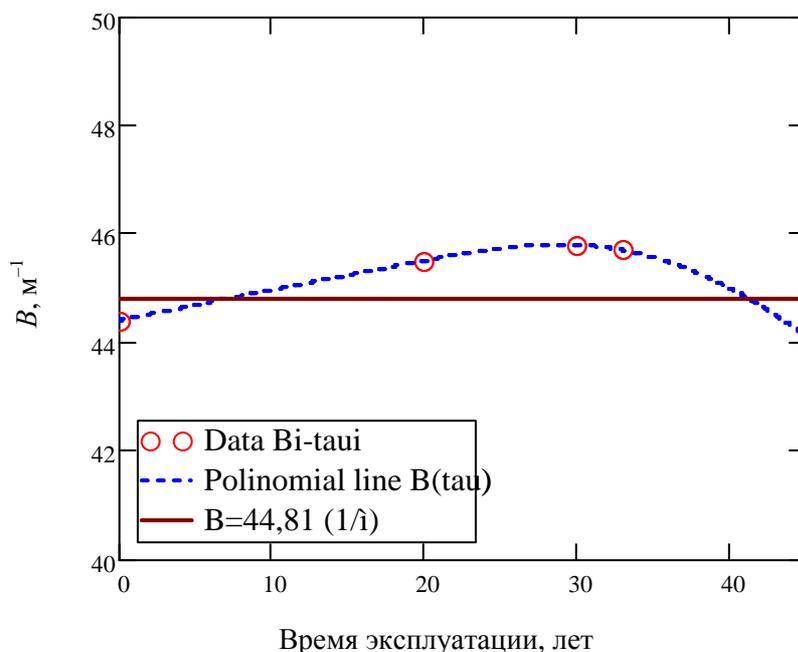
$$44,45 = -0,0001224 \cdot \tau^3 + 0,005285 \cdot \tau^2 - 0,00176 \cdot \tau + 44,4;$$

$$-0,0001224 \cdot \tau^3 + 0,005285 \cdot \tau^2 - 0,00176 \cdot \tau - 0,05 = 0;$$

$$\tau \approx 41 \text{ год.}$$

Найденное значение  $\tau$  соответствует искомому периоду времени от начала эксплуатации до достижения комплекса механических свойств материала предельного значения при сохранении существующих условий эксплуатации печи (рисунок 5.6). С учетом существующего отрезка времени эксплуатации (33 года) печного змеевика, срок его остаточной безопасной эксплуатации составляет 8 лет.

На основании полученных результатов срок безопасной эксплуатации змеевика трубчатой печи продлен на 8 лет.



**Рисунок 5.6 – Определение времени до достижения механических свойств стали 15X5M предельного значения**

## 5.2 Программный комплекс «Мониторинг»

Актуальной задачей при внедрении разработанной методики является автоматизация расчетов для оценки состояния материала НПО. Разработан программный комплекс «Мониторинг». Разработка комплекса осуществлялась в среде Microsoft Visual Studio 2005. Для написания кода программы использован язык программирования C#. Главной целью в ходе

проектирования программы было создание удобного пользовательского интерфейса и эффективного алгоритма исполнения программы.

Введена возможность ведения базы данных по диагностируемому оборудованию с сохранением значений механических свойств материала. База данных позволяет хранить данные о типе и наименовании диагностируемого объекта, значениях механических характеристик, определенных в разные отрезки времени, и отражать состояние материала НПО на карте деградации механических свойств. База данных имеет структуру, обеспечивающую максимальную скорость работы, небольшие требуемые объемы оперативной и дисковой памяти.

Программный комплекс «Мониторинг» предназначен для использования в системе диагностирования оборудования и обеспечивает максимальную автоматизацию ввода данных об объекте исследования, расчета значений механических характеристик, их анализ, формирование протокола.

Программный комплекс разработан с учетом того, что оценка состояния материала выполняется после определения механических свойств (разрушающим или неразрушающим способами). Принимая это во внимание, к исходным данным была отнесена информация о механических свойствах материала и геометрических параметрах пирамидального отпечатка, полученного при определении твердости по Виккерсу.

Программный комплекс «Мониторинг» позволяет:

- 1) проводить автоматический расчет значений механических характеристик материала (в случае их определения неразрушающим способом);
- 2) рассчитывать значение скорости деградации комплекса механических свойств материала;
- 3) проводить автоматический расчет времени до достижения материалом НПО предельного состояния (прогнозирование остаточного ресурса материала);
- 4) вести базу данных значений механических свойств материала диагностируемого НПО;
- 5) представлять информацию о состоянии материала в виде графического оконного интерфейса или протокола отчета, формируемого на принтере.

