ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 72116— 2025

Расчеты и испытания на прочность

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ПОДВЕРГАЕМЫХ МАЛОЦИКЛОВЫМ УСТАЛОСТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ, НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2025

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Интеллект-НН» (ООО «Интеллект-НН»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 132 «Техническая диагностика. Расчеты и испытания на прочность»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 июня 2025 г. № 537-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2025

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения, обозначения и сокращения 2
4 Общие положения 4
5 Требования безопасности 4
6 Требования к средствам измерений 5
7 Требования к объектам контроля 7
8 Подготовка к проведению измерений 7
9 Проведение измерений 7
10 Обработка результатов измерений 8
11 Оформление результатов измерений 8
Приложение А (обязательное) Порядок проведения тарировочных испытаний 9
Приложение Б (обязательное) Определение термоакустических коэффициентов 10
Приложение В (справочное) Пример определения остаточного ресурса 11
Приложение Г (рекомендуемое) Форма протокола измерений 12

Введение

В процессе эксплуатации многие элементы высоконагруженных конструкций работают в условиях малоцикловой усталости. На стадии до появления и развития макротрещины выделяют период, связанный с изменением структуры, зарождением и накоплением рассеянных микроповреждений. Процесс накопления повреждений начинается практически сразу после приложения переменной нагрузки, протекает скрытно, практически без видимых внешних признаков. Скрытые процессы деградации материала приводят к изменению физико-механических характеристик — модулей упругости, прочностных и других характеристик. Завершается период накопления повреждений образованием макротрещины. При этом по условиям безопасной эксплуатации для многих конструкций макротрещина не допускается. Более того, ставится задача оценки степени деградации (поврежденности) материала в процессе его эксплуатации и оценки фактического остаточного ресурса.

Процесс разрушения зависит от множества факторов, теоретически учесть вклад каждого из которых практически невозможно. Этим объясняется значительный разброс как расчетных, так и экспериментальных данных. Контроль повреждений в материале в течение этого периода с помощью традиционных средств неразрушающего контроля затруднен. Тем не менее, задачи оценки степени деградации с использованием методов неразрушающего контроля решаются. К таким методам контроля можно отнести акустические методы[1)].

Настоящий стандарт разработан с целью обеспечения методической основы применения акустического метода для определения поврежденности материала элементов конструкций, подвергаемых малоцикловым воздействиям, и определения его фактического остаточного ресурса.

[1)] Хлыбов А.А., Углов А.Л. Способ оценки поврежденности материала конструкций: Патент на изобретение RU 2 507 514 C1, — Опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5.

Гончар А.В., Мишакин В.В., Клюшников В.А., Курашкин К.В. Способ определения усталостной поврежденности метастабильных аустенитных сталей: Патент на изобретение RU 2 779 974 C1, — Опубл. 16.09.2022, Бюл. № 26.

Хлыбов А.А., Углов А.Л. Экспериментальное исследование закономерностей накопления усталостных повреждений в стали 08Х18Н10Т при малоцикловом блочном нагружении с использованием акустического метода// Физическая мезомеханика. — 2015. — Т. 18. — № 6. — С. 111—115.

Хлыбов А.А., Углов А.Л. Исследование накопления усталостных повреждений в образцах из стали 08Х18Н10Т при малоцикловой усталости//Известия вузов. Черная металлургия. — 2016. — Т. 59. — № 3. — С. 185—189.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Расчеты и испытания на прочность

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ПОДВЕРГАЕМЫХ МАЛОЦИКЛОВЫМ УСТАЛОСТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ, НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Calculation and strength testing. Determination of damage and residual life of structural elements exposed to low-cycle fatigue impacts based on acoustic measurements

Дата введения — 2026—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает общие требования к методике выполнения измерений акустических характеристик, чувствительных к накоплению повреждений в материале элементов конструкций, подвергаемых малоцикловому усталостному нагружению.

Настоящий стандарт предназначен для определения величины поврежденности и фактического остаточного ресурса материала стальных конструктивных элементов, подвергаемых малоцикловым усталостным воздействиям.

Регламентируемая настоящим стандартом методика позволяет на основании комплекса проведенных измерений сделать оценку уровня эксплуатационной поврежденности в точке измерений при неизвестных параметрах усталостных воздействий.

