

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА АКУСТОУПРУГОСТИ

УДК 620.1.08

© Аркадий Вадимович Камышев¹, Владимир Алексеевич Смирнов¹
Илья Юрьевич Шмигельский², Евгений Евгеньевич Гладышев³,
Константин Константинович Савровский³

¹- ООО «ИНКОТЕС», Россия, 603163, г. Нижний Новгород, ул. Бринского, д. 6;
e-mail: info@encotes.ru

²- ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева» (ВНИИМ), Россия, 190005, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19, e-mail: info@vniim.ru

³- ФБУ «Нижегородский ЦСМ» (ННЦСМ), Россия, 603105, г. Нижний Новгород, ул. Республиканская, д. 1, e-mail: mail@nnccsm.ru

Рассмотрены особенности метрологического обеспечения приборов для измерения механических напряжений в конструкционных материалах с использованием эффекта акустоупругости. Представлены результаты испытаний в целях утверждения типа средства измерений приборов для измерения механических напряжений ИН-5101А, реализующего метод измерений, основанный на эффекте акустоупругости. Описанная процедура обеспечивает прослеживаемость измерений механического напряжения к Государственным первичным эталонам силы и длины. Также проанализированы факторы, определяющие основные источники погрешности измерений механических напряжений.

Ключевые слова: механические напряжения, акустоупругость, акустическая анизотропия, акустически слабо анизотропные материалы, прослеживаемость, методика измерений, случайная и систематическая составляющие погрешности измерений.

CURRENT STATE OF METROLOGICAL SUPPORT FOR MEASUREMENTS OF MECHANICAL STRESSES USING THE ACOUSTOELASTICITY EFFECT

© ^{1*} Arkady V. Kamyshev¹, Vladimir A. Smirnov¹, Ilya Yu. Shmigelsky²
Evgeniy E. Gladyshev³, Konstantin K. Savrovsky³

¹- «ENCOTES» LLS, 6 Brinskogo str., Nizhny Novgorod, 603163, Russia;
e-mail: info@encotes.ru.

²- «The D. I. Mendeleev All Russian Institute for Metrology» (VNIIM),
19 Moskovsky Avn., St. Petersburg, 190005, Russia; e-mail: info@vniim.ru.

³-«Federal Budgetary Institution Nizhny Novgorod Metrology Center»
(NNCCM), 1 Respublikanskaya str., Nizhny Novgorod, 6031051 Russia, mail:
mail@nnccsm.ru.

The article discusses the features of metrological certification of devices for measuring mechanical stresses arising from the loading of structural materials. The results of tests for *the purpose of approving the type of measuring instrument (PATMI)* of the device for measuring mechanical stresses IN-5101A based on the use the acoustoelasticity measurement method are presented. The procedure of this tests ensures the transfer of a unit of magnitude of mechanical stresses from the State primary standards of force and length. The factors that determine the errors in the measurement of mechanical stresses using the acoustoelasticity method are analyzed.

Keywords: *mechanical stresses, acoustoelasticity, acoustic anisotropy, acoustically low-anisotropic materials, traceability, measurement technique, random and systematic components of measurement error.*

Введение

Обеспечение надёжности промышленных объектов - ответственных металлоконструкций (мостов, крупных трубопроводных систем, оборудования атомных станций и т.п.) является актуальной задачей. Объективная оценка фактического напряжённого состояния таких объектов позволяет разработать адекватные профилактические мероприятия по поддержанию их нормальной и безопасной работы. Для этого требуются достоверные измерения механических напряжений (МН) в единицах системы СИ (МПа или Н/мм²), так как недостоверные результаты измерений могут привести к серьёзным отрицательным последствиям. Подобные измерения должны выполняться в соответствии с Федеральным законом от 26 июня 2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [1] (далее – ФЗ № 102), с применением средств измерений (приборами) утверждённого типа, прошедших поверку и аттестованных методик измерений в соответствии с [3]. Следовательно, для подтверждения достоверности измерений в процессе испытаний в целях утверждения типа средства измерений (ИЦУТ) [2] *требуется установить прослеживаемость результатов измерений к государственным первичным эталонам.*

Термин «механические напряжения» охватывает достаточно большое количество видов напряжений, различающихся по целому ряду факторов (макро-, микронапряжения, объёмные, поверхностные). Поэтому при проведении измерений и при испытаниях средства измерений или аттестации методики выполнения измерений следует указывать конкретный вид измеряемых напряжений.

