

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СРЕДСТВАМ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

© 2025 г. А.И. Шихов^{1,*}, К.В. Гоголинский^{2,**}, А.С. Зубарев^{3,***},
Я.Г. Смородинский^{4,****}, Д.В. Копытина^{1,*****}, А.А. Виноградова^{1,*****}

¹Санкт-Петербургский Горный университет императрицы Екатерины II,
Россия 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, 2

²НИЦ «Курчатовский Институт» — ПИЯФ,

Россия 188300 Лен. область, г. Гатчина, мкр. Орлова роца, 1

³А3 Инжиниринг, Россия 117105 Москва, Нагорный проезд, 7, стр.1

⁴Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,

Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

E-mail: *shihov-gol@mail.ru; **nanoscan@yandex.ru; ***info@a3-eng.com; ****jack.sm@mail.ru;

*****daryakopytina2000@yandex.ru; *****Vinogradova_AA@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 25.10.2024; после доработки 29.01.2025

Принята к публикации 31.01.2025

Установление требований к акустическим мерам и стандартным образцам и контроль за их выполнением при производстве и аттестации является важной задачей. В данной работе рассмотрены параметры, влияющие на скорость распространения упругих волн в стали, определен их вклад в суммарную неопределенность измерения скорости распространения продольной волны. На основе полученных данных проведен анализ стандартов, посвященных ультразвуковым методам контроля, в части требований к стандартным образцам. Проведенное исследование позволило установить, что предъявляемые действующими стандартами требования не в достаточной степени учитывают ряд факторов, которые могут повлиять на характеристики ультразвуковых мер и стандартных образцов. Стандартные образцы, изготовленные без учета этих факторов, с большой вероятностью не позволяют адекватно оценить метрологические характеристики ультразвукового оборудования.

Ключевые слова: мера, стандартный образец, метрологические характеристики, ультразвук, акустические параметры, упругие волны.

ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS FOR METROLOGICAL SUPPORT OF METHODS AND MEANS OF ULTRASOUND CONTROL

© 2025 A.I. Shikhov^{1,*}, K.V. Gogolinsky^{2,**}, A.S. Zubarev^{3,***},
Ya.G. Smorodinsky^{4,****}, D.V. Kopytina^{1,*****}, A.A. Vinogradova^{1,*****}

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Russia 199106 St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21st line, 2

²Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P.Konstantinov of NRC «Kurchatov Institute», Russia 188300, Leningrad region, Gatchina md. Orlova grove, 1

³“A3 ENGINEERING”, Russia 117105 Moscow, Nagorny passage, 7, building 1

⁴M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Russia 620108 Yekaterinburg, Sofya Kovalevskaya str., 18

E-mail: *shihov-gol@mail.ru; **nanoscan@yandex.ru; ***info@a3-eng.com; ****jack.sm@mail.ru;

*****daryakopytina2000@yandex.ru; *****Vinogradova_AA@pers.spmi.ru

Establishing requirements for acoustic measurements and standard samples and monitoring their implementation during production and certification is an important task. In this paper, the parameters affecting the propagation velocity of elastic waves in steel are considered, and their contribution to the total uncertainty of measuring the propagation velocity of a longitudinal wave is determined. Based on the data obtained, an analysis of the standards devoted to ultrasonic testing methods was carried out in terms of the requirements for standard samples. The conducted research allowed us to establish that the requirements imposed by the current standards do not sufficiently take into account a number of factors that may affect the characteristics of ultrasound measures and reference samples. Standard samples made without taking these factors into account are unlikely to adequately assess the metrological characteristics of ultrasound equipment.

Keywords: measure, standard sample, metrological characteristics, ultrasound, acoustic parameters, elastic waves.

DOI: 10.31857/S0130308225030039

ВВЕДЕНИЕ

Акустический вид неразрушающего контроля (НК) является неотъемлемой частью оценки технического состояния материалов и изделий в различных областях промышленности [1]. Очевидно, что достоверность полученной информации о дефектах играет важную роль в обе-

спечении качества продукции, безопасности работы предприятий и т. д. Достоверность контроля обеспечивается:

подтверждением заявленных технических и метрологических характеристик средств контроля, включая поверку и калибровку согласно №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»;

настройкой оборудования НК в соответствии с требованиями документации на методику НК;

подтверждением работоспособности методики НК применительно к конкретным объектам контроля (валидация методики НК).

Для реализации данных задач в практике ультразвукового НК применяются образцы, представляющие собой изделия из различных материалов с заданными геометрическими размерами и акустическими свойствами в т.ч. содержащие естественные дефекты или искусственные (имитаторы дефектов). К таким образцам относятся:

меры, обеспечивающие подтверждение метрологических характеристик оборудования НК при поверке и калибровке. Мерой по определению является средство измерения, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов, с приписанными им значениями (РМГ 219-2013);

настроечные или контрольные образцы, представляющие собой образцы из материала определенного состава с заданными геометрическими размерами, используемые для настройки и оценки параметров аппаратуры и дефектоскопических материалов, а также в качестве индикаторов их работоспособности. К настроечным и контрольным образцам относятся, в том числе объекты, идентичные объекту контроля или его части с естественными и/или искусственными дефектами и воспроизводящие параметры объектов, подлежащих НК, предназначенные для проверки правильности выполнения методики НК.

Необходимо отметить, что зачастую для обозначения всех перечисленных выше объектов среди дефектоскопистов используется термин «стандартный образец». В российской практике в результате использования различной терминологии существует некоторая путаница при определении статуса и установлении к таким образцам технических и метрологических требований [2, 3]. Использование в середине прошлого века термина «стандартный образец» применительно к объектам для калибровки, настройки и проверки работоспособности приборов ультразвукового НК привело к возникновению формальных и сутевых противоречий при отнесении средств и методов НК к сфере государственного регулирования в области обеспечения единства измерений. В соответствии с ГОСТ 32934—2014 (ISO Guide 30:1992) «Стандартные образцы. Термины и определения, используемые в области стандартных образцов» стандартный образец — это «материал (вещество), достаточно однородный и стабильный по отношению к одному или нескольким определенным свойствам, для того чтобы использовать его в соответствии с назначением в измерительном процессе». В соответствии с ФЗ-102 «Об обеспечении единства измерений» — «образец вещества (материала) с установленными по результатам испытаний значениями одной и более величин, характеризующих состав или свойства этого вещества (материала)». Данные определения, очевидно, не в полной мере подходят к ультразвуковым (УЗ) СО, поскольку их метрологические характеристики определяются не только свойствами материала, но и геометрическими (линейно-угловыми) величинами. В результате на практике такие образцы получили статус мер. В соответствии с РМГ 29-2013 [4] мера — это «средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов, с приписанными им значениями». Поскольку метрологические характеристики УЗ СО определяются одновременно геометрическими размерами и свойствами материала, из которого они изготовлены, они имеют признаки как мер, так и стандартных образцов, что необходимо учитывать при их производстве и метрологической аттестации. Пути решения этой проблемы в рамках действующего законодательства могут быть либо предъявление требований к исходному сырью и технологии производства, как для СО, с последующей аттестацией, либо придания им статуса **многопараметрических мер**, воспроизводящих и передающих такие величины, как линейно-угловые размеры, скорость звука, коэффициент затухания и др., являющиеся критическими при поверке и калибровке ультразвукового оборудования НК. В этом случае такие величины должны прослеживаться к первичным эталонам, либо референтным методикам через поверку или калибровку.

Исходя из метрологических и технологических операций, для которых применяются ультразвуковые образцы, их можно разделить на две большие группы:

образцы, используемые для поверки (калибровки) при производстве и ремонте ультразвуковой аппаратуры (дефектоскопы, толщиномеры и др.);

образцы, используемые для настройки и проверки работоспособности аппаратуры перед проведением контроля.

С определенной степенью допущения можно сказать, что образцы первой группы подтверждают и устанавливают нормируемые и действительные метрологические характеристики средств ультразвукового контроля, а второй группы — устанавливают основные параметры ультразвукового контроля. Данная классификация может стать основной для дальнейшей разработки требований к каждой группе образцов. Соответственно, на основе предложенных выше групп предлагается следующее разделение ультразвуковых образцов:

- Группа 1: Меры, сертифицированные стандартные образцы (ССО) согласно ГОСТ ISO Guide 33—2019 [5].

- Группа 2: Несертифицированные стандартные образцы, настроечные/контрольные образцы, испытательные образцы.

Образцы первой группы предназначены для обеспечения единства, установления и подтверждения технических и метрологических характеристик приборов акустического контроля и, по сути, представляют собой эталонные меры, воспроизводящие, наряду с геометрическими размерами, те или иные акустические характеристики, в частности скорость распространения волны.

На образцах второй группы устанавливаются основные параметры контроля, определяющие достоверность его результатов, к ним, в частности, относятся чувствительность [6]. Отражающая способность неоднородности или дефекта будет определяться его геометрическими параметрами, а также акустическими параметрами как среды, так и самого дефекта [7]. Поэтому в образцах второй группы объекту контроля должен соответствовать не только материал, но и искусственный дефект, который должен иметь акустические характеристики, эквивалентные реальным дефектам. Соответственно, данная группа образцов должна разрабатываться совместно с методикой контроля с учетом специфики как свойств объекта контроля [8, 9], так и параметров его эксплуатации [10]. Метрологические и технические характеристики таких образцов должны определяться методикой контроля.

В дальнейшем в тексте статьи во избежание терминологической путаницы мы будем применять термин «УЗ образец 1/2 группы» по отношению ко всем типам УЗ мер и образцов, независимо от терминологии, применяемой к анализируемым образцам в стандартах и нормативных документах.