Программный комплекс «Мониторинг» экономит время специалистов благодаря сокращению времени, затрачиваемого на всех этапах диагностирования материала – от определения его механических свойств до выдачи заключения о состоянии материала.

Примеры работы программного комплекса представлены на рисунке 5.7.

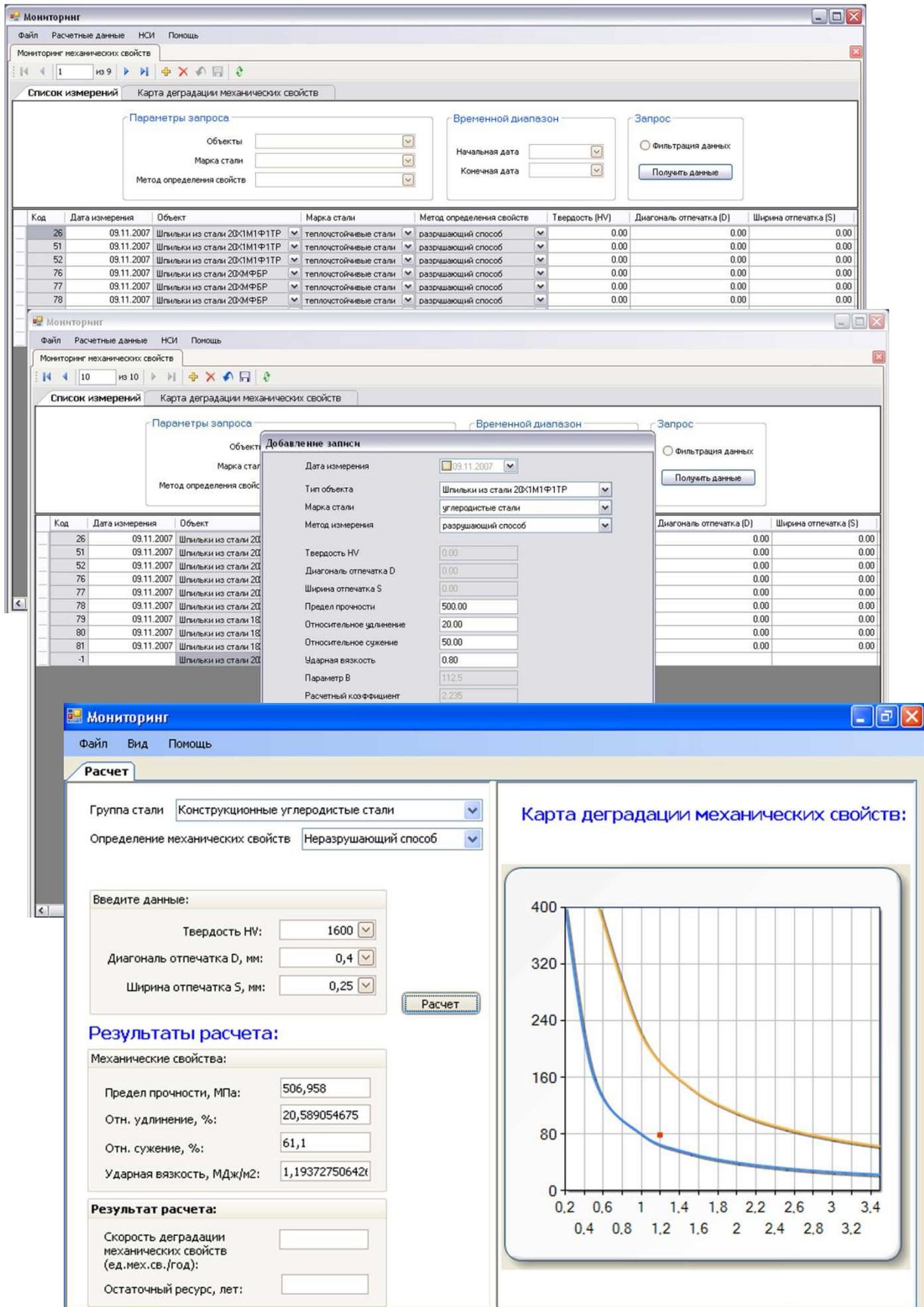


Рисунок 5.7 – Оконный интерфейс программного комплекса «Мониторинг»

### 5.3 Выводы

1. Результаты работы апробированы на технологическом оборудовании НПЗ (печи и колонны). Их применение позволило получать качественные и количественные данные о состоянии материала, достоверно определить потенциально опасные участки конструкций с позиции возможного разрушения, тем самым обеспечить дальнейшую безопасную эксплуатацию оборудования. Исследованные объекты отработали межремонтный период без аварийных остановок, что подтверждает эффективность применения результатов диссертационной работы в практике диагностирования НПО.

