

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРУТКОВ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ С УЧЕТОМ ПРОЦЕНТА АРМИРОВАНИЯ

© 2022 г. В.А. Стрижак^{1,*}

¹ИжГТУ имени М.Т. Калашникова,
Россия 426069 Удмуртская Республика, Ижевск, ул. Студенческая, 7
E-mail: *str@istu.ru

Поступила в редакцию 26.08.2022; после доработки 06.09.2022

Принята к публикации 09.09.2022

Необходимость в эффективных и производительных технических средствах контроля композитных материалов, выпускаемых в виде протяженных элементов (труба, прутки и т.д.), требует адаптации волноводной методики контроля к особенностям композитных материалов. Волноводная методика позволяет производить оценку качества стержня без сканирования и использует установку датчика на торец объекта контроля. Отстройка от влияния акустического контакта на получаемый результат реализуется использованием параметра, определяемого как отношение эхосигнала от неоднородности к амплитуде сигнала, отраженного от противоположного торца. Существенное влияние на результаты оказывает процент армирования композитного материала. Для композитной арматуры — это стекловолокно. Предложена модель, учитывающая влияние процента армирования стержня на результаты контроля стержневыми волнами. На основании модели рассчитаны коэффициенты и номограммы, позволяющие учесть процент армирования стержня и длину дефекта при принятии решения о его существенности. Представлен результат оценки значимости дефектов, выявленных в 5 партиях прутков разных производителей. Показаны дефекты, являющиеся значительными и малозначительными для свойств стержня композитной арматуры.

Ключевые слова: композитная арматура, акустический волноводный метод, искусственный отражатель.

DOI: 10.31857/S0130308222100049, **EDN:** BTDEBK

ВВЕДЕНИЕ

Одной из современных тенденций развития техники и технологии является замещение изделий из металла композитными материалами на основе полимерной матрицы с армирующим волокном [1—3]. Как правило, такие материалы легче, а иногда и прочнее металлических изделий. Данная тенденция, прежде всего, коснулась авиационной техники и ракетостроения. Композитные материалы в строительстве представлены, в том числе, арматурой, изготовленной по ГОСТ 31938—2012 (Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия). Экономическая целесообразность применения композитной арматуры определяется ее химической стойкостью, низкой теплопроводностью и существенно более низкой массой по сравнению с металлической арматурой [4, 5]. Химическая стойкость и низкая теплопроводность позволяет сокращать толщину защитной бетонной рубашки при проектировании зданий и сооружений, а низкая масса позволяет при выборе средства доставки существенно сократить транспортные расходы за счет перехода от ограничения по массе к ограничению по объему. Рекомендуемые области эффективного использования композитной арматуры — элементы фундаментов и нулевых этажей, не требующих высокой пожаростойкости. Особенно перспективным является применение композитной арматуры при проектировании сооружений, непосредственно контактирующих с водой, особенно при строительстве морских сооружений [6].

Внедрению композитных материалов в строительстве препятствует отсутствие квалифицированного, конкурентного рынка композитной арматуры, гарантирующего ее качество [7—9]. Выход на рынок новых производителей композитной арматуры не требует существенных капиталовложений, и новое производство может быть открыто в любом подсобном помещении. Крупных заказчиков отпугивает отсутствие на рынке высокопроизводительных и эффективных технических средств контроля композитной арматуры, что создает условия для манипулирования качеством продукции. Современный рынок композитной арматуры ориентирован, прежде всего, на частное домостроение и не дает существенных предпочтений ответственным производителям.

Используемые методы контроля арматуры композитной полимерной (АКП), определяемые ГОСТ 32482—2013, реализуются в виде лабораторных исследований выборочных образцов разрушающими методами [10, 11]. Данный подход может позволить сертифицировать производство, но не гарантирует отсутствие дефектов в готовых изделиях. В соответствии с ГОСТ Р 56787—2015 (Композиты полимерные. Неразрушающий контроль), методы контроля ориентированы на объек-

ты плоской или объемной формы с гладкой поверхностью. Неразрушающий контроль при поиске дефектов в стержнях, особенно со сложной поверхностью (ребристость, навивка, песчаное покрытие и т.д.), не позволяет добиться высокой чувствительности, и, как правило, такие решения отличаются низкой производительностью при высокой цене автоматических систем [12—21].

Композитную арматуру можно отнести к длинномерным объектам, у которых длина превышает диаметр более чем в 100 раз. Для данного типа объектов хорошо зарекомендовал себя акустический волноводный метод контроля, реализуемый через прозвучивание прутка низкочастотными эхоимпульсами. Методика позволяет осуществить контроль, при котором акустический пьезоэлектрический преобразователь, установленный на торец прутка, генерирует в теле композитной арматуры стержневую волну с последующей регистрацией эхо-импульса от противоположного торца и эхосигналов от дефектов. При этом реализуется высокая контролепригодность исследуемого образца, где без использования сканирования обеспечивается одинаковая чувствительность к дефектам, расположенным на разной глубине от поверхности прутка. Для метода характерно незначительное затухание акустических импульсов при низкой дисперсии скорости и высокая чувствительность к величине изменения акустического импеданса: к отклонениям сечения, нарушениям сплошности [23, 24].

Внедрение акустического волноводного метода для поиска дефектов в композитной арматуре требует разработки набора аппаратных и методологических средств обеспечения измерений. Существующие на рынке дефектоскопы (например, семейство АДНШ), использующие акустическую волноводную методику, ориентированы на контроль металлопроката. Дефектоскоп использует электромагнитный (ЭМА) излучатель и приемник на пьезоэлементе. Материал композитной арматуры не позволяет использовать ЭМА-излучатель, но адаптация приемника для работы в совмещенном режиме достаточно проста [25, 26].