Номенклатура объектов, поврежденность и остаточный ресурс материала которого могут быть определены в соответствии с регламентируемой методикой, устанавливается в техническом задании на контроль с учетом результатов тарировочных экспериментов, порядок проведения которых описан в приложении А.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.001 Система стандартов безопасности труда. Ультразвук. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.1.004 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования

ГОСТ 12.1.019 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

ГОСТ 12.2.003 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности

ГОСТ 12.3.002 Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности

ГОСТ 25.502 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость

ГОСТ 427 Линейки измерительные металлические. Технические условия

ГОСТ 2768 Ацетон технический. Технические условия

ГОСТ 2789 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики

ГОСТ 6616 Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия

ГОСТ 6651 Государственная система обеспечения единства измерений. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний

Издание официальное

ГОСТ 10587 Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия

ГОСТ 17299 Спирт этиловый технический. Технические условия

ГОСТ 20415 Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения

ГОСТ 20799 Масла индустриальные. Технические условия

ГОСТ 23207 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения

ГОСТ 34100.3 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения

ГОСТ Р 8.563 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений

ГОСТ Р 8.736 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения

ГОСТ Р 12.1.038 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

ГОСТ Р 55725 Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые пьезоэлектрические. Общие технические требования

ГОСТ Р ИСО 5577 Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь

ГОСТ Р ИСО 5725-2 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений

ГОСТ Р ИСО 16810 Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Общие положения

ГОСТ Р МЭК 60745-2-3 Машины ручные электрические. Безопасность и методы испытаний. Часть 2-3. Частные требования к шлифовальным, дисковым шлифовальным и полировальным машинам с вращательным движением рабочего инструмента

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения, обозначения и сокращения

3.1 В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 25.502, ГОСТ 20415, ГОСТ Р 55725, ГОСТ Р ИСО 5577, ГОСТ Р ИСО 16810, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **тарировочный эксперимент:** Комплекс экспериментальных исследований на стандартных образцах из материала объекта контроля, в ходе которых устанавливают коэффициенты регрессионной связи усредненного акустического параметра поврежденности с относительным числом циклов усталостного нагружения при заданной амплитуде напряжения или деформации.

3.1.2 **тарировочный образец:** Стандартный образец из материала объекта контроля для испытаний на малоцикловую усталость, предназначенный для проведения тарировочных экспериментов.

3.1.3 **контрольный образец;** КО: Образец из материала объекта контроля с заданными геометрической формой и размерами, используемый для настройки и оценки параметров средств измерений, а также для проверки работоспособности методики определения поврежденности и остаточного ресурса, регламентируемой настоящим стандартом.

Примечание — Так же, как для тарировочного образца, в качестве КО может использоваться стандартный образец для испытания на малоцикловую усталость.

3.1.4 **эффективная длительность импульса:** Число экстремумов с амплитудой, превышающей 20 % (–14 дБ) от максимума огибающей.

3.1.5

текущее число циклов нагружения *N*: Число циклов напряжений или деформаций, которое выдержал нагружаемый объект до рассматриваемого момента испытаний.

[ГОСТ 23207—78, статья 41]

3.1.6

циклическая долговечность N_f: Число циклов напряжений или деформаций, выдержанных нагруженным объектом до образования усталостной трещины определенной протяженности или до усталостного разрушения.

[ГОСТ 23207—78, статья 42]

3.1.7

относительное число циклов $\frac{N}{N_f}$: Отношение текущего числа циклов нагружения к циклической долговечности объекта испытаний при данном режиме испытаний.

[ГОСТ 23207—78, статья 43]

3.2 В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

A — параметр акустической анизотропии;

A^0 — начальное значение параметра A, соответствующее неповрежденному материалу;

A^* — значение параметра, A, соответствующее появлению макротрещины или разрушению;

d_1 — безразмерный акустический параметр, $d_1 = \frac{t_1}{t_3}$;

d_1^0 — начальное значение параметра d_1, соответствующее неповрежденному материалу;

d_1^* — значение параметра, d_1, соответствующее появлению макротрещины или разрушению;

d_2 — безразмерный акустический параметр, $d_2 = \frac{t_2}{t_3}$;

d_2^0 — начальное значение параметра d_2, соответствующее неповрежденному материалу;

d_2^* — значение параметра, d_2, соответствующее появлению макротрещины или разрушению;

$f_н$ — номинальная частота преобразователя, МГц;

h — толщина материала в зоне контроля, мм;

k_1, k_2 … — коэффициенты регрессионной зависимости усредненного акустического параметра поврежденности от относительного числа циклов;

k_{Ts} — термоакустический коэффициент сдвиговых волн, 1/°С;

k_{Tl} — термоакустический коэффициент продольных волн, 1/°С;

k_{TR} — термоакустический коэффициент поверхностных волн, 1/°С;