2. Разработанный программный комплекс «Мониторинг» позволил автоматически рассчитывать значения механических характеристик материала, строить карту деградации механических свойств, проводить оценку изменения механических характеристик, определять скорость их деградации, время до достижения материалом предельного состояния, а также вести базу данных результатов диагностирования. Программный комплекс используется в лаборатории неразрушающего контроля, испытания материалов, акустической эмиссии и технической диагностики. Его внедрение позволило повысить эффективность обследования материала НПО и оценку его состояния при проведении капитальных ремонтов технологических установок.

3. Экономический эффект от внедрения предлагаемого способа в практику диагностирования НПО обеспечивается за счет сокращения материальных и трудовых затрат на вырезку проб и изготовление образцов, а также на последующее восстановление мест вырезки проб. Социальная значимость полученных результатов заключается в обеспечении безопасной эксплуатации и безаварийного пробега технологического оборудования НПЗ, недопущении техногенных катастроф, повышении организационного уровня работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты

Решена задача научного обоснования безопасной эксплуатации НПО, выработавшего нормативный срок службы, на основании контроля деградации структуры, изменения механических свойств и прогнозирования предельного состояния материала. Решение этой задачи позволяет отказаться от преждевременной замены выработавшего проектный ресурс оборудования, полностью использовать его остаточную долговечность, исключить единовременные затраты на приобретение нового оборудования и тем самым сэкономить государственные денежные средства (за счет prolongации срока эксплуатации выработавшего ресурс оборудования и исключения расходов на амортизацию вновь приобретаемого оборудования).

Впервые установлена количественная взаимосвязь между предельным состоянием теплоустойчивых сталей 15ХМ, 15Х5М, 13Х9М, 10Х12В2МФ, 10Х13М1 и размером коагулированных карбидов металлов и выданы рекомендации по эксплуатации конструкций НПО из данных сталей (на примере змеевиков печей). При размере коагулированных карбидов в структуре стали 1...4 мкм эксплуатация конструкции безопасна; 5...8 мкм – дальнейшая эксплуатация безопасна при условии удовлетворительных результатов механических испытаний и сокращении времени до проведения следующего диагностирования материала; более 9 мкм – конструкция подлежит замене. Разработана шкала баллов коагуляции карбидов, позволяющая анализировать структуру НПО из хромомолибденовых сталей, в том числе неразрушающей полевой металлографией, и определять фактическое состояние материала.

Установлены зависимости между геометрическими параметрами пирамидального отпечатка (диагональ и ширина), полученного при определении твердости по Виккерсу (с использованием стационарных и переносных твердомеров), и механическими свойствами основных сталей, из которых изготавливается НПО: углеродистые стали (Ст3, сталь 20); низколегированные стали (16ГС, 09Г2С); теплоустойчивые стали (15Х5М); коррозионностойкие стали (08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т). Полученные зависимости обосновывают использование в качестве оценочных критериев долговечности материала значения механических характеристик ( $\sigma_b$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ), определенных неразрушающим способом, что позволяет уменьшить трудоемкость работ без значительного снижения достоверности определения механических характеристик с погрешностью результатов не более  $\pm 6\%$ .

Экспериментально определены граничные значения удельных работ разрушения материала НПО при статическом и динамическом нагружении, соответствующие работоспособному и неработоспособному состояниям основных сталей, используемых для изготовления НПО, которые поло-

жены в основу разработки карт деградации механических свойств, представляющих соотношение между механическими характеристиками ( $\sigma_B$ ,  $\delta_5$  и  $KCU$ ) и состоянием материала. Результатом является проведение интегрированной оценки комплекса механических характеристик ( $\sigma_B$ ,  $\delta_5$  и  $KCU$ ) материала диагностируемого объекта НПО, наглядное представление его графически в виде одной точки на карте деградации и определение изменений, происходящих в материале с течением времени.

