ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 72395— 2025

Техническая диагностика

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ИЗГИБНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ НЕСУЩИХ СИСТЕМ КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Общие требования

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2025

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Закрытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (ЗАО «НИЦ КД») и Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский институт стандартизации» (ФГБУ «Институт стандартизации»)

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 20 ноября 2025 г. № 1441-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 5
6 Требования к средствам измерений 6
7 Требования к объектам контроля 7
8 Порядок подготовки к проведению измерений 7
9 Порядок проведения измерений и обработки результатов 8
10 Неопределенность измерений 11
11 Правила оформления результатов измерений 11
Приложение А (обязательное) Определение упруго-акустического коэффициента 12
Приложение Б (рекомендуемое) Форма протокола измерений 13
Библиография 14

Введение

Материалу ответственных деталей и конструктивных элементов базовых деталей кузнечно-прессового оборудования (КПО) свойственно наличие вызываемых рабочими нагрузками напряжений, существенно влияющих на потребительские свойства оборудования. В обоих случаях теоретическая оценка этих напряжений, несмотря на развитость аналитических и численных методов расчета по своей точности, далеко не всегда удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современному оборудованию для металлообработки, а это нередко приводит к неоптимальным конструктивным решениям, связанным с увеличением металлоемкости производства. В особенности это относится к элементам несущей системы КПО, играющим ведущую роль в обеспечении жесткости и, как следствие, точности.

Заметному уточнению расчетных алгоритмов может способствовать использование информации о величинах механических упругих напряжений в материале элементов несущей системы, причем не приближенных расчетных, а полученных современными экспериментальными физическими (естественно, неразрушающими) методами.

Результаты оценки напряжений в потенциально опасных зонах несущих элементов КПО могут быть эффективно использованы как для проверки правильности расчетов на прочность и жесткость, так и для оперативной диагностики технического состояния КПО во время его изготовления, монтажа (сборки), пуска-наладки, обслуживания, ремонта, исследований и испытаний.

Одним из наиболее перспективных методов измерения механических напряжений в материале ответственных конструкций без его разрушения является акустический метод, основанный на упруго-акустическом эффекте — линейной зависимости скорости распространения упругих волн от упругих напряжений, надежное экспериментальное определение которой в настоящее время возможно благодаря наличию современных аппаратно-программных средств измерений[1)].

Настоящий стандарт разработан с целью обеспечения основы применения метода акустоупругости для уточнения результатов прочностных расчетов, а также для определения фактических напряжений, возникающих в материале ответственных элементов несущих систем КПО под действием рабочих и испытательных нагрузок.

Регламентируемая настоящим стандартом методика может служить основой для составления методик выполнения измерений по ГОСТ 8.010.

[1)] Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации/Ответственный редактор академик РАН Ф.М. Митенков, М.: Наука. 2009. 280 с.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Техническая диагностика

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ИЗГИБНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ НЕСУЩИХ СИСТЕМ КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Общие требования

Technical diagnostics. Bending elastic stresses measurement in carrier systems elements of forging and pressing equipment by acoustic method. General requirements

Дата введения — 2026—06—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает основные требования к порядку определения изгибных механических напряжений в элементах несущих систем кузнечно-прессового оборудования акустическим методом.

Настоящий стандарт распространяется на элементы несущих систем, изготовленные из серого чугуна или низкоуглеродистой стали.

Настоящий стандарт распространяется на механические и гидравлические прессы, а также другое оборудование по ГОСТ 7600 со стойками и траверсами в форме тонкостенных балок с прямоугольным или круговым поперечным сечением с внутренними перегородками и без них.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7.32 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления

ГОСТ 8.010 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения

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

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 1497 Металлы. Методы испытаний на растяжение

ГОСТ 2789 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики

ГОСТ 7600 Оборудование кузнечно-прессовое. Общие технические условия

ГОСТ 10587 Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия

ГОСТ 28840 Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования

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

ГОСТ IEC 60745-1 Машины ручные электрические. Безопасность и методы испытаний. Часть 1. Общие требования

Издание официальное

ГОСТ ISO 12100 Безопасность машин. Основные принципы конструирования. Оценки риска и снижения риска

ГОСТ Р 8.654 Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения

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

ГОСТ Р 52731 Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования

ГОСТ Р 54431 Станки металлообрабатывающие. Общие требования безопасности

ГОСТ Р 55043 Контроль неразрушающий. Определение коэффициентов упруго-акустической связи. Общие требования

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

ГОСТ Р 56664 Контроль неразрушающий. Определение напряженного состояния материала изделий машиностроения методами акустоупругости. Общие 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 9712 Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала неразрушающего контроля

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 ISO 12100, ГОСТ Р ИСО 5577, ГОСТ Р 52731, ГОСТ Р 55043, ГОСТ Р 55725, ГОСТ Р 56664, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **изгибное напряжение:** Составляющая нормального механического упругого напряжения, действующего в стенке элемента несущей системы за вычетом постоянного напряжения, вызванного силой тяжести и воздействием других элементов металлообрабатывающего оборудования.

3.1.2 **несущий элемент:** Элемент несущей системы кузнечно-прессового оборудования, нагружаемый по схеме консольно-закрепленной тонкостенной коробчатой балки.