T — температура поверхности объекта контроля, °С;

t_1 — задержка импульса сдвиговой волны, поляризованной вдоль нагрузки, нс;

t_2 — задержка импульса сдвиговой волны, поляризованной поперек нагрузки, нс;

t_3 — задержка импульса продольной волны, нс;

t_R — задержка импульса поверхностной волны, нс;

t_R^0 — начальное значение параметра, t_R, соответствующее неповрежденному материалу;

t_R^* — значение параметра, t_R, соответствующее появлению макротрещины или разрушению;

Ψ_{d_1} — акустическая характеристика поврежденности, связанная с параметром d_1;

Ψ_{d_2} — акустическая характеристика поврежденности, связанная с параметром d_2;

Ψ_A — акустическая характеристика поврежденности, связанная с параметром A;

Ψ_R — акустическая характеристика поврежденности, связанная с параметром t_R;

$\overline{\Psi}$ — усредненный акустический параметр поврежденности;

$\delta R_р$ — расчетный относительный остаточный усталостный ресурс, %;

$\delta R_ф$ — фактический относительный усталостный ресурс, %,

$$\delta R_ф = \left(1 - \frac{N}{N_f}\right) \cdot 100\ \%.$$

3.3 В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ОК — объект контроля;

ПО — программное обеспечение;

ПЭП — пьезоэлектрический преобразователь;

СИ — средство измерений;

ЭАП — электроакустический преобразователь;

ЭМАП — электромагнитно-акустический преобразователь;

УИ — ультразвуковой импульс.

4 Общие положения

4.1 Методика основана на существующей зависимости между параметрами распространения упругих волн и уровнем микроповреждений в структуре стали ОК, эксплуатируемого в режиме малоциклового усталостного нагружения.

4.2 В методике используют ручной велосиметрический способ ультразвукового эхо- и теневого методов контроля с применением прямых совмещенных ЭАП объемных продольных и поперечных волн (для эхо-метода), а также раздельно-совмещенных ЭАП поверхностных волн (для теневого метода).

4.3 В качестве ЭАП могут быть использованы ПЭП по ГОСТ Р 55725 или специально разработанные ЭМАП с метрологическими характеристиками, соответствующими ПЭП по ГОСТ Р 55725.

4.4 Вид излучаемого сигнала — радиоимпульс с высокочастотным (ультразвуковым) заполнением, с плавной огибающей и эффективной длительностью от 8 до 10 экстремумов основной частоты.

4.5 Измеряемые характеристики поврежденности являются усредненными по толщине материала и площади ультразвукового пучка.

4.6 Непосредственно измеряемыми величинами являются задержки УИ (время распространения упругих волн разных типов в материале).

4.7 Влияние температуры на точность измерения информативных акустических параметров учитывают с помощью соответствующих термоакустических коэффициентов, имеющих размерность $°C^{-1}$.

Их значения должны содержаться в базе данных используемых СИ или могут быть получены экспериментально в соответствии с приложением Б.

4.8 Характеристики поврежденности определяют на основании обработки массивов информативных акустических параметров с использованием имеющейся базы данных или результатов тарировочных экспериментов.

4.9 Расчетный относительный остаточный ресурс материала ОК в зоне измерений δR_p определяют по имеющейся в базе данных или полученной в ходе тарировочных экспериментов регрессионной зависимости усредненного акустического параметра поврежденности $\overline{\Psi}$ от относительного числа циклов $\frac{N}{N_f}$

$$\overline{\Psi} = f\left(\frac{N}{N_f}\right). \quad (1)$$

4.10 Рекомендуемая настоящим стандартом методика может служить основой для составления методик выполнения измерений по ГОСТ Р 8.563.

4.11 При разработке методик выполнения измерений необходима их верификация на основании представительной базы испытанных ОК.

5 Требования безопасности

5.1 К выполнению измерений для определения поврежденности, регламентируемых настоящим стандартом, допускают специалистов, прошедших специальную подготовку и проверку знаний эксплуатации используемого оборудования, руководствующихся в своей работе нормативными и техническими документами по акустическим методам контроля, прошедших обучение работе с применяемыми СИ и аттестованных на знание правил охраны труда и безопасности.

5.2 При проведении измерений специалист должен руководствоваться требованиями ГОСТ 12.1.001, ГОСТ 12.2.003, ГОСТ 12.3.002 и правилами технической безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей по ГОСТ 12.1.019 и ГОСТ Р 12.1.038.

5.3 Измерения проводят в соответствии с требованиями безопасности, указанными в инструкции по эксплуатации аппаратуры, входящей в состав используемых СИ.

5.4 При организации работ по проведению измерений должны быть соблюдены требования пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004.