Результаты измерений, полученные с использованием средств измерения и методик измерения МН, отвечающих указанным требованиям, могут использоваться применительно к ответственным и опасным производственным объектам для оценки их соответствия нормам прочности, наличия опасных состояний, определения ресурса безопасной эксплуатации, а также для контроля качества при изготовлении.

Существующие приборы, заявленные как измерители МН, реализующие тот или иной физический метод неразрушающего контроля, *как правило*, не соответствуют этим требованиям. Анализ их метрологических характеристик

показывает, что в процессе ИЦУТ они испытывались как средства измерения некоторых конкретных физических характеристик (магнитных, акустических, рентгеновских и других), при этом прямая взаимосвязь «измеряемых механических напряжений» с измеряемыми физическими величинами, а также показатели точности измерений МН не устанавливались.

В отличие от этого, измерение МН с использованием эффекта акустоупругости базируется на известных и хорошо изученных аналитических зависимостях изменения скоростей распространения объёмных акустических (упругих) волн мегагерцового частотного диапазона от действующих напряжений [4-6]. Коэффициенты этих зависимостей строго определяются нелинейной теорией упругости твёрдого тела.

Скорость акустических волн при нагружении материала и действующие напряжения зависят от прочностных характеристик материала (констант упругости 2, 3 порядка [5]), то есть имеют одну физическую природу. При измерении МН с помощью метода акустоупругости, все этапы измерения и расчёты находятся в рамках нелинейной механики, без привлечения полей и волн другой природы.

Наличие научно обоснованных аналитических зависимостей в методе акустоупругости существенно облегчает задачу метрологического обеспечения, поскольку позволяет чётко определить вид измеряемых МН, а также диапазон, показатели точности и условия выполнения измерений.

Передача единиц величины от Государственных первичных эталонов

Процедура оценки погрешности измерения МН методом акустоупругости и установления прослеживаемости результатов измерения к Государственным первичным эталонам в процессе ИЦУТ была реализована путем измерения прибором задаваемых (опорных) значений напряжений, которые возникают в стандартном образце утверждённого типа (ГСО) с известной геометрической формой, известными механическими свойствами (пределом пропорциональности) и определёнными упругоакустическими характеристиками при его осесимметричном растяжении ступенчатой нагрузкой на эталонной силовоспроизводящей машине. Геометрические размеры зоны растяжения такого образца определены с установленной точностью и прослеживаются к Государственному первичному эталону длины ГЭТ 2-2021 [7], а усилия растяжения задаются на эталонной силовоспроизводящей машине, которая в свою очередь имеет прослеживаемость к Государственному первичному эталону единицы силы ГЭТ 32-2011 [8]. Применение такого подхода обеспечивает прослеживаемость результатов измерения опорных значений механических напряжений к Государственным первичным эталонам, и в соответствии с требованиями ФЗ № 102 даёт возможность оценить показатели точности испытываемого СИ в конкретном диапазоне измерений МН, опираясь на результаты измерений, полученные на эталоне силы.

Для воспроизведения значений МН был разработан стандартный образец СО-800 и утверждён его тип [9]. Экземпляры СО-1 и СО-2 стандартного образца СО-800 выполнены из высококачественной конструкционной

высоколегированной стали, имеющей соответствующие прочностные характеристики, необходимые для проведения испытаний средства измерений в заявленном диапазоне измерений МН.

Метод измерений

В методе акустоупругости [6] измерение МН выполняется с использованием соотношений скоростей упругих волн, которые, в свою очередь, определяются по соотношениям времен их распространения. Эти времена соответствуют временным задержкам при прохождении зондирующих сигналов в материале.

Для измерений временных задержек применяется проверенный в более простых задачах (дефектоскопии, толщинометрии) ультразвуковой эхо-импульсный метод. Поскольку изменение скоростей упругих волн в конструкционных материалах даже при достижении предела текучести не превышает 1%, требуется существенно более высокая точность измерения временных задержек по сравнению с обычным эхо-импульсным методом, где для прозвучивания материала используются низкочастотные видеоимпульсы. В отличие от эхо-импульсного метода в методе акустоупругости для прозвучивания применяются радиоимпульсы с высокочастотным заполнением и колоколообразной низкочастотной огибающей, это позволяет добиться точности измерений временных задержек, в несколько раз превышающей точность обычного эхо-метода.