3.1.3 **параллельная поляризация:** Поляризация поперечной волны параллельно оси несущего элемента.

3.1.4 **перпендикулярная поляризация:** Поляризация поперечной волны перпендикулярно оси несущего элемента.

3.1.5 **постоянное изгибное напряжение:** Изгибное упругое напряжение, действующее в материале несущего элемента во время остановки металлообрабатывающего оборудования.

3.1.6 **переменное изгибное напряжение:** Изгибное упругое напряжение, действующее в материале несущего элемента во время работы металлообрабатывающего оборудования.

3.1.7 **размах значений задержки ультразвукового импульса:** Разность между максимальным и минимальным значениями задержки ультразвукового импульса при работе металлообрабатывающего оборудования.

3.1.8 **размах значений изгибных напряжений:** Разность между максимальным и минимальным значениями изгибных напряжений при работе металлообрабатывающего оборудования.

3.1.9 **ультразвуковой импульс:** Одно- или многократно отраженный недетектированный импульс (радиоимпульс) упругой поперечной горизонтально поляризованной волны ультразвуковой частоты, распространяющийся в стенке несущего элемента по нормали к ней.

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

3.2 В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

h — толщина стенки несущего элемента, мм;

N — число зон измерений в сечении несущего элемента;

j — номер зоны измерений в сечении несущего элемента, $j = 1…N$;

$f_н$ — несущая частота ультразвуковых импульсов, МГц;

$f_д$ — частота дискретизации ультразвуковых импульсов, МГц;

m — номер отраженного ультразвукового импульса;

n — число повторных измерений при определении задержки ультразвукового импульса;

i — номер повторного измерения задержки ультразвукового импульса, $i = 1…n$;

T_m — длительность развертки, обеспечивающая визуализацию m отраженных ультразвуковых импульсов, мкс;

Δt — абсолютная погрешность измерения временны́х интервалов используемых средств измерений, нс;

δt — предельно допустимая относительная погрешность измерения временных интервалов используемых средств измерений;

$t^1_{ij}(m)$ — задержки отраженных ультразвуковых импульсов с номерами m относительно первого отраженного импульса при параллельной поляризации в j-й зоне измерений при остановке металлообрабатывающего оборудования, нс;

$t^1_j(m)$ — среднее значение задержки отраженного ультразвукового импульса с номером m относительно первого отраженного импульса при параллельной поляризации для j-й зоны измерений при остановке металлообрабатывающего оборудования, нс;

$t^2_{ij}(m)$ — задержки отраженных ультразвуковых импульсов с номерами m относительно первого отраженного импульса при перпендикулярной поляризации, нс;

$t^2_j(m)$ — среднее значение задержки отраженного ультразвукового импульса с номером m относительно первого отраженного импульса при перпендикулярной поляризации для j-й зоны измерений, нс;

A_{ij} — величина акустической анизотропии материала при i-м измерении в j-й зоне измерений при остановке металлообрабатывающего оборудования;

A_j — среднее значение акустической анизотропии в j-й зоне измерений при остановке металлообрабатывающего оборудования;

A — среднее значение акустической анизотропии в сечении при остановке металлообрабатывающего оборудования;

$\tau^1_{ij}(m)$ — размахи значений задержек m-го отраженного ультразвукового импульса при параллельной поляризации в j-й зоне измерений при работе металлообрабатывающего оборудования, нс;

$\tau^1_j(m)$ — средняя величина значения размаха задержки m-го отраженного ультразвукового импульса при параллельной поляризации в j-й зоне измерений при работе металлообрабатывающего оборудования, нс;

$\tau^2_{ij}(m)$ — размахи значений задержек m-го отраженного ультразвукового импульса при перпендикулярной поляризации в j-й зоне измерений при работе металлообрабатывающего оборудования, нс;

$\tau^2_j(m)$ — средняя величина значения размаха задержки m-го отраженного ультразвукового импульса при перпендикулярной поляризации в j-й зоне измерений при работе металлообрабатывающего оборудования, нс;

$\tilde{A}_{ij}$ — величина размаха значений акустической анизотропии при *i*-м измерении в *j*-й зоне измерений при работе металлообрабатывающего оборудования;

$\tilde{A}_j$ — среднее значение величины размаха акустической анизотропии в *j*-й зоне измерений при работе металлообрабатывающего оборудования;

$\tilde{A}$ — среднее значение величины размаха акустической анизотропии в сечении при работе металлообрабатывающего оборудования;

D — упруго-акустический (тензометрический) коэффициент, Н/мм^2;

σ_j — нормальное постоянное изгибное напряжение для *j*-й зоны измерений при остановке металлообрабатывающего оборудования, Н/мм^2;

$\tilde{\sigma}_j$ — размах значения переменного изгибного напряжения для *j*-й зоны измерений при работе металлообрабатывающего оборудования, Н/мм^2;

$\widetilde{\sigma_j^{min}}$ — минимальное значение нормального переменного изгибного напряжения для *j*-й зоны измерений при работе металлообрабатывающего оборудования, Н/мм^2;

$\widetilde{\sigma_j^{max}}$ — максимальное значение нормального переменного изгибного напряжения для *j*-й зоны измерений при работе металлообрабатывающего оборудования, Н/мм^2;

V_t — скорость поперечных упругих волн в материале несущего элемента, м/с.