6 Требования к средствам измерений

6.1 Используемые СИ должны соответствовать требованиям к выполняемым измерениям, установленным национальным законодательством и перечисленным в 6.2—6.7. Условия применения СИ должны соответствовать требованиям изготовителя СИ. Результаты измерений должны быть выражены в единицах величин, допущенных к применению в соответствии с национальным законодательством.

6.2 Документация СИ должна содержать методику выполнения измерений, а также документы, устанавливающие:

- назначение и область применения СИ;
- состав и основные характеристики средств аппаратного и программного обеспечения, включающие погрешность измерения параметров УИ;
- методы и средства достижения совместимости СИ, в том числе информационной, электрической, энергетической, программной, конструкторской, эксплуатационной.

6.3 Описание функциональных возможностей СИ в эксплуатационных, конструкторских и программных документах должно содержать характеристики аппаратного и программного обеспечения.

6.4 В комплект СИ должны входить ЭАП следующих типов:

- прямые совмещенные преобразователи продольных и поперечных волн;
- раздельно-совмещенные преобразователи поверхностных волн.

Номинальные частоты $f_н$ используемых ЭАП в зависимости от толщины материала h в зоне контроля выбирают следующим образом:

- при h от 2 до 3 мм $f_н$ = 10 МГц;
- при h от 3 до 10 мм $f_н$ = 5 МГц;
- при h более 10 мм $f_н$ = 2,5 МГц.

Примечания

1 Допускается использование преобразователей с номинальными частотами, отличающимися от указанных, на ±25 %.

2 База преобразователей поверхностных волн (расстояние между точкой ввода и точкой приема первичных преобразователей) должна быть не менее удвоенного значения величины h.

6.5 При использовании в качестве ЭАП ПЭП по ГОСТ Р 55725 применяют следующие преобразователи:

- прямые совмещенные преобразователи продольных и поперечных волн типа А111;
- раздельно совмещенные преобразователи поверхностных волн типа А122-60.

6.6 При использовании в качестве ЭАП ЭМАП их технические характеристики должны соответствовать требованиям 4.4, 6.4.

6.7 Основные нормируемые характеристики СИ

6.7.1 Дискретизация УИ с частотой не менее 150 МГц.

6.7.2 Разрядность аналого-цифрового преобразователя — не менее 10.

6.7.3 Определение временны́х интервалов с абсолютной погрешностью не более ±2 нс.

Примечание — Дополнительная абсолютная погрешность измерения временны́х интервалов вследствие изменения температуры поверхности ОК не должна превышать 0,1 нс/10 °С.

6.7.4 Формирование излучаемого сигнала в виде радиоимпульса с высокочастотным (ультразвуковым) заполнением, плавной огибающей с эффективной длительностью от 8 до 10 экстремумов.

6.8 Основные функциональные требования к ПО СИ

6.8.1 ПО должно иметь метрологическую аттестацию.

6.8.2 ПО СИ должно обеспечивать:

- учет условий проведения акустических измерений на ОК, в частности температурный режим;

- определение границ УИ, временно́е расстояние между которыми соответствует эффективной длительности импульса;
- определение информативных временны́х интервалов;
- расчет акустических параметров поврежденности с использованием статистической обработки в соответствии с требованиями ГОСТ 34100.3, ГОСТ Р 8.736, ГОСТ Р ИСО 5725-2;
- регрессионную обработку результатов тарировочных экспериментов;
- определение остаточного ресурса материала ОК в зоне измерений.

6.8.3 ПО СИ должно поддерживать интерактивный режим работы оператора.

6.8.4 ПО СИ должно поддерживать режим генерирования диагностических сообщений при появлении аппаратных или программных сбоев, приводящих к недопустимым ошибкам определения информативных акустических параметров.

6.8.5 Первичную цифровую информацию следует постоянно хранить на внешних носителях, защищенных от несанкционированного доступа.

6.9 Вспомогательные устройства и материалы

6.9.1 Инструмент шлифовальный для подготовки поверхности по ГОСТ Р МЭК 60745-2-3.

6.9.2 Термопреобразователь поверхностный типа ТПП 13 или ТПП 10 по ГОСТ 6616 для измерения температуры поверхности ОК.

6.9.3 Инструмент для обозначения точек измерения, например строительный маркер с несмываемой светлой краской.

6.9.4 Жидкость обезжиривающая (спирт по ГОСТ 17299 или ацетон по ГОСТ 2768) для подготовки поверхности.

6.9.5 Жидкость контактная для ввода продольных колебаний (индустриальное масло марок И-30А, И-40А, И-50А по ГОСТ 20799, глицерин, вода).

6.9.6 Жидкость контактная для ввода сдвиговых колебаний (эпоксидная смола по ГОСТ 10587, жидкость SWC, мед), вязкость которой при температуре измерения должна соответствовать вязкости эпоксидной смолы при температуре 25 °С: от 12 до 25 кг/(м · с) по ГОСТ 10587.