Впервые установлена зависимость изменения комплексного показателя механических свойств материала ( $B = n\sigma_B\delta_5/KCU$ ) от времени эксплуатации оборудования. Установлено, что скорость деградации комплекса механических свойств материала имеет нелинейный характер, а ее численное значение, определенное на отрезках времени, характеризует стабильность свойств материала под воздействием условий эксплуатации (среда, ее температура и давление) оборудования. Установлены предельно допустимые значения комплексного показателя механических свойств. Зная скорость деградации и предельно допустимое значение комплексного показателя механических свойств материала, вычисляется ресурс его безопасной эксплуатации.

В практику диагностирования НПО внедрены: неразрушающий способ определения механических свойств материала; способ контроля деградации структуры теплоустойчивых сталей по размеру коагулированных карбидов; способ оценки изменения механических характеристик и прогнозирования предельного состояния материала на основе построения карт деградации механических свойств материала; программный комплекс «Мониторинг».

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Использование зависимостей между геометрическими параметрами отпечатка и механическими характеристиками при определении механических свойств материала НПО в качестве экспресс-метода контроля его состояния позволит проводить определение механических свойств материала неразрушающим способом в любом доступном месте диагностируемого объекта без вырезки образцов.

Применение способа контроля деградации структуры теплоустойчивых сталей по размеру коагулированных карбидов позволит качественно оценивать состояние материала различных конструкций НПО из данных сталей и обеспечить их дальнейшую безопасную эксплуатацию.

Карты деградации механических свойств материала и программный комплекс «Мониторинг» рекомендуется использовать для мониторинга изменения комплекса механических характеристик материала при эксплуатации НПО. Карты деградации рекомендуется применять в качестве приложений к паспортам ответственных деталей и оборудования и заносить в них результаты определения механических свойств (соответствующие началу эксплуатации и во время проведения каждого капитального ремонта).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

---

1. Корольков, Д. И. Проблемы оценки остаточного ресурса оборудования в Республике Беларусь / Д. И. Корольков // Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением : материалы совещ. – Новополоцк : ПГУ, 1997. – С. 5–7.
2. Особенности диагностирования объектов повышенной опасности нефтехимического комплекса / В. И. Быкова [и др.] // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. / Под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя – Минск : Технопринт, ПГУ, 2001. – С. 591–593.
3. Владимирский, Т. А. Хрупкость сталей / Т. А. Владимирский. – М. : Машиностроение, 1959. – 214 с.
4. Дроздовский, Б. А. Влияние трещин на механические свойства конструкционных сталей / Б. А. Дроздовский, Я. Б. Фридман. – М. : Metallurgizdat, 1960. – 260 с.
5. Карпенко, Г. В. Прочность стали в коррозионной среде / Г. В. Карпенко. – Харьков : Госгортехиздат, 1963. – 188 с.
6. Касаткин, Б. С. Структура и микромеханизм хрупкого разрушения стали / Б. С. Касаткин. – Киев : Техніка, 1964. – 264 с.
7. Криштал, М. А. Ползучесть и разрушение сплавов / М. А. Криштал, И. Л. Миркин. – М. : Metallurgiya, 1966. – 192 с.
8. Потак, Я. М. Хрупкие разрушения стали и стальных деталей / Я. М. Потак. – М. : Оборонгиз, 1955. – 390 с.
9. Пью, Х. Л. Механические свойства материалов под высоким давлением / Х. Л. Пью. – М. : Мир, 1973. – 294 с.
10. Станюкович, А. В. Хрупкость и пластичность жаропрочных материалов / А. В. Станюкович. – М. : Мир, 1967. – 200 с.
11. Горицкий, В. М. Диагностика металлов / В. М. Горицкий. – М. : Metallurgizdat, 2004. – 408 с.
12. Cheremisinoff, N. P. Material selection deskbook / N. P. Cheremisinoff. – New Jersey : Noyes Publications, 1996 – 192 p.
13. Общие правила взрывобезопасности химических производств и объектов. – Минск : Белорусская академия наук безопасности жизнедеятельности, 1996. – 80 с.
14. Правила безопасности при эксплуатации нефтегазоперерабатывающих заводов (ПБНПП-96). – Минск : Белорусская академия наук безопасности жизнедеятельности, 1997. – 203 с.
15. Методические указания по техническому диагностированию и продлению срока службы сосудов, работающих под давлением. РД 34.17.439–96. – М. : РАО «ЕЭС России», 1996. – 56 с.