3.3 В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ИН — изгибные упругие напряжения;

КПО — кузнечно-прессовое оборудование;

НЭ — элемент несущей системы (несущий элемент) кузнечно-прессового оборудования;

ПО — программное обеспечение;

ПЭП — пьезоэлектрический преобразователь;

СИ — средство измерений;

УИ — ультразвуковой импульс;

ЭАП — электроакустический преобразователь;

ЭМАП — электромагнитно-акустический преобразователь.

4 Общие положения

4.1 Измерения изгибных напряжений выполняют методом акустоупругости в соответствии с общими требованиями ГОСТ Р 52731, ГОСТ Р 56664.

4.2 Принцип метода основан на существующей в области упругих деформаций линейной зависимости скоростей распространения объемных упругих волн в направлении, перпендикулярном к плоскости действия напряжений, от величины напряжений.

4.3 Элементы несущих систем, на которые распространяется действие настоящего стандарта, можно считать тонкостенными, поскольку их толщины значительно меньше других геометрических размеров, в связи с чем упругие напряжения в направлении по нормали к поверхности малы по сравнению с напряжениями, главные направления которых лежат в плоскости поверхности несущих элементов. Поэтому напряженное состояние считают локально плоским.

4.4 Для определения ИН используют ЭАП поперечных волн, распространяющихся по нормали к поверхности НЭ.

4.5 Схема прозвучивания материала НЭ соответствует эхо-методу ультразвукового контроля. Способ возбуждения упругих колебаний — контактный или бесконтактный в зависимости от используемого ЭАП. Рекомендуемый вид излучаемого сигнала — «радиоимпульс» с высокочастотным (ультразвуковым) заполнением, плавной огибающей и эффективной длительностью от 8 до 10 экстремумов основной частоты.

Примечание — В качестве ЭАП могут быть использованы ПЭП по ГОСТ Р 55725 или специально разработанные электромагнитно-акустические преобразователи.

4.6 Измеряемые ИН являются усредненными по объему ультразвукового пучка, определяемого поперечными размерами ЭАП и толщиной стенки НЭ.

4.7 Сложившиеся к настоящему времени подходы к контролю механических упругих напряжений в материале акустическим методом, как правило, базируются на общих соотношениях акустоупругости по ГОСТ Р 56664.

Соответствующие уравнения связи времени распространения упругих объемных волн различной поляризации с действующими упругими напряжениями в рамках матричной теории акустоупругости при отсутствии внешних тепловых и электромагнитных воздействий имеют обычный для линеаризованных соотношений вид:

$$\delta t_{ik} = \alpha_{iklm}(\sigma_{lm} - \sigma^0_{lm}), \quad (1)$$

где σ_{lm}, σ^0_{lm} — тензор упругих напряжений в момент измерения и тензор начальных упругих напряжений соответственно,

δt_{ik} — относительные изменения времени распространения упругих волн,

α_{iklm} — акустоупругие коэффициенты.

4.8 В случае одноосного напряженного состояния упругое напряжение σ рассчитывают по формуле

$$\sigma = D(A - A_0), \quad (2)$$

где A соответствует значению акустической анизотропии материала с напряжением, определяемой в зоне измерений по формуле

$$A = 2\frac{t_\perp - t_\parallel}{t_\perp + t_\parallel}, \quad (3)$$

где $t_\parallel$, $t_\perp$ — времена распространения упругих поперечных волн, поляризованных соответственно вдоль и перпендикулярно линии действия одноосного напряжения, величина A_0 соответствует значению акустической анизотропии материала без напряжения.

Упруго-акустический (тензометрический) коэффициент D, используемый для расчета упругих напряжений по измеренным акустическим задержкам, при отсутствии литературных данных определяют экспериментально в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55043 и приложения А.

4.9 Формула (2) может быть использована для определения изгибных напряжений в выбранном сечении НЭ, если под величиной A_0 понимать усредненное по периметру сечения НЭ значение анизотропии.

4.10 Рекомендуемая настоящим стандартом методика может служить основой для составления методик выполнения измерений по ГОСТ 8.010.

5 Требования безопасности

5.1 К выполнению измерений изгибных напряжений в НЭ допускают специалистов лабораторий неразрушающего контроля, аттестованных (аккредитованных) в соответствии с национальным законодательством, квалифицированных в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9712, прошедших специальную подготовку и проверку знаний эксплуатации оборудования ультразвукового контроля, 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 требований обеспечения безопасных условий работ в станкостроительной промышленности.

5.2 При определении ИН специалист должен руководствоваться требованиями ГОСТ 12.2.003, ГОСТ 12.3.002 и правилами по охране труда и обеспечения безопасных условий работ при эксплуатации электроустановок потребителей и ГОСТ Р 12.1.038.

5.3 Специалист должен знать общие требования безопасности по ГОСТ ISO 12100, ГОСТ Р 54431, а также правила обеспечения безопасных условий работ и охраны труда при работе с конкретным КПО.

5.4 При организации работ по определению ИН должны быть соблюдены требования пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004.