По соотношению измеренных временных задержек определяются отношения скоростей двух ортогонально поляризованных сдвиговых волн и продольной волны.

Для определения главных напряжений в условиях плоского напряженного состояния (σ_1 и σ_2) по результатам измерений временных задержек используются уравнения акустоупругости [10]:

$$\begin{cases} \sigma_1 = K_1^{||} \left(\frac{t_{01} t_3}{t_{03} t_1} - 1 \right) - K_2 \left(\frac{t_{02} t_3}{t_{03} t_2} - 1 \right) \\ \sigma_2 = K_1^{\perp} \left(\frac{t_{02} t_3}{t_{03} t_2} - 1 \right) - K_2 \left(\frac{t_{01} t_3}{t_{03} t_1} - 1 \right) \end{cases} \quad (1),$$

где $K_1^{||}$, K_1^{\perp} , K_2 – коэффициенты упруго-акустической связи (КУАС) определяемые константами упругости 2 и 3 порядка, МПа ($K_1^{||}$ и K_1^{\perp} соответствуют КУАС для сдвиговых волн, поляризованных, соответственно, вдоль и поперёк направления действия главного напряжения σ_1);

t_{01} , t_{02} , t_{03} – значения задержек сдвиговых волн и продольной волны, измеренные до приложения нагрузки, мкс;

t_1 , t_2 , t_3 – значения задержек сдвиговых волн и продольной волны, измеренные при приложении нагрузки, мкс.

В обозначениях задержек индексы 1 и 2 соответствуют сдвиговым волнам, поляризованным в направлениях, совпадающих с направлениями действий

главных напряжений σ_1 и σ_2 , соответственно, индекс 3 соответствует продольной волне.

Принципиальное значение при использовании акустоупругого эффекта для измерения механических напряжений имеет параметр - собственная акустическая анизотропия материала (a_0 , %), которая характеризует степень изотропности его акустических (и соответственно, упругих) свойств. Она определяется по формуле:

$$a_0 = 200 \left(\frac{t_{\sigma_2} - t_{\sigma_1}}{t_{\sigma_2} + t_{\sigma_1}} \right) \quad (2).$$

Для акустически слабо анизотропных металлов ($a_0 \leq 1\%$) выполняется равенство $K_1^{\parallel} = K_1^{\perp} = K_1$. Кроме того, для таких материалов можно определять разность главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$) по упрощённой формуле:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = D \left(\frac{t_{\sigma_2} t_1}{t_{\sigma_1} t_2} - 1 \right) \approx D(a - a_0) \quad (3),$$

где $D = K_1 + K_2$.

В случае одноосного напряженного состояния, когда $\sigma_2 = 0$, формула (3) позволяет определять одноосные напряжения σ_1 .

Значения упругоакустических коэффициентов материала экспериментально определяются при акустомеханических испытаниях, производимых на силовоспроизводящих установках с использованием стандартных образцов, подвергаемых одноосному ступенчатому нагружению. Порядок проведения акустомеханических испытаний должен соответствовать требованиям ГОСТ Р 55043-2012 [11].

Измерения МН должны выполняться в условиях упругого нагружения, поскольку при пластической деформации изменение структуры материала приводит к существенному изменению значения акустической анизотропии a_0 , что неконтролируемо влияет на погрешность измерения.

Средство измерений

Для измерений МН методом акустоупругости предприятием «ИНКОТЕС» разработан прибор ИН-5101А. Прибор позволяет измерять усреднённые по толщине одно- и двухосные мембранные механические напряжения растяжения и сжатия (используемые в прочностных расчётах конструкций) в условиях упругих деформаций и локально-плоского напряженного состояния. Для выполнения измерений МН в контролируемом материале возбуждаются две сдвиговые волны взаимно ортогональной поляризации и одна продольная волна. Все три волны распространяются в направлении, перпендикулярном плоскости действия МН (прозвучивание перпендикулярно плоскости материала – по толщине). Для того чтобы добиться требуемой высокой точности измерения временных интервалов (порядка 10^{-9} с), регистрация времени прохождения каждой волны осуществляется по многократно отражённому эхоимпульсам на достаточно большой временной базе.

При выполнении измерений направления поляризации сдвиговых волн должны совпадать с направлениями главных напряжений (σ_1 и σ_2).