- 
16. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – Минск : «Инженерный центр» «БОИМ», 2006. – 194 с.
17. Пантелеенко, Ф. И. Из опыта диагностики трубопроводов в теплоэнергетике / Ф. И. Пантелеенко, А. С. Котенок, В. А. Прикацин // Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением : материалы совещ. – Новополоцк, 1997. – С. 85–87.
18. Неразрушающий контроль и диагностика : справ. / В. В. Клюев [и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2002. – 488 с.
19. Неразрушающие методы контроля. Спецификатор различий в национальных стандартах разных стран : в 3 т. – Т. 1. / В. Е. Белый [и др.] ; под ред. В. Я. Кершенбаума. – М. : Наука и техника, 1992. – 236 с.
20. Неразрушающие методы контроля. Спецификатор различий в национальных стандартах разных стран : в 3 т. – Т. 2. / А. Д. Дегтерев [и др.] ; под ред. Н. А. Пугина. – М. : Наука и техника, 1993. – 160 с.
21. Неразрушающие методы контроля. Спецификатор различий в национальных стандартах разных стран : в 3 т. – Т. 3. / И. Н. Ермолов [и др.] ; под ред. В. Я. Кершенбаума. – М.: Наука и техника, 1995. – 245 с.
22. Грешников, В. А. Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий / В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
23. Иванов, В. И. Акустикоэмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В. И. Иванов, В. М. Белов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
24. Дробот, Ю. Б. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом / Ю. Б. Дробот, А. М. Лазарев. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 128 с.
25. Вашуль, Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов / Х. Вашуль. – М. : Металлургия, 1988. – 320 с.
26. Варовин, А. Я. Проблемы прогнозирования работоспособности конструкций по данным НК / А. Я. Варовин, Ю. Я. Карзов, Б. З. Марголин // В мире неразрушающего контроля. – 2006. – № 4 (34). – С. 6–11.
27. Бондаренко, В. А. Использование нестандартных методов для контроля механических свойств углеродистой стали / В.А. Бондаренко, Р. Г. Айсин, В. В. Третьяков // Заводская лаборатория. – 1974. – № 5 (Т. 40). – С. 601–603.
28. Методика оценки остаточного ресурса технологических трубопроводов. – Волгоград : АООТ «ВНИКТИнефтехимоборудование», 1996 – 25 с.
29. Методика определения остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств (МООР–98). – Волгоград : АООТ «ВНИКТИнефтехимоборудование», 1998. – 43 с.

---

30. Методика оценки ресурса остаточной работоспособности технологического оборудования нефтеперерабатывающих и химических производств. – Волгоград : АООТ «ВНИКТИнефтехимоборудование», 1991. – 51 с.

31. Чувильдеев, В. Н. Новая методика оценки эксплуатационного состояния и остаточного ресурса / В. Н. Чувильдеев // Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением : материалы совещ. – Новополоцк, 1997. – С. 20–26.

32. Опыт применения методики релаксационных испытаний при обследовании металлических конструкций грузоподъемных кранов / В. Н. Чувильдеев [и др.] // Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением : материалы совещ. – Новополоцк, 1997. – С. 31–36.

33. Горицкий, В. М. Учет охрупчивания конструкционных материалов в процессе эксплуатации и дефектности при определении остаточного ресурса ответственного оборудования / В. М. Горицкий // Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением : материалы совещ. – Новополоцк, 1997. – С. 27–30.

34. Горицкий, В. М. Характеристики трещиностойкости сталей и техническое диагностирование / В. М. Горицкий // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. / Под ред. С. А. Астапчика, П. А. Витязя – Минск : Технопринт, ПГУ, 2001. – С. 47–52.

35. Инструкция по обследованию шаровых резервуаров и газгольдеров для хранения сжиженных газов под давлением. РД 03-380-00. – М. : РАО «ЕЭС России», 2000 – 42 с.

36. Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов. РД 30-410-01. – М. : РАО «ЕЭС России», 2001 – 38 с.

37. Березина, Т. Г. Оценка ресурса деталей энергооборудования, работающих в условиях ползучести с учетом структурного фактора / Т. Г. Березина, М. И. Шкляров, Ю. Ю. Штромберг // Теплоэнергетика. – 1992. – № 2. – С. 2–5.

38. Хромченко, Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов / Ф. А. Хромченко. – М. : Машиностроение, 2002. – 352 с.

39. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного ресурса службы сосудов и аппаратов. РД 03-421-01. – СПб. : ЦОТПБСП, 2003. – 136 с.

40. Маковский, А. М. Определение расчетных сроков службы кранов и крановых механизмов / А. М. Маковский // Безопасность труда в промышленности. – 1993. – № 9. – С. 46.