6.9.7 Емкости для хранения контактной жидкости, кисти для нанесения контактной жидкости на поверхность изделий, ветошь для протирки ультразвуковой аппаратуры и рук специалиста, линейка металлическая 500 мм по ГОСТ 427 для разметки ОК.

6.10 Контрольные образцы

6.10.1 Контрольные образцы изготавливают в виде темплетов, вырезанных из материала ОК, аналогичных исследуемому, не подвергавшихся малоцикловым усталостным нагрузкам.

6.10.2 Контрольные образцы изготавливают прямоугольной формы с большей стороной, параллельной направлению предполагаемой нагрузки ОК.

6.10.3 Бóльшая сторона контрольных образцов должна не менее, чем в 1,5 раза превышать базу используемого преобразователя поверхностных волн L_R.

6.10.4 Расстояние l от центра контрольного образца (где проводятся акустические измерения) до его большей стороны должно быть не менее значения, вычисляемого по формуле

$$l = r + \mathrm{tg}\left[\arcsin\left(0{,}61\frac{v_l}{rf}\cdot 10^{-3}\right)\right]\cdot\left(4h - \frac{r^2 f}{v_l}\cdot 10^3\right), \qquad (2)$$

где r — радиус излучателя;

v_l — скорость упругих продольных волн в материале ОК;

h — толщина ОК в зоне измерений.

6.11 Тарировочные образцы

6.11.1 В качестве тарировочных образцов используют стандартные образцы для испытания на усталость прямоугольного сечения типа IV по ГОСТ 25.502 толщиной не менее 5 мм.

6.11.2 Могут быть использованы стандартные образцы круглого сечения типа II по ГОСТ 25.502 диаметром не менее 12 мм, на рабочей поверхности которых выполнены две плоско-параллельные лыски с размерами, обеспечивающими возможность установки ЭАП с учетом соотношения (2).

7 Требования к объектам контроля

7.1 Материал ОК в зоне контроля не должен содержать поверхностных и внутренних дефектов, обнаруживаемых стандартными методами дефектоскопии.

7.2 Шероховатость поверхности *Ra* ОК в точках измерений — не более 2,5 мкм по ГОСТ 2789.

7.3 Перед установкой ЭАП поверхность ОК очищают от грязи, окалины, ржавчины и обезжиривают (в случае использования ПЭП).

7.4 При использовании в качестве ЭАП ПЭП температура поверхности ОК должна быть в пределах от 5 °С до 40 °С.

7.5 При использовании в качестве ЭАП ЭМАП допустимая температура поверхности ОК определяется функциональными характеристиками ЭМАП.

7.6 Расстояние *l* от точки ввода акустической волны до боковых граней ОК должно быть не менее значения, вычисляемого по формуле (2).

8 Подготовка к проведению измерений

8.1 Подготовка к измерениям должна включать в себя следующие организационно-технические мероприятия:

а) подготовку (при необходимости) поверхности металла к контролю согласно 7.2, 7.3;

б) обеспечение безопасности работы персонала, осуществляющего контроль, в соответствии с инструкциями по технике безопасности;

в) подготовку к работе СИ.

8.2 Подготовка к работе СИ

8.2.1 Проверяют работоспособность СИ на контрольном образце в соответствии с руководством по эксплуатации СИ, включая оценку погрешности измерения временных интервалов, которая должна удовлетворять требованиям 6.7.3.

8.2.2 Устанавливают параметры СИ в соответствие с характеристиками ОК из базы данных ПО СИ.

Примечание — В случае их отсутствия в базе данных соответствующие параметры получают в ходе тарировочных экспериментов (приложение А).

8.2.3 Измеряют температуру поверхности ОК с погрешностью не более 1 °С.

9 Проведение измерений

9.1 Смачивают (при использовании ПЭП) поверхность ОК в точках измерений контактной жидкостью для ввода сдвиговых волн.

9.2 Устанавливают в точке измерений преобразователь сдвиговых волн, ориентирую его поляризацию вдоль направления нагрузки.

9.3 Проводят измерения в таком количестве, чтобы фактическая погрешность оценки среднего значения задержки t_1 не превосходила допустимой величины в соответствии с 8.2.1.

9.4 Изменяют поляризацию сдвиговых волн на 90°.

9.5 Проводят измерения по 9.3, средствами ПО СИ определяют среднее значение задержки t_2.

9.6 В точке измерений устанавливают ПЭП продольных волн (с необходимой заменой контактной жидкости) или соответствующим образом изменяют режим работы ЭМАП.