Для генерации соответствующих зондирующих сигналов и приёма ответных эхоимпульсов применяются трёхкомпонентные совмещённые пьезопреобразователи, имеющие три пьезопластины, закреплённые соответствующим образом в едином корпусе. В существующей модификации прибора ИН-5101А используются пьезопластины, которые генерируют и принимают сигналы частотой 3, 6 и 8 МГц (частота выбирается в зависимости от типа контролируемого материала и его толщины). Установка их на объект осуществляется с помощью магнитных прижимов.

На компьютере, входящем в состав прибора ИН-5101А, установлено программное обеспечение управления прибором, имеющее в своём составе защищённый метрологически значимый вычислительный модуль, который обеспечивает как вычисление временных задержек, так и расчет МН в реальном времени с использованием соотношений (1) и (3).

Первые испытания прибора (ИЦУТ) были проведены в 2005 году, повторные – в 2010 году [12-13]. При этом определялась полная погрешность без выделения систематической и случайной составляющих.

При проведении испытаний выполнялось *полное исследование (калибровка)* прибора, как по параметрам измерения временных задержек, так и по параметрам измерения МН, с учетом прослеживаемости к соответствующим Государственным первичным эталонам (ГЭТ). Для этого применялись специальные (стандартные) образцы с предварительно определёнными упругоакустическими коэффициентами, которые нагружались на силовоспроизводящей машине растягивающей нагрузкой. Работающие в определённом диапазоне нагрузок эти образцы можно рассматривать и как средство для воспроизведения механических напряжений, и как меры (эквиваленты) временных задержек.

В ходе модернизации аппаратной части прибора были существенно улучшены его точностные характеристики. Также разработана новая методика поверки, которая позволяет оценивать случайную и систематическую составляющие погрешности измерений МН, методика основана на измерениях МН с использованием эталонной силовоспроизводящей машины и соответствующих стандартных образцов.

Испытания в целях утверждения типа средства измерений прибора ИН-5101А с улучшенными метрологическими характеристиками были проведены в 2022 году. Эти испытания были выполнены с участием ведущих в области механических измерений метрологических организаций РФ: ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (далее – ВНИИМ) и ФБУ «Нижегородский ЦСМ» (далее – ННЦСМ).

Описание испытаний

Испытания проводились на базе научно-исследовательских лабораторий государственных эталонов в области измерений массы и силы ВНИИМ и отдела промышленной метрологии ННЦСМ при участии специалистов ООО «ИНКОТЕС».

Экземпляры СО-1 и СО-2 стандартного образца СО-800, которые использовались при ИЦУТ, изготовлены из стали, имеющей предел пропорциональности, превышающий 800 МПа, а предел текучести – 1000 МПа. Это позволило обеспечить проведение измерений МН в области упругих значений до 600 МПа.

Стандартный образец СО-800 представляет собой плоский образец, конструкция которого обеспечивает возможность его установки в разрывные и универсальные испытательные машины.

На рисунке 1 показан экземпляр СО-2 стандартного образца СО-800, установленный в эталонную силовоспроизводящую машину, в процессе испытаний в целях утверждения типа прибора ИН-5101А,



Рис 1. Применяемый при ИЦУТ прибора ИН-5101А экземпляр СО-2 стандартного образца СО-800 с закреплённым 3-х компонентным первичным преобразователем, установленный в эталонную силовоспроизводящую машину МСВ-1000МГ4.

Задаваемые значения растягивающих напряжений на ступенях нагружения ($\sigma_{уст}^i$, МПа) определялись по формуле:

$$\sigma_i^{уст} = \frac{10^8 P_i^{уст}}{S_{cp}} \quad (4),$$

где i – номер ступени нагружения;

$P_i^{уст}$ - продольное растягивающее усилие, кН, определяемое с использованием силоизмерительного устройства;

S_{cp} – среднее паспортное значение площади поперечного сечения рабочей части экземпляра СО-2 стандартного образца СО-800, мм², которое определялось с использованием концевых мер длины.