5.5 Измерения проводят в соответствии с требованиями обеспечения безопасных условий работ, указанными в инструкции по эксплуатации аппаратуры, входящей в состав используемых СИ.

5.6 Используемое при испытаниях и исследованиях КПО должно быть аттестовано, а также должен быть оформлен акт о вводе в эксплуатацию.

6 Требования к средствам измерений

6.1 СИ должны быть внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений и проходить поверку (калибровку) в организациях, аккредитованных Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии.

6.2 СИ должны иметь аттестованную методику измерений временных интервалов между отраженными ультразвуковыми импульсами.

6.3 Используемые СИ должны соответствовать требованиям к выполняемым измерениям, установленным 6.4—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.

6.4 В комплект СИ должны входить прямые совмещенные преобразователи с номинальными частотами 1,25—10 МГц, обеспечивающие излучение и прием УИ поперечных горизонтально поляризованных волн, распространяющихся по нормали к поверхности НЭ.

6.5 Основные нормируемые характеристики СИ

6.5.1 Дискретизация УИ с частотой дискретизации $f_д$ — не менее 150 МГц.

6.5.2 Разрядность аналого-цифрового преобразователя — не менее 10.

6.5.3 Формирование излучаемого сигнала в виде радиоимпульса с высокочастотным (ультразвуковым) заполнением и плавной огибающей, имеющего следующие основные параметры:

- центральная спектральная частота 1—10 МГц;
- эффективная длительность 8—10 экстремумов;
- эффективная шириной спектра 20 % от центральной спектральной частоты УИ.

6.6 Основные функциональные требования к ПО СИ

6.6.1 ПО СИ должно быть исследовано на соответствие требованиям ГОСТ Р 8.654.

6.6.2 ПО СИ должно в реальном масштабе времени обеспечивать:

- возможность выбора любого отраженного УИ и поиск необходимых отсчетных точек профиля импульсов;
- вычисление задержек любого отраженного УИ относительно первого и оценка текущего значения относительной случайной погрешности для любого числа измерений при определении постоянных напряжений и любого числа циклов работы M — при определении переменных напряжений;
- вычисление размахов значений задержек УИ при работе КПО;
- расчет постоянных и переменных ИН в реальном масштабе времени с привязкой результатов расчета к координатам поверхности НЭ.

6.6.3 ПО СИ должно поддерживать интерактивный режим работы оператора.

6.6.4 ПО СИ должно поддерживать режим генерирования диагностических сообщений при появлении аппаратных или программных сбоев, приводящих к недопустимым ошибкам определения ИН.

6.6.5 Первичная цифровая информация должна постоянно храниться на внешних носителях, защищенных от несанкционированного доступа.

6.7 Вспомогательные устройства и материалы

6.7.1 Инструмент шлифовальный для подготовки поверхности по ГОСТ IEC 60745-1.

6.7.2 Инструмент для обозначения точек измерений, указанных в аттестованных методиках (программах) испытаний и исследований.

6.7.3 Жидкости обезжиривающие и контактные, допускаемые требованиями безопасности в соответствии с разделом 5.

7 Требования к объектам контроля

7.1 Перед установкой ЭАП поверхность НЭ в зоне измерений с координатами по 8.5.1, 8.5.2 очищают от грязи, окалины, ржавчины и обезжиривают (при использовании ПЭП в качестве ЭАП).

7.2 Класс шероховатости поверхности в зоне измерений при использовании ПЭП — не ниже *Ra* 2,5 мкм по ГОСТ 2789. Размеры подготовленных поверхностей в зонах измерений должны быть в 1,5—2 раза больше соответствующих размеров контактных поверхностей применяемых преобразователей.

Примечание — При использовании ПЭП методика не обеспечивает требуемую точность определения ИН, если шероховатость поверхности НЭ *Ra* превышает 2,5 мкм по ГОСТ 2789.

7.3 В зонах измерений должны отсутствовать концентраторы напряжений.

7.4 Расстояние от центра зон измерений до сварных швов НЭ — не менее удвоенной толщины материала НЭ.

7.5 При использовании ПЭП вязкость контактной жидкости при температуре измерения должна соответствовать вязкости эпоксидной смолы при температуре 25 °С: от 12 до 25 Па · с (в соответствии с ГОСТ 10587).

7.6 Температура поверхности НЭ в зоне измерений должна быть в пределах от 5 °С до 40 °С при использовании ПЭП и в пределах от –50 °С до 50 °С при использовании ЭМАП.

7.7 Дополнительные факторы, влияющие на точность измерений изгибных напряжений

К дополнительным факторам относятся:

- шероховатость внутренней (отражающей) поверхности;
- значительная объемная неоднородность материала в области прозвучивания, приводящая к дисперсии упругих волн и их дополнительному затуханию;
- дополнительные отражающие поверхности, возникающие по причине слоистости материала в области прозвучивания (наличие плоских дефектов основного металла, допустимым по условиям эксплуатации КПО).

7.8 Характеристики факторов, указанных в 7.7, не определяются количественно. Их комплексное влияние оценивается по соответствию характеристик отраженных акустических импульсов требованиям настоящего стандарта.

8 Порядок подготовки к проведению измерений

8.1 Изучают сертификаты на материал НЭ.