41. Казак, С. А. Остаточный усталостный ресурс элементов грузоподъемных кранов / С. А. Казак, В. Е. Дусье, Л. В. Стоцкая // Безопасность труда в промышленности. – 1997. – № 10. – С. 17–18.

- 
42. Гофман, Ю. М. Оценка работоспособности металла энергооборудования ТЭС / Ю. М. Гофман. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 136 с.
43. Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации. ОСТ 34-70-690-96. – М. : ВТИ, 1997. – 44 с.
44. Rudzinskas, V. Dynamics of properties and structure changes of pearlite steel during long-lived operation / V. Rudzinskas, A. V. Valiulis, O. Černašėjus, N. Višniakov // Materials Science (Medžiagotyra). – Vol. 9, No. 2. 2003. – P. 164–168.
45. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов : в 2 ч. / Я. Б. Фридман. – Ч. 1. – М. : Машиностроение, 1974. – 472 с.
46. Геллер, Ю. А. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. – М. : Металлургия, 1989. – 456 с.
47. Григорович, В. К. Твердость и микротвердость металлов / В. К. Григорович. – М. : Наука, 1976. – 230 с.
48. Дрозд, М. С. Определение механических свойств металла без разрушения / М. С. Дрозд. – М. : Металлургия, 1965. – 171 с.
49. Марковец, М. П. Определение механических свойств металла по твердости / М. П. Марковец. – М. : Машиностроение, 1979. – 191 с.
50. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
51. Рудницкий, В. А. Метод динамического индентирования металла / В. А. Рудницкий, А. В. Рабцевич, А. Л. Мелешко // Промышленная безопасность. – 2000. – № 6. – С. 17–19.
52. Матюнин, В. М. Обзор переносных твердомеров и методов измерения твердости металла промышленного оборудования / В. М. Матюнин, В. Г. Борисов, Б. А. Юзиков // Методы и технические средства оперативной оценки структурно-механического состояния металла элементов конструкций и машин : сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – М. : МЭИ (ТУ), 2002. – С. 272–337.
53. Металлы. Метод испытаний. Измерение твердости по Бринеллю : ГОСТ 9012. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 23 с.
54. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу. Шкалы А, В и С : ГОСТ 9013. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 7 с.
55. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости методом упругого отскока бойка (по Шору) : ГОСТ 23273. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 4 с.
56. Циммерман, Р. Металлургия и материаловедение / Р. Циммерман, К. Гюнтер. – М. : Металлургия, 1982. – 479 с.
57. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу : ГОСТ 2999. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 29 с.

---

58. Беленький, Д. М. Исследование связи твердости с механическими свойствами / Д. М. Беленький, А. В. Русаков, А. И. Элькин // Проблемы прочности. – 1976. – № 10. – С. 49–52.

59. Raabe, D. Computational material science. The simulation of materials microstructures and properties / D. Raabe. – New York : Wiley-VCH, 1998.

60. Киселев, Ю. А. Анализ диаграмм твердости при вдавливании пирамидального индентора и определение равномерного сужения по отпечатку / Ю. А. Киселев // Заводская лаборатория. – 1971. – № 3 (Т. 37). – С. 356–358.

61. Марковец, М. П. Диаграммы напряжений при упругом и упругопластическом контакте шара и плоскости / М. П. Марковец, В. И. Пашнина // Проблемы прочности. – 1972. – № 11. – С. 71–73.

62. Марковец, М. П. Новый способ определения поперечного сужения металлических материалов / М. П. Марковец, Ф. И. Измаилов // Заводская лаборатория. – 1971. – № 9 (Т. 37). – С. 1135–1138.

63. Марковец, М. П. Определение относительного удлинения в области равномерной деформации стали по характеристикам твердости / М. П. Марковец, В. М. Матюнин // Заводская лаборатория. – 1984. – № 10 (Т. 50). – С. 60–62.

64. Хлопотов, О. Д. О возможности существования взаимосвязей механических характеристик / О. Д. Хлопотов // Заводская лаборатория. – 1973. – № 6 (Т. 39). – С. 740–741.

65. Гусак, А. А. Высшая математика : в 2 т. / А. А. Гусак. – Т. 2. – Минск : ТетраСистемс, 2001. – 448 с.

66. Новик, Ф. С. О корреляционных связях между свойствами некоторых жаропрочных сплавов / Ф. С. Новик, А. А. Клыпин // Заводская лаборатория. – 1972. – № 9 (Т. 38). – С. 84–89.

