ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Российский государственный концерн по производству электрической
и тепловой энергии на атомных станциях»
(ФГУП КОНЦЕРН «РОСЭНЕРГОАТОМ»)

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости

РД ЭО 0027-2005

gost.e-ecolog.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Российский государственный концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях»
(ФГУП КОНЦЕРН «РОСЭНЕРГОАТОМ»)

ОДОБРЕНО

Начальник управления по регулированию безопасности атомных станций Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору

_____ М.И. Мирошниченко

«___»_____2005г.

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор концерна «Росэнергоатом»

_____ Н.М. Сорокин

«_____» _____ 2005 г.

ЛИСТ УТВЕРЖДЕНИЯ

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости

РД ЭО 0027-2005

СОГЛАСОВАНО

Первый заместитель технического директора концерна «Росэнергоатом»	Ю.В. Копьев
Руководитель дирекции материаловедения концерна «Росэнергоатом»	В.Н. Ловчев
Заместитель руководителя дирекции материаловедения концерна «Росэнергоатом»	Д.Ф. Гуцев

ИСПОЛНИТЕЛИ

Первый заместитель Генерального директора ОАО «ВНИИАЭС»	Л.М. Воронин
Начальник отдела стандартизации	В.М. Симин
Начальник Центра материаловедения и ресурса	М.Б. Бакиров
Заместитель начальника Центра материаловедения и ресурса	В.В. Потапов
Ст. н.с. Центра материаловедения и ресурса	И.В. Фролов
Инженер Центра материаловедения и ресурса	Д.А. Николаев

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Открытым акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанции» (ОАО ВНИИАЭС).

2 ВНЕСЕН Дирекцией материаловедения концерна «Росэнергоатом»

3 ПРИНЯТ И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом концерна «Росэнергоатом» от 19.09.2006 № 878

4 ВЗАМЕН РД ЭО 0027-94

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 2
3 Обозначения и сокращения 3
4 Общие положения. 4
5 Порядок подготовки к проведению контроля 5
5.1 Общие требования к приборным средствам 5
5.2 Требования, предъявляемые к качеству испытуемой поверхности 5
6 Порядок проведения контроля 8
6.1 Общие требования при работе с приборами статического действия 8
6.2 Общие требования при работе с приборами динамического действия . 11
6.3 Общие требования при работе с приборами кинетического действия .. 12
7 Правила обработки результатов измерений 14
7.1 Вычисление значения твердости и оценка погрешности 14
7.2 Взаимосвязь значений твердости, определяемых различными ..... методами 14
7.3 Определение характеристик механических свойств металла оборудования и трубопроводов АЭС по результатам испытаний на твердость ... 16
8 Правила оформления результатов измерений 19
Приложение А (справочное) Классификация методов испытания на твердость 20
Приложение Б (справочное) Сравнительная характеристика приборов ... для измерения твердости и рекомендации для использования при контроле на АЭС 21
Приложение В (справочное) ..... Обзор нестандартных методов определения твердости 23
Приложение Г (рекомендуемое) Методики определения механических свойств по диаграмме автоматического вдавливания шара 29
Библиография 47

Введение

В настоящей инструкции по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости сделаны следующие дополнения и изменения по сравнению с РД ЭО 0027-94:

- отражены новые методы измерения твердости, широко применяемые на практике, но не описанные стандартами,
- дано соответствие отечественных и зарубежных стандартов определения твердости,
- перечислены новые отечественные приборы определения твердости и их зарубежные аналоги,
- приведена взаимосвязь значений твердости, определяемых различными методами,
- расширена область применения инструкции на материалы оборудования и трубопроводов при эксплуатации АЭС,
- даны уточненные корреляционные соотношения определения механических свойств материалов по твердости, полученные в результате испытаний образцов после различных сроков эксплуатации,
- дано описание основных опубликованных и применяемых на практике методик определения механических свойств методом автоматического вдавливания шара, а также приборов, реализующих эти методы и зарегистрированных в Государственном реестре средств измерений Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости

Дата введения 2005 -

1 Область применения

1.1 Настоящая инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости инструкция устанавливает основные положения определения кратковременных механических свойств по характеристикам твердости и требования к проведению контроля методами твердости основного металла и сварных швов оборудования и трубопроводов АЭС при эксплуатации.

1.2 Настоящая инструкция распространяется на материалы оборудования и трубопроводов АЭС из сталей (в соответствии с классификацией ПНАЭ Г-7-002-86):

а) перлитного класса:

- углеродистых: Ст3сп5, 10, 15, 20, 20К, 22К, 15Л, 20Л, 25Л;
- легированных: 16ГНМА, 16ГНМ, 10ХСНД, 12МХ, 12ХМ, 15ХМ, 20ХМ, 20ХМА, 10Х2М, 10ХН1М, 10ГН2МФА;
- легированных хромомолибденованадиевых: 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 12Х2МФА, 15Х2МФА, 15Х2МФА-А, 18Х2МФА, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А, 15Х3НМФА, 15Х3НМФА-А, 36Х2Н2МФА, 38ХН3МФА;
- легированных кремнемарганцовистых: 15ГС, 16ГС;

б) аустенитного класса

- высоколегированных хромоникелевых коррозионо-стойких: 08Х18Н9, 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х18Н10, 12Х18Н9Т, 06Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 08Х18Н10Т-ВД, 08Х18Н10ТЛ, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 12Х18Н12Т, 08Х16Н11М3, 10Х18Н9ТЛ, 08Х18Н12ТФ, 12Х18Н9ТЛ;

на сплавы БрАЖМц 10-3-1,5 и ХН35ВТЮ-ВД, а также на материалы сварных швов, выполненных согласно действующих норм ПНАЭ Г-7-009-89.

1.3 Контроль кратковременных механических свойств в соответствии с настоящей инструкцией производится в случаях, описанных в ПНАЭ Г-7-008-89 и в ПНАЭ Г-7-002-86.

2 Нормативные ссылки

В настоящем документе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение

ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики

ГОСТ 2999-75 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу

ГОСТ 3722-81 Подшипники качения. Шарики. Технические условия

ГОСТ 6996-66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств

ГОСТ 9012-59 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю

ГОСТ 9013-59 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу

ГОСТ 9031-75 Меры твердости образцовые. Технические условия

ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников

ГОСТ 18661-73 Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка

ГОСТ 18835-73 Металлы. Метод измерения пластической твердости

ГОСТ 22761-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия

ГОСТ 22762-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара

ГОСТ 22975-78 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу)

ГОСТ 23273-78 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости методом упругого отскока бойка (по Шору)

ГОСТ 23677-79 Твердомеры для металлов. Общие технические требования

ГОСТ 30415-96 Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом

ГОСТ 8.207-76 Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений

ГОСТ 8.398-80 Приборы для измерения твердости металлов и сплавов. Методы и средства поверки

ГОСТ Р 8.563-96 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений

ПН АЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

ПН АЭ Г-7-008-89 Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок

ПН АЭ Г-7-009-89 Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения

3 Обозначения и сокращения

D - диаметр шарового индентора

α - угол при вершине конического или пирамидального индентора

d - диаметр отпечатка

P – сила, приложенная к индентору

t – время выдержки под нагрузкой

h –глубина вдавливания индентора

$R_{p0,2}$ - предел текучести материала при растяжении

R_m - временное сопротивление материала при растяжении

A_5 – относительное удлинение пятикратного образца после разрыва

Z – относительное сужение поперечного сечения после разрыва

$H_{0,2}$ - твердость на пределе текучести

HB -твердость по Бринеллю

HV - твердость по Виккерсу

HV_c - твердость определенная при испытании методом ударного отпечатка при испытании коническим индентором

HB_c- твердость определенная при испытании методом ударного отпечатка при испытании шаровым индентором

HRA - твердость по Роквеллу по шкале А

HRB - твердость по Роквеллу по шкале В

HRC - твердость по Роквеллу по шкале С

HS - твердость по Шору

HSD - твердость по Шору по шкале D

НД – пластическая твердость

HU – универсальная твердость

HL - твердость по Леебу

4 Общие положения

4.1 По способу получения результата методы определения твердости подразделяются на прямые и косвенные [1].

В прямых методах значение твердости находится непосредственно из результата испытания (обычно, на основании соотношения приложенной к индентору нагрузки и геометрических параметров отпечатка). Все прямые методы стандартизированы. К ним относятся методы Бринелля, Виккерса, Роквелла, Шора.

К косвенным методам относятся не стандартизированные методы определения твердости: акустико-импедансный, немеханические методы.

Косвенные методы определения твердости применяются дополнительно к прямым для повышения статистической достоверности результатов либо для упрощения процедуры контроля в случаях, когда применение прямых методов затруднено или невозможно.

В косвенных методах значение твердости находится на основании корреляционных соотношений с результатами определения твердости, полученными прямыми методами.

4.2 По принципу действия методы определения твердости подразделяются на механические и немеханические (бездеформационные).

В ходе испытаний механическими методами производится деформация материала, а в ходе испытаний немеханическими методами измеряются его отличные от механических физические характеристики. Механические методы могут быть как прямыми, так и косвенными, немеханические – только косвенными.

Схематическое представление классификации методов определения твердости представлено в приложении А.

4.3 В зависимости от временного характера приложения нагрузки и измерения параметров вдавливания индентора механические методы определения твердости подразделяются [2] на статические, динамические и кинетические.

Статические методы подразумевают медленное приложение нагрузки и выдержку под нагрузкой.

В динамических методах нагрузка прилагается быстро, а выдержка под нагрузкой не предусматривается,

В кинетических методах приложение нагрузки производится с ограниченной скоростью. В ходе испытаний производится непрерывная регистрация процесса вдавливания индентора с записью диаграммы "нагрузка на индентор-глубина вдавливания индентора".

4.4 По величине прикладываемой нагрузки при вдавливании статические методы определения твердости разделяются: на испытания на микротвердость (нагрузка менее 0.5 кгс), испытания на твердость при малых нагрузках (от 0,5 до 5 кгс) и испытания на макротвердость (свыше 5 кгс).

4.5 Испытания на микротвердость настоящей инструкцией не регламентируются в связи с тем, что для определения механических характеристик металла необходимо проведение испытаний материала на твердость таким обра-

зом, чтобы результат измерений не зависел от структурных неоднородностей тестируемого материала.

4.6 Немеханические методы определения твердости могут применяться только для предварительного обследования и выявления неоднородности свойств исследуемого материала. Обзор немеханических методов приведен в разделе В.5 приложения В. Основной текст инструкции на немеханические методы определения твердости не распространяется.

4.7 Измерение твердости металла на вырезках сварных соединений производится в соответствии с ГОСТ 6996.

4.8 При измерении твердости стандартизованными методами должны быть соблюдены требования соответствующих стандартов для этих методов.

5 Порядок подготовки к проведению контроля

5.1 Общие требования к приборным средствам

5.1.1 Приборы измерения твердости классифицируются на стационарные и переносные.

Стационарные приборы, предназначены для работы в условиях лаборатории АЭС .

Переносные приборы могут быть установлены на объекте измерения и быть использованы для безобразцового контроля оборудования и трубопроводов АЭС.

5.1.2 Прибор измерения твердости должен быть:

- сертифицирован в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии и внесен в Государственный реестр средств измерений;
- поверен в аккредитованной метрологической службе.

5.1.2 Приборы измерения твердости механическим методом проходят поверку в соответствии с ГОСТ 8.398 не реже одного раза в год с применением образцовых мер твердости не ниже второго разряда по ГОСТ 9031.

5.1.3 Подготовка прибора к проведению измерений производится в соответствии с руководством по эксплуатации или паспортом на прибор.

Для приборов измерения твердости косвенным механическим методом перед проведением измерений следует произвести контрольные испытания на образцовых мерах твердости по ГОСТ 9031, либо на аттестованных образцах металла, близкого по свойствам к испытуемому. Погрешность результатов контрольных испытаний не должна превышать нормативную для данного прибора.

5.2 Требования, предъявляемые к качеству испытуемой поверхности

Прежде чем приступить к проведению испытаний, необходимо подготовить поверхность испытуемого изделия в месте контроля:

а) если металл, предназначенный для испытаний, работал в условиях радиационного облучения, то испытания производятся по дозиметрическому наряду-допуску;

б) поверхность испытуемого изделия должна быть свободна от окалины и других посторонних веществ;

в) на контролируемой поверхности изделия производится зачистка участка измерения так, чтобы края отпечатка после вдавливания были достаточно отчетливы для измерения его размеров с требуемой точностью;

г) при испытаниях на искривленных поверхностях радиус кривизны образца (изделия) должен быть не меньше величины $5D$ в случае, кода проводится испытание шаровым индентором или 5 мм в случае вдавливания пирамиды или конуса;

д) при подготовке поверхности к испытаниям необходимо снять поверхностный слой, чтобы исключить влияние наклепа, обезуглерожения или коррозионных повреждений металла;

е) при подготовке поверхности испытуемого изделия необходимо принять меры предосторожности против возможного изменения твердости испытуемой поверхности, вследствие нагрева или наклепа поверхности в результате механической обработки;

ж) поверхность обрабатывается в два-три этапа со сменой направления обработки на 90° до удаления рисок от предыдущей обработки;

з) число этапов зачистки поверхности испытуемого металла определяется требованиями к шероховатости этой поверхности согласно ГОСТ 2789;

и) зачистка испытуемой поверхности проводится в следующем порядке :

- удаление дефектов поверхности с толщиной снимаемого слоя от 0.25 до 1.5 мм. Механическая зачистка производится шлифмашинкой с крупнозернистым кругом. Ручная зачистка производится драчевым напильником;
- шлифование с толщиной снимаемого слоя от 0,1 до 0.25 мм. Достигаемый параметр шероховатости Ra находится в пределах от 0,15 до 3,2мкм. Механическая зачистка производится шлифмашинкой с мелкозернистым кругом. Ручная зачистка производится шлифовальной шкуркой;
- полирование с толщиной снимаемого слоя до 0.05 мм. Достигаемый параметр шероховатости Ra находится в пределах от 0,025 до 0,40 мкм. Механическая зачистка производится войлочным или фетровым кругом, половина цилиндрической поверхности которого покрывается алмазной пастой или пастой ГОИ. При ручном способе полировки на фетровую или суконную ткань последовательно наносятся алмазные пасты различной зернистости. После достижения зеркального состояния поверхности, поверхность очищается от пасты.

к) рекомендуемая глубина снимаемого слоя при зачистке:

- кованно-штампованной поверхности не более 2 мм;
- поверхности литых деталей не более 4 мм;
- для труб – от 4% до 5 % от толщины стенки, но не более 2 мм.

л) Место для проведения испытания на твердость должно располагаться на линии, проходящей через центр подготовленной площадки и параллельной оси трубы. На рисунке 1 представлена номограмма, по которой определяется глубина снятого слоя в зависимости от ширины зачищенной площадки и диаметра трубы.

м) В случае отсутствия ясно выраженных границ сварного шва, в местах зачистки провести травление зоны сварного шва.

Фактическая толщина после зачистки не должна лежать ниже предельно допустимой толщины в соответствии с государственным стандартом или техническими условиями на изделие. В случае, если необходимая зачистка сделает металл тоньше ниже предельно допустимых значений толщины по стандартам или техническим условиям, то необходимо выбрать другое место для проведения испытаний. Если возможность выбора другого места исключена, то вопрос о проведении испытаний согласовать с Головной материаловедческой организацией.

В отдельных случаях, допустимое для измерений состояние поверхности определяется требованиями паспорта на используемый прибор.

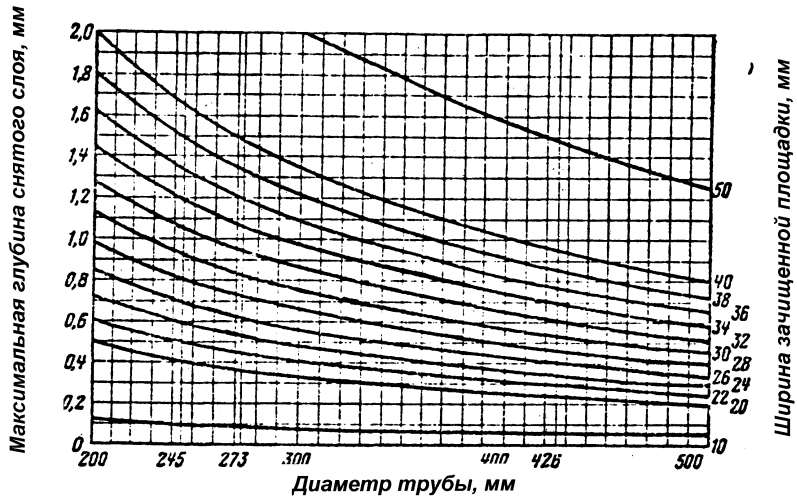


Рисунок 1 - Номограмма для определения глубины снятого слоя в зависимости от диаметра труб и ширины зачищенной площадки.

6 Порядок проведения контроля

6.1 Общие требования при работе с приборами статического действия

В таблице 1 перечислены статические методы измерения твердости, приведены ссылки на регламентирующие их стандарты как отечественные, так и соответствующие им международные. Также в таблице приведен краткий перечень наиболее известных приборов, реализующих каждый метод.

Таблица 1 - Перечень статических методов измерения твердости и приборов их реализующих

Раздел	Содержание
Наименование метода	**Измерение твердости вдавливанием стального шарика по Бринеллю**
Стандарт	ГОСТ 9012; ISO 6506 «Hardness test - Brinell test»; DIN 50351 «Härteprűfung nach Brinell»; ASTM E10 «Brinell Hardness of metallic materials».
Обозначения	Число твердости обозначается цифрами со стоящим после них символом НВ . При условиях испытаний отличных от стандартных (диаметр шарика D = 10 мм нагрузка P=3000 кг, время выдержки под нагрузкой t=10…15 с) после букв НВ указываются условия испытаний – НВ $D/P/t$ При испытаниях с индентором из карбида вольфрама символ НВ дополняется буквой W. В зарубежных источниках также используется обозначение вида НВ/K, где $K=P/D^2$
Приборы	ТШ-2М, ТШ-6, ТШП-4, ТБ 5004, ТБ 5004-03, ИТ 5010 («Точприбор», г. Иваново); Zwick/ZHU 187.5(«Zwick / Roell», Германия); UH250,BRIVISKOP 3000D, BRVISKOP BFR 3, BRIVISOR KL3 («Stiefelmayer /Reicherter», Германия); BRIN200 («Indentec», Великобритания); DIGI-TESTOR 971 («Wilson&Wolpert », США)
Наименование метода	**Измерение твердости по Бринеллю переносными приборами**
Стандарт	ГОСТ 22761
Обозначения	Число твердости обозначается цифрами со стоящим после них символом НВ
Приборы	ТБП 5013 («Точприбор», г. Иваново); МЭИ-Т5, МЭИ-Т7 (МЭИ, г.Москва)

Продолжение таблицы 1

Раздел	Содержание
Наименование метода	**Измерение твердости алмазной пирамидой по Виккерсу**
Стандарт	ГОСТ 2999; ISO 6507 «Hardness test – Vickers test» ; DIN 50133 «Härteprűfung nach Vickers»; ASTM E 92 "Vickers Hardness of Metallic Materials»
Обозначения	Число твердости обозначается цифрами, характеризующими величину твердости со стоящим после них символом HV. При условиях испытаний отличных от стандартных (нагрузка P = 30 кгс и времени выдержки под нагрузкой t = 10...15 с) после букв HV указываются условия испытаний – HV P/t .
Приборы	ТП-7Р, ТВП 5012, ИТ 5010, ТПП-2 («Точприбор», г. Иваново); Zwick/ZHV 10*(«*Zwick / Roell», Германия); UH250, BRIVISKOP 3000D, BRIVISOR KL3 («Stiefelmayer/Reicherter», Германия); 5030 SKV, 5030 TKV, 6030 LKV, 9150 LKV, 8187.5 LKV («Indentec», Великобритания*),* 401 MVD, 430/450-SVD («Wilson&Wolpert », США)
Наименование метода	**Измерение твердости по Роквеллу**
Стандарт	ГОСТ 9013; ISO 6508 «Hardness test - Rockwell test - scales A,B,C,D,E,F,G,H,K»; DIN 50103/1«Härteprűfung nach Rockwell- Verfahren C, A, B, F»; ASTM E 18 «Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials»
Обозначения	Число твердости обозначается цифрами со стоящим после них символом HRA, HRB или HRC (в зависимости от используемой шкалы измерения)
Приборы	ТКС-1, ТКС-1М, ТК-2М, ТКП, ТК-14-250, ТР 5014, ТРП – 5011, ТР 5006, ТР 5043(«Точприбор», г. Иваново); AT130 D, NR 3D, AT200 («Ernst», Швейцария); Zwick/ZHR *(«*Zwick / Roell», Германия);UH250, BRIRO TR, BRIRO HE1 – HBT («Stiefelmayer/Reicherter», Германия); 4150 AK, 4150 BK, 4150 LK, 4150 SK, 4150 TK («Indentec», Великобритания); 2499 Idromim 150(«Mim», Италия) ; 500 MRD, 600 MRD («Wilson&Wolpert », США); TH 300 («Time Group Inc. », Китай)
Наименование метода	**Измерение твердости при малых нагрузках по Супер-Роквеллу**
Стандарт	ГОСТ 22975; ISO 1024 «Hardness test – Rockwell superficial test – scales 15N, 30N, 45N, 15T, 30T, 45T»; DIN 50103/2 «Härteprűfung nach Rockwell – Verfahren N und T»; ASTM E 18 " Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials»

Окончание таблицы 1

Раздел	Содержание
Обозначения	Число твердости обозначается цифрами со стоящим после них символом HRN или HRT (в зависимости от используемой шкалы измерения) и значением приложенной общей нагрузки *Р. (По международным стандартам значение приложенной нагрузки ставится перед символами "N"или "Т")*
Приборы	ТРС 2143, ТРС 5009(«Точприбор», г. Иваново); AT130 D, NR 3D, AT200 («Ernst», Швейцария); Zwick/ZHR *(«*Zwick / Roell», Германия); 4045 АК, 4045 ВК, 4045 LK, 4045 SK, 4045 ТК («Indentec», Великобритания); 600 MRD/S («Wilson&Wolpert », США)
Наименование метода	**Измерение твердости на пределе текучести вдавливанием шара**
Стандарт	ГОСТ 22762
Обозначения	Число твердости обозначается цифрами со стоящим после них символом $H_{0,2}$ и с указанием размерности.
Приборы	МЭИ-Т5, МЭИ-Т7 (МЭИ, г.Москва).
Наименование метода	**Измерение пластической твердости**
Стандарт	ГОСТ 18835
Обозначения	Число твердости обозначается цифрами со стоящим после них символом НД
Наименование метода	**Метод акустического импеданса**
Стандарт	Стандартами не регламентируется
Приборы	МЕТ-У1, МЕТ-УД (ЦФМИ «МЕТ», г. Москва); УЗИТ-3(НПО «Интротест», г. Екатеринбург); Microdur MIC-1, MIC-2, MIC-10, MIC-20 («Krautkrämer», Германия); SH5/75, HLJ 2000 («Namicon», Италия)
Примечание	Краткое описание метода дано в приложении В.3. Приборы, основанные на методе акустического импеданса используют для определения твердости по шкале Виккерса

Широко применяются ручные приборы статического действия, реализующие косвенные (или нестандартизованные) механические методы определения твердости. К таким приборам относятся ручные твердомеры: Ernst SC («Ernst», Швейцария), Webster-Härteprüfzange(Zwick), Wilson M-51/52 (Instron Wolpert), Instrumatic, Rockmaster, MARK II Rangemaster (CV Instruments), HH 120/140 (Mitutoyto), Handhärteprüfer R/SR (Gnehm), Briro TR (Stiefelmayer). Принцип действия этих приборов основан на вдавливании конического индентора. Также выпускаются ручные приборы основанные на методе Виккерса: HMO 10u (WPM Leipzig), Brivisor VHT5 (Stiefelmayer), и на методе Бринелля: Scherkrafthärteptüfer STE (Ernst), Handhärteprüfgerät PZ3 (Zwick). Приборы калибруются на стандартных мерах твердости. В ходе калибровки находятся корреляционные зависимо-

сти, на основании которых показания прибора автоматически преобразуются в значения по соответствующей стандартной шкале твердости

При измерении твердости должны быть соблюдены следующие условия:

- плавное возрастание нагрузки до необходимого значения;
- поддержание постоянства нагрузки в течение установленного времени;
- приложение действующего усилия перпендикулярно к поверхности испытуемого образца или изделия;
- при проведении измерений непосредственно на оборудовании переносными приборами, при необходимости обеспечить жесткую связь прибора с испытуемым изделием при помощи струбцины, цепного или магнитного захвата;
- расстояние между центром отпечатка и краем образца или соседнего отпечатка должно быть не менее 2,5 диаметра (длины диагонали) отпечатка;
- толщина объекта измерения должна быть не менее десятикратной глубины отпечатка;
- испытуемое изделие на время проведения измерений должно находиться в разгруженном состоянии от основных рабочих нагрузок.

6.2 Общие требования при работе с приборами динамического действия

В таблице 2 перечислены динамические методы измерения твердости и краткий перечень наиболее известных приборов, реализующих каждый метод.

Таблица 2 - Перечень динамических методов измерения твердости и приборов их реализующих

Раздел	Содержание
Наименование метода	**Измерение твердости методом ударного отпечатка**
Стандарт	ГОСТ 18661
Обозначения	Число твердости обозначается цифрами со стоящим перед ними символом: при испытании коническим индентором – HV_c и при испытании шариковым индентором – HB_c
Приборы	ИТ 5038(«Точприбор», г. Иваново); ВПИ-2, ВПИ-3К (Волгоградский государственный технический университет)
Наименование метода	**Измерение твердости по Шору – метод упругого отскока бойка**
Стандарт	ГОСТ 23273
Обозначения	Число твердости обозначается цифрами со стоящим после них символом HSD
Приборы	ИТ 5078(«Точприбор», Иваново), Sklerograf (Zwick,Германия)

Окончание таблицы 2

Раздел	Содержание
Наименование метода	**Измерение твердости по Леебу**
Стандарт	В России не регламентирован. Принят в качестве стандарта США ASTM A956-02 «Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products»
Обозначения	Число твердости обозначается цифрами со стоящим после них символом *HL* (*альтернативное обозначение L)*
Приборы	ТЭМП-2 (НПП «Технотест-М», г. Москва), МЕТ-Д1 («МЕТ», г. Москва), ЭЛИТ – 2Д (НПО «Интротест», Екатеринбург); МИТ-2 («ЭПСИ», Калининград) *; Equotip *) («Proceq», Швейцария) *; DynaPOCKET, DynaMIC («Krautkrämer», Германия)
Примечание	Краткое описание метода дано в приложении В.2. Приборы, основанные на методе Леба используют для определения твердости по шкале Бринелля, Виккерса или Роквелла

* Не внесён в Госреестр СИ на момент написания инструкции 30.06.2005

При измерении твердости должны быть соблюдены следующие условия:

- поверхность объекта контроля должна иметь металлический блеск, быть ровной, гладкой и без следов загрязнения маслом;
- при измерении методом Лееба объект не должен быть намагниченным;
- обеспечить перпендикулярность приложения нагрузки по отношению к испытуемой поверхности;
- при измерении твердости на исследуемую поверхность металла наносят не менее 5 отпечатков,
- расстояние между центрам отпечатка и краем образца или соседнего отпечатка должно быть не менее 2.5 диаметра отпечатка.
- для приборов ударного действия измерение диаметров отпечатков на исследуемой поверхности и эталоне производится в двух взаимно перпендикулярных направлениях одним оператором при фиксированной настройке измерительного микроскопа
- не рекомендуется проводить измерения твердости на изделиях толщиной менее 10 мм.

6.3 Общие требования при работе с приборами кинетического действия

В таблице 3 перечислены кинетические методы измерения твердости и краткий перечень наиболее известных приборов, реализующих каждый метод.

Таблица 3 - Перечень кинетических методов измерения твердости и приборов их реализующих

Раздел	Содержание
Наименование метода	**Испытания на непрерывное вдавливание алмазной пирамиды - универсальная твердость**
Стандарт	В России не регламентирован; DIN 50359 «Prüfung Metallishe Werkstoffe Universalhärteprüfung»; ISO 14577 «Metallishe Werkstoffe – Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und andere Werkstoffparameter»
Обозначения	Согласно DIN 50359 число твердости обозначается цифрами со стоящим после них символом HU; согласно ISO 14577 число твердости обозначается цифрами со стоящим после них символом HM
Приборы	ZH2,5/Z2,5 (Zwick / Roell, Германия); UHP 100 («Stiefelmayer/Reicherter», Германия); Минитест-1 (ВНИИАЭС, Москва)
Примечание	Согласно ISO 14577 от 05.2003 универсальная твердость получила новое наименование - «твердость по Мартенсу». Краткое описание метода дано в приложении В
Наименование метода	**Метод автоматического вдавливания шара**
Стандарт	Регламентируются утвержденными в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии руководствами по эксплуатации приборов, отраслевой инструкцией, стандартом США ASTM WK381 “Standard Test Methods for Automated Ball Indentation Testing of Metallic Samples and Structures to Determine Stress-Strain Curves and Ductility at Various Test Temperatures”
Приборы	ТЕСТ-5У («ВНИИАЭС», г. Москва), ПИТМ-ДВ-02 (НПФ «Экспресс-измерения», Москва), SSM-M1000, SSM-B1000 SSM-B4000 («Advanced Technology Corporation», США)
Примечание	Описание метода дано в приложении Г. На основании метода автоматического вдавливания шара разработаны методики, позволяющие по регистрируемой диаграмме вдавливания получать значения механических свойств материала

При измерении твердости кинетическим методом должны быть соблюдены все требования, что и при работе с приборами статического действия, а также дополнительные:

- обеспечение постоянства скорости перемещения индентора при нагружении;

- скорость пластической деформации материала под индентором должна быть сопоставима со скоростью деформации материала при испытаниях на одноосное растяжение;
- в ходе нагружения производится запись диаграммы вдавливания в координатах «глубина вдавливания индентора – приложенная к индентору сила».

7 Правила обработки результатов измерений

Обработка результатов измерений включает в себя следующие этапы:
- вычисление значений твердости, получаемых непосредственно в результате испытания материала на основании соответствующих методик и оценка погрешности полученного значения твердости;
- преобразование, если это необходимо, полученного значения твердости в значение твердости по более употребительной шкале (например, перевод в единицы по шкале Бринелля производится как промежуточный этап при расчете механических свойств);
- расчет значений механических свойств по характеристикам твердости и оценка погрешности полученных значений механических свойств.

7.1 Вычисление значения твердости и оценка погрешности

Вычисление твердости производится по серии испытаний.

Для каждого испытания в соответствии с руководством по эксплуатации или паспортом к прибору производится расчет значения твердости.

Статистическую обработку результатов испытаний производить в соответствии с ГОСТ 8.207. Считать при этом, что результаты испытаний принадлежат к нормальному распределению и принять доверительную вероятность равной 0,95.

7.2 Взаимосвязь значений твердости, определяемых различными методами

При сопоставлении значений твердости, полученных различными методами между собой необходимо помнить, что:
- зависимости для такого перевода являются эмпирическими,
- при одном и том же способе измерения твердости ее значение сильно зависит от нагрузки: при меньших нагрузках значения твердости получаются более высокими.

Перевод значений твердости, определяемых различными методами, для углеродистых конструкционных сталей приведен в таблице 4 (по данным [3]).

Таблица 4 - Перевод значений твердости, определяемых различными методами для сталей перлитного класса

Твердость по Виккерсу HV	Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу HV	Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу		
	при испытании стандартным стальным шариком	при испытании шариком из карбида вольфрама	HRC	HRA	HRB		при испытании стандартным стальным шариком	при испытании шариком из карбида вольфрама	HRC	HRA	HRB
1234	780	872	72	84	-	228	229	-	20	61	100
1116	745	840	70	83	-	222	223	-	19	60	99
1022	712	812	68	82	-	217	217	-	17	60	98
941	682	794	66	81	-	213	212	-	15	59	97
868	673	760	64	80	-	208	207	-	14	59	95
804	627	724	62	79	-	201	201	-	13	58	94
746	601	682	60	78	-	197	197	-	12	58	93
694	578	646	58	78	-	192	192	-	11	57	92
650	555	614	56	77	-	186	187	-	9	57	92
606	534	578	54	76	-	183	183	-	8	56	90
687	514	555	52	75	-	178	179	-	7	56	90
551	495	525	50	74	-	174	174	-	6	55	89
534	477	514	49	74	-	171	170	-	4	55	88
502	461	477	48	73	-	166	167	-	3	54	87
474	444	460	46	73	-	162	163	-	2	53	86
460	429	432	45	72	-	159	159	-	1	53	85
435	415	418	43	72	-	155	156	-	-	-	84
423	401	401	42	71	-	152	152	-	-	-	83
401	388	388	41	71	-	149	149	-	-	-	82
390	375	375	40	70	-	148	146	-	-	-	81
386	363	364	39	70	-	143	143	-	-	-	80
361	352	352	38	69	-	140	140	-	-	-	79
344	341	341	36	68	-	138	137	-	-	-	76
334	331	330	35	67	-	134	134	-	-	-	77
320	321	321	33	67	-	131	131	-	-	-	76
311	311	311	32	66	-	129	128	-	-	-	75
303	302	302	31	66	-	127	126	-	-	-	74
292	293	-	30	65	-	123	123	-	-	-	73
285	285	-	29	65	-	121	121	-	-	-	72
278	277	-	28	64	-	118	118	-	-	-	71
270	269	-	27	64	-	116	116	-	-	-	70
261	262	-	26	63	-	115	114	-	-	-	66
255	255	-	25	63	-	113	111	-	-	-	67
249	248	-	24	62	-	110	110	-	-	-	66
240	241	-	23	62	102	109	109	-	-	-	66
235	235	-	21	61	101	108	107	-	-	-	64

В таблице 5 даны уравнения перевода определяемых различными методами значений твердости в значение твердости по Бринеллю для сталей оборудования и трубопроводов АЭС. Используется поправочный коэффициент k_a, равный:

k_a =1 для перлитных сталей,

k_a =0,97 для аустенитных сталей.

Таблица 5 - Перевод значений твердости, определяемых различными методами для сталей оборудования и трубопроводов АЭС

Твердость	Ограничение	Уравнение
По Виккерсу HV	80<HV<250	HB = HV
	250<HV≤500	HB =HV - 0,0002·HV·(HV-57)
По Роквеллу HRA	50<HRA<73	$HB = k_a \cdot (0{,}43\ HRA^2 - 41\ HRA + 1125)$
По Роквеллу HRB	40<HRB<102	$HB = k_a \cdot (0{,}0007\ HRB^3 - 0{,}1\ HRB^2 - 5{,}8\ HRB - 35)$
По Роквеллу HRC	1<HRC<45	$HB = k_a \cdot (0{,}1\ HRC^2 + 1{,}3\ HRC + 160)$
По Шору HSD	20,5<HSD<70	HB = 7,02 HSD

7.3 Определение характеристик механических свойств металла оборудования и трубопроводов АЭС по результатам испытаний на твердость

7.3.1 Для определения характеристик механических свойств металла оборудования и трубопроводов АЭС применяются методики:

а) использование предварительно установленных корреляционных соотношений между значениями твердости и искомыми механическими свойствами;

б) определение механических свойств по диаграмме вдавливания шарового индентора, регистрируемой приборами, реализующими кинетические методы определения твердости.

7.3.2 В таблице 6 приведены корреляционные соотношения, позволяющие по значениям твердость по Бринеллю НВ определять значения характеристик механических свойств металла оборудования и трубопроводов АЭС:

- предела текучести $R_{p0,2}$ с погрешностью 15 % для основного металла, 20% для металла сварных швов;
- временного сопротивления R_m с погрешностью 10 % для основного металла, 15% для металла сварных швов;
- относительного удлинения A_5 с погрешностью 20 %;
- относительного сужения Z с погрешностью 30 %.

Справедливость приведенных в таблице 6 зависимостей для материалов, работающих в условиях прямого нейтронного облучения оговариваются особо.

Зависимости представлены для групп сталей в соответствии с классификацией, представленной в разделе 1. Для отдельных материалов с целью повышения точности определения механических свойств даны самостоятельные зависимости. Это:

– сталь 10ГН2МФА;

– стали корпусов ядерных реакторов (корпусные стали), включающие 15Х2МФА, 15Х2МФА-А, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А.

7.3.3. Представленная в таблице 6 зависимость между твердостью по Бринеллю НВ и временным сопротивлением для углеродистых и легированных кремнемарганцовистых сталей выведена на основании рекомендации ГОСТ 22761.

7.3.4 Для легированных сталей соотношение между твердостью на пределе текучести $H_{0,2}$ и пределом текучести приведено в ГОСТ 22762.

7.3.5 Обзор методик определения характеристик механических свойств по диаграмме вдавливания шарового индентора описаны в приложении Г.

Таблица 6 - Определение характеристик механических свойств материалов по измеренным значениям твердости

Материал	Ограничение	Свойство	Единицы измерения	Уравнение
Стали углеродистые и легированные кремнемарганцовистые *	НВ≥140	$R_{p0,2}$	МПа	3,4 НВ – 175
	НВ<140	$R_{p0,2}$	МПа	2,15 НВ
	-	R_m **	МПа	$8{,}8\cdot10^{-4}$ НВ^2+2,66 НВ+103
		A_5	%	$3{,}0\cdot10^4 / (2\,R_m + R_{p0,2})$
		Z	%	$1{,}9\cdot10^5 / (R_m+R_{p0,2}+2000)$
Стали легированные и легированные хромомолибденованадиевые перлитного класса *	НВ≥200	R_m	МПа	3,4 НВ-90
		$R_{p0,2}$	МПа	3,6 НВ – 240
	НВ<200	R_m	МПа	2,5 НВ + 90
		$R_{p0,2}$	МПа	2,4 НВ
	-	A_5	%	$4{,}2\cdot10^4 / (2\,R_m + R_{p0,2})$
		Z	%	$2{,}3\cdot10^5 / (R_m+R_{p0,2}+2000)$
Стали аустенитного класса	-	R_m	МПа	1,9 НВ+250
		$R_{p0,2}$	МПа	1,7 НВ
		A_5	%	$7{,}5\cdot10^4 / (2\,R_m + R_{p0,2})$
		Z	%	$1{,}8\cdot10^5 / (R_m+R_{p0,2}+2000)$
Сварные соединения аустенитных сталей	-	R_m	МПа	1,9 НВ + 250
		$R_{p0,2}$	МПа	2,2 НВ
		A_5	%	$6{,}8\cdot10^4 / (2\,R_m + R_{p0,2})$
		Z	%	$1{,}8\cdot10^5 / (R_m+R_{p0,2}+2000)$
Корпусные стали *	***	R_m	МПа	3,5 НВ – 105
		$R_{p0,2}$	МПа	3,8 НВ – 290
		A_5	%	$4{,}2\cdot10^4 / (2\,R_m + R_{p0,2})$
		Z	%	$2{,}3\cdot10^5 / (R_m+R_{p0,2}+2000)$
10ГН2МФА *	-	R_m	МПа	2,2 НВ + 180
		$R_{p0,2}$	МПа	2,45 НВ
		A_5	%	$4{,}2\cdot10^4 / (2\,R_m + R_{p0,2})$
		Z	%	$2{,}3\cdot10^5 / (R_m+R_{p0,2}+2000)$
БрАЖМц 10-3-1,5	-	R_m	МПа	3,9 НВ
		$R_{p0,2}$	МПа	1,4 НВ
ХН35ВТЮ-ВД	-	R_m	МПа	3,9 НВ
		$R_{p0,2}$	МПа	2,4 НВ

* Формулы применимы в том числе и для сварных соединений данных сталей
** Формула выведена на основании ГОСТ 22761
*** Формулы применимы в том числе и для материалов облученных с флюенсом нейтронов до 10^{21} н/см^2 с энергией 0,5 МЭВ

8 Правила оформления результатов измерений

Результаты измерения твердости с определением механических свойств оформляются по форме, приведенной в таблице 7.

В графах таблицы заносятся:

1 – дата проведения измерения,

2 – наименование объекта измерения,

3 – марка стали объекта измерения,

4 – марка прибора, на котором производились измерения,

5 – число испытаний в серии,

6 – шкала твердости, в которой были получены первичные результаты измерений (например, НВ),

7 – значение твердости по шкале, указанной в столбце 6, полученное как результат измерения по серии испытаний,

8 – случайная погрешность определения результата измерений,

9 – результат пересчета твердости в шкалу по Бринеллю,

10 – результат расчета временного сопротивления R_m,,

11 – результат расчета условного предела текучести $R_{p0,2}$,

12 – результат расчета относительного удлинения после разрыва A_5,

13 – результат расчета относительного сужения поперечного сечения после разрыва Z,

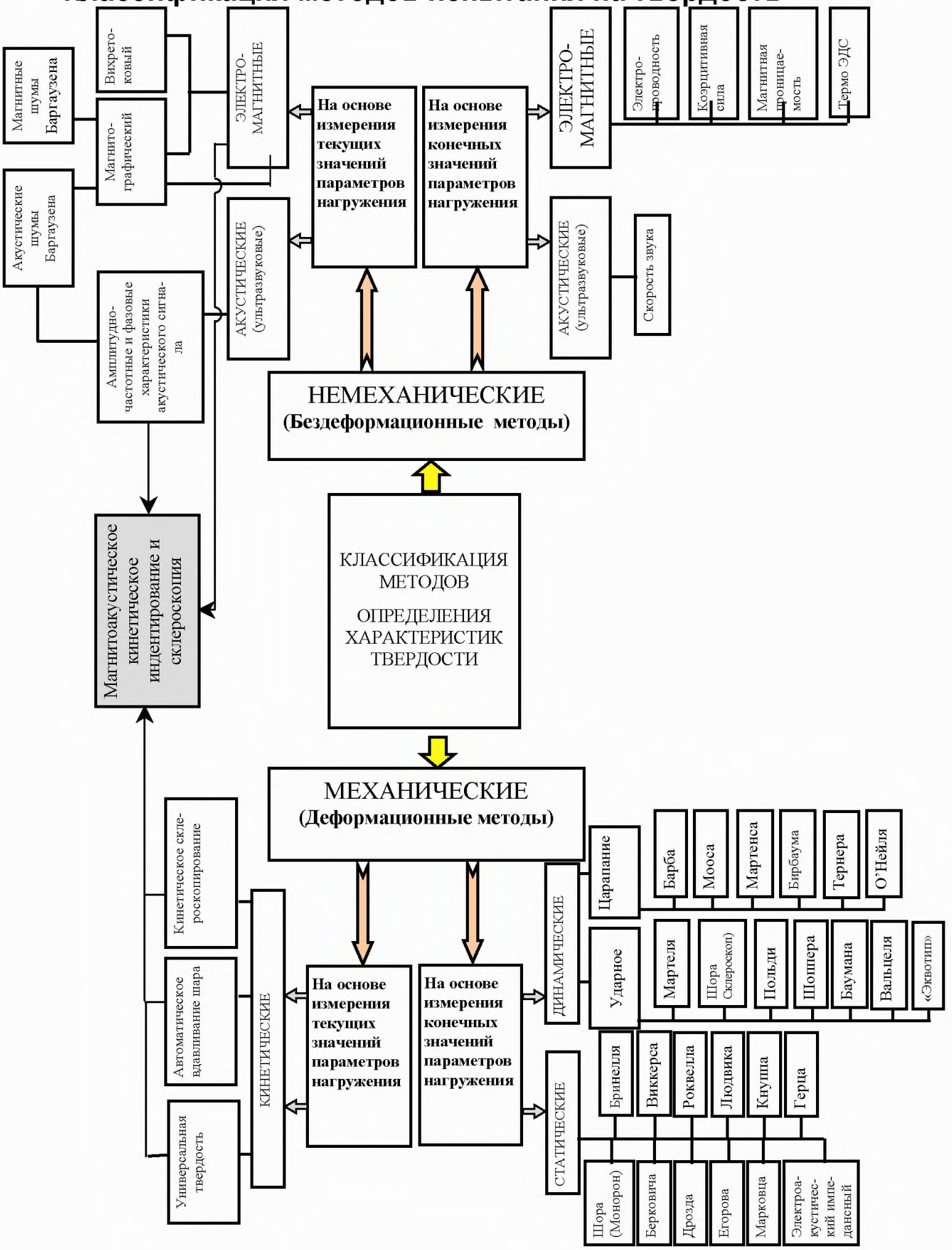
14 – примечание.

Таблица 7 – Рекомендуемый формуляр для записи результатов определения твердости с определением механических свойств

Дата	Объект испыта-ния	Марка стали	Марка прибора	Число испы-таний	Твердость металла				Механические свойства				При-мечание
					Шкала	Значе-ние	Погреш-ность	НВ	R_m МПа	$R_{p0,2}$ МПа	A_5 %	Z %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Приложение А
(справочное)

Классификация методов испытания на твердость



Приложение Б
(справочное)

Сравнительная характеристика приборов для измерения твердости и рекомендации для использования при контроле на АЭС

В разделе 4 дана классификация твердомеров на стационарные и переносные. Для осуществления эксплуатационного контроля на АЭС необходимы переносные приборы. В нашей стране выпускались и использовались различные модификации переносных твердомеров статического нагружения типа ТШП, ТПП, ТКП («Точприбор», Иваново), приборы серии МЭИ-Т (МЭИ, Москва). Они требуют крепления на испытуемой поверхности с помощью струбцин, магнитных и ленточных или цепных захватов. Они рассчитаны на создание значительной нагрузки на индентор. Это позволяет удовлетворить требованиям стандартов, но делает приборы громоздкими, тяжелыми и неудобными в эксплуатации. Поэтому их практическое использование ограничено.

В последнее время появился ряд ручных приборов, не требующих закрепления, из которых можно назвать приборы фирм "Stiefelmayer", “Zwick” (Германия), "ERNST" (Швейцария), основанные на принципах статического или кинетического действия. Сюда же можно отнести отечественный твердомер «Минитест-1» (ВНИИАЭС, Москва). Эти приборы не требуют крепления на испытуемой поверхности, имеют малые размеры и массу, не требуют приложения больших нагрузок. Широкое применение нашли ручные твердомеры динамического действия, работающие на принципе Леева - «Equotip» (Proceq, Швейцария), «ТЭМП» (НПП («Технотест-М», г. Москва). Твердомеры, работающие по принципу акустического импеданса, такие как «Microdur» («Krautkramer», Германия), «МЕТ-У1» (ЦФМИ «МЕТ», г. Москва) используются для контроля труднодоступных объектов. Выпускаются также твердомеры, объединяющие несколько методов в одном блоке: твердомер МЕТ-УД (ЦФМИ «МЕТ», г. Москва)), MIC 20 («Krautkramer», Германия) благодаря использованию сменных датчиков сочетает в себе метод Леева и метод акустического импеданса, что позволяет существенно расширить спектр измеряемых изделий и повысить точность измерения.

Во ВНИИАЭС был накоплен большой опыт использования приборов различного типа для контроля оборудования и трубопроводов АЭС. При этом использовались макротвердомер ТЕСТ-5У, ручной твердомер, реализующий кинетический метод МИНИТЕСТ-1 (оба – конструкции ВНИИАЭС), ручные динамические твердомеры, реализующий метод Леева: ТЭМП-2 (НПП «Технотест-М», г. Москва) , «МЕТ-Д1» (ЦФМИ «МЕТ», г. Москва).

Твердомер ТЕСТ-5У предназначен для проведения испытаний на вдавливание шарового индентора с максимальным усилием до 4000 Н. Он обеспечивает запись диаграммы вдавливание шара с целью определения механических свойств испытуемого материала с погрешностью до 10 %. Также он мо-

жет быть использован для определения твердости по Бринеллю с погрешностью до 5 %.

Сопоставление результатов измерения твердости на оборудовании и трубопроводах АЭС показало, что дисперсия результатов отдельных испытаний у ручных твердомеров значительно выше, чем у макротвердомера. У ТЕСТ-5У относительное среднеквадратическое отклонение результатов испытаний составило 4% , у ударных твердомеров – от 8 до 15 %, у твердомера МИНИТЕСТ-1 – до 10 %.

В ЦНИИТМАШ проводились сравнительные испытания переносных твердомеров различного типа: приборов ВПИ-2, ВПИ-3К (Волгоградский государственный технический университет), МЭИ-Т7 (МЭИ, г.Москва), "Equotip"("Schneider", Германия), ТШ-2М («Точприбор», г. Иваново). Приборы ВПИ, реализующие метод ударного отпечатка показали наибольшее среднеквадратическое отклонение результатов испытаний – 25%, остальные приборы показали близкое между собой дисперсию в пределах от 6 до 10 %.

Опыт проведения работ показывает, что для повышения надежности результатов испытаний ручными твердомерами на оборудовании и трубопроводах АЭС следует

- проводить серию не менее чем из трех испытаний, а при использовании ручных твердомеров - пяти испытаний;
- проводить их тщательную тарировку перед испытанием и систематически контролировать их показания.

Приложение В
(справочное)

Обзор нестандартных методов определения твердости

В данном приложении дается краткое изложение методов, имеющих широкое применение, но не описанных в отечественных стандартах.

В.1 Испытания на непрерывное вдавливание алмазной пирамиды (универсальная твердость)

Безобразцовое определение механических свойств методом кинетической твердости регламентируется германским стандартом DIN 50359-1 и международным ISO14577.

Универсальный метод твердости подходит к определению твёрдости всех материалов и соответствует принципу твердости по Виккерсу.

Используется алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом между противоположенными гранями пирамиды при вершине 136° (рисунок В.1). При этой форме испытательная нагрузка пропорциональна площади поверхности отпечатка. В ходе испытания записывается диаграмма вдавливания (рисунок В.2)

Значение универсальной твердости обозначается цифрами, характеризующими величину твердости со стоящим после них символом *HU*.

Расчет универсальной твердости *HU* осуществляется по формуле

$$HU = \frac{F}{S} = \frac{F}{2ab} = \frac{F}{26{,}43 \cdot h^2} \qquad \text{(В.1)}$$

где F - приложенное к индентору усилие в н;

S - площадь поверхности отпечатка в мм ^{2},

a - ширина площади основания пирамиды в мм,

b - высота пирамиды в мм

h - глубина вдавливания в мм.

На рисунке В.3 приведена номограмма, позволяющая находить значения универсальной твердости при различных значениях прилагаемой силы и F и глубины вдавливания h.

Согласно вышедшему в 2003 году переизданию международного стандарта ISO14577 универсальная твердость получила новое наименование – «твердость по Мартенсу» и обозначение HM.

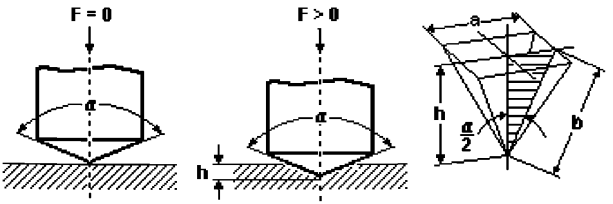


Рисунок В.1 - Схема проведения испытаний на универсальную твердость

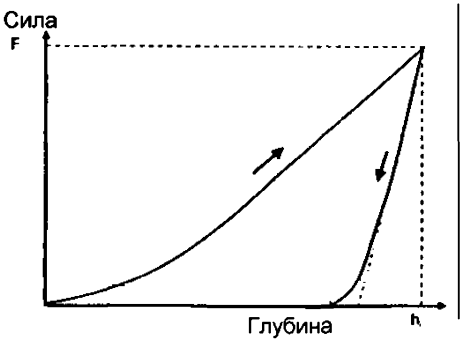


Рисунок В.2 – Вид диаграммы вдавливания, регистрируемой в ходе испытания методом универсальной твердости

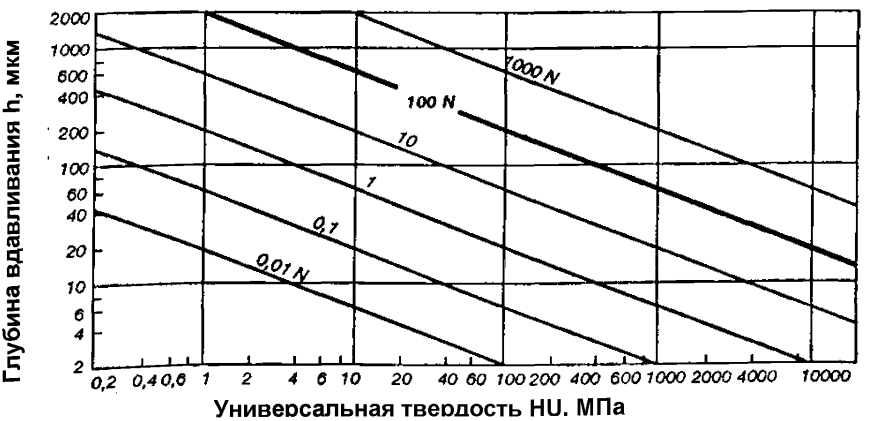
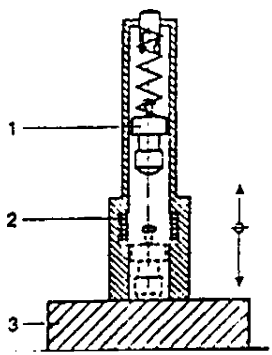


Рисунок В.3 – Номограмма определения универсальной твердости

В.2 Метод определения твердости по Леебу

Метод основан на измерении потери энергии при соударении бойка с испытываемым образцом материала или элементом конструкции. Процесс измерения твердости (рисунок В.4) во времени может быть разделен на три фазы: свободное движение бойка до соударения, соударение и отскок. В фазе свободного движения потенциальная энергия бойка, определяемая начальной высотой свободного падения или сжатием пружины, превращается в кинетическую энергию и боек соударяется с испытываемым образцом. Фаза соударения состоит из этапа нагрузки, в течение которого боек внедряется в испытываемый образец. Этап нагрузки заканчивается, когда скорость бойка относительно образца становится равной нулю. После этого начинается этап разгрузки, при котором боек восстанавливается как совершенно упругое тело, а испытываемый образец - только частично, вследствие потерь энергии на пластическую деформацию. Фаза отскока начинается в момент, когда боек с начальной скоростью отскока отделяется от испытываемого образца. В фазе отскока под действием остаточной кинетической энергии боек поднимается на соответствующую этой энергии высоту.



1 - ударник, 2 направляющая трубка, 3 – образец

Рисунок В.4 - Схема проведения испытаний методом Леeба.

Мерой твердости материала *HL* является частное от деления скорости движения бойка в момент отскока v_{out} на скорость движения непосредственно перед соударением v_{in} умноженное на 1000.

$$HL = 1000 \frac{v_{out}}{v_{in}}. \qquad (B.2)$$

При испытаниях методом Лееба образцов материалов одинаковой твердости, но с различным модулем упругости получаются различные данные. Чтобы исключить эту погрешность, рекомендуется разделять материалы на группы по значению модуля упругости.

Область использования данного метода имеет ограничения, касающиеся условия закрепления детали и ее массы. Потеря энергии при ударе зависит как от местной деформации в точке соударения, которая определяется упругопластическими свойствами материала, так и от податливости образца как упругого тела. Поэтому метод Лееба определения твердости можно применять только на достаточно массивных образцах или на образцах, закрепленных на достаточно массивном основании. Для тонкостенных труб или сосудов его использование нецелесообразно.

Метод измерения твердости по Леебу принят в качестве стандарта ASTM A956-02 “Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products”.

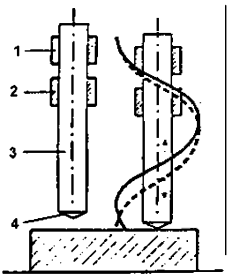
В.3 Метод акустического импеданса

Метод акустического импеданса (именуемый также как *метод ультразвукового контактного импеданса* или, сокращенно, *UCI*) основан на измерении относительных изменений механического импеданса колебательной системы преобразователя в зависимости от механических свойств поверхности. Акустический преобразователь представляет собой стержень из магнитострикционного материала, на конце которого укреплен индентор. На стержень надета катушка, возбуждающая в преобразователе продольные упругие колебания (рисунок В.5). Стержень с индентором прижимается к контролируемому изделию с постоянной силой. При этом индентор внедряется в изделие тем глубже, чем меньше твердость материала изделия. Площадь зоны соприкосновения индентора с изделием с уменьшением твердости растет, гибкость контактной зоны уменьшается, а модуль упругого сопротивления (импеданса) - увеличивается. Изменение импеданса определяют по изменению собственной частоты нагруженного преобразователя. Шкалу индикатора градуируют в единицах твердости.

Применение метода акустического импеданса имеет следующие особенности:

- из-за малой площади контакта преобразователя с контролируемым изделием возможен значительный разброс в показаниях, обусловленные неоднородностью структуры материала;
- к зачистке поверхности предъявляются повышенные требования ($Ra \leq 3,2$ при усилии 10 кгс);
- работа с датчиком требует от оператора специальных навыков: необходимо обеспечить плавное нажатие на корпус датчика до упора, затем удерживать приложенное усилие. На всём протяжении замера твёрдости рука оператора не должна дрожать;
- при измерении на небольших образцах малой толщины (менее 15 мм

при усилии 10 кг, менее 1,5 мм при усилии 1,5 кг) может возникнуть значительный разброс результатов измерений из-за резонансных колебаний в проверяемом материале. Такие изделия следует фиксировать на мягком основании, например, через слой вязкой пасты.



1- источник сигнала, 2 приемник сигнала, 3 – резонирующий стержень,
4 – пирамида Виккерса, - - - частота колебаний в отсутствии контакта,
— частота колебаний при наличии контакта

Рисунок В.5 - Схема проведения испытаний методом акустического импеданса

В.4 Проба на твердость царапаньем

При измерении твердости методом царапанья [2] в поверхность образца (изделия) под действием нормально приложенной постоянной нагрузки P вдавливается конусный индентор и производится одновременная подача острия индентора параллельно тестируемой поверхности материала. В результате на поверхности образца (изделия) остается царапина, глубина и ширина которой зависит от сопротивления металла царапанью. Последнее взаимосвязано не только с твердостью, но и с истинным сопротивлением металла разрыву (особенно для пластичных металлов).

В качестве индентора наиболее часто используется алмазный конус с углом у вершины 90° или алмазный конус с углом 120° (аналогичен, применяемому при определении твердости по Роквеллу), но иногда применяют также алмазную сферу радиусом 1,25 мм или резцы из твердого сплава ВК8. Рекомендуемая скорость перемещения индентора при царапании составляет от 100 мм/мин до 1500 мм/мин, а величина шероховатости поверхности испытуемого материала $Ra \leq 0{,}63$.

Известно несколько вариантов метода, в том числе:

а) мерой твердости $H_ц$ принимают осевую нагрузку на индентор P, при которой получается царапина заданной ширины b = 10 мкм;

б) мерой твердости $H_ц$ принимают величину обратную ширине царапины b в мм при заданной постоянной нагрузке на конусный индентор.

В.5 Немеханические методы определения твердости

В настоящее время широко используются методы косвенного определения твердости на основании немеханических методов (без механической деформации поверхности материала). В основу этих методов положено измерение определенных физических констант, находящихся в функциональной зависимости от твердости материала.

Приборы, основанные на немеханических методах, могут быть рекомендованы в качестве индикационных средств, а уточнять их метрологические характеристики можно только после соответствующих экспериментальных исследований для стали выбранной марки.

Магнитные методы измерения твердости основаны на определении магнитных характеристик ферромагнитных материалов, которые корреляционно связаны с твердостью [4]. Их использование для неразрушающего контроля механических свойств и микроструктуры в и металлопродукции регламентируется ГОСТ 30415.

Среди магнитных методов широкое применение получил *метод коэрцитиметрии* с использованием приставных электромагнитов. Они позволяют измерять коэрцитивную силу материалов на локальном участке ферромагнитного изделия. Существует связь между коэрцитивной силой и твердостью у низкоуглеродистых сталей. Контролируемый участок намагничивается и размагничивается П-образным электромагнитом с намагничивающей и размагничивающей обмотками. После намагничивания контролируемого участка изделия плавно увеличивают размагничивающий ток до тех пор, пока измерительный прибор, подключенный к феррозонду, не покажет отсутствие магнитного поля в контролируемом участке. Сила размагничивающего тока пропорциональна коэрцитивной силе материала.

При *импульсно-локальном магнитном методе* изделие намагничивают серией мощных импульсов тока, пропускаемых через накладной малогабаритный соленоид без сердечника. Градиент нормальной составляющей остаточного магнитного поля, характеризующий механические свойства материала, в том числе его твердость, измеряют при помощи феррозонда, расположенного симметрично вдоль оси внутри намагничивающего соленоида.

Метод магнитных шумов основан на анализе спектра, амплитуд и длительности магнитного шума (скачков Баркгаузена) в функции исследуемых механических свойств ферромагнитного материала.

Для контроля твердости сплавов широко применяют вихретоковый *метод измерения удельной электрической проводимости.* Существует однозначная (близкая к линейной) взаимосвязь между удельной электрической проводимостью и твердостью для многих цветных сплавов на основе меди и магния (например, для латуни и бронзы).

Приложение Г
(рекомендуемое)

Методики определения механических свойств по диаграмме автоматического вдавливания шара

Метода автоматического вдавливания шара состоит в непрерывной регистрации процесса вдавливания индентора в виде трехкоординатной диаграммы: "нагрузка на индентор (P) - глубина внедрения индентора в поверхность исследуемого материала(t) " на трех стадиях процесса: активного нагружения, выдержки под нагрузкой, разгрузки с возможностью повторного многократного циклического нагружения. Таким образом, достигается качественная аналогия между безобразцовым методом испытания на непрерывное локальное деформирование и стандартными образцовыми методами растяжения-сжатия.

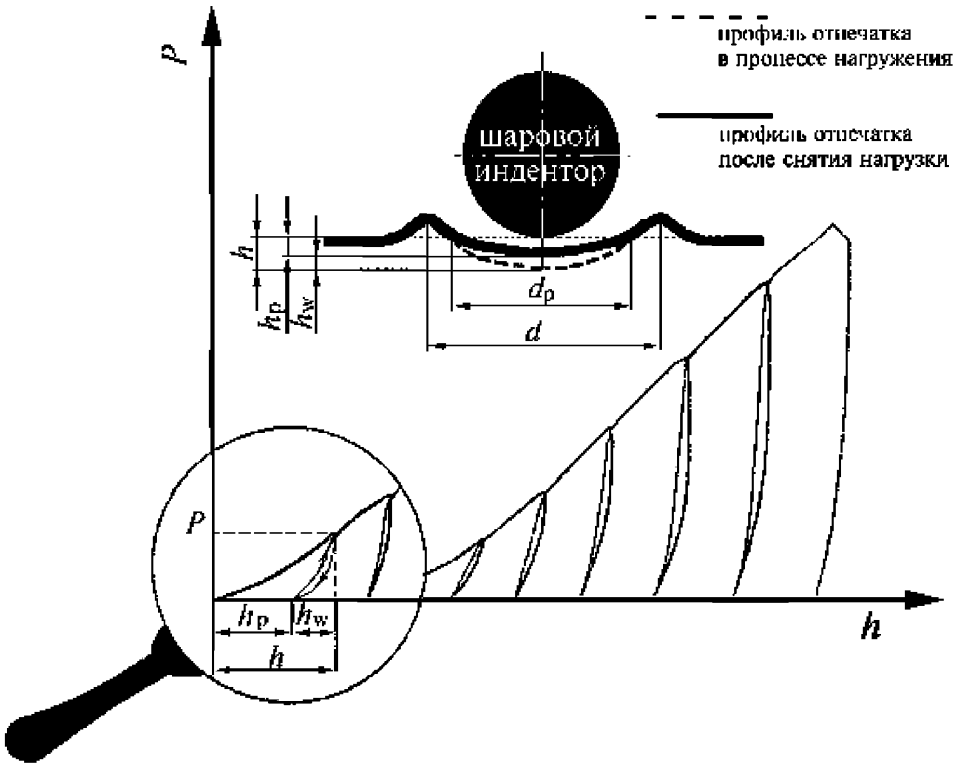
На основе анализа полученных в результате испытаний диаграмм вдавливания шара находятся следующие механические характеристики испытуемого материала: твердость, предел текучести $R_{p0,2}$, временное сопротивление R_m,равномерная деформация A_m. В настоящем приложении описаны наиболее полно разработанные методики определения механических свойств по диаграмме вдавливания шара:

- феноменологическая методика ВНИИАЭС,
- методика ВНИИАЭС с использованием процедуры численного моделирования,
- методика Марковца,
- методика Окриджской национальной лаборатории (США)

Для определения механических свойств по параметрам диаграммы вдавливания требуются корреляционные зависимости, которые могут отличаться для разных материалов. В связи с этим каждая методика определения механических свойств по диаграмме вдавливания шара должна пройти аттестацию для материалов трубопроводов и оборудования АЭС.

Г.1 Феноменологическая методика ВНИИАЭС

Феноменологическая методика ВНИИАЭС [5] позволяет получить из кинетической диаграммы вдавливания шарового индентора стандартную диаграмму одноосного деформирования (рисунок Г.1).



P – нагрузка на индентор, h – глубина внедрения индентора,
h_p – пластическая составляющая глубины вдавливания,
h_w – упругая составляющая глубины вдавливания

Рисунок Г.1 - Диаграмма вдавливания шарового индентора при измерении твердости кинетическим методом

Основой методики является феномен подобия кривых деформирования: одноосного растяжения на участке пластического упрочнения и кривых вдавливания шарового индентора.

Методика основывается на выделении и последующем сопоставлении сходственных коэффициентов в формулах, описывающих степенные зависимости интенсивности напряжений R от интенсивности деформаций ε в процессах растяжения

$$R(\varepsilon) = Y_A \cdot \varepsilon^m \qquad (Г.1)$$

и аналогичные зависимости в процессах вдавливания

$$H_M(\varepsilon_p) = Y_b \cdot \varepsilon_p{}^n , \qquad (Г.2)$$

где Y_A, Y_b- параметры,

H_M - твердость по Майеру, определяемая через диаметр отпечатка d и силу, приложенную к индентору P

$$H_M = \frac{C}{p \cdot d^2 / 4} \quad , \qquad (Г.3)$$

ε_p - деформация при вдавливании, определяемая как отношение диаметра отпечатка d к диаметру индентора D. Диаметр отпечатка d может быть выражен через глубину вдавливания t и диаметр шарового индентора D по формуле

$$d = 2\sqrt{(t \cdot D - t^2)} \, . \qquad (Г.4)$$

Соотношение (Г.2) может быть представлено в виде

$$\frac{P}{d^2} = Y_B \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n . \qquad (Г.5)$$

Коэффициенты в процессах растяжения (Г.1) и сжатия (Г.5) имеют одинаковый физический смысл: Y_A, Y_B - характеризуют запас пластичности материала, m, n - характеризуют способность материала к упрочнению. Следовательно, установив вид зависимостей $Y_A = f(Y_B)$ и $m = g(n)$ для исследуемой стали, можно по диаграмме непрерывного вдавливания шарового индентора полностью восстановить диаграмму одноосного растяжения по зависимости вида:

$$R(\varepsilon) = f(Y_B) \cdot \varepsilon^{g(n)} \, . \qquad (Г.6)$$

Для корпусных сталей 15Х2МФА, 15Х2МНФА зависимость имеет вид

$$R(\varepsilon) = (0{,}032 \cdot Y_B + 665)\, \varepsilon^{0{,}13 - 0{,}12n} \, .$$

Если же исходные данные отсутствуют или недостаточны для построения устойчивых зависимостей, то для диагностики металлов используется другой вариант определения методом кинетической твердости предела текучести и временного сопротивления.

При нахождении предела текучести $R_{p0,2}$ зависимость (Г.6) модифицируется к виду:

$$R_{p0,2} = f(Y_B), \qquad (Г.7)$$

т.е. предел текучести является функцией коэффициента запаса пластичности материала Y_B. Вид этой зависимости подбирается для каждой исследуемой стали.

Для определения временного сопротивления R_m находится точка перегиба (экстремум первой производной) на участке нагружения диаграммы вдавливания в координатах "нагрузка - глубина". В этой точке осуществляется переход из областей малых и средних упругопластических деформаций в область больших упругопластических деформаций с исчерпанием деформационной способности в зоне остаточной пластической деформации под индетором (аналог потери устойчивости при испытаниях на растяжение).

В точке перегиба на участке вдавливания шарового индентора текущее значение твердости по Бринеллю равно

$$H_{max} = \frac{C_{\max}}{p \cdot D \cdot t_{\max}} \quad , \qquad (Г.8)$$

где t_{max} - значение глубины вдавливания, P_{max} - значение прилагаемого усилия в точке перегиба.

Временное сопротивление выражается через текущее значение твердости в точке перегиба:

$$R_m = f\,(H_{max}), \qquad (Г.9)$$

Значение равномерного удлинения A_m рассчитывается по текущему диаметру поверхности контакта соответствующему точке перегиба

$$A_m = f(d_{max} / D), \qquad (Г.10)$$

$$d_{max} = 2\sqrt{(t_{\max} \cdot D - t_{\max}^2)} \,,$$

По полученным значениям предела текучести, временного сопротивления и равномерной деформации может быть восстановлена кривая одноосного деформирования. Для описания поведения истинной кривой одноосного растяжения в истинных кординатах $R(\varepsilon)$ оптимальным выбором является трехпараметрическая экспоненциальная зависимости вида

$$R(\varepsilon) = b - (b-a) \cdot e^{-c \cdot \varepsilon}. \qquad (Г.11)$$

Параметры *a, b, c* в формуле (Г.11) выражаются через значения предела текучести $R_{p,02}$, временного сопротивления R_m , равномерной деформации A_m на основании условий, устанавливающих, что кривая начинается с предела текучести $R_{p,02}$, а точка $\varepsilon = \varepsilon_m$, где

$$\varepsilon_m = ln\,(1 + A_m), \qquad (Г.12)$$

отвечает значению временного сопротивления R_m:

$$R\,(\varepsilon=0) = R_{p,02}\,, \qquad (Г.13)$$

$$R\,(\varepsilon=\varepsilon_m) = \frac{dR}{d\varepsilon}(\varepsilon = \varepsilon_m) = R_m \cdot e^{\varepsilon m}. \qquad (Г.14)$$

Решение системы (Г.13)-(Г.14) относительно неизвестных *a, b, c* может быть сведено к решению относительно с уравнения

$$c = \frac{1}{e_m} ln\left(\frac{(1+c)(x-1)}{x - e^{-c \cdot e_m}}\right) , \qquad (Г.15)$$

где параметр *x* рассчитывается по формуле

$$x = R_m \cdot e^{\varepsilon m} / R_{p0,2}. \qquad (Г.16)$$

Нелинейное уравнение (Г.15) может быть решено численно методом итераций. Если коэффициент *c* найден, остальные два коэффициента даются соотношениями

$$a = Rp_{0,2},$$
$$b = Rp_{0,2} \cdot e^{c\varepsilon m} / (1+c). \qquad (Г.17)$$

В таблице Г.1 приведены уравнения для определения механических свойств различных материалов по параметрам диаграммы вдавливания. Погрешность определения механических свойств по этим уравнениям составляет:

- при определении предела текучести $R_{p0,2}$ – 10 %,
- при определении временного сопротивления R_m – 10 %,
- при определении равномерной деформации A_m – 20 %.

Таблица Г.1 - Значение коэффициентов расчета механических свойств для различных материалов

Марка стали	R_m, МПа	$R_{p0,2}$,МПа	Am, %
Корпусные стали и их сварные швы	$0,382\ H_{max}$	$0.23\ Y_B$	$14\ d_{max} / D$
Сталь 10ГН2МФА и сварные швы	$0,29\ H_{max} + 163$	$0,20\ Y_B$	$20\ d_{max} / D$
Аустенитные стали и их сварные швы	$0,14\ H_{max} + 400$	$0,146\ Y_B$	-
Углеродистые стали и их сварные швы	$0,41\ H_{max}$	$0,165\ Y_B$	$26\ d_{max} / D$

Г.2 Методика ВНИИАЭС определения механических свойств методом кинетического индентирования с использованием процедуры численного моделирования

В основе настоящей методики лежит численная модель процесса вдавливания шара в упругопластический материал.

На основании численной модели строится процедура интерпретации диаграмм вдавливания, полученных методом кинетической твердости, суть которой состоит в нахождении вида кривой одноосного растяжения материала, для которых диаграмма вдавливания, полученная численным расчетом, наилучшим образом согласуется с экспериментальной. По найденной таким методом кривой растяжения определяются значения предела текучести $Rp_{0,2}$, временного сопротивления R_m, относительного равномерного удлинения A_m.

Расчетная модель должна удовлетворять следующим требованиям:

- поведение образца под действием приложенного к нему усилия определяется уравнениями состояния упругопластического материала,
- должен учитываться процесс наплывообразования,
- процедура расчета должна быть устойчива к малому изменению исходных данных,
- должно быть проведено сопоставление с другими расчетными схемами,
- сопоставление с экспериментальными данными должно давать расхождение не более 10% на представительной выборке материалов.

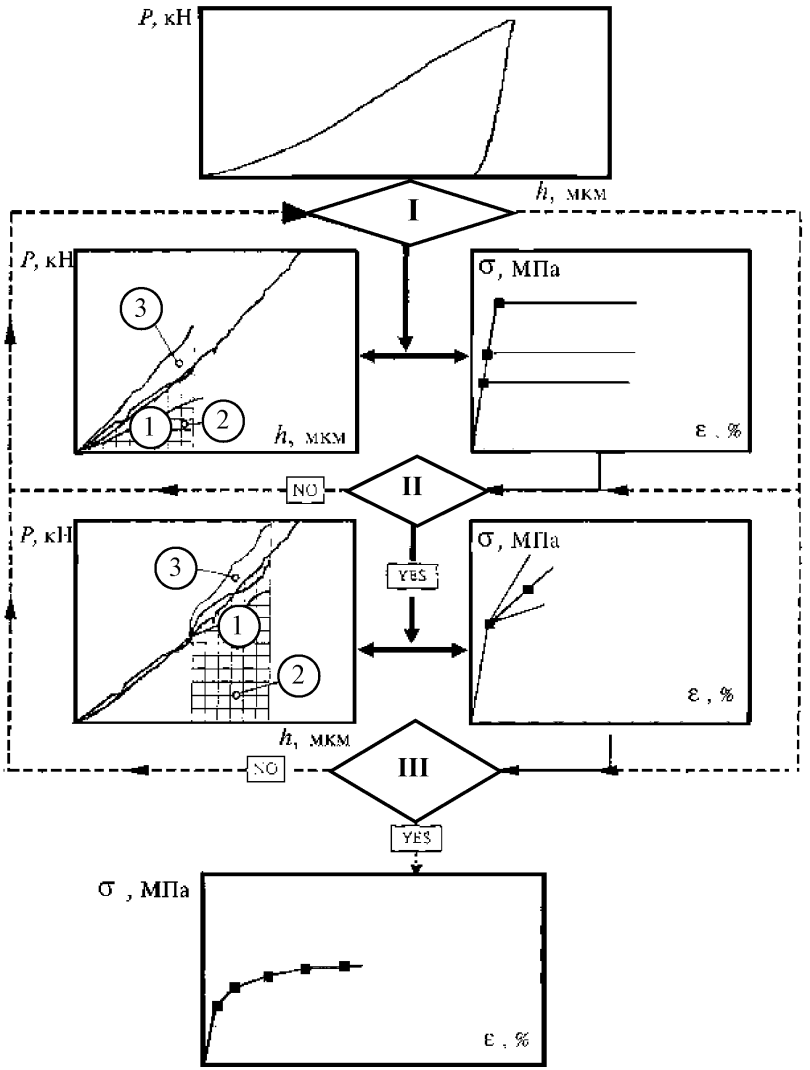
Для решения задачи восстановления диаграммы растяжения по диаграмме вдавливания класс допустимых решений ограничивается трехпараметрической экспоненциальной функцией (Г.11). После того как класс решений выбран, решение задачи восстановления диаграммы растяжения по диаграмме вдавливания сводится к сопоставлению экспериментальной кривой с расчетными с целью нахождения наилучшего соответствия (см. блок-схему на рисунок Г.2). В качестве решения берутся параметры диаграммы, для которой наилучшее совпадение было достигнуто.

Для того чтобы ускорить процесс нахождения решения и повысить его устойчивость, предварительно насчитывается база решений для набора значений (сетки) параметров кривой растяжения, покрывающего всю область изменения параметров для выбранного сорта материала. Выбор наилучшего схождения кривых вдавливания производится в поле, полученном экстраполяцией значений, полученной в узлах расчетной сетки.

Сопоставление кривых вдавливания производится по следующей процедуре:

- производится сглаживание кривых для того чтобы устранить приборные шумы на экспериментальной кривой и колебания решения, связанные с конечным размером ячеек разбиения для расчетной кривой;
- по сглаженной функции вычисляются значения в нескольких ключевых точках;
- ключевые точки определяются заранее так, чтобы представительно характеризовать поведение кривой;
- производится поиск параметров расчетной кривой из базы, для которых мера близости экспериментальной и расчетной кривых достигает минимума. В качестве меры близости кривых принимается среднее квадратичное расхождение значений в ключевых точках;
- в качестве решения задачи берется набор параметров, служащий исходными данными для расчета кривой вдавливания, на которой был достигнут минимум расхождений с экспериментом. По найденному набору параметров строится искомая кривая одноосного растяжения материала.

Использование метода численного моделирования в дополнение к феноменологической методике позволяет повысить достоверность результатов определения механических свойств исследуемого материала по результатам испытаний на вдавливание.



1 – работа, рассчитанная по экспериментальной кривой (A_{exp}); 2, 3 – работа, рассчитанная по расчетной кривой ($A^1_{cal}; A^2_{cal}$); блок I: $A^1_{cal} < A_{exp} < A^2_{cal}$; блок II: $A^i_{cal} = A_{exp}$; блок III: $A^i_{cal} = A_{exp}$

Рисунок Г.2 - Блок-схема восстановления диаграммы одноосного растяжения по

диаграмме вдавливания при измерении методом кинетического индентирования.

Г.3 Методика Марковца

Методика, предложенная Марковцом [6] и развитая в МЭИ [7] предоставляет процедуру определения предела текучести и временного сопротивления испытуемого материала. Разработана методика определения предела текучести, которая состоит в том, чтобы найти текущее значение НВ при выполнении условия

$$d/D = (d/D)_{0,2} \cong 0,0893..\cong 0,09 . \qquad (Г.18)$$

Текущее значение НВ обозначается как твердость на пределе текучести $H_{0,2}$. Эта методика изложена в ГОСТ 22762. По значениям твердости на пределе текучести предлагается определять предел текучести при растяжении $Rp_{0,2}$ в месте испытания. В ГОСТ 22762 рекомендовано соотношение между твердостью на пределе текучести $H_{0,2}$ и пределом текучести $Rp_{0,2}$ для легированных сталей. Для оперативной оценки используется формула

$$Rp_{0,2} \cong 0,333\, H_{0,2} . \qquad (Г.19)$$

Для нахождения значения временного сопротивления вводится новую характеристика - твердость на пределе прочности. Установлено, что при вдавливании шарика в сталь текущее значение твердости по Бринеллю при возрастании степени деформации сначала возрастает, достигает максимума, а затем уменьшается. Сопоставление степеней деформации при максимальных значениях на диаграммах твердости и растяжения показывают их близкие значения. На основании такой аналогии производится связывание максимального значения на диаграмме твердости, обозначаемого как твердость на пределе прочности HB_B, с максимальным значением на диаграмме растяжения R_m. Для углеродистых и легированных сталей используется соотношение

$$R_m \cong 0,32\, HB_B + 1,5\ кГс/мм^2 . \qquad (Г.20)$$

Для оперативной оценки значения временного сопротивления используется формула

$$R_m \cong 0,333\, HB_B . \qquad (Г.21)$$

На основании данной методики значения предела текучести и временного сопротивления могут быть найдены по двум вдавливаниям под разными нагрузками.

Г.4 Методика Окриджской национальной лаборатории

Описываемая методика была разработана коллективом (Хаггаг и др.) Окриджской национальной лаборатории (США) и изложена в стандарте ASTM WK381 [8]. В ее основе лежит регистрация диаграмм вдавливания шарового индентора и их интерпретация с целью определения механических свойств испытуемого материала (в первую очередь - нахождение диаграммы растяжения, предела текучести, временного сопротивления).

Данная методика во многом аналогична феноменологической методике ВНИИАЭС, но имеет следующие особенности

Особенности проведения испытаний

В основе методики лежит многоцикловое нагружение (не менее пяти циклов) с равным шагом по глубине, хотя и допускается возможность проведения одноцикловых испытаний.

В методике подразумевается использование только индентора из карбида вольфрама или нитрида силикона.

В практике применения описываемой методики нагружение индентора проводятся до больших пластик: d/D = 0,7,

Методика обработки результатов измерений

1) Отыскание начальной точки

Согласно методике ABI регистрация диаграммы вдавливания производится после превышения некоторого значения преднагрузки. При обработке диаграммы вдавливания учитывается глубина, соответствующая значению преднагрузки, которая вычисляется путем продолжения линейной части начального участка кривой нагружения.

2) Расчет пластической составляющей вдавливания для многоцикловых диаграмм производится для точек максимумов циклов с учетом углов наклона кривых разгрузки. (Для одноциклового нагружения не предусмотрено).

3) Расчет диаграмм напряжение-деформация в соответствии с приведенными ниже формулами.

При интерпретации диаграммы вдавливания согласно методике ABI производится восстановление кривой одноосного растяжения на основании значений максимального усилия на индентор P и пластической составляющей перемещения индентора в момент максимальной нагрузки h_p для каждого цикла. Последняя величина рассчитывается следующим образом: на диаграмме зависимости силы P от глубины h из точки, соответствующей начальному моменту разгрузки для рассматриваемого цикла проводится прямая, угол наклона которой совпадает с углом наклона начального линейного участка кривой

разгрузки. Значение глубины, соответствующее пересечению этой прямой с осью P=0 принимается в качестве значения пластической составляющей перемещения индентора h_p.

Точка на восстановленной истинной кривой одноосного растяжения $R\ (\varepsilon_p)$ находится из соотношений

$$\varepsilon_p = 0{,}2 \cdot d / D \qquad (Г.22)$$

$$R = \frac{P}{\pi (d/2)^2 \delta}, \qquad (Г.23)$$

где R –истинное напряжение, ε_p – истинная пластическая деформация, δ - множитель, учитывающий наличие переходной области между режимом упругого вдавливания и режимом развитой пластичности (см. ниже), d - диаметр лунки который рассчитывается по глубине h_p с учетом поправки на упругую деформацию лунки и индентора на основании формулы Герца

$$d^3 \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D_p} \right) = \frac{3P}{E_*} \qquad (Г.24)$$

с учетом того, что значение кривизны лунки $D_p/2$ вычисляется на основании ее глубины и диаметра с помощью соотношения

$$(D_p/2)^2 = (D_p/2 - h_p)^2 + d^2$$

В формуле (П3.2) E_* - приведенный модуль упругости, который выражается через модуль упругости и коэффициент Пуассона образца (E_s, ν_s) и индентора (E_i, ν_i) по формуле

$$\frac{1}{E_*} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \qquad (Г.25)$$

Множитель δ рассчитывается по формуле

$$\delta = \begin{cases} 1.12 & \Phi \le 1 \\ 1.12 + \tau \ln \Phi & 1 < \Phi \le 27 \\ \delta_{\max} & \Phi > 27 \end{cases}, \qquad (Г.26)$$

где

$$\Phi = \varepsilon_p E_s / 0{,}43R; \qquad (Г.27)$$

$$\delta_{\max} = 2.87\alpha_m, \tag{Г.28}$$

$$\tau = \frac{\delta_{\max} - 1.12}{\ell n(27)}, \tag{Г.29}$$

α_m – параметр, отражающий чувствительность материала к скорости нагружения. (Для материалов нечувствительных к скорости нагружения α_m=1.0)

Для нахождения предела текучести принята следующая процедура. По текущему значению глубины вдавливания под нагрузкой t рассчитывается текущий диаметр лунки

$$d_t = 2\sqrt{tD - t^2} \tag{Г.30}$$

Связь диаметра лунки со значением приложенного к индентору усилия аппроксимируется зависимостью

$$P / d_t^{\,2} = A\,(d_t / D)^{m-2} \tag{Г.31}$$

где m – индекс Майера, A – коэффициент, характеризующий механические свойства материала. Предел текучести находится из соотношения

$$R_{p0,2} = \beta_m \cdot A + B, \tag{Г.32}$$

где коэффициенты β_m, B зависит от класса материала образца. (Например, для испытаний углеродистой стали индентором из карбида вольфрама диаметра D=0,762 мм рекомендуется выбрать значение β_m=0,22.)

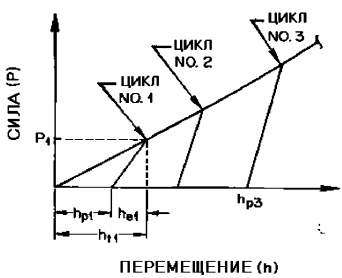


Рисунок Г.3 - Схематическое представление многоцикловой диаграммы вдавливания для методики Окриджской национальной лаборатории

Г.5 Комбинирование измерения твердости с методами акустической эмиссии и контролем магнитной проницаемости

Перспективным направлением является комбинирование измерений методом кинетического твердости, с другими методами анализа структурных превращений в результате упругопластической деформации в зоне вдавливания индентора [2]. Параллельное изменение магнитных свойств при вдавливании шарового индентора получило название метода кинетической ферритометрии (рисунок Г.4). Данный метод предназначен для оценки степени усталостного повреждения конструкций, выполненных из аустенитных сталей после длительных сроков эксплуатации. Определение степени усталостного повреждения реализуется путем определения изменения содержания ферритной фазы в аустенитной стали в процессе локального пластического деформирования. Принцип метода основан на явлении изменения количества ферритной фазы в аустенитных материалах, обусловленного трансформацией кристаллической гамма-решетки аустенита в альфа- и дельта-феррит под действием циклической нагрузки. По скорости прироста содержания ферритной фазы в процессе поверхностного деформирования металла методом кинетического индентирования при вдавливании шарового индентора производится оценка состояния материала в данном месте контроля.

Метод магнитного акустическо-эмиссионного контроля физико-механических свойств материалов при непрерывном циклическом локальном деформировании шаровым индентором используется для оценки циклической повреждаемости исследуемого материала. В основе метода лежит эффект возникновения акустической эмиссии при пластической деформации под индентором (рисунок Г.5). Пластически продеформированный материал при повторном нагружении не излучает сигналы акустической эмиссии пока максимально достигнутая величина нагрузки не будет превышена (эффект Кайзера), таким образом, параметры акустической эмиссии измеряются при стандартном однократном вдавливании индентора. Для этих целей измерительный узел кинетического прибора должен быть дополнен широкополосным акустическим датчиком. С целью унификации процесса измерения датчик-преобразователь помещается непосредственно на индентор, изготовленный из материала с низким акустическим сопротивлением, что также позволяет существенно снизить энергетические потери при записи сигналов акустической эмиссии.

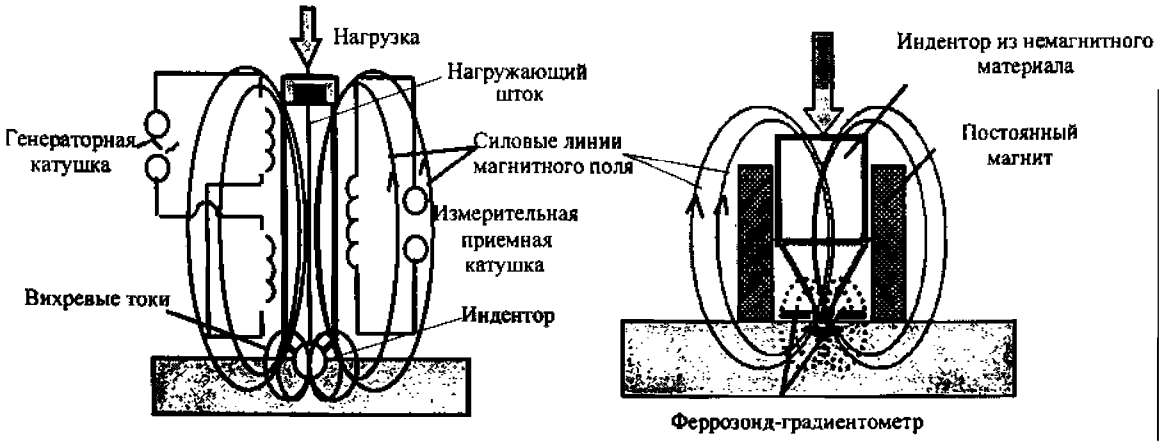


Рисунок Г.4 - Принципиальная схема реализации метода кинетической ферритометрии.

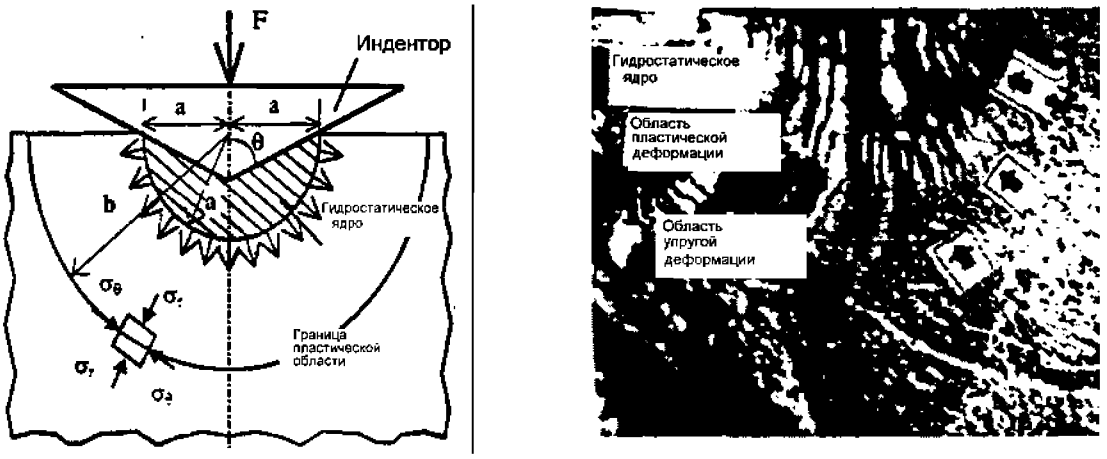


Рисунок Г.5 - Метод акустическо-эмиссионного контроля при вдавливании индентора. Слева – схематическое изображение зон излучения сигналов аккустической эмиссии. Справа – фотоизображение сечения образца с обозначенными на нем зонами пластической деформации.

Г.6 Приборы реализующие метод автоматического вдавливания шара

Г.6.1 Прибор автоматизированный универсальный для измерения магнитных и механических характеристик металлов по диаграмме вдавливания ТЕСТ-5У

Производитель: ЦМиР (ВНИИАЭС), г. Москва

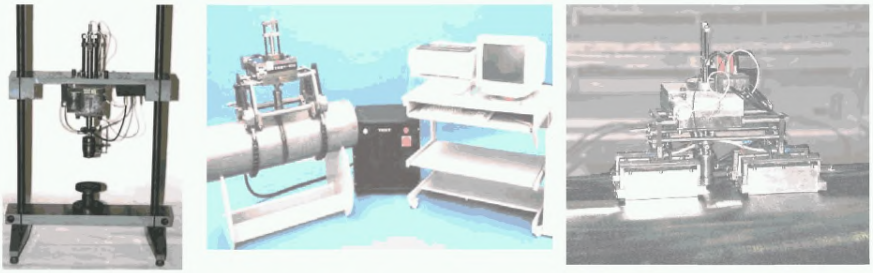


Рисунок Г.6 - Прибор ТЕСТ-5У (слева направо) на лабораторной, роликовой и магнитной рамах.

Прибор автоматизированный для измерений магнитных и механических характеристик металлов по диаграмме вдавливания ТЕСТ-5У (далее по тексту – прибор, ТЕСТ-5У) предназначен

- для измерений твердости по Бринеллю;
- для контроля механических свойств (временного сопротивления, предела текучести, равномерной деформации, коэффициента упрочнения) исследуемых материалов;
- при комплектации измерителя ферритометрической системой – для измерения содержания ферритной фазы в металлах и для регистрации изменения магнитной проницаемости в процессе вдавливания;
- при комплектации измерителя акустико-эмиссионной системой – для измерения акустико-эмиссионных сигналов, инициируемых под индентором в процессе вдавливания.

Внешний вид прибора ТЕСТ-5У представлен на рисунке Г.6. Технические характеристики приведены в таблице Г.2.

Прибор ТЕСТ-5У зарегистрирован Государственном реестре средств измерений Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии под номером №27722-04 и допущен к применению в Российской Федерации. При аттестации прибора использована база данных материалов оборудования и трубопроводов АЭС в различных состояниях (исходное состояние, состояния эксплуатационного и модельного старения, радиационного охрупчивания).

Таблица Г.2 - Технические характеристики прибора ТЕСТ-5У

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерения твердости, НВ	80 ÷ 450
Предел допускаемой относительной погрешности прибора при поверке образцовыми мерами твердости 2 разряда типа МТБ по ГОСТ 9031 не превышает: Мера МТБ 100 ± 25 НВ. не более, % Мера МТБ 200 ± 50 НВ. не более, % Мера МТБ 400 ± 50 НВ. не более, %	 ±5,0 ±4,0 ±4,0
Предел допускаемой относительной погрешности, % при измерении условного предела текучести и временного сопротивления для сталей, указанных ниже: сталь углеродистая качественная конструкционная, сталь корпусная в различных состояниях, сталь 10ГН2МФА, аустенитная сталь, сварные соединения указанных выше сталей.	±10,0
Диапазон измерения содержания ферритной фазы, %	0 ÷ 20
Предел допускаемой относительной погрешности измерения содержания ферритной фазы, %	15
Диапазон измерения амплитуды акустических сигналов, дБ (приведенные к 1 мкВ)	28-100
Габаритные размеры, не более, мм электронного блока управления приводом головки-редуктора измерительного узла лабораторной силовой рамы ферритометрической системы акустико-эмиссионной системы	 250×420×460 400×400×400 60×60×200 80×70×1200 300×250×350 140x450x370
Масса, не более электронного блока управления приводом головки-редуктора измерительного узла ферритометрической системы акустико-эмиссионной системы	 20 20 5 7 10

Г.6.2 Прибор МЭИ – Т7

Производитель: МЭИ ТУ, г. Москва.

Переносной прибор МЭИ – Т7 позволяет проводить безобразцовый контроль механических свойств и микроструктуры металла непосредственно в изделии. Автоматический прибор позволяет выполнить экспресс-контроль механических характеристик конструкционных материалов на микрошлифах с получением диаграмм условных и истинных напряжений в пределах равномерной деформации. Методы применяемы в приборах обладают высокой локальностью и дают возможность выявить распределение механических свойств в локальных зонах наклепа, сварных соединений, концентраторов напряжений.

Внешний вид прибора МЭИ – Т7 представлен на рисунке Г.7. Технические характеристики приведены в таблице Г.3.

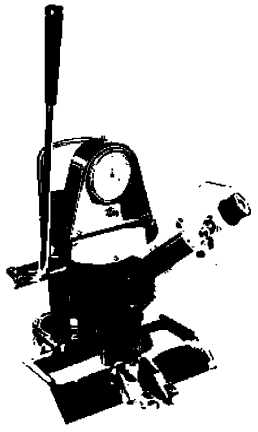


Рисунок Г.7 - Прибор МЭИ – Т7

Таблица Г.3 - Технические характеристики прибора МЭИ – Т7

Наименование характеристики	Значение
Переносной прибор	
Диапазон изменения нагрузок, Н	0...2000
Погрешность измерения нагрузки , %	1,0
Диапазон измерения твердости, ед. НВ	8...450
Погрешность измерения твердости, %	± 3,0
Погрешность определения механических свойств по сравнению с методом растяжения, %	5,0
Время однократного испытания с определением механических свойств, мин	3...5
Габариты, мм	250x270x250
Масса, кг	7
Автоматизированный прибор	
Диапазон изменения нагрузок, Н	0...2000
Погрешность измерения нагрузки , %	1,0
Диапазон изменения перемещений индентора, мкм	0...1000
Погрешность измерения перемещения, %	1,5
Погрешность измерения твердости, ед. HB, HV, HRC	± 3
Погрешность определения механических свойств по сравнению с методом растяжения, %	5,0
Время однократного испытания с выдачей диаграмм растяжения и значений механических свойств, мин	3...5
Габариты, мм	180x220x220
Масса, кг	10

Г.6.3 Переносная мини-лаборатория ПИТМ-ДВ-02

Производитель: НПФ «Экспресс-измерения», г.Москва.

Малогабаритный автоматизированный прибор ПИТМ-ДВ-02 с возможностями испытательной машины предназначен для оперативного макромеханического испытания материалов, как на небольших образцах, так и непосредственно на изделиях. Позволяет получить предел текучести, временное сопротивление, твердость, кривую упрочнения, равномерную деформацию, относительное удлинение.

Прибор имеет сертификат Госстандарта РФ, внесен в Государственный Реестр средств измерений под №17227-98 и допущен к применению в Российской Федерации.

Внешний вид прибора ПИТМ-ДВ-02 представлен на рисунке Г.8.

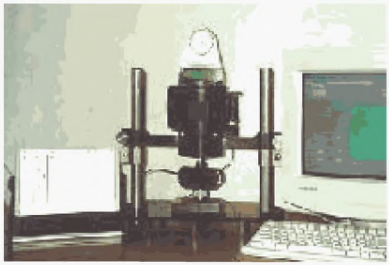


Рисунок Г.8 - Прибор ПИТМ-ДВ-02

Г.6.4 Прибор SSM-M1000

Производитель: Advanced Technology Corporation (США).

Прибор SSM-M1000 (Патент США № 4,852,397) реализует методику Окриджской национальной лаборатории (США) измерения механических свойств методом автоматического вдавливания шара.

Внешний вид прибора SSM-M1000 представлен на рисунке Г.9.



Рисунок Г.9 - Прибор SSM-M1000

Прибор SSM-M1000 имеет следующие характеристики:

- результаты становятся доступны немедленно после испытания,
- легко транспортируется,
- мощный и портативный двигатель обеспечивает нагрузку вдавливания до 4.5 кН,
- для стальных трубопроводов и сосудов давления используется электрический магнит для установки прибора,
- полностью автоматизированное управление от компьютера.

Библиография

[1] С.Г.Рабинович. Погрешности измерений, Л.,Энергия. 1978.-262с.

[2] А.Г. Колмаков, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров. Методы измерения твёрдости. Справочное издание, М.: «Интермет Инжиниринг», 2000. -128с.

[3] Металловедение и термическая обработка стали. Справочник. Под ред. Бернштейна М.Л. и Рахштадта А.Г., Том 1.2. Методы испытаний и исследова-ния. М.: Металлургия, 1991, 462с.

[4] Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн.3. Электромагнитный контроль Под ред. В.В. Сухорукова. М.: «Высшая школа», 1992.-312с.

[5] М.Б.Бакиров, В.В.Потапов Заводская лаборатория, 2000. т.66. № 12. с. 35-44.

[6] Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979, 192с.

[7] В.М.Матюнин, В.Г.Борисов, Б.А.Юзиков Дефектоскопия. 1995. №8. с.61-68.

[8] Стандарт США ASTM WK381. Standard Test Methods for Automated Ball Indentation Testing of Metallic Samples and Structures to Determine Stress-Strain Curves and Ductility at Various Test Temperatures

gost.e-ecolog.ru