Значения нормированных растягивающих усилий на ступенях нагружения и опорные значения МН, соответствующие им, приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ ступени, i	1	2	3	4	5
P_i^{ycm} , кН	0	45	90	180	285
σ_i^{ycm} , МПа	0	95,5	191	382	605

Значение упругоакустического коэффициента (D) в выражении (3) для данной марки стали определялось в процессе предварительных акустомеханических испытаний (градуировочных измерений) на экземпляре СО-1. Основные испытания по определению диапазона и погрешности измерения МН выполнялись с использованием экземпляра СО-2 и значения коэффициента D , полученного на экземпляре СО-1. Это было сделано для учёта в погрешности возможной разницы акустических свойств двух образцов, изготовленных по единой технологии из стали одной марки, и соблюдения условий воспроизводимости

Определение значения коэффициента D экземпляра СО-1 выполнялось в лаборатории ВНИИМ на эталонной силовоспроизводящей машине СМ-200, зав № 551, обеспечивающей максимальную силу растяжения 200 кН. Машина входит в состав Государственного рабочего эталона единицы силы 1-го разряда в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерения силы, утверждённой приказом Росстандарта от 22.10.2019 № 2498 [14]. Пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения силы машиной не превышают $\pm 0,01\%$. Экземпляр СО-1 нагружался ступенчато нормированным продольным растягивающим усилием в диапазоне от 0 до 176,6 кН (0 - 375 МПа). Процедура соответствовала требованиям [11].

Основные нагрузочные испытания на растяжение выполнялись с использованием экземпляра СО-2 в лаборатории ННЦСМ. Усилия растяжения задавались на эталонной силовоспроизводящей машине МСВ-1000МГ4, заводской № 33, изготовитель «СКБ Стройприбор». Машина обеспечивает максимальную растягивающую нагрузку 1000 кН, входит в состав Государственного рабочего эталона единицы силы 1-го разряда по [14]. Пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения силы машиной в диапазоне до 100 кН не превышают $\pm 0,02\%$, в диапазоне свыше 100 кН не превышают $\pm 0,01\%$.

На экземпляре СО-2 выполнялись прямые измерения МН в процессе его нагружения одноосным продольным усилием в диапазоне от 0 до 285 кН (0-605 МПа). Измерения выполнялись при ступенчатом увеличении и уменьшении растягивающего усилия. Всего, в соответствии с требованиями [11], было проведено три цикла нагружения.

Измерения выполнялись прибором ИН-5101А в режиме одноосных измерений на каждой ступени нагружения при стабилизации нагрузки. В каждом цикле на максимальной ступени было выполнено 10 измерений напряжений, на остальных ступенях – по 5 измерений (всего за 3 цикла на каждой ступени выполнено 30

измерений). Общая выборка значений измеренных напряжений для трёх циклов составила 150 измерений.

Расчёт значений напряжений осуществлялся в процессе измерений в реальном масштабе времени метрологически значимым программным модулем прибора ИН-5101А с использованием соотношения (3) и значения $D = -128000 \text{ МПа}$ (значение, полученное на этапе градуировочных измерений на экземпляре СО-1 в границах погрешности $\pm 0,13\%$).

На рисунке 2 показаны графики заданных и измеренных значений механических напряжений, полученных в процессе испытаний.

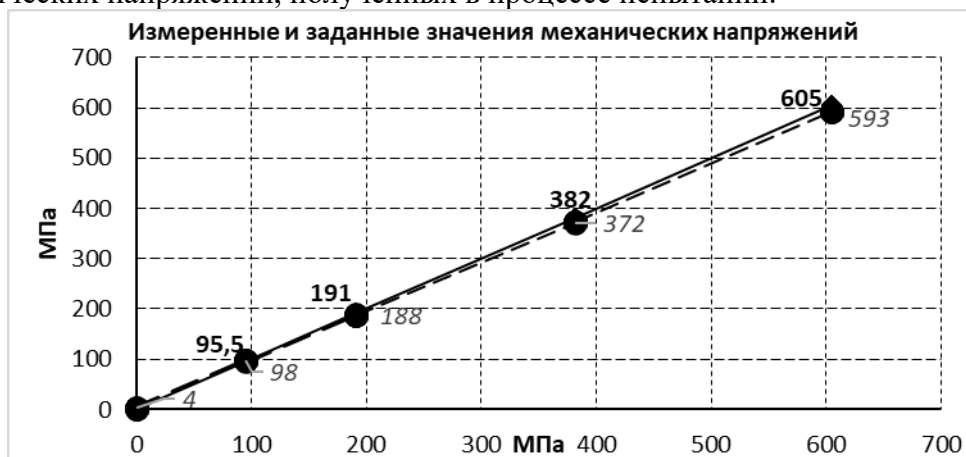


Рис. 2. Заданные (сплошная линия) и измеренные (пунктирная линия) значения механических напряжений (σ_i), полученные при нагружении экземпляра СО-2 стандартного образца СО-800 в процессе испытаний.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При измерении значений МН с использованием вышеописанной методики учитывались следующие составляющие погрешности измерений:

- погрешность определения значений КУАС (коэффициента D) для данной марки стали. Она включает погрешность градуировочных измерений и погрешность, обусловленную естественным технологическим разбросом значений D двух экземпляров стандартного образца СО-800, изготовленных по единой технологии из стали одной марки;

- случайная погрешность, обусловленная погрешностью прибора при измерении временных задержек;

- погрешность измерения силы, задаваемой эталонной силовоспроизводящей машиной;

- погрешность измерения площади поперечного сечения образца.

Случайная составляющая погрешности

Случайная составляющая погрешности измерений определялась как максимальное значение среднеквадратического отклонения (СКО) измеренных значений МН для каждой ступени нагружения (S_i).

Расчёт осуществлялся по измеренным значениям напряжений (σ_{ij}). Количество столбцов расчётной матрицы $i=5$ соответствует количеству ступеней, количество строк $j=5 \times 6=30$ соответствует суммарному количеству измерений МН за три цикла на каждой ступени.

Для каждой ступени нагружения вычислялись:

- среднее значение измеренных МН (σ_i^{cp});
- оценка СКО измеренных значений МН (S_i);
- оценка дисперсии измеренных значений МН (S_i^2).

Определялись максимальные значения дисперсии ($S_{i_{макс}}^2$) и СКО ($S_{i_{макс}}$).

Вычислялась оценка СКО (S^{cp}) среднего арифметического измеренных значений МН по пяти ступеням нагружения и верхняя граница СКО (S) среднего арифметического измеренных значений МН:

$$S = S^{cp} \sqrt{\frac{v}{\chi_v^2}} = 1,1085 S^{cp} \quad (5),$$

где $\chi_v^2=118,17$ - 95%-я квантиль χ^2 -распределения с $v=(j-1) \times 5 = 29 \times 5=145$ степенями свободы;

Далее выполнялась проверка однородности значений дисперсий измеренных значений МН по критерию Кохрэна (G_S) [15].

Случайная составляющая погрешности прибора при измерениях МН ($S_d^{изм}$) принималась равной:

- $S_d^{изм} = S^g = 1,108 \cdot S^{cp}$, при выполнении условия $G_S \leq 0,5063$.

- $S_d^{изм} = S_{i_{макс}}$, при невыполнении условия $G_S \leq 0,5063$.

Заявленный предел (СКО) случайной составляющей погрешности прибора ИН-5101А при измерении МН установлен равным 4 МПа.

Значения случайной составляющей погрешности измерения МН, полученные при испытаниях, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Установленные напряжения, МПа	σ_i^{cp} , МПа	S_i , МПа	$S_d^{изм}$ МПа	Допуск СКО, МПа
0	1,3	2,1	2,1	4
95,5	97	1,5		
191	188,3	0,5		
382	372,8	0,4		
605	593,3	1,0		

Случайная составляющая погрешности (СКО) прибора ($S_d^{изм}$) при измерении МН не превышает 4 МПа.

Систематическая составляющая погрешности

Систематическая составляющая погрешности измерения МН рассчитывалась по измеренным значениям МН на ступенях нагружения.

Для каждой ступени нагружения вычислялись:

- значение полуширины доверительного интервала оценок систематической составляющей погрешности измерения МН:

$$D_i = \sqrt{\frac{(t \cdot S_i)^2}{\nu}} \quad (6),$$

где: $t = 2,045$ – 95 %-я квантиль распределения Стьюдента с $\nu = j-1=29$ степенями свободы;

- 6 значений отклонений измеренных МН от заданных значений:

$$\theta_{ij} = \sigma_{ij \max} - \sigma_{i \text{уст}} \quad (7),$$

где: $\sigma_{ij \max}$ – результаты измерений МН на i -ой ступени нагружения, имеющее максимальную разницу с установленным значением (одно из пяти измерений для каждой из шести серий измерений на каждой ступени за три цикла), $\sigma_{i \text{уст}}$ – заданное значение МН на i -ой ступени нагружения. Всего 30 значений для пяти ступеней.