8.2 На основании технической документации на НЭ определяют значения *h* в зонах измерений. Уточняют возможность считать исследуемый элемент тонкостенным, для чего другие его размеры должны по крайней мере на порядок превышать величины *h*.

8.3 На основании справочных данных или экспериментально определяют величину V_t.

8.4 Выбирают ЭАП, $f_н$ которого в зависимости от *h* имеет следующие значения:

- при *h* от 4 до 10 мм $f_н$ = 5 МГц;
- при *h* более 10 мм для НЭ из стали $f_н$ = 2,5 МГц;
- при *h* более 10 мм для НЭ из чугуна $f_н$ = 1,25 МГц.

8.5 Выбор и подготовка зон измерений

8.5.1 Зоны измерений ИН выбирают равномерно вдоль периметра НЭ с учетом требований 7.3, 7.4.

8.5.2 Число зон измерений *N* в сечении НЭ должно быть не менее 8.

8.5.3 На рисунке 1 показаны рекомендуемые зоны измерений для типовых стоек КПО без внутренних ребер жесткости.

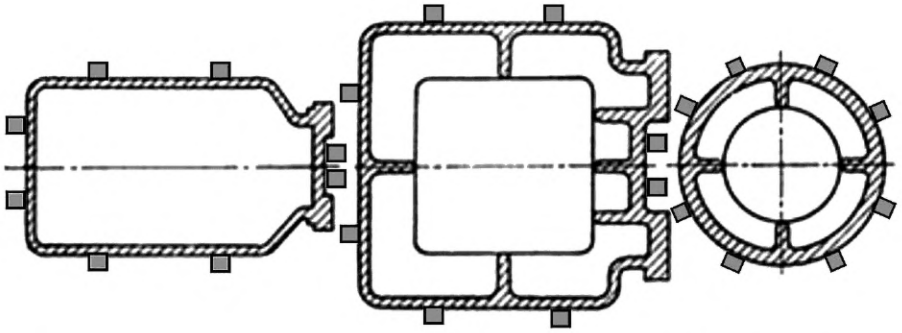
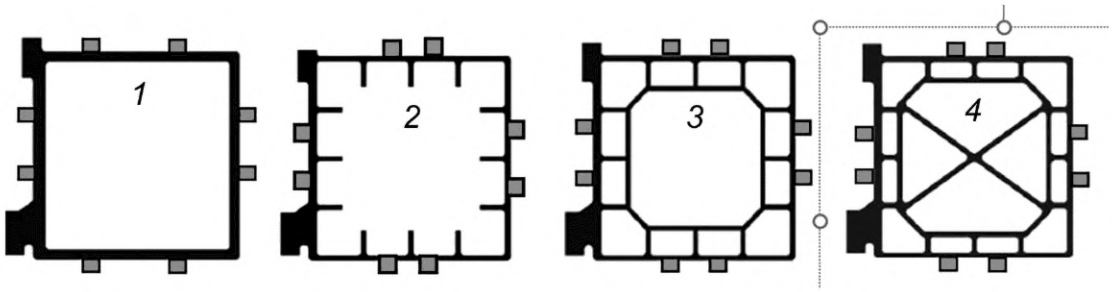


Рисунок 1 — Зоны измерений для стоек без внутренних ребер жесткости

8.5.4 При наличии у НЭ внутренних ребер жесткости в соответствии с требованиями 9.1.4, 9.1.5 зоны измерений выбирают таким образом, чтобы УИ распространялись только в стенках НЭ, как это показано на рисунке 2 на примере поперечин (траверс).



1 — пустотелая траверса; *2* — кессонное оребрение; *3* — двойная стенка; *4* — двойная стенка, мембраны, стяжки

Рисунок 2 — Зоны измерений для траверс с внутренними ребрами жесткости

8.6 Приводят состояние поверхности зон измерений в соответствие условиям проведения измерений (см. 7.2).

9 Порядок проведения измерений и обработки результатов

9.1 Измерение постоянных изгибных напряжений

9.1.1 Наносят при необходимости слой контактной жидкости на подготовленные поверхности НЭ в зонах измерений.

9.1.2 Устанавливают ЭАП на поверхность НЭ, ориентируя плоскость поляризации ЭАП в продольном направлении, подключают их к СИ.

9.1.3 Включают СИ, проверяют их работоспособность, выводя на экран видеоконтрольного устройства временную развертку принимаемых сигналов.

9.1.4 На экране видеоконтрольного устройства без значительных видимых искажений должны наблюдаться многократно отраженные УИ, как это показано на рисунке 3, причем форма импульсов должна соответствовать требованиям 4.5, как на рисунке 4.

9.1.5 Проверяют отсутствие на временной развертке дополнительных импульсов, возникающих вследствие:

- отражения УИ от ребер жесткости, установленных с внутренней стороны НЭ;
- влияния допустимых по условиям эксплуатации НЭ дефектов — слоев, включений и т. п., обнаруженных методами ультразвуковой дефектоскопии;
- неправильной ориентации преобразователя поперечных колебаний относительно оси НЭ.