Поскольку требования к образцам второй группы определяются специфическими особенностями объекта контроля и методики контроля, в дальнейшем основное внимание в данной работе будет уделено образцам первой группы, предназначенным для обеспечения единства выполнения процедур настройки и оценки метрологических и технических характеристик ультразвукового оборудования.

АНАЛИЗ СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫМ К УЗ ОБРАЗЦАМ, И ЗАЯВЛЕННЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Предметом дальнейшего анализа является установления соответствия между метрологическими характеристиками (приписанными значениями величин и точностью их определения) образцов 1 группы и требованиями к техническим характеристикам (материалу и технологии изготовления), предъявляемым к таким образцам в соответствующих стандартах и нормативных документах. По мнению авторов [11], метрологические характеристики самих образцов, относящихся к первой группе, не во всех случаях обеспечивают требуемую, заявленную в технической документации точность при настройке ультразвукового оборудования. Так, в частности, в [11] указано, что с учетом требований к метрологическим характеристикам для мер из комплектов [12] разброс скорости распространения продольной волны составляет ± 163 м/с, при номинальном значении скорости распространения продольной волны 5900 м/с, погрешность измерения угла ввода упругой волны, вызванная только изменением скорости распространения упругой волны, составит $\pm 1,4^\circ$ при допустимых $\pm 1^\circ$, и это без учета других влияющих факторов. Здесь стоит отметить, что в [11] указан разброс скорости распространения продольной волны с учетом допустимой погрешности на измерение действительного значения фактической скорости распространения продольной волны, т.е. допустимый разброс скорости распространения продольной волны в материале образца меньший, а именно ± 133 м/с, соответственно и погрешность измерения угла ввода будет ниже, указанной в [11]. Кроме того, в нормативном документе [13] указано, что допустимая погрешность измерения угла ввода $\pm 2,5^\circ$ и более в зависимости от номинального значения угла ввода ПЭП. Также стоит отметить, что допустимые отклонения самого угла ввода ПЭП, согласно [14, 15], $\pm 1,5^\circ$ и более, при этом данные нормативы утратили силу, а в вышедшем взамен данных нормативов стандарте [16] допустимое отклонение угла ввода $\pm 2^\circ$. Поэтому вывод о несоответствии метрологических характеристик данных образцов требуемым может быть преждевременным. Однако приведенные выше факты

позволяют сделать выводы о необходимости проведения дополнительных исследований метрологических характеристик выпускаемых мер.

При этом, как будет показано далее, для обеспечения требуемых метрологических характеристик необходимо учитывать значительный ряд факторов при изготовлении данных образцов. Однако технология изготовления не регламентирована или регламентирована в объеме, недостаточном для изготовления мер с необходимыми для выполнения требований этого же стандарта характеристиками. Более того, в выпущенном взамен [15] стандарте [16] регламентируются только геометрические параметры, несмотря на то, что меры СО-2, СО-3 также предназначены для воспроизведения акустических параметров.

Исходя из вышесказанного, целью данной работы является анализ факторов, влияющих на акустические характеристики металлов, а также анализ нормативной базы, регламентирующей производство мер и стандартных образцов, используемых в акустическом виде контроля, на предмет учета выявленных влияющих факторов. Причем, так как некоторые образцы используются и как меры, и как стандартные и настроечные образцы, необходимо анализировать предъявляемые требования ко всем типам образцов. Результаты проведенного анализа позволят регламентировать требования к изготовлению и производству мер, обеспечивающих необходимую точность измерения параметров ультразвуковых приборов.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛОВ

Для описания распространения упругой волны в металле, в том числе в стали, используется уравнения Ламе. При этом предполагается, что среда, в которой распространяется ультразвуковая волна, является изотропной. Однако, как показывают исследования [17—22], далеко не всегда образцы стали и металлов в целом могут считаться таковыми. Как показано в [17, 23, 24], микроструктура материала, в том числе морфология зерен, количество фаз и направление кристаллов, оказывает влияние на анизотропию механических свойств, соответственно, в общем случае, можно говорить о влиянии микроструктурных факторов на скорость распространения упругих волн. В [25] отмечается, что в зависимости от группы термической обработки и времени охлаждения в микроструктуре стали изменялась толщина феррита-перлита, что оказывало влияние на скорость распространения упругих волн, а в [26] отмечено влияние фазового перехода аустенита в мартенсит на величину коэффициента Пуассона.

Показанные [25, 26] результаты можно объяснить, представив модуль упругости стали в целом как материала, используя приближение Фойгта—Рейса [27]:

$$E_c = \sum_{i=1}^N E_i v_i, \quad (1)$$

где E_c — модуль упругости всего материала; E_i , v_i — модуль упругости и объемное содержание каждой фазы соответственно; N — количество фаз.

Так как для каждой фазы присуще свое значение модуля упругости, то с учетом выражений (1) и уравнения Ламе становится очевидно, что изменение микроструктуры, а также количественное содержание каждой фазы оказывают влияние на скорость распространения упругой волны.

Независимо от причин возникновения и типа анизотропии неоднородность, вызванная тем или иным изменением свойств образца, может оказывать влияние как непосредственно на скорость распространения упругой волны [28], так и на акустический тракт волны [29], тем самым внося неопределенность в оценку пути, который проходит волна в среде. В [28] показано, что в зависимости от ориентации зерен в аустенитной стали скорость распространения продольной волны составляла 5780 и 6210 м/с соответственно. При этом стоит отметить, что ультразвуковые исследования в работе [28] проводились на высоких частотах (15 МГц), то есть длина волны составляла порядка 0,4 мм, что в сочетании с крупным размером зерна аустенитной стали и позволило выявить акустическую анизотропию.

Одной из частых причин возникновения анизотропии являются остаточные напряжения, которые могут возникать как на этапе изготовления, так и в результате внешних воздействий. В свою очередь влияние остаточных напряжений на скорость распространения упругой волны в материале неоднократно показано в работах различных авторов [30, 31, 32]. Одно из выражений, описывающих зависимость скорости распространения упругой волны от величины напряжений, выглядит следующим образом [30]:

$$V_{ij} = V_0 \left(1 + a_{ij} \frac{T_{ij}}{E} \right); \quad (2)$$

$$T_{ij} = J_{ia} \frac{\partial(\rho_0 \Phi)}{\partial \eta_{aj}}, \quad (3)$$

где E — модуль упругости второго и третьего порядка; V_0 — скорость упругой волны в ненагруженном состоянии; T_{ij} — статическое напряжение; η_{aj} — деформация; $(\rho_0 \Phi)$ — свободная энергия единицы объема деформируемого изотропного тела; J_{ia} — матрица Якоби; V_{ij} — скорость упругой волны в нагруженном состоянии.

Если величина остаточных напряжений влияет на скорость распространения упругих волн, то можно говорить о том, что факторы, оказывающие влияние на величину остаточных напряжений, также оказывают влияние и на распространение упругой волны в среде. Так, например, в [33] рассмотрена анизотропия скорости распространения упругой волны в стальном образце в результате температурного и механического воздействия. Величина температуры и объемного сжатия были подобраны таким образом, чтобы не допустить зарождения и распространения существующих термических трещин. Температура оказывает более существенное влияние на величину скорости распространения продольной волны, нежели объемное сжатие, однако, в отличие от температуры, влияние объемного сжатия на скорость распространения волны имеет анизотропный характер по направлению распространения волны и наибольшее изменение скорости наблюдаются в направлении оси Z . В [34] показано влияние геометрии образцов на величину остаточных напряжений. Остаточные напряжения в плоских прямоугольных образцах были меньше, нежели в образцах с криволинейными стенками (круглыми или полукруглыми). В [32] отмечено, что на величину остаточных напряжений, кроме вышеуказанных факторов, влияют теплофизические характеристики.

В разрабатываемой нормативной документации на образцы для ультразвукового контроля [35] в качестве материала в состоянии поставки, т.е. без предварительной термообработки, указана так называемая мягкая сталь. По всей видимости, это сделано с целью снижения величины остаточных напряжений в образце, возникающих при его изготовлении. Однако мягкие низкоуглеродистые стали обладают высокой анизотропией механических свойств, которая возникает как на этапе твердения расплава, так и на этапе обработки [36]. Также в [37] отмечено, что такой метод борьбы с пластической анизотропией, как термообработка, не всегда работает и в случае изготовления материала методом селективного лазерного плавления анизотропия поперечной деформации останется практически неизменной. Кроме того, в [38] отмечают, что вклад в акустическую анизотропию текстуры образца сравним с вкладом упругих напряжений. В свою очередь в [39, 40] рассмотрено влияние пластических деформаций на акустическую анизотропию, и в [40] приведено выражение, связывающее акустическую анизотропию с компонентами пластических деформаций, причем, как отмечают авторы, выражение (4) получено для области малых пластических деформаций:

$$\Delta a = a_0 + a_1 (\varepsilon_1^P + \varepsilon_2^P) + C_a (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (4)$$

где a_0 — начальная акустическая анизотропия; $\varepsilon_1^P, \varepsilon_2^P$ — компоненты пластических деформаций; σ_1, σ_2 — компоненты главных напряжений; a_1, C_a — константы материала, независимые от пластических деформаций.

Очевидно, что пластические деформации приводят к изменению текстуры материала, и компонент $a_1 (\varepsilon_1^P + \varepsilon_2^P)$ в выражении (5), судя по всему, описывает вклад изменения текстуры материала в акустическую анизотропию, о влиянии которой на скорость распространения упругой волны также заявляется в [41], причем авторы отмечают, что корреляция анизотропии скорости распространения продольной волны и изменения текстуры нержавеющей стали более выражена, нежели в высокопрочной мартенситной стали.