- 6 пар (12 значений) оценки доверительных границ (верхней и нижней) отклонений результатов измерений МН от заданных значений, где $\Delta_{\text{ни}j}^{\text{изм}}$; $\Delta_{\text{ви}j}^{\text{изм}}$ – измеренные значения систематической составляющей погрешности:

$$\Delta_{\text{ни}j}^{\text{изм}} = \theta_{ij} - D_i, \quad \Delta_{\text{ви}j}^{\text{изм}} = \theta_{ij} + D_i \quad (8).$$

Систематическая составляющая погрешности эталона единицы силы (погрешность задаваемых напряжений) ввиду её малости не учитывалась.

Границы погрешности установки опорных значений МН определялись как:

$$\Delta_{i \text{МН}} = \pm \zeta_{i \text{уст}} \sqrt{\left(\frac{\Delta_p}{P_{i \text{уст}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_b}{b}\right)^2} \quad (9),$$

где Δ_p , Δ_a , Δ_b – границы погрешности создаваемого продольного растягивающего усилия, ширины и толщины образца, соответственно;

$a=40$ мм, $b=12$ мм – номинальные значения ширины и толщины экземпляра СО-2 стандартного образца, соответственно. Пределы допускаемой абсолютной погрешности их измерения $\pm 0,004$ мм, они определяются погрешностью используемого микрометра гладкого цифрового типа МКЦ 50.

Пределы относительной погрешности задаваемого продольного растягивающего усилия эталона единицы силы в диапазоне до 100 кН равны $\pm 0,02\%$, - свыше 100 кН- $\pm 0,01\%$.

Результаты вычислений:

- пределы допускаемой погрешности установки задаваемого МН в диапазоне нагрузок до 100 кН (~ 200 МПа) $\sim \pm 0,04$ МПа;

- пределы допускаемой погрешности задаваемого максимального значения МН при нагрузке 285 кН (605 МПа) - $\sim \pm 0,12$ МПа.

Заданные нормативные значения систематической составляющей погрешности (Θ_i):

- в диапазоне значений от 0 до 120 МПа включительно - $\Theta_i = \pm 6$ МПа;
- в диапазоне значений свыше 120 до 600 МПа - $\Theta_i = \pm 0,05 \sigma_{1i}^{cp}$.

Полученные значения систематической составляющей погрешности измерения МН на ступенях нагружения приведены в таблице 3.

Таблица 3

№ ступени, i	1	2	3	4	5
σ_i^{ycm} , МПа	0	95,5	191	382	605
Доверительные границы систематической составляющей погрешности $\Delta_{ij}^{МН}$, МПа	3,3 -0,7	3,0 -2,0	-1,8 -3,2	-8,9 -10,0	-11,6 -12,4
Границы допуска Θ_i , МПа	± 6	± 6	$\pm 9,6$	$\pm 19,1$	$\pm 30,3$

Доверительные границы отклонений результатов измерения МН на ступенях нагружения от заданных значений не выходят за пределы установленной систематической составляющей погрешности измерений Θ_i .

Отрицательные значения систематической составляющей погрешности при увеличении механических напряжений определяются разницей в значениях коэффициента D двух экземпляров стандартного образца СО-800, которая не превышает $\pm 2\%$. Для других видов стали, как показали многолетние масштабные исследования широкой номенклатуры трубных сталей при разбросе значений КУАС $\pm 4\%$ для сталей одного сортамента, погрешности измерения механических напряжений укладываются в заявленные пределы.

Заключение

Результаты испытаний подтвердили возможность достоверных измерений мембранных механических напряжений растяжения-сжатия в металлических конструкционных материалах, в условиях упругих деформаций и локально-плоского напряженного состояния с использованием прибора ИН-5101А.

Результаты испытаний подтвердили заявленные метрологические характеристики прибора ИН-5101А:

- диапазон измерений МН для сталей (металлов): от $-0,8\sigma_{02}$ до $+0,8\sigma_{02}$, но в пределах от - 600 до +600 МПа;
- предел (СКО) случайной составляющей погрешности прибора при измерении МН: 4 МПа;
- пределы допустимой систематической составляющей погрешности:
 - в диапазоне от -120 до +120 МПа включительно: ± 6 МПа;
 - в диапазонах от -600 МПа до -120 МПа и от +120 МПа до +600 МПа: $\pm 0,05\sigma$, где σ - измеренное значение МН.

Систематическая составляющая погрешности при максимальных значениях (~600 МПа) в 2,5 раза меньше заявленного допуска (~±30 МПа). Такой запас по погрешности необходим, поскольку для других видов сталей технологический разброс значений КУАС может быть больше, чем для материала стандартного образца СО-800.

Испытания подтвердили существенное улучшение точностных характеристик прибора ИН-5101А и расширение диапазона измерений МН. Ранее диапазон измерения ограничивался максимальным значением 480 МПа для сталей с $\sigma_{02}=600$ МПа ($0,8\sigma_{02}$) и жёстко установленными границами *приведённой погрешности измерения ±10% от максимального измеряемого значения (±48 МПа) во всём диапазоне измерений*. В новой модификации прибора в диапазоне до 120 МПа пределы систематической составляющей погрешности ±6 МПа в диапазоне значений свыше 120 МПа используется *относительная погрешность с пределами ±5 % от измеряемых значений МН*. При измеряемом значении 480 МПа пределы систематической составляющей погрешности соответственно равны ±24 МПа.

Прибор ИН-5101А полностью удовлетворяет требованиям нормативных документов в области обеспечения единства измерений, что позволяет использовать его для оценки напряженного состояния ответственных металлоконструкций. Прибор ИН-5101А может применяться для контроля монтажных и остаточных сварочных напряжений при изготовлении и монтаже металлоконструкций, для контроля изменения напряженного состояния металлоконструкций в процессе эксплуатации [16] и принятия соответствующих технических решений по их дальнейшей эксплуатации.

По результатам ИЦУТ на прибор ИН-5101А для измерения механических напряжений получен Сертификат об утверждении типа средств измерений [17]. Сведения об утвержденном типе прибора ИН-5101А внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений в раздел по обеспечению единства измерений в области использования атомной энергии.

Список литературы

1. Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 № 102-ФЗ.
2. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ПРИКАЗ от 28 августа 2020 г. № 2905. «Об утверждении порядка проведения испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа...».
3. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ПРИКАЗ от 15 декабря 2015 г. № 4091. «Об утверждении порядка аттестации первичных референтных методик измерений...».
4. Методика. Техническая диагностика. Определение напряжений в элементах конструкций акустическим методом. Горький: Гф ВНИИНМАШ. 1977. 32с. Авторы: Гузь А.Н., Гуца О.И., Конюхов В.А., Лебедев В.К., Никитина Н.Е.

5. Никитина Н.Е. Определение плоского напряженного состояния конструкционных материалов с помощью объёмных упругих волн // Дефектоскопия. 1999. №1. С. 48-54.
6. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАН, 2005. 208 с.
7. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. ПРИКАЗ от 2 февраля 2021 года № 63 «Об утверждении Государственного первичного эталона единицы длины – метра».
8. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. ПРИКАЗ от 5 мая 2012 года № 299 «Об утверждении Государственного первичного эталона единицы силы».
9. Описание типа стандартного образца. Стандартные образцы механических свойств сталей (набор ИНКО МСС-МН 1) ГСО 11544-2020/ГСО 11545-2020 (приложение к Свидетельству об утверждении типа стандартных образцов. RU.C.01.442.A № 6644 от 09.07.2020 года. СО механических свойств сталей).
10. ГОСТ Р 52731-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования.
11. ГОСТ Р 55043-2012. Контроль неразрушающий. Определение коэффициентов упругоакустической связи. Общие требования.
12. Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.28.011.A № 20395 от. 22.04.2005 г. Приборы для измерений механических напряжений ИН-6101А.
13. Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.28.011.A № 41227 от 28.11.2010 г Приборы для измерений механических напряжений ИН-6101А.
14. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 октября 2019 года № 2498 «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений силы».
15. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений.
16. Камышев А.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А., Модестов В.С., Пивков А.В.: Расчётно-инструментальный метод оценки НДС с определением силовых граничных условий методом акустоупругости и его применение для анализа повреждаемости СС№111 /Тяжёлое машиностроение. 2015. №1-2. С.11-18.
17. Сертификат об утверждении типа средств измерений № 87772-22 от 26.12.2022 года. Приборы для измерений механических напряжений ИН-5101А.