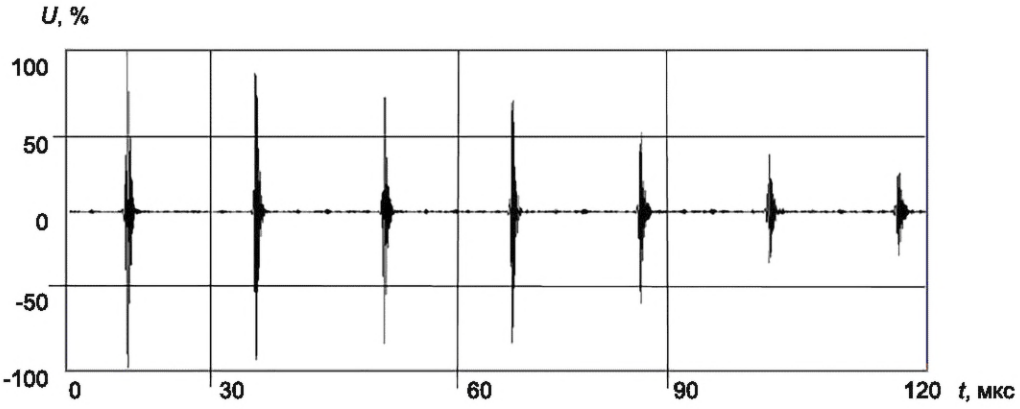


Рисунок 3 — Типичные осциллограммы отраженных импульсов

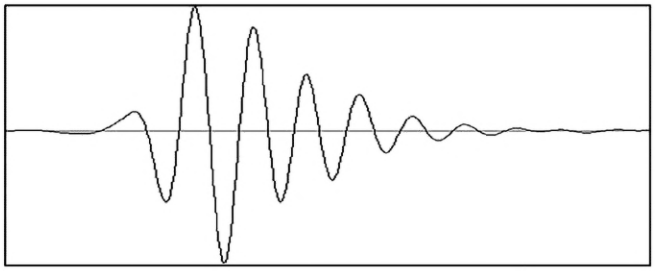


Рисунок 4 — Оптимальная форма ультразвукового импульса

9.1.6 Рассчитывают минимальные значения развертки T_m, обеспечивающей визуализацию необходимого количества отраженных УИ и измерение их задержек с заданной относительной погрешностью δt по формуле

$$T_m = \frac{\Delta t}{\delta t} + t_3, \tag{4}$$

где t_3 — аппаратная задержка зондирующего импульса, мкс, определяемая техническими характеристиками используемых СИ.

Как правило, значение δt не должно превышать 10^{-5}—10^{-4}.

9.1.7 Получают осциллограммы УИ при значении развертки T_m.

9.1.8 С использованием ПО оценивают отношение амплитуды УИ с номером m к среднему значению уровня шума. Если это отношение превышает 10 дБ, то проведение измерений с заданной относительной погрешностью считается возможным.

9.1.9 Если отношение сигнал/шум для УИ с номером m менее 10 дБ, то последовательно уменьшают значение m на единицу до тех пор, пока значение отношения сигнал/шум не станет больше 10 дБ.

9.1.10 Рассчитывают фактическую относительную погрешность $\delta t_ф$ определения задержек УИ по формуле

$$\delta t_ф = \frac{V_t \Delta t}{mh} \cdot 10^{-3}, \tag{5}$$

после чего принимают решение о проведении измерений с пониженной по сравнению с δt погрешностью или замене используемых СИ на более точные, обеспечивающие выполнение соотношения

$$\delta t_ф \le \delta t. \tag{6}$$

9.1.11 Для каждой j-й зоны измерений, используя ПО СИ, определяют значения задержек УИ $t^1_{ij}(m)$ и $t^2_{ij}(m)$ при числе повторных измерений n не менее 5. При измерении задержек рекомендуется использовать метод перехода сигнала через нуль, при этом сигнал аппроксимируют с помощью сплайн-

функции по четырем точкам отсчета, ближайшим к нулевому уровню [1]. Выбор отсчетных точек для первого и *m*-го отраженных импульсов иллюстрирует рисунок 5.

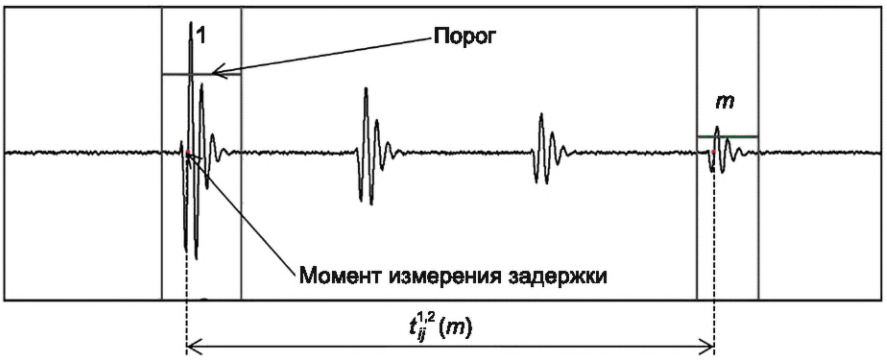


Рисунок 5 — Выбор отсчетных точек

9.1.12 Для учета возможной перефазировки *m*-го УИ относительно первого найденные отсчетные точки проверяют на синфазность в соответствии со следующим алгоритмом, реализуемым средствами ПО:

1) определяют задержку второго УИ $t_{ij}^{1,2}(2)$ (если $m > 2$);

2) проверяют справедливость соотношения

$$m\left[t_{ij}^{1,2}(m) - t_{ij}^{1,2}(2)\right] \le \frac{1}{2f_н} \cdot 10^3; \tag{7}$$

3) при соблюдении соотношения (7) действия по 4), 5) пропускают;

4) при несоблюдении соотношения (7) рассчитывают значение *k* по формуле

$$k = [R \cdot f_н], \tag{8}$$

где $R = t_{ij}^{1,2}(m) - (m-1)t_{ij}^{1,2}(2)$. Квадратные скобки [ ] означают операцию округления до целых значений;

5) в дальнейших расчетах вместо значений $t_{ij}^{1,2}(m)$ используют скорректированные значения задержек, равные $t_{ij}^{1,2}(m) + \frac{k}{f_н}$;

6) массив значений $t_{ij}^{1,2}(m)$ для каждой точки измерений проверяют на наличие выбросов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2;

7) после уменьшения (при наличии выбросов) значения *n* для дальнейших расчетов используют усеченные вариационные ряды $\{t_{ij}^{1}(m)\}$, $\{t_{ij}^{2}(m)\}$.

9.1.13 Определяют значения A_{ij}, A_j, A по формулам

$$A_{ij} = 2\frac{t_{ij}^{2}(m) - t_{ij}^{1}(m)}{t_{ij}^{2}(m) + t_{ij}^{1}(m)}; \tag{9}$$

$$A_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} A_{ij}; \tag{10}$$

$$A = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} A_j. \tag{11}$$

9.1.14 Нормальное постоянное ИН для *j*-й зоны измерений σ_j, Н/мм^2, вычисляют по формуле

$$\sigma_j = D[A_j - A]. \tag{12}$$

Абсолютная погрешность оценки величины σ_j в основном определяется относительной погрешностью определения временных интервалов используемых средств измерений и, как правило, составляет 10—15 Н/мм^2 для НЭ из стали и 15—20 Н/мм^2 для НЭ из чугуна.

9.2 Измерение переменных изгибных напряжений

9.2.1 При работе КПО, используя ПО СИ, для каждой *j*-й зоны измерений проводят измерения значений размахов $\tau^1_{ij}(m)$ и $\tau^2_{ij}(m)$ и их усредненных значений в течение времени работы КПО, при котором текущее значение случайной погрешности измеряемых задержек становится не более δt.

9.2.2 Определяют значения $\tilde{A}_{ij}$, $\tilde{A}_j$, $\tilde{A}$ по формулам:

$$\tilde{A}_{ij} = 2\frac{\tau^2_{ij}(m) - \tau^1_{ij}(m)}{\tau^2_{ij}(m) + \tau^1_{ij}(m)}; \tag{13}$$

$$\tilde{A}_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} A_{ij}; \tag{14}$$

$$\tilde{A} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \tilde{A}_j. \tag{15}$$

9.2.3 Размах нормального переменного ИН для *j*-й зоны измерений $\tilde{\sigma}_j$, Н/мм^2, вычисляют по формуле

$$\widetilde{\sigma_j} = D\left[\tilde{A}_j - \tilde{A}\right]. \tag{16}$$

9.2.4 Минимальное и максимальное значения ИН $\widetilde{\sigma_j^{min}}$ и $\widetilde{\sigma_j^{max}}$, Н/мм^2, вычисляют по формулам:

$$\widetilde{\sigma_j^{min}} = \sigma_j - \widetilde{\sigma_j}; \tag{17}$$

$$\widetilde{\sigma_j^{max}} = \sigma_j + \widetilde{\sigma_j}. \tag{18}$$

10 Неопределенность измерений

10.1 Результаты определения ИН в несущих элементах КПО используют без учета неопределенностей их измерения, если нормативными правовыми актами, нормами, правилами, стандартами или иными документами, выполнение требований которых носит обязательный характер, не предусмотрено выполнение измерений с обязательным указанием неопределенности измерений.

10.2 При наличии таких требований оценку неопределенности измерения ИН проводят по ГОСТ 34100.3.

11 Правила оформления результатов измерений

11.1 Данные об используемых средствах измерений, объекте контроля и результаты измерений записывают в протоколе испытания. Рекомендуемая форма протокола приведена в приложении Б. Допускается использовать форму(ы), принятые в конкретной организации.

11.2 Если измерения ИН являются частью научно-исследовательских работ, то результаты измерений следует оформлять в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32.

Приложение А
(обязательное)

Определение упруго-акустического коэффициента

А.1 Упруго-акустический (тензометрический) коэффициент D в формулах расчета ИН (12), (16) определяют при проведении испытаний на растяжение плоских образцов по ГОСТ 1497 с толщиной, равной толщине стенки НЭ при номинальной скорости нагружения 10 Н/мм^2 · с.

А.2 Класс шероховатости поверхности образцов в зоне измерений — не ниже *Ra* 2,5 по ГОСТ 2789.

А.3 Для нагружения образца используют машины для механических испытаний материалов по ГОСТ 28840.

А.4 Выбор испытательного оборудования осуществляют таким образом, чтобы в образце можно было создать напряжение не менее $0{,}8\sigma_{02}$.