67. Григорович, В. К. Оценка способности металлов к наклепу по форме отпечатков, полученных при измерении их твердости пирамидальным наконечником / В. К. Григорович // Заводская лаборатория. – 1950. – № 8 (Т. 16). – С. 980–983.

68. Киселев, Ю. А. Механизм образования формы отпечатка при вдавливании пирамиды / Ю. А. Киселев, В. А. Ильин // Заводская лаборатория. – 1970. – № 10 (Т. 36). – С. 1259–1261.

69. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1978. – 648 с.

70. Марковец, М. П. Методика определения максимальной твердости аустенитных сталей / М. П. Марковец, В. П. Плотников // Заводская лаборатория. – 1975. – № 10 (Т. 41). – С. 1267–1268.

71. Гребенюк, Я. Ф. Определение предела прочности аустенитной стали 0X18H12T методом твердости / Я. Ф. Гребенюк, Т. В. Сологуб // Заводская лаборатория. – 1975. – № 2 (Т. 41). – С. 232–234.

---

72. Березина, Т. Г. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок / Т. Г. Березина, Н. В. Бугай, И. И. Трунин. – Киев : «Тэхника», 1991. – 120 с.

73. Склюев, П. В. Эмпирические формулы для определения механических свойств конструкционных сталей / П. В. Склюев // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1965. – № 12. – С. 40–41.

74. Киселев, Ю. А. Зависимость между твердостью по Виккерсу и пределом прочности при разрыве / Ю. А. Киселев // *Заводская лаборатория.* – 1968. – № 5 (Т. 34). – С. 596–597.

75. Геллер, А. Л. О возможности оценки качества металлургической продукции с помощью чисел твердости / А. Л. Геллер // *Заводская лаборатория.* – 1970. – № 12 (Т. 36). – С. 1514.

76. Бойцов, Б. В. Статистическое исследование механических характеристик титанового сплава ВТ-22 / Б. В. Бойцов, Г. Н. Кравченко, Т. М. Орлова // *Заводская лаборатория.* – 1981. – № 3 (Т. 47). – С. 71–73.

77. Головачев, М. Г. К определению зависимостей между твердостью и характеристиками прочности алюминиевых сплавов / М. Г. Головачев, О. А. Голосов // *Заводская лаборатория.* – 1991. – № 4 (Т. 57). – С. 67–68.

78. Дрозд, М. С. О выборе угла конуса при контроле механических свойств стали по твердости / М. С. Дрозд, Ю. И. Славский // *Заводская лаборатория.* – 1970. – № 1 (Т. 36). – С. 80–84.

79. Славский, Ю. И. Твердость стали как функция ее прочностного и структурного состояния / Ю. И. Славский, Ю. Г. Артемьев // *Заводская лаборатория.* – 1989. – № 8 (Т. 55). – С. 88–91.

80. Головачев, М. Г. К определению зависимостей между твердостью и характеристиками прочности алюминиевых сплавов / М. Г. Головачев, О. А. Голосов // *Заводская лаборатория.* – 1991. – № 4 (Т. 57). – С. 67–68.

81. Киселев, Ю. А. Исследование связи между характеристиками пластичности и формой отпечатка по Виккерсу / Ю. А. Киселев // *Заводская лаборатория.* – 1969. – № 8 (Т. 35). – С. 974–976.

82. 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. – № 2 (Т. 38). – С. 217–221.

83. Хлопотов, О. Д. Связь между ударной вязкостью и другими механическими характеристиками / О. Д. Хлопотов // *Проблемы прочности.* – 1971. – № 9. – С. 34–38.

84. Снарский, А. С. Создание боросодержащего материала для металлорежущих инструментов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / А. С. Снарский ; Бел. гос. политехн. академия – Минск, 1988. – 18 с.