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПОДХОДЫ

Для оценки работоспособности дефектоскопа и его настройки при контроле металлопроката используется настроечный образец с дефектом в виде сегментного паза длиной 30 мм и глубиной 0,4 мм [27, 28]. Это соответствует классическим методам создания искусственных отражателей для акустического контроля в виде полости, при этом, производится механическое удаление части материала, что соответствует разнообразным дефектам (раковина, загрязнение, включение, пористость и т.д.). Композитный материал в отличие от металлопродукции не является однородным и существенно меняет свои свойства в зависимости от направления армирующих волокон. Композитная арматура изготавливается в виде силового стержня, состоящего из армирующих волокон, расположенных в нем соосно, что и приводит к существенной анизотропии свойств. В качестве связующего материала между армирующими нитями используется наполнитель из синтетических смол (например, эпоксидная смола). При вырезании искусственного отражателя в теле АПК механические свойства участка в зоне искусственного отражателя будут существенно зависеть от количества разрушенных армирующих волокон, что требует высокой повторяемости при нанесении искусственного отражателя. Другая особенность композитной арматуры в том, что при ее изготовлении на силовой стержень равномерно по поверхности и под углом к его продольной оси наносится навивка из нити армирующего волокна в виде двойной нити или одиночной нити, что существенно усложняет форму поверхности и нанесение на нее искусственного отражателя. Основной классификационной характеристикой композитной арматуры является номинальный диаметр d (диаметр равновеликого по объему гладкого, круглого стержня).

Типичным производственным дефектом композитной арматуры является наплыв, возникающий на месте ремонта при обрыве нити армирующего волокна [29, 30]. В зоне дефекта наблюдаются значительные поры и нарушения сечения стержня. Таким образом, изготовление искусственного отражателя на композитной арматуре методом удаления части материала вызывает существенные затруднения, но существует возможность нанесения искусственного отражателя в виде наплыва. При этом использование наполнителя из эпоксидной смолы гарантирует хорошую адгезию к материалу композитной арматуры, не нарушает внутренней структуры силового стержня и в силу высокой пластичности заполняет все особенности внешней поверхности стержня.

Цель работы — на основании акустических свойств модели искусственного отражателя разработать рекомендации по учету процента армирования стержня при контроле композитной арматуры волноводным методом, опробовать данный подход на образцах композитной арматуры с разным процентом армирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В силу особенностей периодического (анкеровочного) профиля арматуры площадь сечения по всей длине стержня можно принять как постоянную величину и при моделировании прутков представить в виде круглого гладкого стержня с номинальным диаметром d . В качестве искусственного отражателя рассматривается прямоугольный наплыв высотой h и длиной L (рис. 1а). Искусственный отражатель дополняет круглый профиль стержня до прямоугольного и при высоте $h = 0$ мм демонстрирует наличие незначительного избыточного сечения.

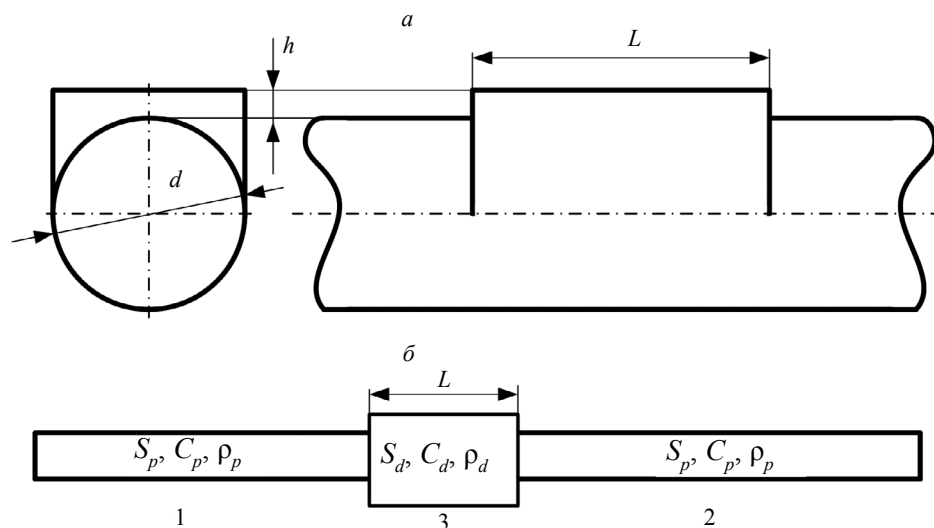


Рис. 1. Геометрическая модель искусственного отражателя (а) и его акустическая модель (б): d — номинальный диаметр; h — высота отражателя; L — длина отражателя.

Акустический импеданс участка в зоне с искусственным отражателем отличается от акустического импеданса стержня, что приводит к возникновению отражения акустических импульсов. Акустический импеданс определяется площадью сечения S , плотностью ρ и скоростью акустической волны C_s . Искусственный отражатель, изготовленный из эпоксидной смолы, имеет свойства, существенно отличающиеся от свойств армированного материала АКП, что существенно сказывается на коэффициенте прозрачности R и коэффициенте отражения D . Свойства основных компонентов, входящих в композицию материала стержня и искусственного отражателя, приведены в табл. 1. Характеристики материала стержня определяются степенью его армирования A_p , который, в свою очередь, задается массовой долей стекла в стержне, выраженной в процентах [31—33].

Таблица 1

Свойства основных компонентов, входящих в композицию материала стержня и искусственного отражателя

Тип материала	Армирование A_p , %	Плотность ρ , 10^3 кг/м ³	Модуль упругости E , ГПа	Скорость стержневой волны C_s , м/с
Стекло	100	2,5	80	5657
Эпоксидная смола в отверженном состоянии	0	1,2	5	2041
АКП стеклокомпозит	88	2,18	55	5059
АКП стеклокомпозит	76	1,98	46	4820

Модель участка с искусственным отражателем (см. рис. 1б) является коаксиальной и не учитывает особенность искусственного отражателя, реализованного в виде наплыва только с одной сто-

роны стержня. Модель содержит зоны 1 и 2 с одинаковыми свойствами материала прутка (площадь сечения S_p , скорость стержневой волны C_p , плотность ρ_p). Участок 3 (искусственный отражатель) длиной L имеет свойства, отличные от свойств исходного материала стержня (площадь сечения S_d , скорость стержневой волны C_d , плотность ρ_d).

В зоне 1 и 2 плотность ρ_p можно оценить через процент армирования и плотности входящих компонентов: плотности стекла ρ_s и эпоксидной смолы в отверженном состоянии ρ_n . Степень отверждения при этом не учитывается:

$$\rho_p = \frac{\rho_s \cdot \rho_n}{A(\rho_n - \rho_s) + \rho_s}. \quad (1)$$

Для оценки скорости стержневой волны C_p в зависимости от процента армирования можно принять, что $C_p = \sqrt{\frac{E_p}{\rho_p}}$, где E_p — модуль упругости прутка; ρ_p — плотность прутка. Учитывая, что при одинаковом относительном удлинении происходит перераспределение усилия между элементами армирования и наполнителем в соответствии с процентом армирования A_p , модуль упругости прутка E_p выражается через модули упругости стекла E_s и наполнителя E_n :

$$E_p = \frac{E_s \cdot S_s + E_n \cdot (S_p - S_s)}{S_p}. \quad (2)$$

Таким образом, скорость стержневой волны в прутке C_p определяется процентом армирования A_p , модулями упругости стекла E_s , наполнителя E_n и площадью сечения прутка:

$$C_p = \sqrt{\frac{E_s \cdot S_s + E_n \cdot (S_p - S_s)}{S_p} \cdot \frac{A_p(\rho_n - \rho_s) + \rho_s}{\rho_s \cdot \rho_n}}, \quad (3)$$

где S_s — площадь в сечении прутка, занятая стеклом:

$$S_s = \frac{S_p}{\rho_s - \rho_n} \left(\frac{\rho_s \cdot \rho_n}{A_p(\rho_n - \rho_s) + \rho_s} - \rho_n \right). \quad (4)$$

Интегральные характеристики материала в зоне искусственного отражателя рассчитывается аналогично, но массовая доля стекловолокна будет уменьшаться с увеличением высоты искусственного отражателя, так как он состоит только из материала наполнителя:

$$\rho_d = \frac{S_p \cdot \left(\frac{\rho_s \cdot \rho_n}{A_p(\rho_n - \rho_s) + \rho_s} - \rho_n \right) + S_d \cdot \rho_n}{S_d}; \quad (5)$$

$$C_d = \sqrt{\frac{E_p \cdot S_p + E_n \cdot S_d}{S_d \cdot \rho_d}}, \quad (6)$$

где ρ_d — плотность участка; S_d — площадь сечения; C_d — скорость стержневой волны в зоне искусственного отражателя.

Рис. 2 демонстрирует линейную зависимость скорости стержневой волны от процента армирования как для прутка без искусственного отражателя C_p , так и в зоне с искусственным отражателем C_d . При этом увеличение высоты искусственного отражателя приводит к незначительному уменьшению наклона зависимости $C_p(A)$.



Рис. 2. Скорость стержневой волны в прутке без искусственного отражателя C_p и в зоне с искусственным отражателем C_d при разных высотах дефекта h .

Используемый подход не рассматривает вопросы, связанные с акустическими особенностями волновода, в том числе с дисперсией скорости, не учитывает влияние диаметра прутка на скорость стержневой волны, наличие пор, частичное отвердевание наполнителя, не рассматривает другие особенности, возникающие в сложных композитных системах.

В качестве результирующего параметра Kd (далее «параметр Kd ») выступает отношение амплитуды эхосигнала от искусственного отражателя $Ud(f)$ к амплитуде сигнала, отраженного от торца $Ut(f)$, выраженное в процентах:

$$Kd = \frac{\max(|Ud(t)|)}{\max(|Ut(t)|)} \cdot 100 \%. \quad (7)$$

Сигнал, отраженный от торца $Ut(f)$, определяется коэффициентом прозрачности $D(f)$, причем сигнал дважды проходит через зону с искусственным отражателем. Сигнал, отраженный от искусственного отражателя $Ud(f)$, определяется коэффициентом отражения $R(f)$.

Расчет основывается на свойствах коэффициента отражения и коэффициента прозрачности, полученных из общего решения по известной методике [34], построенной на учете явлений прохождения акустического импульса через участок с тонкой пленкой. Выражения для коэффициентов отражения $R(f)$ и прозрачности $D(f)$ учитывают отличие свойств стержня от участка с искусственным отражателем:

$$R(f) = \frac{(Z_d^2 - Z_p^2) \cdot \sin(2\pi f / C_d \cdot L)}{2 \cdot Z_p \cdot Z_d \cdot i \cdot \cos(2\pi f / C_d \cdot L) - (Z_p^2 + Z_d^2) \cdot \sin(2\pi f / C_d \cdot L)}; \quad (8)$$

$$D(f) = \frac{2 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_d^2 + Z_p^2) \cdot \cos(2\pi f / C_d \cdot L) - 2 \cdot Z_d \cdot Z_p \cdot i \cdot \sin(2\pi f / C_d \cdot L)}, \quad (9)$$

где Z_p — импеданс стержня на участке без искусственного отражателя; Z_d — импеданс участка с искусственным отражателем; f — частота; C_d — скорость стержневой волны в зоне искусственного отражателя; L — длина искусственного отражателя. При этом $Z_p = \rho_p \cdot S_p \cdot C_p$, где ρ_p — плотность прутка; S_p — площадь сечения прутка; C_p — скорость стержневой волны прутка, а $Z_d = \rho_d \cdot S_d \cdot C_d$, где ρ_d — плотность; S_d — площадь сечения; C_d — скорость стержневой волны в зоне искусственного отражателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Коэффициенты отражения $R(f)$ и прозрачности $D(f)$ являются частотно-зависимыми (рис. 3) и их поведение для разных частот f обусловлено соотношением скорости стержневой волны в зоне дефекта C_d и длины искусственного отражателя L . Графики получены для прутка диаметром $d = 8$ мм, высотой дефекта $h = 2$ мм и длиной дефекта $L = 30$ мм.

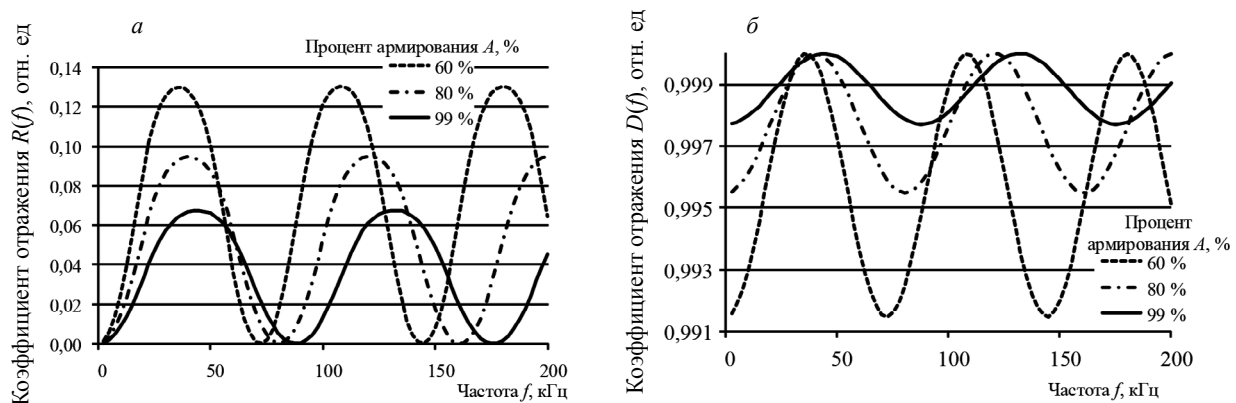


Рис. 3. Коэффициенты отражения $R(f)$ и прозрачности $D(f)$ участка с искусственным отражателем при разных процентах армирования (диаметр прутка $d = 8$ мм, высота отражателя $h = 2$ мм, длина отражателя $L = 30$ мм).

Процент армирования A_p определяет плотность материала и, с одной стороны, влияет на амплитуду коэффициентов отражения $R(f)$ и прозрачности $D(f)$, а, с другой стороны, в силу изменения скорости стержневой волны в зоне дефекта C_d изменяет частотные свойства участка с искусственным отражателем. Так как искусственный отражатель изготовлен из материала наполнителя и имеет более низкую плотность по сравнению с материалом стержня, то стержню с большим процентом армирования A_p соответствует меньший коэффициент отражения $R(f)$ и больший коэффициент прозрачности $D(f)$. Аналогично, при фиксированных размерах искусственного отражателя увеличение процента армирования стержня A_p приводит к уменьшению коэффициента отражения и увеличению частоты резонанса участка с искусственным отражателем.

Последовательность расчета включает в себя получение спектрального образа зондирующего импульса, учет его спектрального искажения при прохождении (отражении) участка с искусственным отражателем и восстановление сигнала из полученного спектра. Коэффициент отражения от противоположного торца стержня принят за 1. Расчет не учитывает затухание акустических импульсов в прутке длиной до 10 м в силу их незначительности при низкочастотном прозвучивании [35]. Расчет адаптирован к свойствам усилительного тракта дефектоскопа протяженных объектов АДНШ-П в виде ограничения полосы пропускания на уровне -6 дБ в полосе частот 9–64 кГц с центральной частотой в 25 кГц [23].

Расчетные графики (рис. 4, рис. 5) иллюстрируют поведение параметра Kd при различной высоте искусственного отражателя h , процента армирования A_p и диаметра стержня d в зависимости от длины искусственного отражателя L . Параметр Kd определяется как геометрическими размерами искусственного отражателя: высота h и длина L , так и процентом армирования стержня A_p . Существенную роль имеет отношение исходной плотности ρ_p прутка и усредненной плотности ρ_d в зоне отражателя. В зависимости от длины искусственного отражателя L параметр Kd имеет схожее поведение. Например, при фиксированном проценте армирования стержня $A_p = 80\%$ (см. рис. 4а), с увеличением длины отражателя L параметр Kd сначала растет и по достижении своего максимума (длина отражателя $L \sim 41$ мм) падает в 2,5 раза (длина отражателя $L \sim 82$ мм), затем увеличивается на 20 % и стабилизируется. Стабилизация значения параметра Kd наступает в виду разделения на временной оси сигналов от вступления и окончания искусственного отражателя. Положение максимума, в первую очередь, определяется соотношением длины искусственного отражателя L и длины волны $\lambda/4 = 48$ мм. Сдвиг максимума к меньшим длинам отражателя

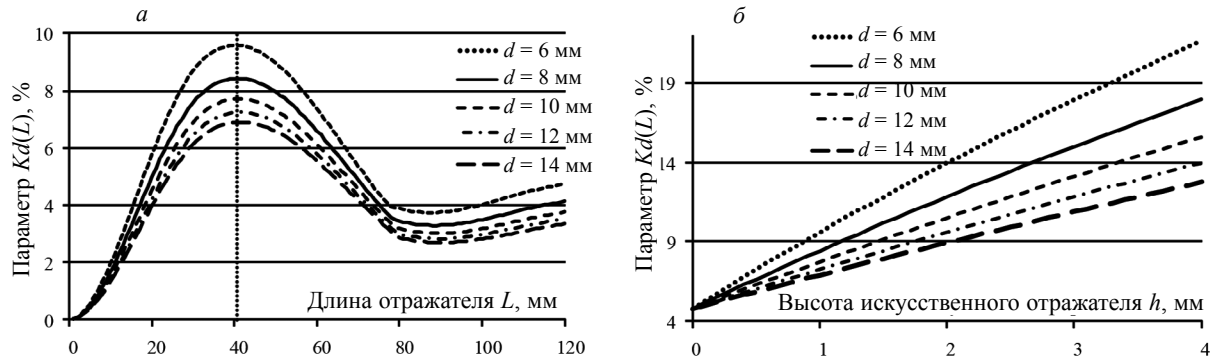


Рис. 4. Параметр Kd в зависимости от длины искусственного отражателя L и высоты искусственного отражателя h при разных диаметрах прутка d и фиксированном проценте армирования $A_p = 80\%$:
 а — высота искусственного отражателя $h = 1$ мм; б — длина искусственного отражателя $L = 41$ мм.

(смещение в более высокочастотную область) определяется учетом в параметре Kd амплитуды сигнала, отраженного от противоположного торца прутка, дважды прошедшего через зону с отражателем.

Рис. 4а демонстрирует, что при фиксированном значении процента армирования $A_p = 80\%$ у прутков разных диаметров d параметр Kd в основном определяется соотношением площадей поперечного сечения в зоне с искусственным отражателем и вне нее. Поскольку, в силу особенностей модели, изменение высоты h линейно связано с изменением площади сечения искусственного отражателя, то параметр Kd (рис. 4б) у прутков разного диаметра растет с разным наклоном. У прутков с меньшим диаметром d при увеличении высоты h рост параметра $Kd(L)$ происходит более интенсивно. Расчет параметра $Kd_d(L)$ для прутка диаметром d возможен через соответствующее значение параметра $Kd_8(L)$, полученного для прутка диаметром $d = 8$ мм с привязкой к диаметру прутка d :

$$Kd_d(L) = \frac{8}{d} (Kd_8(L) - Kd_8^{h=0}(L)) + Kd_8^{h=0}(L), \quad (10)$$

где $Kd_d(L)$ — расчетный параметр для прутка диаметром d ; $Kd_8(L)$ — значение параметра для прутка диаметром $d = 8$ мм; $Kd_8^{h=0}(L)$ — значение параметра для прутка диаметром $d = 8$ мм при высоте отражателя $h = 0$.

Для прутков разных диаметров, при фиксированном значении процента армирования и одинаковой высоте искусственного отражателя h , изменения плотности в зоне искусственного отражателя не оказывает существенного влияния на изменение параметра Kd . Отклонение расчетного значения параметра $Kd_d(L)$ по формуле (10) от значения параметра $Kd_d(L)$ в соответствии с моделью, приведенное к значению высоты отражателя h в мм, не выходит за пределы значения 0,01.

Уменьшение процента армирования A_p при фиксированной высоте отражателя h (рис. 5а) или увеличение высоты отражателя h при фиксированном проценте армирования A_p (рис. 5б) не только

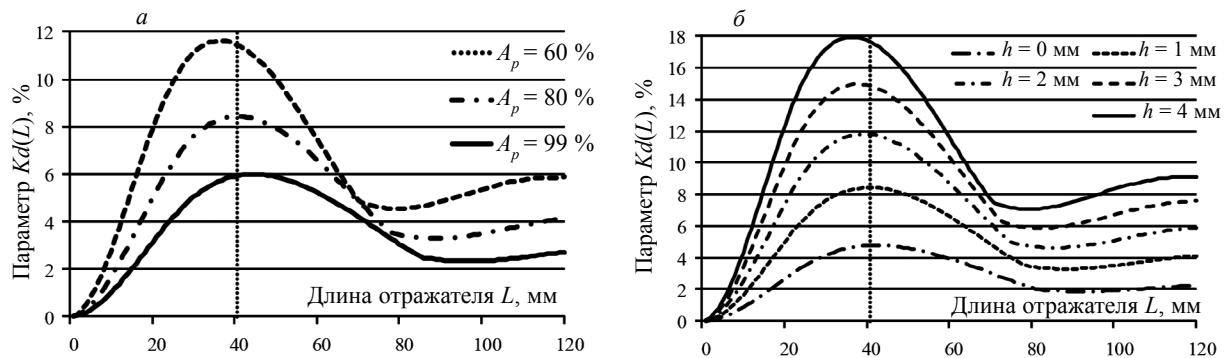


Рис. 5. Параметр Kd в зависимости от длины искусственного отражателя L для прутка диаметром $d = 8$ мм:
 а — процент армирования $A_p = 60\text{—}99\%$, высота искусственного отражателя $h = 1$ мм; б — процент армирования $A_p = 80\%$, высота искусственного отражателя $h = 1\text{—}4$ мм.

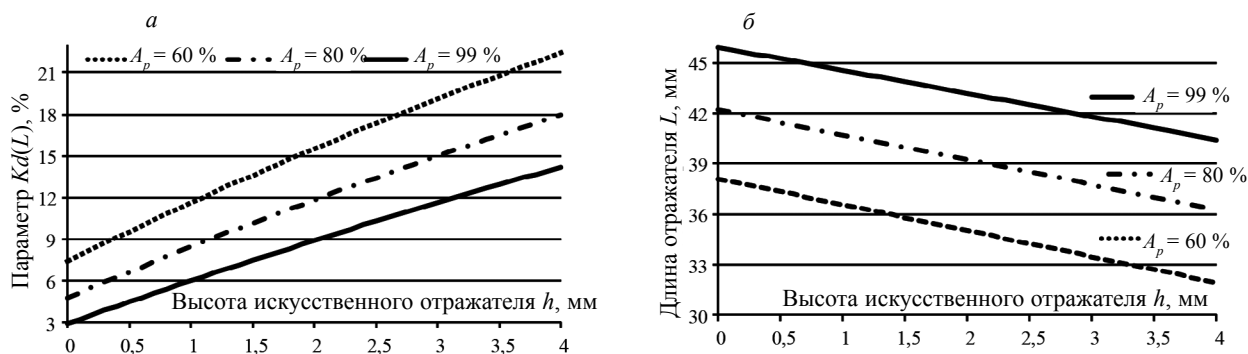


Рис. 6. Максимум параметра Kd и соответствующая ему длина L в зависимости от высоты h для прутка диаметром $d = 8$ мм при проценте армирования $A_p = 60$ —99 %:

a — значение максимума параметра Kd ; $б$ — длина L , соответствующая значению максимума параметра Kd .

увеличивает значение параметра Kd , но и приводит к смещению его максимума в сторону меньшего значения длины искусственного отражателя L по сравнению с позицией $A_p = 80\%$ и $h = 1$ мм (вертикальная пунктирная линия). В первую очередь, данное изменение определяется изменением плотности стержня при изменении процента армирования или изменением плотности в зоне искусственного отражателя при увеличении его высоты и, как следствие, уменьшением скорости стержневой волны.

Для прогнозирования величины параметра $Kd(h)$ при вариации процента армирования стержня A_p приведены расчеты значения максимума параметра $Kd(h)$ и соответствующие ему длины L для различных высот h (рис. 6). Изменение процента армирования стержня A_p с 99 до 60% у искусственного отражателя высотой $h = 1$ мм приводит к росту параметра $Kd(h)$ в 1,94 раза, а у дефекта высотой $h = 3$ мм — к росту параметра $Kd(h)$ в 1,54 раза. При аналогичных величинах процента армирования стержня A_p длины, соответствующие максимуму параметра $Kd(h)$, при высоте искусственного отражателя $h = 1$ мм составляют 44,6 и 36,6 мм, а при высоте $h = 3$ мм — 41,8 и 33,6 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании предложенной методики разработана номограмма (рис.7), позволяющая соотнести между собой прутки с разным процентом армирования A_p при разных высотах искусственного отражателя h . Линии номограммы соединяют точки максимумов параметра Kd одного уровня при различных значениях процента армирования и высотах искусственного отражателя. Напри-

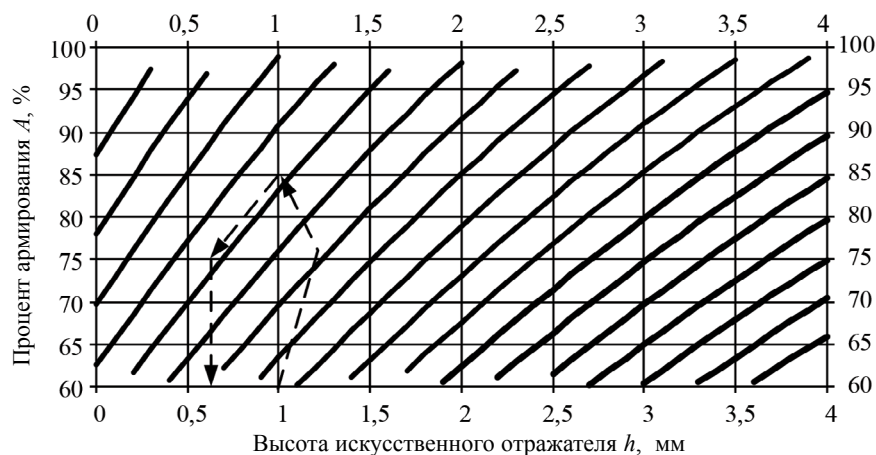


Рис. 7. Номограмма для прутка диаметром $d = 8$ мм значений одного уровня максимумов параметра Kd в зависимости от высоты h искусственного отражателя и процента армирования стержня A_p .

мер, настроенный образец [36], изготовленный для калибровки дефектоскопа, реализующего контроль композитной арматуры волноводным методом с нанесенным искусственным отражателем высотой 1 мм на стержне с процентом армирования $A_p = 85\%$ по значению параметра Kd соответствует образцу с процентом армирования стержня $A_p = 75\%$ и с искусственным отражателем высотой 0,65 мм. Пунктирная линия показывает нахождение уровня параметра Kd при известном значении армирования и поиск значения высоты искусственного отражателя при другом уровне процента армирования.

По результатам расчета влияния размера наплыва и процента армирования стержня на значение параметра Kd рассчитаны поправочные коэффициенты, позволяющие при оценке существенности дефектов учесть процент армирования материала стержня:

$$Kd^M = Kd^i(-0,018(A_p - 80) + 1,013); \quad (11)$$

$$L^M = L^i(-0,005(A_p - 80) + 1,004), \quad (12)$$

где Kd^M — значение параметра Kd с учетом отличия процента армирования A_p от 80 %; Kd^i — измеренное значение параметра Kd ; L^M — значение длины дефекта с учетом отличия процента армирования A_p от 80 %; L^i — измеренное значение длины дефекта.

При изготовлении композитной арматуры дефекты образуются в виду заполнения связующим материалом неудаленных узлов нитей в зоне их обрыва или окончания. Петля армирующей нити, находящаяся на поверхности стержня, не приводит к ухудшению качества стержня и может быть, при необходимости, удалена режущим инструментом. Существенным дефектом является пузырь, заполненный связующим или воздухом и внедренный в тело арматуры. Таким образом, заключение о дефектности необходимо основывать на величине параметра Kd и измерении габаритов обнаруженных дефектов. При изготовлении композитной арматуры типовые дефекты не превышают 30 мм по длине. Применительно к искусственному отражателю, в области длин до 30 мм, величина параметра Kd для одной высоты h различается многократно.

На графике (рис. 8) нанесены величины параметра Kd , рассчитанные для прутка диаметром $d = 8$, с процентом армирования стержня $A_p = 80\%$, при разных высотах искусственного отражателя. Точками обозначены значения параметра Kd^M для дефектов, обнаруженных по волноводной методике контроля, в 5 партиях 4-х производителей с общим объемом более тысячи образцов, с длиной более 6 метров каждый [37]. Значение параметра Kd^M и его длина дефекта L^M для разных партий скорректирована в соответствии с процентом армирования стержня в партии. Измерение геометрических размеров дефектных участков позволяет оценить значимость дефекта. Уровень $Kd(L)$, соответствующий искусственному отражателю с заданной высотой, может рассматриваться как уровень браковки. В этом случае дефекты с одинаковым параметром Kd , но разные по протяженности, будут классифицированы по-разному.

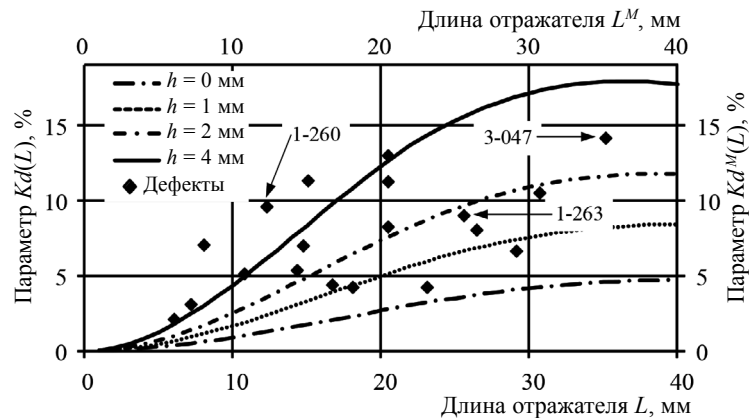
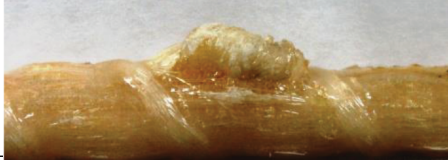


Рис. 8. Параметр Kd дефектов и прутка диаметром $d = 8$ мм, процент армирования стержня $A_p = 80\%$ при разных высотах искусственного отражателя h в зависимости от длины L .

В табл. 2 приведена краткая характеристика и внешний вид некоторых дефектных участков. В качестве браковочного уровня выбран критерий, соответствующий расчетному значению искус-

Характеристики и вид обнаруженных дефектов

Образец Армирование, %	Значение параметра Kd^M , %	Длина L^M , мм	Внешний вид дефекта	Годен или брак / (Заключение)
1-260	9,86	12		Брак / (Недостаток связующего в стержне)
76,4 %				
1-263	8,49	20		Годен / (Наплыв может быть удален)
76,4%				
3-047	14,3	35		Годен / (Наплыв не влияет на качество стержня)
79,9 %				

ственного отражателя высотой $h = 3$ мм. Образец 1-260 при небольшой протяженности дефекта имеет существенный сигнал и при визуальном осмотре демонстрирует пористость тела в зоне дефекта. Образец 1-263 на поверхности стержня имеет узел, заполненный связующим, что не влияет на качество тела прутка. У образца 3-047 протяженное утолщение по телу не уменьшает качество стержня и при отсутствии специальных требований к поверхности он может быть использован.

ВЫВОДЫ

Разработанная акустическая модель прозвучивания стержня с искусственным отражателем в виде наплыва учитывает отличия материалов используемых при изготовлении композитного стержня и при создании наплыва. Модель построена на учете коэффициента прозрачности и коэффициента отражения в районе неоднородности с учетом резонансных явлений, возникающих при прозвучивании низкочастотным импульсом с торца прутка. С ростом высоты наплыва в зоне дефекта изменяется массовая доля армирующего стекловолокна, и, как следствие, средние значения акустического импеданса в этой области зависят не только от высоты искусственного отражателя, но и от процента армирования исходного материала стержня. Модель учитывает изменение скорости стержневой волны, интегральную плотность в зоне наплыва в зависимости от диаметра стержня, процента его армирования, высоту и длину наплыва. Результатом расчета является параметр Kd в виде отношения сигнала, отраженного от неоднородности, к сигналу, отраженному от противоположного торца объекта контроля.

Модель показывает, что при фиксированном проценте армирования и одинаковой высоте искусственного отражателя изменение диаметра стержня не влияет на параметр Kd , который в основном определяется высотой и длиной отражателя.

Увеличение процента армирования или увеличение высоты отражателя приводит к увеличению параметра Kd и смещению максимума зависимости параметра $Kd(L)$ к меньшим значениям длины L искусственного отражателя.

На основании модели рассчитана номограмма, позволяющая соотнести настроечные образцы с искусственным отражателем в виде наплыва, выполненные на стержнях с разным процентом армирования.

Предложено при заключении о значительности дефектов, обнаруженных волноводным методом, учитывать визуальную длину дефекта, а значение параметра Kd и длину дефекта L адаптировать к величине армирования стержня в 80 %. Применение данного подхода позволило отделить дефекты, имеющие влияние на стержень композитной арматуры, от малозначительных особенностей, не приводящих к понижению эксплуатационных свойств стержня.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов М.Ю., Будадин О.Н., Козельская С.О., Овчинников И.Г., Шелемба И.С. Внешнее армирование композитными материалами и оптический мониторинг надежности эксплуатации строительных сооружений (Обзор) // Конструкции из композиционных материалов. 2022. № 1 (165). С. 57—67. DOI: 10.52190/2073-2562_2022_1_57. EDN NZVWQQ.
2. Бегунова Н.В., Грахов В.П., Возмищев В.Н., Кислякова Ю.Г. Сравнительная оценка результатов испытаний бетонных балок с композитной арматурой и расчетных данных // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 2. С. 155—163. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163. EDN ZBFCNL.
3. Францев М.Э. Исследование надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях акустическими методами неразрушающего контроля // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19. № 4. С. 13—17.
4. Soliman Ehab S. M. M., El-Sayed Tamer A., Naga Soheir A. R. A new approach to design a composite material for light mono leaf spring using fea // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2016. Т. 19. № 1. С. 8—13. DOI: 10.22213/2413-1172-2016-1-8-13
5. Степанова В.Ф., Ильин Д.А., Бучкин А.В. Гибридная композитная арматура с повышенным модулем упругости // Естественные и технические науки. 2014. № 9—10 (77). С. 435—437.
6. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Чепур М.Д. Акустико-эмиссионные эффекты при растяжении композитов и их использование для контроля состояния кровли горных выработок // Горный журнал. 2019. № 1. С. 13—16.
7. Усачев А.М., Хорохордин А.М., Данилова А.В. Анализ перспектив развития рынка стальной и композитной арматуры // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2016. № 2 (13). С. 122—126. EDN YGBSMX.
8. Гладунова О.И., Лысенко А.А. Мировой и российский рынок полимерных композиционных материалов. Тенденции и перспективы // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2021. № 2. С. 96—100. DOI: 10.46418/2079-8199_2021_2_15. EDN DEXUZI.
9. Долгих М.В., Федосова О.Г., Дергач И.А., Ондар А.А. Преимущества и недостатки применения композитной арматуры // Инновации и инвестиции. 2019. № 10. С. 298—300. EDN NZESFR.
10. Грахов В.П., Саидова З.С. Методика определения степени отверждения арматуры композитной полимерной // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15. № 1. С. 96—98. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-96-98. EDN YIOUBR.
11. Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Чернова В.В. Акустико-эмиссионный контроль процесса разрушения образцов из углепластика, изготовленных методом вакуумного формования // Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 3 (155). С. 64—69. EDN GGFGBC.
12. Смелков С.Л. Способы контроля армированных композитов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 4. С. 49—52.
13. Трифонова С.И., Генералов А.С., Далин М.А. Современные технологии и средства теневого ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов // Технология машиностроения. 2017. № 7. С. 37—43.
14. Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials / Proc. XV Portuguese Conference on Fracture, PCF 2016, 10—12 February 2016, Paço de Arcos, Portugal. V. 1.
15. Мурашов В.В. Исследование и совершенствование акустических низкочастотных методов контроля изделий из слоистых пластиков и многослойных клееных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 87—93.
16. Саидова З., Грахов В.П., Яковлев Г., Гордина А., Захаров А. Thermal analysis of glass-fiber reinforced polymer rebars // Engineering Structures and Technologies. 2017. V. 9. No 3. P. 142—147. EDN ZMLLZZ.
17. Shpil'noi V.Yu., Vavilov V.P., Derusova D.A., Druzhinin N.V., Yamanovskaya A.Yu. Specific Features of Nondestructive Testing of Polymer and Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Excitation and Laser Vibrometry // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 8. P. 647—655. [Шпильной В.Ю., Вавилов В.П., Дерусова Д.А., Дружинин Н.В., Ямановская А.Ю. Особенности проведения неразрушающего контроля полимерных и композиционных материалов с использованием бесконтактной ультразвуковой стимуляции и лазерного вибросканирования // Дефектоскопия. 2021. № 8. С. 14—23. DOI: 10.31857/S0130308221080029. EDN TLCADA.]
18. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С., Смотров С.А., Иванов В.И. Контроль образцов из полимерных композиционных материалов с использованием ультразвуковых антенных решеток // Дефектоскопия. 2022. № 6. С. 3—16. DOI: 10.31857/S013030822206001X. EDN BMGAYP.

19. Качанов В.К., Соколов И.В., Первушин В.В., Тимофеев Д.В. Структуроскопия изделий из полимерных материалов с помощью анализа мгновенного спектра ультразвуковых сигналов // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 3—10. DOI: 10.1134/S0130308219060010. EDN VSJDCV.
20. Derusova D.A., Vavilov V.P., Shpil'noi V.Y., Nekhoroshev V.O., Druzhinin N.V. Features Of Laser-Vibrometric Nondestructive Testing of Polymer Composite Materials Using Air-Coupled Ultrasonic Transducers // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 12. P. 1060—1071. [Дерусова Д.А., Вавилов В.П., Нехорошев В.О., Шпильной В.Ю., Дружинин Н.В. Особенности лазерно-виброметрического неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов с использованием воздушно-связанных ультразвуковых преобразователей // Дефектоскопия. 2021. № 12. С. 26—38. DOI: 10.31857/S0130308221120034. EDN AGHGZZ.]
21. Смотровая С.А., Смотров А.В., Иванов В.И. Сравнение выявляемости малозаметных ударных повреждений по результатам выполнения ультразвукового неразрушающего контроля и оптической профилометрии поверхности образцов полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 4 (164). С. 43—50. DOI: 10.52190/2073-2562_2021_4_43. EDN SHMKEJ.
22. Муравьева О.В., Стрижак В.А., Злобин Д.В., Мурашов С.А., Пряхин А.В., Мышкин Ю.В. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования // Нефтяное хозяйство. 2016. № 9. С. 110—115.
23. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 2 (31). С. 59—67.
24. Евлампиев А.И., Попов Е.Д., Сажин С.Г., Федосенко Ю.К., Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Останин Ю.Я. Неразрушающий контроль / Справочник. В 8 т. Под общ. ред. Клюева В.В. Изд. 2-е, перераб. и испр. М., 2006. 829 с.
25. Muravieva O.V., Khasanov R.R., Strizhak V.A., Mkrtchyan S.S. Water absorption effect on the propagation velocity of normal waves in composite rebars // Materials Science Forum. 2019. V. 970. P. 202—209. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.970.202. EDN IZDGLO.
26. Стрижак В.А., Хасанов Р.Р., Пряхин А.В. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 159—166. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166. EDN XPTZXN.
27. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Стрижак В.А., Мурашов С.А., Пряхин А.В. Акустический волноводный контроль линейно протяженных объектов: монография. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. 234 с. ISBN 978-5-7692-1560-5.
28. Солодов И.Ю., Кройцбрук М. Резонансные дефекты: новый подход к повышению чувствительности методов НК с использованием ультразвуковой стимуляции дефектов // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19. № 4. С. 8—12.
29. Добровольский Д.С. Влияние надразов стержней на коэффициенты интенсивности напряжений кольцевых трещин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. Т. 19. № 2. С. 6—8. DOI: 10.22213/2413-1172-2016-2-6-8
30. Ганзий Ю.В. Идентификация опасностей получения некачественной продукции из полимерного композитного материала на примере строительной композитной арматуры // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 3. С. 13—19. DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-13-19
31. Бучкин А.В., Степанова В.Ф., Стрижак В.А., Юрин Е.Ю., Никушинов Е.И. Неразрушающий контроль композитной полимерной арматуры // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2021. № 4 (267). С. 59—66. EDN KCDDDL.
32. Mahmoud M., Zaghloul Y., Karen Steel K., Martin Veidt M., Heitzmann M.T. Wear behaviour of polymeric materials reinforced with man-made fibres: A comprehensive review about fibre volume fraction influence on wear performance // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2021. № 10. P. 215—241.
33. Karakoc A., Bulota M., Hummel M., Sriubaitė S., Hughes M., Sixta H., Paltakari J. Effect of single-fiber properties and fiber volume fraction on the mechanical properties of Ioncell fiber composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2021. No. 3. P. 741—748.
34. Муравьева О.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В. Оценка чувствительности метода акустической рефлектометрии к дефектам теплообменных труб // Дефектоскопия. 2017. № 3. С. 27—34.
35. Муравьева О.В., Злобин Д.В. Акустический тракт метода многократных отражений при дефектоскопии линейно протяженных объектов // Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 43—51.
36. Стрижак В.А. Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 2. С. 5—15. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15. EDN NZFFOP.
37. Стрижак В.А., Пряхин А.В., Хасанов Р.Р., Мкртчян С.С. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 1. С. 78—88. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88. EDN ZBAFKN.