А.5 Испытательные машины должны обеспечивать требуемую нагрузку с допустимым отклонением напряжений не более 1 Н/мм^2 в течение промежутка времени, необходимого для проведения акустических измерений (от 30 с до нескольких минут в зависимости от квалификации оператора и используемых СИ).

А.6 Составляют программу ступенчатого нагружения образца от начальной нагрузки, соответствующей значению одноосного напряжения не более $0{,}1\sigma_{0,2}$, до нагрузки, соответствующей $0{,}8\sigma_{0,2}$. Рекомендуется предусмотреть не менее пяти ступеней нагружения для последующей регрессионной обработки результатов испытаний.

А.7 Образец с закрепленными на нем ЭАП помещают в машину для механических испытаний, добиваются правильной его центровки и прикладывают к нему небольшую предварительную нагрузку для обеспечения надежной фиксации образца в захватах.

А.8 На каждой i-ступени нагружения проводят измерения задержек УИ двух типов:

$t_i^1(m)$ — задержки УИ для поперечных волн, поляризованных вдоль оси нагружения;

$t_i^2(m)$ — задержки УИ для поперечных волн, поляризованных перпендикулярно оси нагружения.

Измерения проводят как при увеличении, так и при уменьшении нагрузки. Затем образец вынимают из машины. Каждое нагружение («вверх-вниз») проводят три раза. Перед новым нагружением ЭАП снимают и вновь устанавливают на образец.

А.9 Для определения акустоупругих коэффициентов α_1, α_2 проводят регрессионную обработку линейных зависимостей:

$$\delta t_i^1 = \frac{\Delta t_i^1(m)}{t_0^1(m)} = f_1(\sigma_i); \tag{А.1}$$

$$\delta t_i^2 = \frac{\Delta t_i^2(m)}{t_0^2(m)} = f_2(\sigma_i), \tag{А.2}$$

где σ_i — действующее напряжение при i-ступени нагружения, $\Delta t_i^1(m) = t_i^1(m) - t_0^1(m)$,

$\Delta t_i^2(m) = t_i^2(m) - t_0^2(m)$, $t_0^1(m)$,

$t_0^2(m)$ — задержки УИ в материале образцов при начальной нагрузке.

Коэффициенты α_1, α_2 рассчитывают по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{M\sum_{i=1}^{M}\sigma_i\delta t_i^1 - \sum_{i=1}^{M}\sigma_i\sum_{i=1}^{M}\delta t_i^1}{M\sum_{i=1}^{M}(\sigma_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{M}\sigma_i\right)^2}; \tag{А.3}$$

$$\alpha_2 = \frac{M\sum_{i=1}^{M}\sigma_i\delta t_i^2 - \sum_{i=1}^{M}\sigma_i\sum_{i=1}^{M}\delta t_i^2}{M\sum_{i=1}^{M}(\sigma_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{M}\sigma_i\right)^2}, \tag{А.4}$$

где M — число ступеней нагружения.

А.10 Упруго-акустический (тензометрический) коэффициент D рассчитывают по формуле

$$D = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1}. \tag{А.5}$$

Приложение Б
(рекомендуемое)

Форма протокола измерений

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель
_____
(наименование организации)
_____ _____
(личная подпись) (инициалы, фамилия)
«_____»_____20__ г.

ПРОТОКОЛ
определения изгибных напряжений в элементе несущей системы
_____
(контролируемое кузнечно-прессовое оборудование)

1 Дата измерения _____
2 Организация, проводящая измерения _____
3 Владелец оборудования_____
4 Данные об оборудовании
завод-изготовитель _____
номер и дата свидетельства о поверке_____
тип несущего элемента, марка материала _____
дополнительные сведения об оборудовании_____
5 Используемые средства измерений, номер и дата свидетельства о поверке_____ _____
_____
6 Местоположение зон измерений_____
7 Значение упруго-акустического коэффициента *D,* Н/мм^2_____
8 Результаты измерений

Таблица Б.1

Номер и координата зоны измерений	Постоянное изгибное напряжение σ_j, Н/мм^2	Размах переменного изгибного напряжения, $\tilde{\sigma}_j$, Н/мм^2	Минимальное значение переменного изгибного напряжения $\widetilde{\sigma_j^{min}}$, Н/мм^2	Максимальное значение переменного изгибного напряжения $\widetilde{\sigma_j^{max}}$, Н/мм^2

Измерения выполнил специалист _____ _____
(личная подпись) (инициалы, фамилия)

Руководитель лаборатории
неразрушающего контроля _____ _____
(личная подпись) (инициалы, фамилия)

Библиография

[1] МВИ Стандартные образцы времени прохождения ультразвуковых сигналов. Определение основных метрологических характеристик. ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, 2007. 16 с.

УДК 620.172.1:620.179.16:006.354

ОКС 77.040.10
77.040.20

Ключевые слова: изгибные механические упругие напряжения, акустический эхо-метод, акустоупругость, задержки импульсов, упруго-акустические (тензометрические) коэффициенты

Редактор *Е.Ю. Митрофанова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 21.11.2025. Подписано в печать 18.12.2025. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 1,97.

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

gost.e-ecolog.ru