Геометрические размеры образцов стоит рассматривать не только с точки зрения влияния на величину остаточных напряжений. В [42, 43] показано влияние неровности поверхности на акустический тракт. Авторы отмечают, что в зависимости от типа формы неровности поверхности могут возникать различные явления, такие как отклонения акустической оси от номинального значения и изменения поляризации волны. Кроме того, шероховатость поверхности и радиус кривизны оказывают значительное влияние на рассеивание отраженного сигнала. Также стоит отметить, что данные эффекты проявляются в различной степени, в зависимости от соотношения неровностей и длины волны.

Проведенный анализ показал, что на скорость распространения упругих волн в металлах влияют как внутренние факторы: химический состав, структура, остаточные напряжения, так и внешние: температура при эксплуатации образца, пластические деформации заготовки в процессе изготовления. Кроме того, на акустические характеристики образца влияет технология его

Факторы, влияющие на изменение скорости распространения продольной волны

Влияющий фактор		Величина изменения скорости продольной волны	Тип стали	Источник
Изменение микроструктуры в результате циклической нагрузки	Основной металл	20 м/с	ASTM 1020 (аналог Ст20)	[6]
	Зона термической обработки	28 м/с		
Термическое и механическое воздействие	Одноосное сжатие	200 м/с	ATS 314 (аналог Ст 100X15M)	[33]
	Нагрев до 600 °С	250 м/с		
Внешние условия	Нагрев от 18 до 50 °С	30 м/с	AISI 304 (аналог Ст 08X18H10)	[44]
Термическая обработка	Отпуск при температуре от 152 до 650 °С	37 м/с	Мартенситная углеродистая	[41]
Термическая обработка	Нагрев в диапазоне температур, эквивалентом отпуску (изменение твердости от $\Delta = 25$ HRC)	50 м/с	Сталь	[45]
Термическая обработка	Нагрев до 600 °С (изменение твердости $\Delta = 250 - 200$ HB)	60 м/с	AR450	[46]
Фазовый состав	Соотношение фаз	4 м/с на 1 % мартенсита	Сталь	[47]
	Нагрев до 900 °С	≈ 1 [м/с]/°С независимо от фазового состава		

изготовления, в том числе термическая обработка, шлифовка и т.д. В табл. 1 показаны изменения скорости распространения продольной волны под действием различных факторов. Как можно видеть, каждый влияющий фактор вносит различный вклад в абсолютное значение скорости распространения продольной волны в зависимости от типа стали.

АНАЛИЗ ДОКУМЕНТОВ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ НА УЗ ОБРАЗЦЫ

Как было сказано ранее, недостаточность терминологической базы не позволяет четко разделить ультразвуковые меры, эталонные, калибровочные, настроечные и контрольные образцы и на основе определенной классификации предъявлять требования к их метрологическим характеристикам. При проведении анализа нормативной базы в данной работе все образцы и меры были условно разделены на две группы, которые обсуждались ранее, а именно: образцы для определения технических и метрологических характеристик оборудования и образцы для установления основных параметров ультразвукового контроля.

Далее коротко приведены требования к образцам обеих групп в стандартах.

В [48] сказано, что образцы изготавливают исходя из принципа действия и характеристик обеспечиваемых ими средств неразрушающего контроля трубопроводов. При этом диаметр образца должен соответствовать условному проходу контролируемого трубопровода по ГОСТ 28338. Толщина стенки образца также зависит от применяемого оборудования. В [15, 16] предлагают использовать в качестве настроечных образцов стандартные образцы СО-2, СО-3 или СО-3Р для преобразователей с частотой 1,25 МГц и более. Форма и размеры этих образцов регламентированы. В [49] приведены следующие требования к геометрии стандартных образцов: плоские образцы должны иметь толщину до 60 мм, ступенчатые — свыше 60 мм. Толщина плоского стандартного образца не должна отличаться от толщины контролируемого проката более чем на 10 %. А в [50] предполагает использование ступенчатых образцов в виде единого блока или отдельных ступеней. Высота первой ступени и различие в высотах двух соседних ступеней должны быть не более 50 мм. Высота последней ступени — толщина контролируемого проката. Согласно [51], в качестве образца служит отрезок заготовки, по сечению равный или с отклонением не более 10 % от размеров контролируемой продукции и аналогичный ей по своей конфигурации. В [52] ссылаются на размеры и форму образцов, указанных в ГОСТ

21397—81. В [45] устанавливаются минимальные размеры образцов: минимальная ширина — 30 мм; минимальная длина — 120 мм. Изготавливают эти образцы из трубы, идентичной контролируемому объекту. Также присутствует ссылка на образцы СО-2, СО-3, как и в [53]. В то же время в [54] указано, что образец должен повторять геометрию контролируемого объекта и иметь толщину стенки, соответствующую номинальной толщине стенки или отличающуюся от нее не более чем на 10 %. В [55] для настройки преобразователей предлагает использовать образцы СО-2 и СО-3. Однако для определения некоторых параметров предусмотрены специальные образцы. Так, отклонение акустической оси прямых и наклонных преобразователей определяют по образцу, представленному на рис. 1 (на поверхностях А и В наносят риски глубиной не более 0,05 мм, расстояние между рисками — $(2 \pm 0,1)$ мм), а фокусное расстояние прямого преобразователя — по образцу на рис. 2. В [56] установлены следующие геометрические параметры образцов:

– образцы для калибровки точности должны представлять собой цилиндры диаметром D и длиной L . Диаметр образца при этом не должен быть меньше 3-кратного диагонального размера поверхности ультразвукового преобразователя;

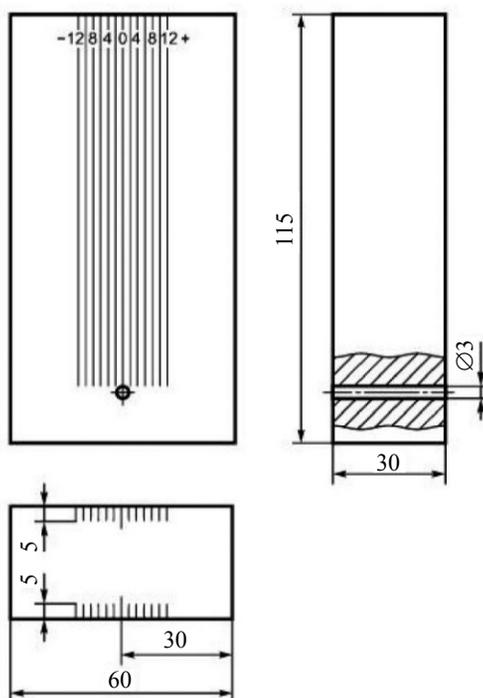


Рис. 1. Контрольный образец для определения отклонения акустической оси прямых и наклонных преобразователей.

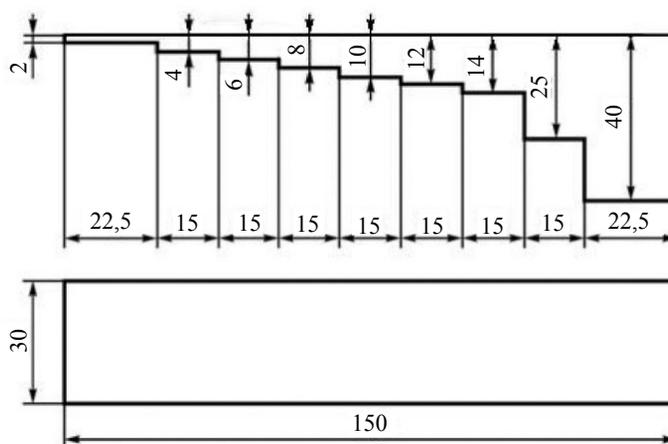


Рис. 2. Контрольный образец для определения глубины фокуса прямых преобразователей (материал — Ст.3).

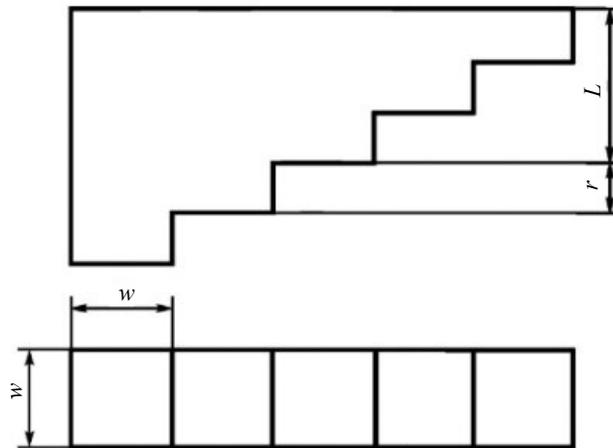


Рис. 3. Образец для калибровки разрешающей способности: w — ширина ступеньки; r — высота ступеньки; L — длина образца.

– образцы для калибровки разрешающей способности (рис. 3) должны содержать не менее пяти ступенек, ширина которых должна быть больше либо равна 3-кратному диагональному размеру поверхности преобразователя, а высота ступеньки — менее или равна заданной разрешающей способности.

Шероховатость поверхности в различных нормативных документах выражена различными показателями. Так, [56] в качестве параметра шероховатости устанавливает высоту неровностей профиля по десяти точкам Rz , в то время как [57] указывает наибольшую высоту неровностей профиля R_{\max} . В [49, 50, 52, 58, 59] при определении шероховатости устанавливается, что она должна быть такой же, как и у объекта контроля. Остальные стандарты никак не регламентируют требования к шероховатости образцов.

На скорость ультразвуковой волны в большой степени влияют материал образца и режим термической обработки. Большая часть стандартов в качестве требования к материалу образца устанавливает его соответствие материалу контролируемого объекта. Термическая обработка при этом учтена только в [49], где говорится, что образец должен быть изготовлен из того же структурного класса и подвергаться такой же термообработке, что и объект контроля. В [60] допускается использование материала, по акустическим свойствам соответствующего контролируемому изделию. Более конкретные требования регламентированы [15, 16], где сказано, что образцы должны быть изготовлены из стали марки Ст20. Лишь два стандарта определяют требования и к материалу, и к термической обработке образцов. В [57] для изготовления образцов используется алюминиевый сплав марки Д16 в закаленном и естественно состаренном состоянии Д16Т, а в [56] помимо конкретного материала полностью прописана технология термообработки.

В [61] указаны нормируемые характеристики образцов СО-2 и СО-3. Стандарт [61] (утративший силу в РФ) предъявляет требования к геометрическим характеристикам, материалу, шероховатости образцов и скорости распространения продольной волны. В [16], вышедшем взамен [61], указаны только геометрические характеристики и материал образцов СО-2 и СО-3.

Результаты проведенного анализа нормативной базы ультразвуковых методов и средств контроля сведены табл. 2. В документах [15, 16, 55—57, 61—65] регламентируются требования к образцам первой группы, в документах [48—54, 59, 60, 66, 67] речь идет об образцах второй группы. При этом стоит отметить, что ряд стандартов [15, 16, 49, 52, 53, 55, 57] допускает использование ультразвуковых мер, относящихся к первой группе, в качестве образцов второй группы.

Как показал проведенный анализ, из 20 проанализированных стандартов лишь 9 регламентируют скорость звука в образцах. При этом в 5 нормативных документах установлено, что скорость звука в образце должна быть такой же, как в объекте контроля. Три документа задают конкретное значение скорости звука при нормальной температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ [15, 56, 57].

В то же время нормирование характеристик образцов второй группы сводится к тому, что они должны иметь свойства и характеристики, идентичные объекту контроля, то есть изготовлены из него. Как говорилось ранее, метрологические характеристики таких образцов должны определяться методикой измерений, и дальнейший анализ их соответствия общим требованиям

Таблица 2

Результаты анализа нормативной документации

Наименование стандарта	Требования к материалу	Требования к геометрическим параметрам	Требования к скорости звука	Требования к шероховатости поверхности
ГОСТ Р ИСО 16831—2016	+	+	+	+
ГОСТ Р ИСО 16811—2016	+/-	-	+/-	-
ГОСТ Р 8.637—2007	+/-	+	+/-	-
ГОСТ 21397—81	+	+	+	+/-
ГОСТ Р ИСО 16809—2015	-	-	-	-
ГОСТ Р 55724—2013	+	+	-	-
ГОСТ 26126—84	+/-	-	-	-
ГОСТ 18576—96	+	+	+	-
ГОСТ 31244—2004	+/-	-	-	+/-
ГОСТ Р 57932—2017	-	-	-	-
ГОСТ 24507—80	+	+/-	-	+/-
ГОСТ 22727—88	+/-	+/-	+/-	+/-
ГОСТ 28831—90	+/-	+/-	+/-	+/-
ГОСТ 21120—75	+/-	+/-	+/-	-
ГОСТ Р 50.05.03—2022	+/-	+	+/-	-
ГОСТ Р 50.05.02—2018	+/-	+	-	+
ГОСТ Р 50.05.04—2018	+/-	+/-	-	-
ГОСТ Р 50.05.13—2019	+/-	+	-	-
ГОСТ Р 50.05.18—2019	+/-	+/-	-	-
СТО РЖД 11.009-2012	-	-	+	-
СТО РЖД 1.11.002-2008	+/-	-	+	-

Примечание: «+» — требование присутствует и регламентировано качественно и количественно; «+/-» — требование присутствует, регламентировано качественно; «-» — требование отсутствует.

не имеет смысла, так как установление основных параметров ультразвукового контроля, по сути, выполняется на объекте контроля. С этой точки зрения можно сказать, что требования, указанные в нормативной документации, достаточны.

Образцы же первой группы должны обеспечивать воспроизводимость хранимой единицы. Как показал анализ влияющих на скорость распространения упругой волны факторов, для обеспечения требуемой точности к образцам первой группы должны предъявляться исчерпывающие требования, с конкретным описанием технологии изготовления, материала, геометрических параметров и акустического воздействия.

В рассмотренных стандартах и описаниях типа средства измерения требования к материалу образцов сводится к указанию марки стали и ссылки на нормативы [68, 69], в которых указаны механические свойства используемых марок сталей. Причем при изготовлении образцов из комплекта [12] допускается использование различных марок стали, указанных в описании типа средства измерения, для которых указано номинальное значение скорости распространения продольной волны. Разность данного показателя для трех различных марок стали составляет всего 20 м/с, хотя в [28] показано, что даже в пределах одной марки стали разброс скорости распространения продольной волны может составлять порядка 300 м/с.

АНАЛИЗ ВКЛАДА ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ В СУММАРНУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ

Как показал анализ стандартов [16, 56, 61, 68, 69], большинство параметров, влияющих на скорость распространения упругих волн, рассмотренных ранее, не регламентированы для образцов СО-2 и СО-3. С целью формирования предварительных выводов о необходимости регламентирования тех или иных параметров при изготовлении данных образцов был выполнен анализ вклада ряда входных величин в неопределенность измерения скорости распространения продольной волны. Расчет производился на основе двух модельных уравнений [7, 70] для определения скорости распространения продольной волны:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}; \quad (5)$$

$$V_p = \frac{L}{T}, \quad (6)$$

где V_p — скорость распространения продольной волны; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона; ρ — плотность; L — путь волны в образце; T — время распространения волны в образце.

Вклад входной величины в суммарную неопределенность вычислялся следующим образом:

$$u_i = c_i \cdot u(x_i); \quad (7)$$

$$c_i = \frac{\partial V}{\partial x_i}, \quad (8)$$

где u_i — вклад неопределенности входной величины в измеряемую величину; $u(x_i)$ — неопределенность входной величины; c_i — коэффициент чувствительности; x_i — входная величина.

В качестве входных величин были проанализированы три параметра — модуль упругости E как параметр физико-механических и акустических свойств материала образца, высота образца L как геометрический параметр образца и время распространения волны в образце T как параметр, определяемый средством измерения, в данном случае дефектоскопом (инструментальный вклад). Величина неопределенности E получена из литературных источников и характеризует разброс величины модуля упругости в материале Ст20 [71], так как она указана в качестве материала для образцов СО-2 и СО-3, при этом разброс величин физико-механических параметров характерен и для других марок стали; L — максимальный допуск отклонения высоты образца, взятый из методики поверки образца СО-2 [12]; T — предел допускаемой абсолютной погрешности измерения времени дефектоскопа УСД50, допуская, что величина инструментальной погрешности не значительно отличается для стандартных дефектоскопов. В табл. 3 приведены значения неопределенности входных величин и соответствующего вклада в суммарную неопределенность.

Таблица 3

Вклад входных величин в суммарную неопределенность

Входная величина	Неопределенность входной величины	Вклад в неопределенность, м/с
E , ГПа	21	300
L , мм	0,2	10
T , мкс	0,14	20

Как можно видеть, наибольший вклад в неопределенность измерения скорости распространения продольных волн в образце СО-2 вносит именно параметр физико-механических свойств материала. Причем рассчитанная неопределенность превышает допускаемую погрешность скорости распространения продольной волны в образцах СО-2, указанную как в описании типа средства измерения [12] 133 м/с, так и в стандартах [15, 61] 118 м/с и 59 м/с соответственно. Кроме того, как можно видеть из данных, приведенных в табл. 1, величина разброса скорости распространения продольной волны в результате применения различного типов и режимов термо- и механической обработки, также превышает величину вклада в неопределенность как инструментальную, так и геометрического параметра.

Следовательно, можно сделать вывод, что предъявляемые требования к технологии изготовления и материалу образцов СО-2 и СО-3 в стандартах не являются исчерпывающими. Необходимо регламентировать не только геометрические параметры, но и акустические, в частности скорость распространения волны, так как соблюдение требований геометрии образца не гарантирует обеспечения требуемых значений акустических характеристик, которые в данном случае являются основными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным вопросом в случае применения образцов НК в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений является необходимость их испытаний в целях утверждения типа, о чем также говорится в [3, 72]. С этой точки зрения необходимо установить, что такие испытания необходимо проводить только для образцов, которые обеспечивают подтверждение метрологических характеристик дефектоскопического оборудования и прослеживаемость измеряемых ими физических величин к первичным эталонам, т.е. образцам первой группы. К таким величинам на примере УЗ образцов могут относиться линейные и угловые размеры, а также скорость распространения УЗ волн, воспроизводимые ГПЭ единиц скоростей распространения и коэффициента затухания ультразвуковых волн в твердых средах гэт189-2014. Необходимо подчеркнуть, что такие образцы являются многопараметрическими и должны содержать несколько нормируемых метрологических характеристик (приписанных значений) разнородных физических величин. Во всех других случаях образцы, служащие для настройки оборудования для конкретных условий контроля или проверки выявляемости дефектов в рамках определенной методики, не являются средствами измерений, поскольку не воспроизводят какую-либо физическую величину, прослеживаемую к первичному эталону (образцы второй группы). Требования к таким образцам должны устанавливаться стандартами или документами, регламентирующими методики контроля.

В случае, когда образец НК применяется для подтверждения установленных метрологических характеристик средств контроля (дефектоскопов) (первая группа), существуют два варианта испытаний в целях утверждения типа: как средства измерения (меры) или стандартного образца. Имеются существенные различия между стандартными образцами и средствами измерений с точки зрения порядка испытаний в целях утверждения типа (Приказ Минпромторга РФ от 28.08.2020 № 2905). Поскольку известные стандартные образцы для УЗ контроля (СО-1, 2 и т.д.) нормируются не только с точки зрения их геометрических размеров, но и акустических свойств (скорость ультразвука/время прохождения УЗ волны), они соответствуют определению одновременно средства измерения и стандартного образца. Эта двойственность проявляется в неоднозначности терминологии и подходов: меры СО-2 и СО-3 внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений как средства измерений, при этом в ГОСТах называются стандартными образцами. С точки зрения их изготовления совершенно недостаточно соблюсти требования только по линейно-угловым размерам образца. Для обеспечения требуемых абсолютных значений и однородности акустических свойств необходимо не только изготовить их из конкретного материала (марки стали), но и строго соблюсти технологию его обработки. Производители стандартных образцов при аккредитации проходят проверку на соответствие ГОСТ Р ИСО 17034—2021 «Общие требования к компетентности производителей стандартных образцов», который содержит также требования к технологическому процессу. Производители средств измерений такую проверку не проходят, поэтому потребителю приходится только уповать на их достаточную компетентность и добросовестность. Требования к стандартным образцам для УЗ контроля также регламентированы весьма неоднозначно, причем динамика этого процесса идет не в лучшую сторону: если в отмененном ГОСТ [61] требования к образцам СО-1, 2, 3 приведены достаточно четко, то во введенном взамен его с 1 июля 2015 года ГОСТ Р [16] присутствуют только эскизы этих образцов без допусков на линейные размеры и нормирования их акустических характеристик. Сложившаяся ситуация привела к появлению на рынке СО различных производителей, для которых формально обеспечивается соответствие только описанию типа, требования в котором не регламентированы ничем, кроме добросовестности разработчика. Для исправления этой ситуации предлагается разработать национальные или межгосударственные стандарты на типовые стандартные образцы (меры) для УК, в которых будут не только установлены их геометрические размеры и акустические свойства, но и регламентированы методы подтверждения их метрологических характеристик. В дальнейшем производство, испытания в целях утверждения типа и поверка таких образцов должны проводиться в соответствии с этими стандартами.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенного анализа нормативной документации установлено, что, применительно к анализируемым образцам употребляются термины: мера, эталон, стандартный, эталонный, настроечный, контрольный, калибровочный образец и т.д. Очевидно, что нет смысла в нормировании требований к каждому типу образцов. Предлагается разделить всю номенклатуру используемых в ультразвуковом контроле образцов, на две группы. К первой группе должны

быть разработаны и нормированы требования как к метрологическим характеристикам образцов, так и к технологическому процессу их производства, а также испытаний в целях утверждения типа, которые позволят адекватно воспроизводить единицу величины данных образцов. К образцам второй группы необходимость разработки и нормирования требований отсутствует, так как их параметры должны определяться методикой контроля. Весь объем рассмотренных образцов должен быть разделен на основе предложенной классификации, что позволит предъявлять требования к образцам безотносительно их названия и терминологии. В случае использования образца и для воспроизведения единицы величины и для установления параметров контроля, в частности СО-2 и СО-3, образцы должны соответствовать требованиям, предъявляемым к обеим группам.

В свою очередь, проведенный анализ литературных источников и нормативно-технической документации, регламентирующей параметры образцов, с учетом нормируемых метрологических характеристик ультразвукового оборудования позволяет сделать следующие выводы:

1. Необходимо ввести и использовать единообразную терминологию с четкими определениями, установленными требованиями, назначением и определенным метрологическим статусом для классификации стандартных/настроечных/калибровочных образцов, мер и комплектов, что позволит предъявлять исчерпывающие требования к ним при испытаниях в целях утверждения типа и к производителям на стадии аккредитации по ГОСТ Р ИСО 17034. В основе данной классификации может лежать предложенное деление образцов на 1 и 2 группы, исходя из метрологических и технологических операций.

2. Меры, используемые в акустическом контроле, являются многопараметрическими, для обеспечения передачи единиц которых недостаточно подтверждения геометрических параметров. Необходима разработка стандартов, регламентирующих однозначные требования к мерам, и общие требования к предложенным группам образцов, включая нормирование акустических параметров, в частности, скорости упругой волны.

3. Анализ влияния различных факторов на точность оценки метрологических характеристик ультразвукового оборудования по УЗ мерам показал, что физико-механические свойства материала (модуль Юнга) являются основным источником неопределенности, который на порядок превышает вклад неопределенности геометрических размеров и приборной погрешности. Полученная величина неопределенности для материала заготовки, связанная с типичным разбросом модуля Юнга (± 20 ГПа), не позволяет адекватно оценить нормируемые метрологические характеристики ультразвукового оборудования, так как возникающая в таком случае погрешность, в частности для угла ввода, превышает регламентируемый предел. Следовательно, изготовление меры из требуемой марки стали не является достаточным требованием для достоверной передачи единицы акустической величины. Поэтому при разработке стандарта необходимо регламентировать марку материала (сплава), вид и режимы механической и термической обработки заготовки при изготовлении меры, способы обработки поверхности, геометрические параметры, контроль заготовки на предмет отсутствия дефектов, выявляемых методами акустического вида НК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grigorev E., Nosov V.* Improving quality control methods to test strengthening technologies: A multilevel model of acoustic pulse flow // *Applied Sciences*. 2022. V. 12 (9). DOI: 10.3390/app12094549
2. *Федоров В.В.* О метрологическом статусе образцов для ультразвукового неразрушающего контроля // *Неразрушающий контроль и диагностика*. 2011. № 3.
3. *Гоголинский К.В., Сясько В.А.* Современное состояние и проблемы законодательного регулирования, метрологического обеспечения и стандартизации в области неразрушающего контроля // *Законодательная и прикладная метрология*. 2019. № 4. С. 15—21. EDN: MQQRAN.
4. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения: дата введения 2015-01-01. Москва: Стандартинформ, 2014. 60 с.
5. ГОСТ ISO Guide 33—2019 СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ. Надлежащая практика применения стандартных образцов: дата введения 01.08.2020. «Уральский научно-исследовательский институт метрологии» (ФГУП «УНИИМ»).
6. *Gonchar A., Solovyov A., Klyushnikov V.* Ultrasonic Study of Longitudinal Critically Refracted and Bulk Waves of the Heat-Affected Zone of a Low-Carbon Steel Welded Joint under Fatigue // *Acoustics*. 2024. No. 6. P. 593—609. DOI: 10.3390/acoustics6030032
7. *Mogilner L.Y., Syasko V.A., Shikhov A.I.* Modeling Defects in Ultrasonic Nondestructive Testing: State-of-the-Art and Prospects // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2024. V. 60. P. 481—500. DOI: 10.1134/S1061830924700657
8. *Chassignole B., El Guerjouma R., Ploix M.-A., Fouquet T.* Ultrasonic and structural characterization of anisotropic austenitic stainless steel welds: Towards a higher reliability in ultrasonic non-destructive testing // *NDT & E International*. 2010. V. 43. P. 273. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.12.005