9.7 Проводят измерения по 9.3, средствами ПО СИ определяют среднее значение задержки t_3.

9.8 В точке измерений устанавливают ЭАП поверхностных волн таким образом, чтобы направление распространения УИ совпадало с направлением действия нагрузки.

9.9 Проводят измерения по 9.3, средствами ПО СИ определяют среднее значение задержки t_R.

10 Обработка результатов измерений

10.1 Рассчитывают параметры d_1, d_2 по формулам:

$$d_1 = \frac{t_1\left[1 - k_{Ts}(T - 20)\right]}{t_3\left[1 - k_{Tl}(T - 20)\right]}, \tag{3}$$

$$d_2 = \frac{t_2\left[1 - k_{Ts}(T - 20)\right]}{t_3\left[1 - k_{Tl}(T - 20)\right]}. \tag{4}$$

10.2 Определяют величину акустической анизотропии A по формуле

$$A = 2\frac{t_2 - t_1}{t_2 \mp t_1}. \tag{5}$$

10.3 Корректируют величину задержки t_R, заменяя ее на значение $t_R[1 - k_{TR}(T - 20)]$.

10.4 Рассчитывают акустические характеристики поврежденности по формулам:

$$\Psi_{d_1} = \frac{\delta d_1}{\delta d_1^*}, \tag{6}$$

где $\delta d_1 = \dfrac{d_1 - d_1^0}{d_1^0}$, $\delta d_1^* = \dfrac{d_1^* - d_1^0}{d_1^0}$,

$$\Psi_{d_2} = \frac{\delta d_2}{\delta d_2^*}, \tag{7}$$

где $\delta d_2 = \dfrac{d_2 - d_2^0}{d_2^0}$, $\delta d_2^* = \dfrac{d_2^* - d_2^0}{d_2^0}$,

$$\Psi_A = \frac{\delta A}{\delta A^*}, \tag{8}$$

где $\delta A = \dfrac{A - A^0}{A^0}$, $\delta A^* = \dfrac{A^* - A^0}{A^0}$,

$$\Psi_R = \frac{\delta t_R}{\delta t_R^*}\left(\frac{\delta t_R^* + 1}{\delta t_R + 1}\right), \tag{9}$$

где $\delta t_R = \dfrac{t_R - t_R^0}{t_R^0}$, $\delta t_R^* = \dfrac{t_R^* - t_R^0}{t_R^0}$.

Примечание — Если значения величин δd_1^*, δd_2^*, $\delta \bar{d}^*$, δA^*, δt_R^* отсутствуют в базе данных используемых СИ, они должны быть получены в ходе тарировочных экспериментов.

10.5 Вычисляют среднее значение

$$\bar{\Psi} = \frac{\Psi_{d_1} + \Psi_{d_2} + \Psi_A + \Psi_R}{4}. \tag{10}$$

10.6 Пример расчета относительного остаточного ресурса на основании величины усредненного параметра поврежденности $\bar{\Psi}$ приведен в приложении В.

11 Оформление результатов измерений

11.1 Результаты измерений фиксируют в протоколе, форма которого приведена в приложении Г.

11.2 Дополнительные сведения, подлежащие записи, порядок оформления и хранения протокола (или заключения) устанавливают в технической документации на контроль.

11.3 Если определение эксплуатационной поврежденности материала ОК является частью научно-исследовательских работ, результаты измерений оформляют в соответствии с общими требованиями и правилами оформления отчетов о научно-исследовательских работах.

11.4 Результаты обследования сохраняют до следующего контроля.

Приложение А
(обязательное)

Порядок проведения тарировочных испытаний

А.1 Тарировочные испытания проводят для определения параметров зависимости информативных акустических характеристик от величины эксплуатационной поврежденности материала ОК при его малоцикловом нагружении.

А.2 Для проведения тарировочных испытаний используют стандартные образцы по ГОСТ 25.502 типов II или IV в соответствии с требованиями, приведенными в 6.1, 6.2.

А.3 При тарировочных испытаниях задают режим нагружения, соответствующий режиму нагружения обследуемого ОК.

А.4 Диапазон амплитуд деформаций или напряжений определяют на основании информации об условиях эксплуатации ОК.

А.5 Диапазон амплитуд и деформаций или напряжений разбивают на 5 значений.

А.6 Для каждого значения амплитуды деформации или напряжения выбирают не менее пяти тарировочных образцов.

А.7 В соответствии с требованиями, приведенными в разделе 9, проводят измерения информативных акустических параметров для всех образцов в исходном состоянии.