- 
85. Сосновский, Л. А. О взаимосвязи между основными характеристиками механических свойств стали / Л. А. Сосновский // Заводская лаборатория. – 1991. – № 6 (Т. 57). – С. 44–45.
86. Стали и сплавы. Марочник / В. Г. Сорокин [и др.] ; науч. ред. В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева – М. : Интермет Инжиниринг, 2003. – 608 с.
87. Марочник сталей и сплавов / М. М. Колосков [и др.] ; под общ. ред. А. С. Зубченко – М. : Машиностроение, 2001. – 672 с.
88. Дьяков, В. Г. Легированные стали для нефтехимического оборудования / В. Г. Дьяков. – М. : Машиностроение, 1971. – 183 с.
89. Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний : ГОСТ 7564. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997 – 15 с.
90. Металлы. Методы испытаний на растяжение : ГОСТ 1497. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 37 с.
91. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах : ГОСТ 9454. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 15 с.
92. Разработка теоретических и технологических основ оценки механических свойств материалов малоразрушающим способом : отчет о НИР (заключ.) / Полоц. гос. ун-т ; рук. Ф. И. Пантелеенко. – Новополоцк, 2005. – 174 с. – ГПОФИ «Диагностика» задание № 24.
93. Дьяконов, В. П. Mathcad 2001 : спец. справ. / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2002. – 832 с.
94. Основные методы статистического анализа. Многомерный статистический анализ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.yartel.ru/stat/vzaim2.html>. – Дата доступа: 05.10.2007.
95. Айвазян, С. А. Статистическое исследование зависимостей / С. А. Айвазян. – М.: Металлургия, 1968. – 228 с.
96. Григорович, В. К. Интерференционное исследование топографии наращиваний вокруг отпечатков, получаемых при испытании на твердость пирамидальным наконечником / В. К. Григорович // Заводская лаборатория. – 1951. – № 2 (Т. 17). – С. 196–202.
97. Электронный учебник StatSoft. Таблицы распределений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>. – Дата доступа: 05.10.2007.
98. Новик, Ф. С. О корреляционных связях между свойствами некоторых жаропрочных сплавов / Ф. С. Новик, А. А. Клыпин // Заводская лаборатория. – 1972. – № 9 (Т. 38). – С. 84–89.
99. Маневич, Ш. С. Корреляция между ударной вязкостью и поперечным сужением / Ш. С. Маневич // Заводская лаборатория. – 1947. – № 4 (Т. 13). – С. 479–481.
100. Материаловедение / Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М. : Машиностроение, 1986. – 384 с.

---

101. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : ГОСТ 25.506. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.

102. Использование методики релаксационных испытаний для оценки состояния сталей транспортных трубопроводов / В. Н. Чувильдеев [и др.] // Проблемы безопасности и надежности трубопроводного транспорта : тез. докл. науч.-техн. конф. – Новополюцк : ПГУ, 1999. – С. 67–69.

103. Трубы металлические и соединительные части к ним. Часть 1. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 376 с.

104. 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.

105. Щербак, Г. К. Взаимосвязь характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости конструкционных сталей / Г. К. Щербак // Заводская лаборатория. – 1992. – № 10 (Т. 58). – С. 45–46.

106. Щербак, Г. К. Приближенная количественная зависимость механических свойств конструкционной стали / Г. К. Щербак // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1965. – № 11. – С. 27–28.

107. Щербак, Г. К. О прогнозировании количественных характеристик пластичности и ударной вязкости при заданной прочности стали / Г. К. Щербак // Заводская лаборатория. – 1996. – № 4 (Т. 62). – С. 60–61.

108. Ульянин, Е. А. Коррозионностойкие стали и сплавы / Е. А. Ульянин. – М. : Metallurgy, 1991. – 256 с.

109. ASME Boiler And Pressure Vessel Code An International Code. Section II. Part A. Ferrous Material Specifications. – New York: ASME, 2002. – 1475 p.

110. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королюк [и др.]. – М. : Наука, 1985. – 640 с.

111. Назарова, М. Н. Исследование механизмов релаксации внутренних напряжений в стенке резервуара и их влияние на развитие процессов разрушения : автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. Н. Назарова ; Уфим. технолог. ун-т. – Уфа, 2000. – 24 с.

112. Ентус, Н. Р. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / Н. Р. Ентус, В. В. Шарихин. – М. : Химия, 1987. – 304 с.

113. Hill, T. Heater Tube Life Management / T. Hill // National Petroleum Refiners Association Plant Maintenance Conference 22–25 May 2000 / ERA Technology. – Houston, 2000. – P. 30–49.

114. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : в 3 т. / Г. М. Фихтенгольц. – Т. 1. – М. : Физматлит, Лаборатория Знаний, 2003. – 680 с.

*Научное издание*

ИВАНОВ Владимир Петрович  
КРЫЛЕНКО Александр Владимирович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ  
ОБОРУДОВАНИЯ  
НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Редактор *И. Н. Безборцая*  
Дизайн обложки *Е. Н. Бурцевой*

---

Подписано в печать 25.02.15. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 10,44. Уч.-изд. л. 10,25. Тираж 100 экз. Заказ 199.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.