9. Noritaka Y., Mohammadjavad F., Ryouji S., Takashi F., Masayuki T. High frequency ultrasonic inspection of the bonded interface between a divertor monoblock and a cooling pipe // *Fusion Engineering and Design*. 2023. P. 187. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113367
10. Попов Г., Болобов В., Жуиков И., Злотин В. Development of the Kinetic Equation of the Groove Corrosion Process for Predicting the Residual Life of Oil-Field Pipelines // *Energies*. 2023. V. 16. P. 7067. DOI: 10.3390/en16207067
11. Романко А.А. Меры ультразвукового неразрушающего контроля: регламентация технических требований // *Измерительная техника*. 2023. No. 3. P. 55. DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-3-55-60
12. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений: сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1382458> (дата обращения: 05.07.2023).
13. РД-50-407-83 Методические указания. Основные параметры преобразователей наклонных для ультразвукового контроля сварных соединений на частоту 1,25–5 МГц с углами призмы 30–55°. Методика выполнения измерений: дата введения 1984-07-01. Москва: Изд-во стандартов, 1983. 20 с.
14. ГОСТ 26266—90 Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования: дата введения 1991-01-01. Москва: Стандартинформ, 2010. 18 с.
15. ГОСТ 18576—96 Контроль неразрушающий. Рельсы железнодорожные. Методы ультразвуковые: дата введения 2002-01-01. Минск: Изд-во стандартов, 2001. 31 с.
16. ГОСТ Р 55724—2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые: дата введения 2015-07-01. Москва: Стандартинформ, 2014. 27 с.
17. Liu W., Lian J. Microstructure Effects on the Plastic Anisotropy of a Fine-Structured Dual-Phase Steel // *Procedia Manufacturing*. 2020. V. 47. P. 1552. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.349
18. Bolobov V.I., Il'nur U.L., Zhukov V.S., Popov G.G. Using the Magnetic Anisotropy Method to Determine Hydrogenated Sections of a Steel Pipeline // *Energies*. V. 16. P. 5585—5585. DOI: 10.3390/en16155585
19. Konchus D.A., Pryakhin E.I., Sivenkov A.V. Structural variations on the surface of metallic products at laser marking // *CIS iron and steel review*. 2021. P. 96—101. DOI: 10.17580/cisirs.2021.02.18
20. Alekseev V.I., Barakhtin B.K., Zhukov A.S. Chemical heterogeneity as a factor of improving the strength of steels manufactured by selective laser melting technology // *Journal of Mining Institute*. 2020. V. 242. P. 191. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.191
21. Volokitina I., Fediuk R., Siziakova E.V., Kolesnikov A. Development of a Thermomechanical Treatment Mode for Stainless-Steel Rings // *Materials*. No. 15. P. 4930—4930. DOI: 10.3390/ma15144930
22. Gromyka D.S., Gogolinskiy K.V. Introduction of evaluation procedure of excavator bucket teeth into maintenance and repair: Promptse. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. No. 8. P. 94—111. [In Rus.]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_94
23. Kok Y., Tan X.P., Wang P., Nai M.L.S., Loh N.H., Liu E., Tor S.B. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review // *Materials & Design*. 2018. V. 139. P. 565. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.021
24. Pryakhin E.I., Sharapova D.M. Understanding the structure and properties of the heat affected zone in welds and model specimens of high-strength low-alloy steels after simulated heat cycles // *CIS Iron and Steel Review*. 2020. V. 19. P. 60—65. DOI: 10.17580/cisirs.2020.01.12
25. Vera L., Hugo V.C., Edgard M.S., Silva A.A., Manuel R.S. Tavares Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements // *Materials Science and Engineering: A*. 2010. V. 527. P. 16. DOI: 10.1016/j.msea.2010.03.090
26. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Kachanov M. On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy // *International Journal of Engineering Science*. 2021. V. 168. P. 103567. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2021.103567
27. Klyushnikov V.A. Influence of plastic deformation temperature on ultrasonic and electromagnetic properties of austenitic steel // *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 19. P. 2320. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.679
28. Luo Z., Jin S., Zou L., Zhu X., Lin Li. Gain-scale ultrasonic properties measurement of cast austenitic stainless steel // *Measurement*. 2020. V. 151. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107231
29. Chen Y., Luo Z., Zhou Q., Zou L., Lin L. Modeling of ultrasonic propagation in heavy-walled centrifugally cast austenitic Stainless steel based on EBSD analysis // *Ultrasonics*. 2015. V. 59. P. 31. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.01.009
30. Takahashi S., Motegi R. Measurement of third-order elastic constants and applications to loaded structural materials // *SpringerPlus*. 2015. V. 4. No. 25. DOI: 10.1186/s40064-015-1019-2
31. Li Z., He J., Teng J., Wang Y. Internal Stress Monitoring of In-Service Structural Steel Members with Ultrasonic Method // *Materials*. 2016. V. 9. No. 223. DOI: 10.3390/ma9040223
32. Acevedo R., Sedlak P., Kolman R., Fredel M. Residual stress analysis of additive manufacturing of metallic parts using ultrasonic waves: State of the art review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. V. 9. No. 4. P. 9457. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.05.092
33. Bazargan M., Almqvist B.S.G., Motra H.B., Broumand P., Schmiedel T., Hieronymus, C.F. Elastic Wave Propagation in a Stainless-Steel Standard and Verification of a COMSOL Multiphysics Numerical Elastic Wave Toolbox // *Resources*. 2022. No. 11. P. 49. DOI: 10.3390/resources11050049
34. Salmi A., Eleonora A. Residual stress analysis of thin AlSi10Mg parts produced by Laser Powder Bed Fusion // *Virtual and Physical Prototyping*. 2020. V. 15 (1). P. 49—61. DOI: 10.1080/17452759.2019.1650237

35. ГОСТ Р ИСО 7963—20 «Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. Технические условия для эталонного образца № 2».
36. *Mutua J., Nakata Sh., Onda T., Chen Zhong-Chun.* Optimization of selective laser melting Polyanyskiy V.A., parameters and influence of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of maraging steel // *Materials & Design.* 2018. V. 139. P. 486. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.042
37. *Mooney B., Kourousis Kyriakos I., Raghavendra R.* Plastic anisotropy of additively manufactured maraging steel: Influence of the build orientation and heat treatments // *Additive Manufacturing.* 2019. V. 25. P. 19. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.032
38. *Tretyakov D., Belyaev A., Shaposhnikov N.* Acoustic anisotropy and localization of plastic deformation in aluminum alloys // *Materials Today: Proceedings.* 2020. V. 30. P. 413. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.387
39. *Alekseeva E.L., Belyaev A.K., Grishchenko A.I., Mansyrev D.E., Polyanskiy V.A., Tretyakov D.A., Shvetsov O.V.* The Initiation Mechanism of Plastic Strain Localization Bands and Acoustic Anisotropy // *Procedia Structural Integrity.* 2017. No. 6. P. 128. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.020
40. *Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Y.A.* Investigation of the correlation between acoustic anisotropy, damage and measures of the stress-strain state // *Procedia Structural Integrity.* 2017. No. 6. P. 201. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.031
41. *Malmström M., Jansson A., Hutchinson B.* Application of Laser-Ultrasonics for Evaluating Textures and Anisotropy // *Appl. Sci.* 2022. No. 12. P. 10547. DOI: 10.3390/app122010547
42. *Lhémery A., Calmon P., Chatillon S., Gengembre N.* Modeling of ultrasonic fields radiated by contact transducer in a component of irregular surface // *Ultrasonics.* 2002. V. 40. P. 231. DOI: 10.1016/S0041-624X(02)00143-9
43. *Chiang E.H., Adler R.S., Meyer C.R., Rubin J.M., Dedrick D.K., Laing T.J.* Quantitative assessment of surface roughness using backscattered ultrasound: The effects of finite surface curvature // *Ultrasound in Medicine & Biology.* 1994. V. 20. P. 123. DOI: 10.1016/0301-5629(94)90077-9
44. *Alanisamy R.P., Pyun D.-K., Findikoglu A.T.* Accurate Ultrasonic Thickness Measurement for Arbitrary Time-Variant Thermal Profile // *Sensors.* 2024. V. 24. P. 5304. DOI: 10.3390/s24165304
45. *Kowalczyk J., Jóska M., Wieczorek D., Sędlak K., Nowak M.* The Influence of the Hardness of the Tested Material and the Surface Preparation Method on the Results of Ultrasonic Testing // *Appl. Sci.* 2023. V. 13. P. 9904. DOI: 10.3390/app13179904
46. *Lukomski T., Stepinski T.* Steel hardness evaluation based on ultrasound velocity measurements // *Insight Non-Destr. Test. Cond. Monit.* 2010. V. 52. P. 592—596. DOI: 10.1784/insi.2010.52.11.592
47. *Duijster A., Volker A., Van den Berg F., Celada-Casero C.* Estimation of Grain Size and Composition in Steel Using Laser UltraSonics Simulations at Different Temperatures // *Appl. Sci.* 2023. V. 13. P. 1121. DOI: 10.3390/app13021121
48. ГОСТ Р 8.637—2007 ГСИ. Стандартные образцы для метрологического обеспечения средств неразрушающего контроля трубопроводов. Общие требования: дата введения 2008-10-01. Москва: Стандартинформ, 2008. 5 с.
49. ГОСТ Р 50.05.02—2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Ультразвуковой контроль сварных соединений и наплавленных покрытий: дата введения 2018-03-01. Москва: Стандартинформ, 2018. 90 с.
50. ГОСТ 28831—90 Прокат толстолистовой. Методы ультразвукового контроля: дата введения 1992-01-07. Москва: Изд-во стандартов, 1992. 7 с.
51. ГОСТ 21120—75 Прутки и заготовки круглого и прямоугольного сечения. Методы ультразвуковой дефектоскопии: дата введения 1977-01-01. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 7 с.
52. ГОСТ 24507—80 Контроль неразрушающий. Поковки из черных и цветных металлов. Методы ультразвуковой дефектоскопии: дата введения 1982-01-01. Москва: Стандартинформ, 2010. 10 с.
53. ГОСТ Р 50.05.13—2019 Система оценки в области использования атомной энергии. Ультразвуковой контроль сварных соединений с применением технологии фазированных решеток: дата введения 2019-08-01. Москва: Стандартинформ, 2019. 24 с.
54. ГОСТ Р 50.05.18—2019 Система оценки в области использования атомной энергии. Соединения сварных деталей из сталей различных структурных классов для оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Порядок ультразвукового контроля: дата введения 2019-08-01. Москва: Стандартинформ, 2019. 15 с.
55. ГОСТ Р 50.05.05—2018 Система оценки в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Ультразвуковой контроль основных материалов (полуфабрикатов): дата введения 2018-03-01. Москва: Стандартинформ, 2018. 32 с.
56. ГОСТ Р ИСО 16831—2016 Контроль неразрушающий. Контроль ультразвуковой. Определение характеристик и верификация ультразвукового оборудования для измерений толщины: дата введения 2016-11-01. Москва: Стандартинформ, 2016. 20 с.
57. ГОСТ 21397—81 Контроль неразрушающий. Комплект стандартных образцов для ультразвукового контроля полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов. Технические условия: дата введения 1983-01-01. Москва: Изд-во стандартов, 1981. 10 с.
58. ГОСТ 22727—88 Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля: дата введения 1989-01-07. Москва: Изд-во стандартов, 1988. 15 с.

59. ГОСТ 31244—2004 Контроль неразрушающий. Оценка физико-механических характеристик элементов технических систем акустическим методом. Общие требования: дата введения 2010-04-01. Москва: Стандартинформ, 2010. 11 с.
60. ГОСТ 26126—84 Контроль неразрушающий. Соединения паяные. Ультразвуковые методы контроля качества: дата введения 1985-01-07. Москва: Изд-во стандартов, 1984. 9 с.
61. ГОСТ 14782—86 Контроль неразрушающий. Сварные соединения. Методы ультразвуковые: дата введения 1988-01-01. Москва: Изд-во стандартов, 1986.
62. ГОСТ Р 50.05.03—2022 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Ультразвуковой контроль и измерение толщины монометаллов, биметаллов и антикоррозийных покрытий: дата введения 2023-03-01. Москва: Институт стандартизации, 2022. 46 с.
63. ГОСТ Р 50.05.04—2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Ультразвуковой контроль сварных соединений из стали аустенитного класса: дата введения 2018-03-03. Москва: Стандартинформ, 2018. 28 с.
64. ГОСТ Р 57932—2017 Композиты полимерные. Акустико-ультразвуковой контроль изготовленных намоткой сосудов, работающих под давлением: дата введения 2018-06-06. Москва: Стандартинформ, 2017. 14 с.
65. ГОСТ Р ИСО 16809—2015 Контроль неразрушающий. Контроль ультразвуковой. Измерение толщины: дата введения 2016-03-01. Москва: Стандартинформ, 2015. 36 с.
66. ГОСТ 22727—88 Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля: дата введения 1989-01-07. Москва: Изд-во стандартов, 1988. 15 с.
67. ГОСТ Р 56814—2015 Композиты полимерные. Ультразвуковой контроль материала внешних слоев и материала внутреннего слоя «сэндвич»-конструкций: дата введения 2017-01-01. Москва: Стандартинформ, 2016. 15 с.
68. ГОСТ 14637—89 Прокат толстолистовой из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические условия: дата введения 1991-01-01. Москва: Стандартинформ, 2008. 11 с.
69. ГОСТ 1050—2013 Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия: дата введения 2015-01-01. Москва: Стандартинформ, 2014. 36 с.
70. *Кадиса Р.Л., Нежиховского Г.Р., Симина В.Б.* Руководство ЕВРАХИМ/СИТАК Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement* / под общей редакцией Л.А. Конопелько. 2-е издание перевод с английского. Санкт-Петербург: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2002. 149 с.
71. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский. Под общей редакцией А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
72. *Жданев О.В., Зайцев А.В., Лобанков В.М.* Метрологическое обеспечение аппаратуры для геофизических исследований // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 667—677. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.9

REFERENCES

1. *Grigorev E., Nosov V.* Improving quality control methods to test strengthening technologies: A multilevel model of acoustic pulse flow // *Applied Sciences*. 2022. V. 12 (9). DOI: 10.3390/app12094549
2. *Fedorov V.V.* On the metrological status of samples for ultrasonic non-destructive testing // *Non-destructive testing and diagnostics*. 2011. No. 3.
3. *Gogolinsky K. V., Syasko V. A.* The current state and problems of legislative regulation, metrological support and standardization in the field of non-destructive testing // *Legislative and applied metrology*. 2019. No. 4. P. 15—21. REDN: PEACE be with you.
4. RMG 29-2013. The state system of ensuring the uniformity of measurements. *Metrology. Basic terms and definitions*: date of introduction 2015-01-01. Moscow: Standartinform, 2014. 60 p.
5. GOST R ISO 33—2019 “REGULATORY DOCUMENTS”. Good practice in using standard samples: date of introduction 08/01/2020. Ural Scientific Research Institute of Metrology (FSUE UNIIM).
6. *Gonchar A., Solovyov A., Klyushnikov V.* Ultrasound examination of longitudinal critically refracted and volumetric waves of the thermal impact zone of a welded joint made of low carbon steel under fatigue conditions // *Vestn. Acoustics* 2024. No. 6. P. 593—609. DOI: 10.3390/acoustics 6030032
7. *Mogilner L.Yu., Syasko V.A., Shikhov A.I.* Modeling of defects in ultrasonic non-destructive testing: current state and prospects // *Russ J. Non-destructive Testing*. 2024. V. 60. P. 481—500. DOI: 10.1134/S1061830924700657
8. *Chassignol B., Gerdjuma El R., Ploa M.-A., Fouquet T.* Ultrasonic and structural characteristics of welds made of anisotropic austenitic stainless steel: towards improving the reliability of ultrasonic non-destructive testing, flaw detection and International standards. 2010. V. 43. P. 273. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.12.005
9. *Noritaka Yu., Mohammadjawad F., Ryuji S., Takashi F., Masayuki T.* High-frequency ultrasonic inspection of the connecting surface between the divertor monoblock and the cooling pipe // *Thermonuclear Engineering and Design*. 2023. P. 187. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113367

10. *Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V.* Development of the Kinetic Equation of the Groove Corrosion Process for Predicting the Residual Life of Oil-Field Pipelines // *Energies*. 2023. V. 16. P. 7067. DOI: 10.3390/en16207067
11. *Romanko A.A.* Ultrasonic non-destructive testing measures: regulation of technical requirements // *Measuring technology*. 2023. No. 3. P. 55. DOI: 10.32446/0368-1025it.2023-3-55-60
12. Federal Information Fund for Ensuring the Uniformity of Measurements : website. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/1382458> (date of request: 07/05/2023).
13. RD-50-407-83 Methodological guidelines. The main parameters of tilt transducers for ultrasonic inspection of welded joints at a frequency of 1.25–5 MHz with prism angles of 30–55 °. Measurement procedure : date of introduction 1984-07-01. Moscow: Publishing House of Standards, 1983. 20 p.
14. GOST 26266—90 Non-destructive testing. Ultrasonic transducers. General technical requirements: date of introduction 1991-01-01. Moscow: Standartinform, 2010. 18 p.
15. GOST 18576—96 Non-destructive testing. Railway rails. Ultrasound methods : date of introduction 2002-01-01. Minsk: Publishing House of Standards, 2001. 31 p.
16. GOST R 55724—2013 Non-destructive testing. The joints are welded. Ultrasound methods: date of introduction 2015-07-01. Moscow: Standartinform, 2014. 27 p.
17. *L. U., Lian J.* The influence of microstructures on the optical production automation system // *Procedia Manufacturing*. 2020. V. 47. P. 1552. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.349
18. *Bolobov V.I., Inur U.L., Zhukov V.S., Popov G.G.* Using the magnetic anisotropy method to determine hydrogenated sections of a steel pipeline // *Energia*. V. 16. P. 5585—5585. DOI: 10.3390/en16155585
19. *Konchus D.A., Pryashin E.I., Sivenkov A.V.* Structural changes in the market metallurgy as a result of laser marking // *CIS iron and steel review*. 2021. P. 96—101. DOI: 10.17580/cisirs.2021.02.18
20. *Alekseev V.I., Barakhtin B.K., Zhukov A.S.* Chemical heterogeneity as a factor in increasing the strength of steels manufactured using selective laser melting technology // *Bulletin of the Mining Institute*. Business Activity Index: 10.31897/PMI.2020.2.191
21. *Volokitina I., Fedyuk R., Sizyakova E.V., Kolesnikov A.* Development of a regime for thermomechanical processing of stainless steel rings // *Materials*. V. 15. P. 4930—4930. DOI: 10.3390/ma15144930
22. *Gromyka D.S., Gogolinsky K.V.* Introduction of a methodology for assessing the condition of excavator bucket teeth during maintenance and repair: An overview. MIAB. Mountain inf. Anal sex. Bull. 2023. No. 8. P. 94—111. [In Russian]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_94
23. *Kok Yu., Tan H.P., Wang P., Nai M.L.S., Lo N.H., Liu E., Tor S.B.* Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in additive manufacturing of metals: a critical review // *Materials and Design*. 2018. V. 139. P. 565. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.021
24. *Pryakhin E.I., Sharapova D.M.* Understanding the structure and properties of the thermal influence zone in welds and model samples made of high-strength low-alloy steels after modeling heat treatment cycles // *Review of Metrology of the CIS countries*. V. 19. P. 60—65. DOI: 10.17580/cisirs.2020.01.12
25. *Vera L., Hugo V.C., Edgard M.S., Silva A.A., Manuel R.S.* Tavares Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements // *Materials Science and Engineering: A*. 2010. V. 527. P. 16. DOI: 10.1016/j.msea.2010.03.090
26. *Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Kachanov M.* On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy // *International Journal of Engineering Science*. 2021. V. 168. P. 103567. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2021.103567
27. *Klyushnikov V.A.* Influence of plastic deformation temperature on ultrasonic and electromagnetic properties of austenitic steel // *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 19. P. 2320. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.679
28. *Luo Z., Jin S, Zou L., Zhu X., Lin Li.* Gain-scale ultrasonic properties measurement of cast austenitic stainless steel // *Measurement*. 2020. V. 151. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107231
29. *Chen Y., Luo Z., Zhou Q., Zou L., Lin L.* Modeling of ultrasonic propagation in heavy-walled centrifugally cast austenitic Stainless steel based on EBSD analysis // *Ultrasonics*. 2015. V. 59. P. 31. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.01.009
30. *Takahashi S., Motegi R.* Measurement of third-order elastic constants and applications to loaded structural materials // *SpringerPlus*. 2015. V. 4. No. 25. DOI: 10.1186/s40064-015-1019-2
31. *Li Z., He J., Teng J., Wang Y.* Internal Stress Monitoring of In-Service Structural Steel Members with Ultrasonic Method // *Materials*. 2016. V. 9. No. 223. DOI: 10.3390/ma9040223
32. *Acevedo R., Sedlak P., Kolman R., Fredel M.* Residual stress analysis of additive manufacturing of metallic parts using ultrasonic waves: State of the art review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. V. 9. No. 4. P. 9457. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.05.092
33. *Bazargan M., Almqvist B.S.G., Motra H.B., Broumand P., Schmiedel T., Hieronymus C.F.* Elastic Wave Propagation in a Stainless-Steel Standard and Verification of a COMSOL Multiphysics Numerical Elastic Wave Toolbox // *Resources*. 2022. No. 11. P. 49. DOI: 10.3390/resources11050049
34. *Salmi A., Eleonora A.* Residual stress analysis of thin AlSi10Mg parts produced by Laser Powder Bed Fusion // *Virtual and Physical Prototyping*. 2020. V. 15 (1). P. 49—61. DOI: 10.1080/17452759.2019.1650237
35. GOST R ISO 7963—20 “Non-destructive testing. Ultrasonic control. Technical specifications for reference sample No. 2”.

36. *Mutua J., Nakata Sh., Onda T., Chen Zhong-Chun.* Optimization of selective laser melting Polyanskiy V.A., parameters and influence of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of maraging steel // *Materials & Design.* 2018. V. 139. P. 486. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.042
37. *Mooney B., Kourousis Kyriakos I., Raghavendra R.* Plastic anisotropy of additively manufactured maraging steel: Influence of the build orientation and heat treatments // *Additive Manufacturing.* 2019. V. 25. P. 19. DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.032
38. *Tretyakov D., Belyaev A., Shaposhnikov N.* Acoustic anisotropy and localization of plastic deformation in aluminum alloys // *Materials Today: Proceedings.* 2020. V. 30. P. 413. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.387
39. *Alekseeva E.L., Belyaev A.K., Grishchenko A.I., Mansyrev D.E., Polyanskiy V.A., Tretyakov D.A., Shvetsov O.V.* The Initiation Mechanism of Plastic Strain Localization Bands and Acoustic Anisotropy // *Procedia Structural Integrity.* 2017. No. 6. P. 128. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.020
40. *Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Y.A.* Investigation of the correlation between acoustic anisotropy, damage and measures of the stress-strain state // *Procedia Structural Integrity.* 2017. No. 6. P. 201. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.031
41. *Malmström M., Jansson A., Hutchinson B.* Application of Laser-Ultrasonics for Evaluating Textures and Anisotropy // *Appl. Sci.* 2022. No. 12. P. 10547. DOI: 10.3390/app122010547
42. *Lhémery A., Calmon P., Chatillon S., Gengembre N.* Modeling of ultrasonic fields radiated by contact transducer in a component of irregular surface // *Ultrasonics.* 2002. V. 40. P. 231. DOI: 10.1016/S0041-624X(02)00143-9
43. *Chiang E.H., Adler R.S., Meyer C.R., Rubin J.M., Dedrick D.K., Laing T.J.* Quantitative assessment of surface roughness using backscattered ultrasound: The effects of finite surface curvature // *Ultrasound in Medicine & Biology.* 1994. V. 20. P. 123. DOI: 10.1016/0301-5629(94)90077-9
44. *Alanisamy R.P., Pyun D.-K., Findikoglu A.T.* Accurate Ultrasonic Thickness Measurement for Arbitrary Time-Variant Thermal Profile // *Sensors.* 2024. V. 24. P. 5304. DOI: 10.3390/s24165304
45. *Kowalczyk J., Jóska M., Wiczorek D., Sędlak K., Nowak M.* The Influence of the Hardness of the Tested Material and the Surface Preparation Method on the Results of Ultrasonic Testing // *Appl. Sci.* 2023. V. 13. P. 9904. DOI: 10.3390/app13179904
46. *Lukomski T., Stepinski T.* Steel hardness evaluation based on ultrasonic velocity measurements // *Insight Non-Destr. Test. Cond. Monit.* 2010. V. 52. P. 592—596. DOI: 10.1784/insi.2010.52.11.592
47. *Duijster A., Volker A., Van den Berg F., Celada-Casero C.* Estimation of Grain Size and Composition in Steel Using Laser UltraSonics Simulations at Different Temperatures // *Appl. Sci.* 2023. V. 13. P. 1121. DOI: 10.3390/app13021121
48. GOST R 8.637—2007 GSI. Standard samples for metrological support of non-destructive testing of pipelines. General requirements: date of introduction 2008-10-01. Moscow: Standartinform, 2008. 5 p.
49. GOST R 50.05.02—2018 Conformity assessment system in the field of atomic energy use. Conformity assessment in the form of control. Unified methods. Ultrasonic inspection of welded joints and deposited coatings: date of introduction 2018-03-01. Moscow: Standartinform, 2018. 90 p.
50. GOST 28831—90 Thick-sheet metal rental. Ultrasonic testing methods: date of introduction 1992-01-07. Moscow: Publishing House of Standards, 1992. 7 p.
51. GOST 21120—75 Bars and blanks of round and rectangular cross-section. Methods of ultrasonic flaw detection: date of introduction 1977-01-01. Moscow: Publishing House of Standards, 1989. 7 p.
52. GOST 24507—80 Non-destructive testing. Forgings from ferrous and non-ferrous metals. Methods of ultrasonic flaw detection: date of introduction 1982-01-01. Moscow: Standartinform, 2010. 10 p.
53. GOST R 50.05.13—2019 Assessment system in the field of atomic energy use. Ultrasonic inspection of welded joints using phased array technology: date of introduction 2019-08-01. Moscow: Standartinform, 2019. 24 p.
54. GOST R 50.05.18—2019 Assessment system in the field of atomic energy use. Joints of welded parts made of steels of various structural classes for equipment and pipelines of nuclear power plants. Ultrasound control procedure: date of introduction 2019-08-01. Moscow: Standartinform, 2019. 15 p.
55. GOST R 50.05.05—2018 Assessment system in the field of atomic energy use. Conformity assessment in the form of control. Unified methods. Ultrasonic inspection of basic materials (semi-finished products): date of introduction 2018-03-01. Moscow: Standartinform, 2018. 32 p.
56. GOST R ISO 16831—2016 Non-destructive testing. Ultrasonic control. Characterization and verification of ultrasonic equipment for thickness measurements: date of introduction 2016-11-01. Moscow: Standartinform, 2016. 20 p.
57. GOST 21397—81 Non-destructive testing. A set of standard samples for ultrasonic inspection of semi-finished products and products made of aluminum alloys. Technical specifications: date of introduction 1983-01-01. Moscow: Publishing House of Standards, 1981. 10 p.
58. GOST 22727—88 Rolled sheet. Methods of ultrasound control: date of introduction 1989-01-07. Moscow: Publishing House of Standards, 1988. 15 p.
59. GOST 31244—2004 Non-destructive testing. Evaluation of the physico-mechanical characteristics of the elements of technical systems by the acoustic method. General requirements: date of introduction 2010-04-01. Moscow: Standartinform, 2010. 11 p.
60. GOST 26126—84 Non-destructive testing. The joints are soldered. Ultrasonic quality control methods: date of introduction 1985-01-07. Moscow: Publishing House of Standards, 1984. 9 p.

61. GOST 14782—86 Non-destructive testing. Welded joints. Ultrasound methods: date of introduction 1988-01-01. Moscow: Publishing House of Standards, 1986.
62. GOST R 50.05.03—2022 Conformity assessment system in the field of atomic energy use. Conformity assessment in the form of control. Unified methods. Ultrasonic inspection and thickness measurement of monometals, bimetallics and anti-corrosion coatings: date of introduction 2023-03-01. Moscow: Institute of Standardization, 2022. 46 p.
63. GOST R 50.05.04—2018 Conformity assessment system in the field of atomic energy use. Conformity assessment in the form of control. Unified methods. Ultrasonic inspection of welded joints made of austenitic steel: date of introduction 2018-03-03. Moscow: Standartinform, 2018. 28 p.
64. GOST R 57932—2017 Polymer composites. Acoustic and ultrasonic inspection of pressure vessels manufactured by winding: date of introduction 2018-06-06. Moscow: Standartinform, 2017. 14 p.
65. GOST R ISO 16809—2015 Non-destructive testing. Ultrasonic control. Thickness measurement: date of introduction 2016-03-01. Moscow: Standartinform, 2015. 36 p.
66. GOST 22727—88 Rolled sheet. Methods of ultrasound control: date of introduction 1989-01-07. Moscow: Publishing House of Standards, 1988. 15 p.
67. GOST R 56814—2015 Polymer composites. Ultrasonic inspection of the material of the outer layers and the material of the inner layer of “sandwich” structures: date of introduction 2017-01-01. Moscow: Standartinform, 2016. 15 p.
68. GOST 14637—89 Rolled thick-sheet carbon steel of ordinary quality. Technical specifications: date of introduction 1991-01-01. Moscow: Standartinform, 2008. 11 p.
69. GOST 1050—2013 Metal products made of non-alloy structural high-quality and special steels. General technical conditions: date of introduction 2015-01-01. Moscow: Standartinform, 2014. 36 p.
70. *Kadisa R.L., Nezhikhovskiy G.R., Simina V.B.* EVRAHIM / SITAK Manual Quantitative description of uncertainty in analytical measurements Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement / under the general editorship of L.A. Konopelko. 2nd edition translated from English. St. Petersburg: Mendeleev VNIIM, 2002. 149 p.
71. Vintage of steels and alloys. 2nd ed., supplement. and ispr. / A.S. Zubchenko, M.M. Koloskov, Yu. V. Kashirsky. Under the general editorship of A.S. Zubchenko, Moscow: Mashinostroenie, 2003. 784 p.
72. *Zhdaneev O.V., Zaitsev A.V., Lobankov V.M.* Metrological support of equipment for geophysical research // Notes of the Mining Institute. 2020. V. 246. P. 667—677. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.9
-