А.8 Для каждого значения амплитуды деформаций или напряжений на основании литературных данных определяют приблизительные значения относительного числа циклов $\frac{N}{N_f}$, соответствующие величинам: $\frac{N}{N_f} = 0,1$, $\frac{N}{N_f} = 0,2 \ \cdots \ \frac{N}{N_f} = 1$.

А.9 Каждый тарировочный образец подвергают усталостным испытаниям со своей амплитудой деформации или напряжения до значений $\frac{N}{N_f}$, перечисленных в А.8.

А.10 После каждого цикла испытаний проводят измерения информативных акустических параметров в соответствии с разделом 9.

А.11 При исчерпании усталостного ресурса (появлении магистральной трещины или разрушении) для каждого образца фиксируют значения циклической долговечности N_f и уточняют фактические значения $\frac{N}{N_f}$ для каждого блока нагружения (см. А.8) с целью построения регрессионной зависимости (1).

А.12 Определяют значения предельных акустических характеристик δd_1^*, δd_2^*, δA^*, δt_R^*.

А.13 В соответствии с 10.1—10.5 рассчитывают значения параметра $\overline{\Psi}$ для каждого блока нагружения и с помощью ПО СИ устанавливают вид регрессионной зависимости (1), которую используют для расчета относительного остаточного ресурса δR_p материала ОК в точке измерений на любой стадии нагружения.

Приложение Б
(обязательное)

Определение термоакустических коэффициентов

Б.1 Определение термоакустических коэффициентов k_{Tk} (k_{ts}, k_{tl}, k_{TR}) проводят на основании исследования регрессионных зависимостей задержек импульсов упругих волн соответствующих типов t_k от температуры T контрольного образца.

Б.2 Для определения коэффициентов k_{Tk} в качестве задержек t_k используют следующие выражения:

- для k_{Ts} $t_k = \frac{t_1 + t_2}{2}$;
- для k_{Tl} $t_k = t_l$;
- для k_{TR} $t_k = t_R$.

Б.3 Измерение температурных зависимостей проводят на контрольном образце из материала ОК в лабораторных условиях.

Б.4 Температуру поверхности образца измеряют с использованием контактного термометра по ГОСТ 6651 или ГОСТ 6616.

Б.5 Измерения проводят в центральной зоне образца поочередно для всех типов волн при постоянной установке соответствующего преобразователя.

Б.6 Образцы нагревают до температуры 80 °С, затем для равномерного распределения температуры выдерживают при комнатной температуре до достижения температуры поверхности образца 60 °С.

Б.7 По мере остывания образца с интервалом 5—7 °С проводят измерение температуры поверхности образца T_i и соответствующих задержек $t_k(i)$ для всех i-х значений температуры. Каждую серию измерений для каждого образца повторяют не менее трех раз.

Б.8 Термоакустические коэффициенты рассчитывают по формуле

$$k_{Tk} = \left(N_T \sum_{i=1}^{N_T} \delta t_k(i) T_i - \sum_{i=1}^{N_T} T_i \sum_{i=1}^{N_T} \delta t_k(i) \right) / \left(N_T \sum_{i=1}^{N_T} (T_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{N_T} T_i \right)^2 \right), \quad (Б.1)$$

где $\delta t_k(i) = \frac{t_k(i) - t_k(N_T)}{t_k(N_T)}$, N_T — общее число измерений для данного образца при его остывании от 60 °С до комнатной температуры.

Б.9 При измерениях используют от трех до пяти образцов с усреднением результатов.

Приложение В
(справочное)

Пример определения остаточного ресурса

В.1 Проверка работоспособности методики, регламентированной настоящим стандартом, осуществлялась на образцах из стали 08Х18Н10Т. Проводилось испытание на малоцикловую усталость в режиме жесткого нагружения при симметричном цикле с амплитудой деформации 0,3 %.

В.2 Испытывались четыре образца: один — тарировочный, три других — контрольные.

В.3 В качестве тарировочного и контрольных образцов использовались стандартные образцы типа II.

В.4 Тарировочные испытания проводились в соответствии с требованиями приложения А.

В.5 Перед испытаниями и на каждой его стадии, включая последнюю, соответствующую появлению макротрещины, проводились акустические измерения.

В.6 Акустические параметры d_1, d_2, A рассчитывались по формулам (3)—(5).

В.7 Характеристики поврежденности Ψ_{d1}, Ψ_{d2}, Ψ_A, Ψ_R рассчитывались по формулам (6)—(9).

В.8 Для каждого этапа нагружения определялись значения усредненного параметра поврежденности $\overline{\Psi}$ по формуле (10).

В.9 Результаты измерений приведены в таблице В.1.

Таблица В.1 — Результаты измерений параметра $\overline{\Psi}$

δN %	0	3	7	10	17	30	47	67	100
$\overline{\Psi}$	0	0,12	0,35	0,34	0,48	0,52	0,8	0,79	1

В.10 Регрессионная обработка экспериментальных данных, приведенных в таблице В.1, позволила конкретизировать вид зависимости (1) следующим выражением:

$$\overline{\Psi} = k_1 \ln\left(\frac{N}{N_f}\right) + k_2, \tag{В.1}$$

где $k_1 \approx 0{,}22$, $k_2 \approx 0{,}89$.

Соответствующий график зависимости $\overline{\Psi}(\delta N)$ приведен на рисунке В.1.

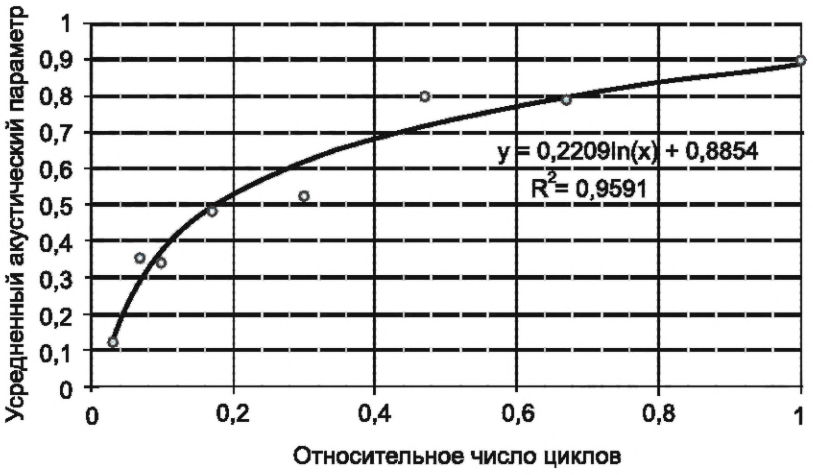


Рисунок В.1 — График зависимости $\overline{\Psi}(\delta N)$

В.11 Величина расчетного относительного остаточного ресурса δR_p в любой момент испытаний определяли по формуле

$$\delta R_p = \left[1 - \exp\left(\frac{\overline{\Psi} - k_2}{k_1}\right)\right] \cdot 100\ \%. \tag{В.2}$$

В.12 В процессе испытаний трех контрольных образцов погрешность оценки относительного остаточного ресурса не превысила 15 %.

Приложение Г
(рекомендуемое)

Форма протокола измерений

«УТВЕРЖДАЮ»

Руководитель

_____
наименование организации

_____ _____
личная подпись инициалы, фамилия

«_____» _____ 20___ г.

ПРОТОКОЛ
измерения накопленной поврежденности и оценки остаточного ресурса

_____
(наименование объекта контроля)

1 Дата измерения _____

2 Организация, проводящая измерения _____

3 Владелец объекта _____

4 Данные об объекте контроля:

назначение _____

завод-изготовитель, технология изготовления _____

режим термо- или виброобработки _____

геометрические параметры _____

состояние поверхности _____

дополнительные сведения об объекте контроля _____

5 Внешние условия при проведении измерений:

температура рабочей среды _____

температура окружающей среды _____

дополнительные нагрузки, характер нагружения _____

6 Эскиз объекта контроля с указанием местоположения точек измерений и их нумерации (приводится в приложении к протоколу) _____

7 Сведения о материалах объекта контроля:

страна-изготовитель _____

марка материала (национальный, иной стандарт) _____

технология изготовления _____

8 Таблица Г.1 — Значения акустических характеристик в точках измерений

Номер точки измерений	Материал	T, °С	t_1, нс	t_2, нс	t_2, нс	t_R, нс	A, %

9 Наименование и код базы данных _____

10 Таблица Г.2 — Результаты измерений

Номер точки измерений	Значение акустического параметра поврежденности $\bar{\Psi}$	Вид используемой регрессионной зависимости $\bar{\Psi} = f\left(\frac{N}{N_f}\right)$, коэффициенты регрессии	Значение относительного расчетного ресурса δR_p, %

Измерения выполнил специалист _____ _____

личная подпись — инициалы, фамилия

Руководитель лаборатории неразрушающего контроля _____ _____

личная подпись — инициалы, фамилия

УДК 620.172.1:620.179.16:006.354 ОКС 77.040.10

Ключевые слова: поврежденность, остаточный ресурс, элементы конструкций, малоцикловые усталостные воздействия, акустические измерения, тарировочный эксперимент

Редактор *Н.А. Аргунова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *И.А. Налейкиной*

Сдано в набор 09.06.2025. Подписано в печать 18.06.2025. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 1,90.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru