

УДК.620.179.16

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15

**Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры****В. А. Стрижак**, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Предложен способ нанесения искусственного отражателя на длинномерный объект без разрушения его тела, что позволяет разработать настроечный образец для волноводного метода контроля при упрощении способа нанесения искусственного отражателя. На основании существующих методик оценки спектральных свойств сигналов, отраженных и прошедших через участки с перепадом сечения, разработана расчетная модель. Модель позволяет оценить амплитуды эхосигналов в зависимости от высоты и длины искусственного отражателя. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований влияния габаритных размеров искусственного отражателя на эхосигнал. Показано, что максимум эхосигнала достигается при длине искусственного отражателя на 19 % меньше значения, соответствующего критерию четверти волнового резонанса. Амплитуда от искусственного отражателя в 1,2...1,3 раза меньше процента прироста площади, и с увеличением площади в зоне отражателя различия растут в силу уменьшения коэффициента его прозрачности.*

*Полученные зависимости позволяют по амплитуде эхосигнала и видимой длине дефекта оценить его внутренний размер. Предлагаемая методика характеризуется высокой точностью, оперативностью и позволяет повысить достоверность волноводного метода контроля длинномерных объектов из полимерных композитных материалов (пруток, труба, арматура).*

**Ключевые слова:** композитные материалы, акустический волноводный метод, искусственный отражатель.**Введение**

**К**омпозитные материалы на основе полимерной матрицы с армирующим волокном находят всё более широкое применение в технических изделиях. На фоне попыток реформировать рынок с целью создания конкурентной среды среди ответственных производителей необходим механизм контроля качества выпускаемой продукции. Наиболее быстрорастущая область применения композитных материалов – строительство [1–5].

В отличие от металлических изделий нечувствительность композитных материалов к магнитным и электромагнитным излучениям ограничивает их контролепригодность. Среди ограниченного количества разработанных методов контроля композитных материалов (ГОСТ Р 56787–2015) наиболее распространен метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе параметров упругих волн, возбуждаемых в контролируемом объекте [6–11]. Особые трудности возникают при разработке

метода неразрушающего контроля длинномерных композитных материалов с длиной, многократно превышающей их диаметр (прутки, штанги, трубы, арматура и т. д.) [12]. Реализация ультразвукового прозвучивания с использованием сканирования наталкивается на особенности поверхности таких объектов контроля (ребристость, навивка, песчаное покрытие и т. д.).

Существует способ контроля эхометодом, при котором производится прозвучивание образца стержневой или крутильной волной с торца с длиной волны, значительно превышающей диаметр длинномерного объекта [13–15]. В условиях незначительного затухания, отсутствующей или низкой дисперсии скорости импульс отражается от противоположного торца объекта и возвращается в зону излучения, затем вновь проходит по телу объекта до противоположного торца и обратно. Сигнал, отраженный от дефектной области, возникает на участках с измененным сечением и пропорционален изменению площади сечения [16, 17]. По резуль-

татам измерения амплитуды сигнала от противоположного торца и сигнала от участка с измененным сечением дается заключение о величине изменения сечения.

Для настройки и калибровки прибора, реализующего волноводный метод контроля, необходимо выбрать оптимальный метод нанесения искусственного отражателя на образец из композитного материала. Известны способы нанесения искусственных отражателей [18], в основе которых используются методы удаления или деформации материала образца:

- ГОСТ 21397–81 – метод цилиндрического отверстия с плоским дном;
- патент SU881608 – метод выдавливания углубления;
- патент РФ2538053 – изготовление в образце технологических сквозных отверстий;
- патент RU2346268 – соединение двух заготовок из контролируемого материала методом сварки с размещением искусственного отражателя в предварительно полученной канавке;
- патент SU1185227 – калиброванный стальной шарик, запрессованный внутри образца;
- патент SU1772734 – образец из термопластичного материала с запрессованным внутрь металлическим искусственным отражателем в виде пластины;
- патент SU1538115 – образец из металла, выполненный сваркой с внутренними полосами;
- патент SU1772732 – многослойный образец с расположенным между слоями имитатором дефектов;
- патент RU2186383 – полость в контролируемом материале, в которой размещен искусственный дефект, а остальная часть полости заварена;
- авторское свидетельство СССР № 847192 – боек с клиновидной режущей кромкой, внедряющийся в поверхность образца с образованием в нем искусственного дефекта в виде выемки.

Для контроля длинномерных металлоизделий разработан способ нанесения искусственного отражателя на длинномерный объект в виде

сегментного паза длиной 30 мм и глубиной 0,4 мм [19].

В отличие от металлоизделий композитный материал не является гомогенным, и нанесение на объект контроля искусственных отражателей в виде пропилов, лысок или зарубок является нецелесообразным, поскольку приводит к разрушению армирующих элементов и наполнителя в неопределенных пропорциях, оказывая влияние на свойства образца из композитного материала случайным образом. В силу использования в качестве наполнителя композитного материала синтетических смол (например, эпоксидной смолы), предпочтительным видится создание искусственного отражателя как локального наплыва из терморезактивной смолы, что позволяет обеспечить цельность и однородность полученной конструкции. По внешнему виду такой искусственный отражатель соответствует типовому дефекту арматуры композитной полимерной, возникающему в момент ее производства при обрыве нити армирующего волокна [20, 21].

Таким образом, **цель работы** – исследовать модель искусственного отражателя для длинномерного объекта и проверить его применимость для нужд контроля.

#### Используемые подходы

В соответствии с ГОСТ 31938 «арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций» (АКП) представляет собой силовую стержень с анкерочным слоем, расположенным равномерно на поверхности и под углом к его продольной оси. Силовой стержень и анкерочный слой изготовлен из терморезактивной смолы и непрерывного армирующего наполнителя. Внешний вид АКП (рис. 1) в основном определяется шагом периодического (анкерочного) профиля –  $A$ , наружным диаметром –  $B$ , диаметром силового стержня –  $B$ . На рисунке изображена АКП с двухзаходным анкерочным слоем. ГОСТ 31938 также определяет номинальный диаметр  $d$  как «диаметр равновеликого по объему круглого гладкого стержня».

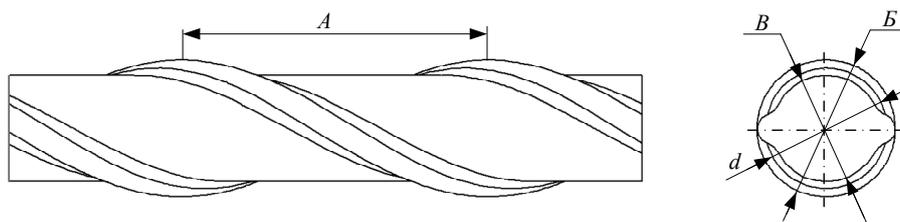


Рис. 1. Внешний вид арматуры композитной полимерной

Fig. 1. The appearance of the reinforcement polymer composite

Волноводный метод контроля протяженных объектов позволяет контролировать тело композитной арматуры датчиком, установленным на торец прутка. Метод реализует прозвучивание датчиком прутка с его торца с последующей регистрацией тем же датчиком сигналов, отраженных от искусственного отражателя и противоположного торца (донный импульс). Для отстройки от потерь, вызванных акустическим контактом, за 100 % принимается амплитуда сигнала донного импульса [22, 23].

Поскольку волноводный метод контроля чувствителен как к потере, так и к прибавке сечения [24, 25], нанесение искусственного отражателя возможно в виде наплыва из материала наполнителя с увеличенным сечением в зоне искусственного отражателя. Задачей является

расчет параметров искусственного отражателя, позволяющий повысить точность и достоверность волноводного метода контроля длинномерных объектов из полимерных композитных материалов при упрощении способа нанесения искусственного отражателя.

#### Методика проведения расчетов

Для оценки влияния геометрических характеристик искусственного отражателя на амплитуду сигнала, выраженную в процентах от амплитуды донного импульса, произведено моделирование распространения акустического импульса. В силу постоянства сечения прутка композитной арматуры в качестве аналога взят круглый гладкий стержень с номинальным диаметром  $d$  и с искусственным отражателем высотой  $h$  и длиной  $L$  (рис. 2).

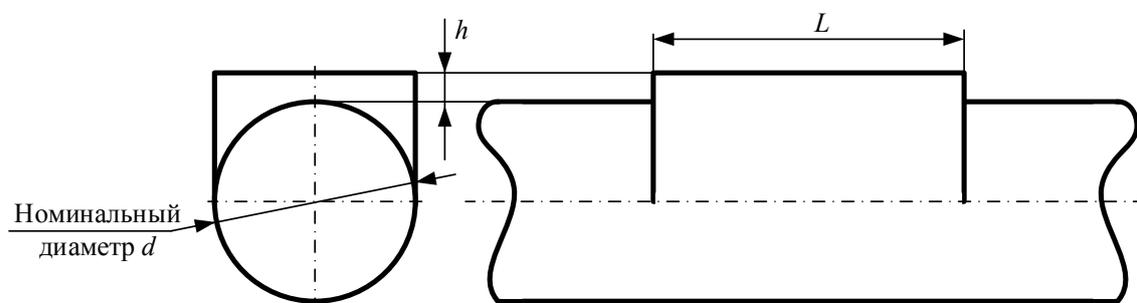


Рис. 2. Искусственный отражатель

Fig. 2. Artificial reflector

Особенностью данной модели является наличие избыточного сечения при  $h = 0$  мм, вызванное дополнением круглого профиля стержня до прямоугольного. Стержень рассматривается как волновод с постоянным акустическим сопротивлением  $Z = \rho \cdot c$ , где  $\rho$  – плотность,  $c$  – скорость акустической волны. Физические свойства эпоксидной смолы отличаются от физических свойств армированного материала композита. Например, плотность  $\rho$  эпоксидной смолы в отвержденном состоянии составляет  $1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а плотность армированного материала композитной арматуры варьируется в зависимости от типа наполнителя и его процентного количества. При содержании непрерывного армирующего наполнителя не менее 80 % по массе нормируется плотность  $\rho$  для стеклокомпозита и базальтокомпозита более  $2,05 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а для углекомпозита более  $1,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Для упрощения модели рассматривается случай совпадения физических свойств наплыва и стержня. При необходимости модель нужно уточнить в соответствии с используемым материалом стержня. Модель построена на известных урав-

нениях, описывающих явления прохождения и отражения в тонких пленках [26]. Произведен учет спектра зондирующего импульса и его ограничение в измерительном тракте. Для прутка композитной арматуры экспериментально полученный коэффициент затухания не превышает 0,1 1/м без выделения потерь вызванных контактом приемника с торцом прутка. Для упрощения модели в ней не рассматриваются явления, связанные с затуханием акустических импульсов и отсутствуют длина стержня и координата нахождения искусственного отражателя относительно торца.

Зондирующий импульс  $U(t)$  и его спектр  $S(f)$  (рис. 3) задан в виде ударного импульса амплитудой, принятой за 1. Основная частота зондирующего импульса  $f_0$  составляет 25 кГц.

Последовательность алгоритма расчета изложена на рис. 4.

Для получения образов сигналов, отраженных от торца и искусственного отражателя, используется спектр зондирующего импульса  $S(f)$ . Спектр сигнала от искусственного отражателя  $Sd(f)$  получен из спектра ударного импульса  $S(f)$

с учетом частотно-зависимого коэффициента отражения  $R(f)$  и полосы пропускания приемного тракта  $FF(f)$ . Спектр сигнала от торца  $St(f)$  получен из спектра  $S(f)$  ударного импульса с учетом частотно-зависимого коэффициента

прозрачности  $D(f)$  и полосы пропускания приемного тракта  $FF(f)$ :

$$Sd(f) = S(f) \cdot R(f) \cdot FF(f);$$

$$St(f) = S(f) \cdot D^2(f) \cdot FF(f).$$

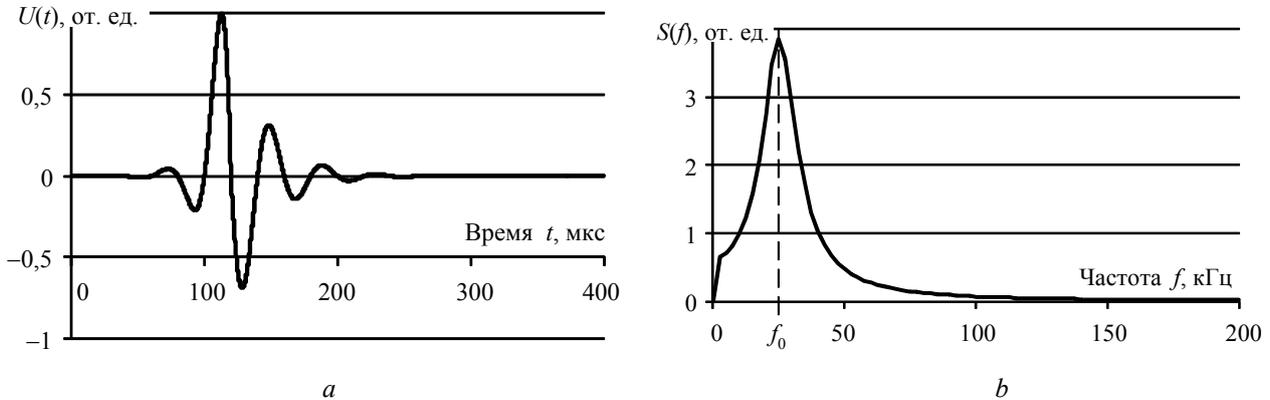


Рис. 3. Зондирующий импульс (а) и его спектр (b)

Fig. 3. Probe pulse (a) and its spectrum (b)

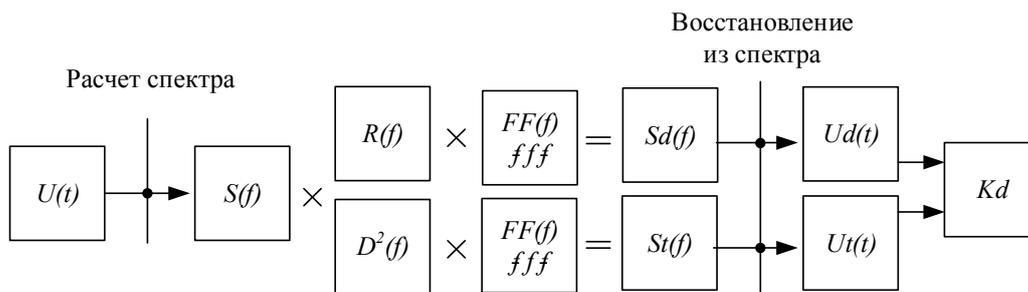


Рис. 4. Алгоритм расчета сигналов от торца и искусственного отражателя

Fig. 4. Algorithm for calculating signals from the end face and artificial reflector

Так как сигнал, принятый от торца, дважды проходит через зону с искусственным отражателем при движении от датчика к торцу и обратно, коэффициент прозрачности используется дважды. Сигнал от искусственного отражателя  $Ud(f)$  и сигнал от торца  $Ut(f)$  рассчитаны из полученных спектров  $Sd(f)$ ,  $St(f)$ . Зондирующий импульс задан на временной оси  $2^{14}$  точек. Расчет проведен в программной среде MathCad.

Результирующим расчетным параметром является отношение амплитуд  $Kd$ , полученный как отношение амплитуды сигнала от искусственного отражателя  $Ud(f)$  к амплитуде сигнала от торца  $Ut(f)$ , принятого за 100 %:

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

Полоса пропускания приемного тракта задана параболой (рис. 5) с максимум на частоте 25 кГц и полосой по уровню  $-6$  дБ в границах

9,5...64 кГц. Полоса соответствует электрическому тракту дефектоскопа протяженных объектов АДНШ-П.

На участке при постоянном акустическом сопротивлении волновода  $\rho \cdot c$  коэффициенты отражения  $R(f)$  и прозрачности  $D(f)$  от скачка поперечного сечения волновода с  $S_1$  до  $S_2$  на ограниченной длине  $h$  выражаются следующими формулами:

$$R(f) = \frac{(S_1^2 - S_2^2) \sin\left(\frac{\omega L}{c}\right)}{\sqrt{4S_1^2 S_2^2 + (S_1^2 - S_2^2)^2 \sin^2\left(\frac{\omega L}{c}\right)}};$$

$$D(f) = \frac{2S_1 S_2}{\sqrt{4S_1^2 S_2^2 + (S_1^2 - S_2^2)^2 \sin^2\left(\frac{\omega L}{c}\right)}},$$

где  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота волны;  $c$  – скорость звука в воздухе.

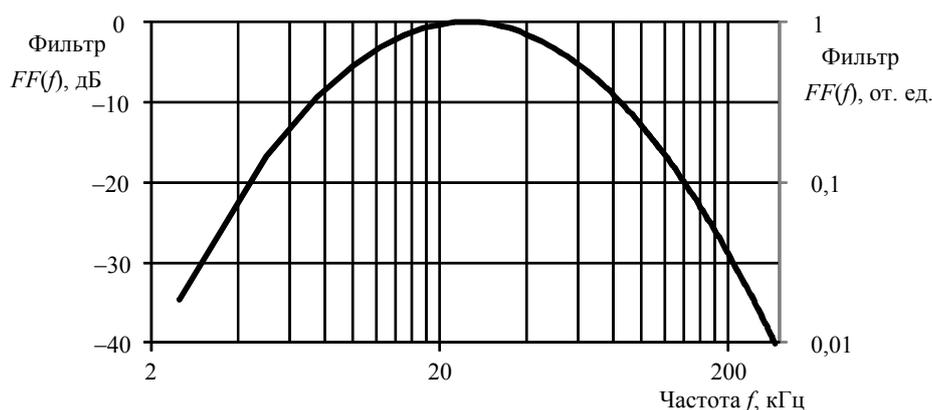


Рис. 5. Полоса пропускания приемного тракта  $FF(f)$

Fig. 5. The bandwidth of the receiving path  $FF(f)$

Коэффициенты отражения  $R(f)$  и прозрачности  $D(f)$  являются частотно зависимыми и определяются соотношением длины акустической волны  $\lambda = f/c$  и длины искусственного отражателя  $L$ . Значения коэффициента отражения и прозрачности в зависимости от частоты  $f$  (рис. 6) приведены для скорости акустической волны  $c = 4800$  м/с, прутка диаметром 8 мм, высоты искусственного отражателя  $h = 1$  мм и протяженности искусственного отражателя  $L = 40$  мм.

**Результаты расчетов и их обсуждение**

В соответствии с аналитическим расчетом коэффициента отражения максимум коэффициента в полосе частот зондирующего импульса соответствует условию  $\omega L/c = \pi/2$  ( $L = \lambda/4$ ), где длина волны  $\lambda = c/f$  определяется скоростью  $c$  и частотой акустического сигнала  $f$ . Сигналы от искусственного отражателя и торца (рис. 7) рас-

считаны для частоты зондирующего импульса  $f_0 = 25$  кГц, скорости акустической волны  $c = 4800$  м/с, для прутка диаметром  $d = 8$  мм, высоты  $h = 1$  мм и протяженности 40 мм искусственного отражателя. Амплитуда донного импульса составила 0,82 от амплитуды зондирующего импульса. Амплитуда сигнала от торца в 4,3 раза превысила амплитуду сигнала от искусственного отражателя.

Отношение амплитуд  $Kd$  зависит как от высоты  $h$ , так и от длины  $L$  искусственного отражателя. В силу особенностей модели искусственного отражателя (см. рис. 2) увеличение площади сечения в области с искусственным отражателем линейно-пропорционально увеличению высоты  $h$  (рис. 8). Результаты расчета приведены для сигналов, имеющих максимальное значение при вариации длины искусственного отражателя.

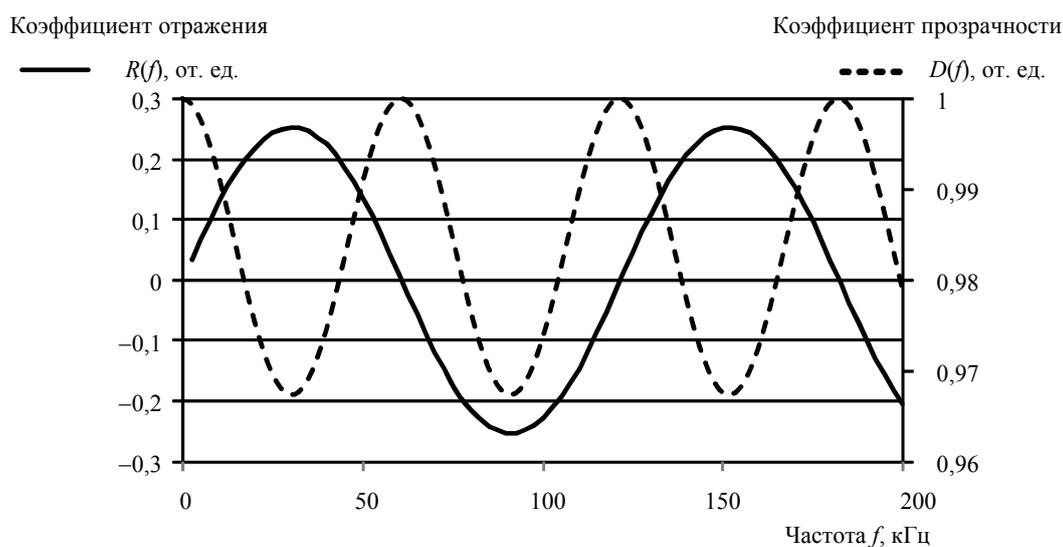


Рис. 6. Частотные свойства коэффициента отражения  $R$  и коэффициента прозрачности  $D$

Fig. 6. Frequency properties of the reflection coefficient  $R$  and the transparency coefficient  $D$

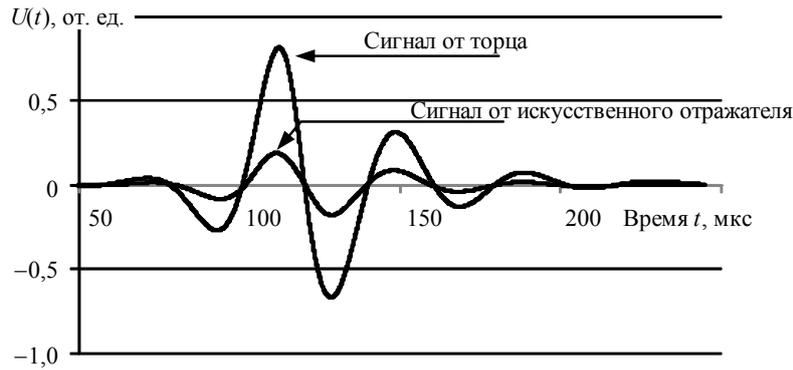


Рис. 7. Форма сигнала от искусственного отражателя и сигнала от торца

Fig. 7. The signal form from the artificial reflector and the signal from the end face

Для прутков различных диаметров вклад высоты нанесенного искусственного отражателя  $h$  в изменение площади тела будет зависеть от исходного диаметра прутка. У прутка с большим диаметром прирост отношения амплитуд  $Kd$  ниже на каждый миллиметр высоты  $h$  искусственного отражателя (см. рис. 8). Приведенные значения получены при длине искусственного

отражателя  $L$ , соответствующего максимуму амплитуды. На прутке диаметром 8 мм при высоте искусственного отражателя  $h = 0$  мм расчетное значение отношение амплитуд  $Kd$  составило 11 % вне зависимости от диаметра прутка. Для прутка с диаметром основного тела в 8 мм искусственному отражателю высотой 1 мм соответствует отношение амплитуд  $Kd$ , равное 23 %.

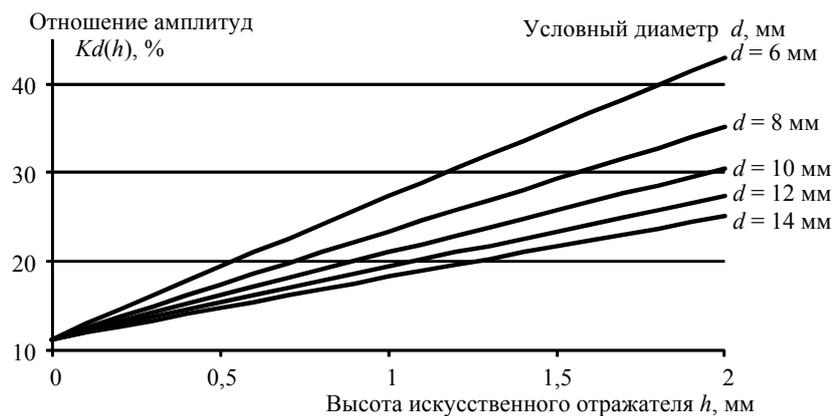


Рис. 8. Максимальное значение отношение амплитуд  $Kd$  в зависимости от высоты искусственного отражателя для разных диаметров прутка

Fig. 8. The maximum value is the ratio of amplitudes  $Kd$  depending on the height of the artificial reflector for different bar diameters

Отношение амплитуд сигнала  $Kd(L)$  определяется как коэффициентом отражения  $R(f)$ , так и коэффициентом прозрачности  $D(f)$ . Их совокупное влияние (см. рис. 9) приводит к смещению максимума отраженного сигнала (пунктир из точек) к меньшему значению длины искусственного отражателя  $L$  по сравнению с предполагаемым критерием  $L = \lambda/4$  (пунктирная линия). Эффект достигается ввиду особенности целевого параметра  $Kd(L)$ , учитывающего амплитуду импульса, отраженного от противоположного торца, который, в свою очередь, дважды проходит через зону с искусственным отражателем

и, как следствие, имеет более ярко выраженные резонансные свойства. Рост амплитуды донного импульса в области предполагаемого критерия  $L = \lambda/4$  оказывается более существенным, чем рост сигнала от искусственного отражателя, что и смещает максимум целевого параметра  $Kd(L)$  в более низкочастотную область. Значения отношения амплитуд  $Kd(L)$  в зависимости от длины  $L$  искусственного отражателя получены для прутка диаметром 8 мм при скорости стержневой волны  $c = 4800$  м/с и высотах искусственного отражателя  $h = 1$  мм (превышение площади 29,9 %, отношение амплитуд  $Kd = 23,4$  %) и  $h = 0$  мм

(превышение площади 13,7 %, отношение амплитуд  $Kd = 11,3$  %). Для центральной частоты зондирующего импульса в 25 кГц критерий  $L = \lambda/4$  составляет 48 мм. Расчетное значение длины искусственного отражателя  $L$ , соответствующее максимуму отношения амплитуд  $Kd(L)$ , составило 39 мм, что на 19 % меньше значения, соответствующего критерию  $L = \lambda/4$ .

На рис. 10 показано соответствие отношения амплитуд  $Kd(h)$  и максимума коэффициента отражения  $R(h)$  от перепада сечения при различных высотах искусственного отражателя  $h$  в сравнении с приростом площади  $dS/S(h)$ . Значения получены для искусственного отражателя

длиной  $L$ , соответствующего максимуму отношения амплитуд  $Kd(h)$ , такой дефект можно назвать модельным. Отношение амплитуд  $Kd(h)$  в 1,2...1,3 раза меньше процента прироста площади  $dS/S(h)$  в зоне искусственного отражателя. С увеличением высоты искусственного отражателя  $h$  различия растут. Таким образом, пересчет отношения амплитуд  $Kd(h)$  в размер дефекта через процент прироста площади  $dS/S(h)$  необходимо проводить с повышающим коэффициентом. При уменьшении длины отражателя различия между приростом площади  $dS/S(h)$  и отношением амплитуд  $Kd(h)$  будут увеличиваться в соответствии с рис. 9.

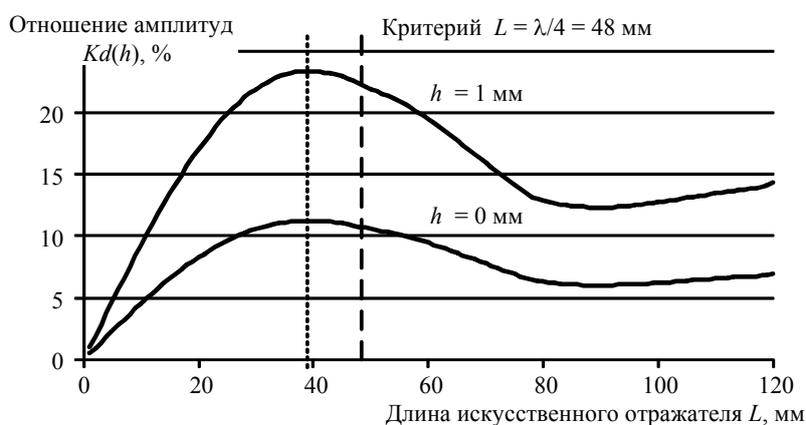


Рис. 9. Отношение амплитуд  $Kd$  в зависимости от длины искусственного отражателя

Fig. 9. The ratio of amplitudes  $Kd$  depending on the length of the artificial reflector

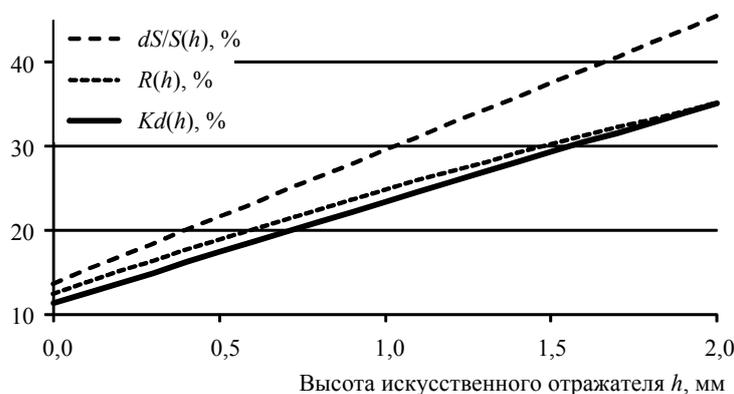


Рис. 10. Отношение амплитуд  $Kd(h)$ , максимум коэффициента отражения  $R(h)$  и прирост площади  $dS/S(h)$  в зависимости от высоты искусственного отражателя  $h$

Fig. 10. The ratio of amplitudes  $Kd(h)$ , maximum reflection coefficient  $R(h)$  and area gain  $dS/S(h)$  depending on the height of the artificial reflector  $h$

Максимум коэффициента отражения  $R(h)$  ведет себя подобно отношению амплитуд  $Kd(h)$  (см. рис. 10), их различия не превышают 1,1 в зоне малых высот искусственного отражателя  $h$ . Более быстрый рост отношения амплитуд  $Kd(h)$  при увеличении высоты искусственного отражателя  $h$  объясняется учетом уменьшения

амплитуды донного импульса ввиду уменьшения коэффициента прозрачности в зоне искусственного отражателя.

Обобщенный коэффициент  $Kd_0$  (рис. 11) позволяет скорректировать акустический отклик от дефекта с учетом параметров объекта контроля.

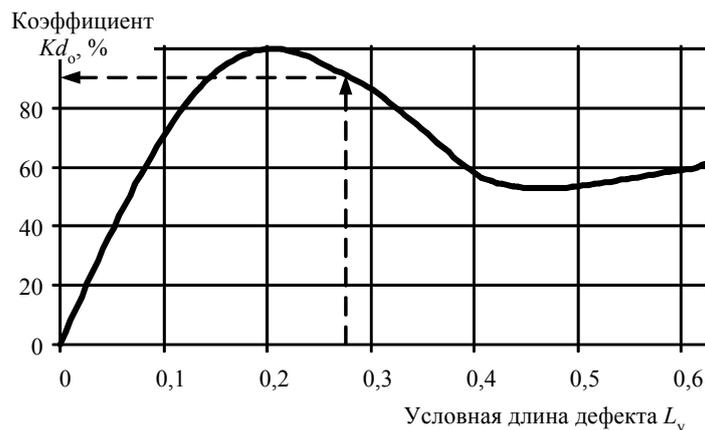


Рис. 11. Коэффициент  $Kd_0$  в зависимости от условной длины дефекта  $L_y$

Fig. 11. Coefficient  $Kd_0$  depending on the conditional length of the defect  $L_y$

По горизонтальной оси отложена условная длина дефекта  $L_y = L \cdot f_0 / c$ , где  $L$  – длина визуально обнаруженного дефекта,  $f_0$  – основная частота спектра и  $c$  – скорость акустической волны. Например, для дефекта длиной  $L = 40$  мм при скорости  $c = 4800$  м/с и основной частоте спектра  $f_0 = 33$  кГц условная длина дефекта  $L_y$  составит 0,275, и обобщенный коэффициент  $Kd_0 = 0,91$ . Значение полученного обобщенного коэффициента  $Kd_0$  позволяет противопоставить обнаруженный дефект к искусственному отражателю известной длины и высоты (модельному дефекту).

#### Результаты опробования

По разработанной методике на образец композитной арматуры условным диаметром 8 мм с использованием оправки нанесен искусственный отражатель из эпоксидной смолы (рис. 12). Длина образца композитной арматуры 3 м, координата искусственного отражателя 2 м. Длина искусственного отражателя составляет  $L = 40$  мм. Высота заливки с учетом поглощения анкерочного слоя искусственным отражателем составила  $h = 0,4$  мм.

Эхограмма прозвучивания образца с искусственным отражателем представлена на рис. 13.

Эхограмма получена на дефектоскопе протяженных объектов АДНШ-П в программной среде «Монитор П». Амплитуда сигнала от ис-

кусственного отражателя составила 13 % при основной частоте 1-го донного импульса 33 кГц. На основании рассчитанного обобщенного коэффициента  $Kd_0 = 0,91$  пересчетное значение амплитуды сигнала соответствует 14 %. Это позволяет по графику рис. 10 противопоставить изготовленный отражатель модельному дефекту с изменением площади на 20 %.

#### Выводы

Таким образом, предложенный способ нанесения искусственного отражателя на длинномерный объект без разрушения его тела позволяет разработать настроечный образец для волноводной методики контроля при упрощении способа нанесения искусственного отражателя. По результатам моделирования влияния габаритных размеров искусственного отражателя на эхосигнал получены зависимости амплитуды эхосигналов от искусственного отражателя. Показано, что максимум эхосигнала достигается при длине искусственного отражателя на 19 % меньше значения, соответствующего критерию  $L = \lambda/4$ . Амплитуда от искусственного отражателя в 1,2...1,3 раза меньше процента прироста площади  $dS/S(h)$ , и в силу уменьшения коэффициента прозрачности в зоне отражателя с увеличением его площади различия растут. Полученные зависимости позволяют по амплитуде эхосигнала и видимой длине дефекта оценить его внутренний размер.

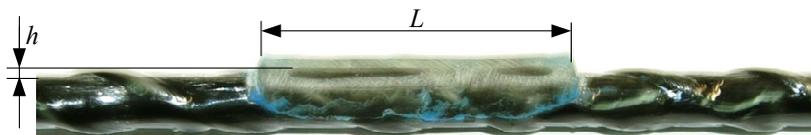


Рис. 12. Внешний вид искусственного отражателя на композитной арматуре с условным диаметром 8 мм

Fig. 12. Appearance of an artificial reflector on a composite reinforcement with a nominal diameter of 8 mm

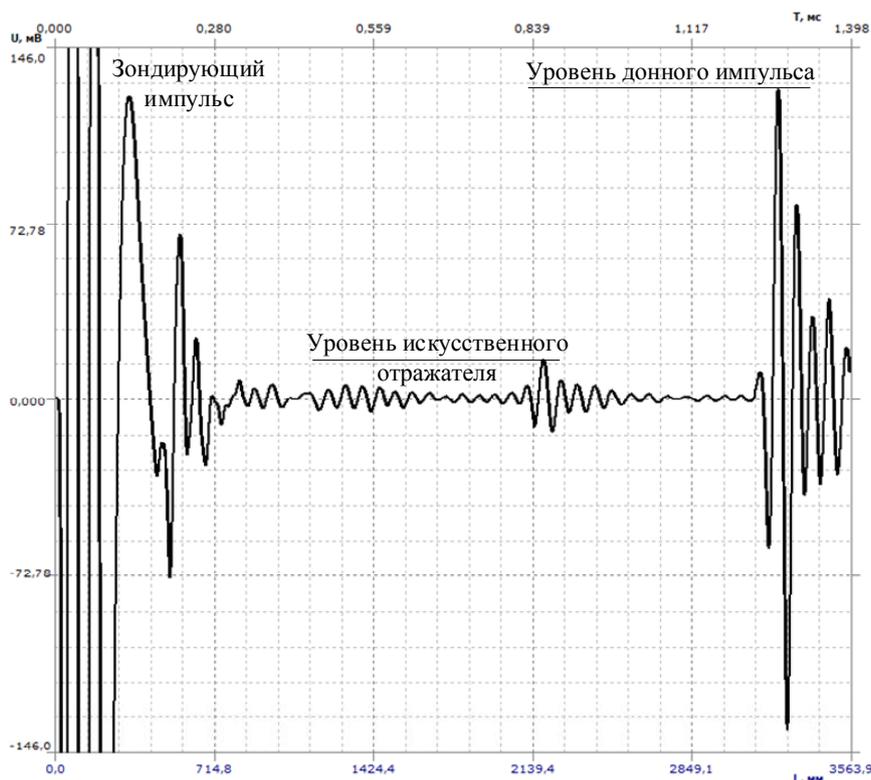


Рис. 13. Эхограмма прозвучивания образца композитной арматуры с искусственным отражателем

Fig. 13. Echogram of sounding of a sample of composite reinforcement with an artificial reflector

Изготовленный настроечный образец с искусственным отражателем позволяет повысить достоверность волноводного метода контроля длинномерных объектов из полимерных композитных материалов (пруток, труба, арматура).

#### Библиографические ссылки

1. Неразрушающий контроль качества бетонных строительных композитов / М. А. Фролова, А. С. Тутыгин, А. М. Айзенштадт, Т. А. Махова, В. С. Лесовик // *Строительные материалы*. 2012. № 3. С. 20–22.
2. 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.
3. 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.
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. 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.

6. Смелков С. Л. Способы контроля армированных композитов // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2019. № 4. С. 49–52.

7. 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.

8. Мурашов В. В., Генералов А. С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 2 (31). С. 59–67.

9. *Неразрушающий контроль : справочник*. В 8 т. / А. И. Евлампиев, Е. Д. Попов, С. Г. Сажин, Ю. К. Федосенко, В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, Ю. Я. Останин ; под общ. ред. В. В. Клюева. Изд. 2-е, перераб. и испр. М., 2006. 829 с.

10. 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, vol. 1*.

11. 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.

12. Патент на изобретение RU 2688877 С1, 22.05.2019. Способ определения прочностных харак-

теристик полимерных композиционных материалов / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов.

13. Эффективность использования стержневых и крутильных волн для контроля пруткового проката / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, Т. Н. Лебедева // Дефектоскопия. 2004. № 3. С. 3–8.

14. Акустическая дефектоскопия прутков с использованием многократных отражений / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Б. А. Буденков, Т. Н. Лебедева, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. 2004. № 8. С. 50–55.

15. Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами труб / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов // Дефектоскопия. 2006. № 6. С. 58–66.

16. Муравьева О. В., Стрижак В. А., Пряхин А. В. Влияние регулярных перепадов сечения на контролепригодность прутка при контроле акустическим волноводным методом // Дефектоскопия. 2014. № 4. С. 41–49.

17. Буденков Г. А., Недзвецкая О. В. Основные закономерности взаимодействия волн похгаммера с дефектами // Дефектоскопия. 2004. № 2. С. 33–46.

18. Добровольский Д. С. Влияние надрезов 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.

19. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин : монография. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. 234 с. ISBN 978-5-7692-1560-5.

20. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, С. С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 1. С. 78–88. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88.

21. 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.

22. Патент на изобретение RU 2679480 C1, 11.02.2019. Способ акустического контроля прутков волноводным методом / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Ю. В. Мышкин.

23. Патент на полезную модель RU 173773 U1, 11.09.2017. Устройство акустического контроля прутков / Ю. В. Мышкин, О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, М. А. Синцов.

24. Муравьева О. В., Злобин Д. В. Акустический тракт метода многократных отражений при дефектоскопии линейно-протяженных объектов // Дефектоскопия. 2013. № 2. С. 43–51.

25. Буденков Г. А., Недзвецкая О. В., Стрижак В. А. Акустика затрубного пространства добывающих и нагнетательных скважин // Дефектоскопия. 2003. № 8. С. 3–10.

26. Муравьева О. В., Стрижак В. А., Пряхин А. В. Оценка чувствительности метода акустической рефлектометрии к дефектам теплообменных труб // Дефектоскопия. 2017. № 3. С. 27–34.

## References

1. Frolova M.A., Tutygin A.S., Ajzenshtadt A.M., Mahova T.A., Lesovik V.S. [Non-destructive quality control of concrete building composites]. *Stroitel'nye materialy*, 2012, no. 3, pp. 20-22 (in Russ.).

2. Nikolenko P.V., Shkuratnik V.L., Chepur M.D. [Acoustic emission effects during tensile composites and their use for monitoring the state of the roof of mine workings] *Gornyj zhurnal*, 2019, no. 1, pp. 13-16 (in Russ.).

3. Stepanova V.F., Il'in D.A., Buchkin A.V. [Hybrid composite reinforcement with high modulus of elasticity]. *Estestvennye i tehicheskie nauki*, 2014, no. 9-10, pp. 435-437 (in Russ.).

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]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 8-13 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2016-1-8-13.

5. Frantsev M.E. [Study of the superstructure of passenger hydrofoil composites using acoustic non-destructive testing methods]. *V mire nerazrushajushhego kontrolja*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 13-17 (in Russ.).

6. Smelkov S.L. [Methods of control of reinforced composites]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii*, 2019, no. 4, pp. 49-52 (in Russ.).

7. Trifonova S.I., Generalov A.S., Dalin M.A. [Modern technologies and means of shadow ultrasonic testing of polymer composite materials]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2017, no. 7, pp. 37-43 (in Russ.).

8. Murashov V.V., Generalov A.S. [Control of multilayer glued structures with low-frequency acoustic methods] *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. 2, pp. 59-67 (in Russ.).

9. Evlampiev A.I., Popov E.D., Sazhin S.G., Fedosenko YU. K., Gerasimov V.G., Pokrovskij A.D., Ostanin Yu.Ya. *Nerazrushayushchij kontrol'* [Non-destructive testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 829 p. (in Russ.).

10. 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, vol. 1.

11. Solodov I.Yu., Krojcbрук M. [Resonance defects: a new approach to increasing the sensitivity of NK methods using ultrasonic stimulation of defects]. *V mire nerazrushayushhego kontrolja*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 8-12 (in Russ.).

12. Strizhak V.A., Pryahin A.V., Hasanov R.R. Patent RU 2688877 C1, 22.05.2019.

13. Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V., Zlobin D.V., Lebedeva T.N. [The application efficiency of rod and torsional waves for checking rod-shaped roll stock]. *Defektoskopiya*, 2004, vol. 40, no. 3, pp. 147-151 (in Russ.).

14. Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V., Budenkov B.A., Lebedeva T.N., Zlobin D.V. [Acoustic nondestructive testing of rods using multiple reflections]. *Defektoskopiya*, 2004, vol. 40, no. 8, pp. 541-544 (in Russ.).
15. Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V., Zlobin D.V., Murashov S.A. [Interaction of torsion waves with longitudinal cracks in tubes]. *Defektoskopiya*, 2006, vol. 42, no. 6, pp. 392-397 (in Russ.).
16. Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V. [The effect of regular differences in a cross section on the testability of a rod tested by the acoustic waveguide method]. *Defektoskopiya*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 219-226 (in Russ.).
17. Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V. [Principal regularities of Pochhammer-wave interaction with defects]. *Defektoskopiya*, 2004, vol. 40, no. 2, pp. 99-108 (in Russ.).
18. Dobrovolskij D.S. [The effect of notch rods on the stress intensity factors of annular cracks]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2016, vol. 19, no. 2, pp. 6-8 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2016-2-6-8.
19. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Strizhak V.A., Murashov S.A., Pryakhin A.V. *Akusticheskij volnovodnyj kontrol' linejno protyazhennykh ob'ektov* [Acoustic waveguide control of linearly extended objects]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2017, 234 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7692-1560-5.
20. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Hasanov R.R., Mkrtchyan S.S. [Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 78-88 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88.
21. Ganzij Yu.V. [Identification of the dangers of obtaining low-quality products from a polymer composite material by the example of building composite reinforcement]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 13-19 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-13-19.
22. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Myshkin Yu.V. Patent RU 2679480 C1, 11.02.2019.
23. Myshkin Yu.V., Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Sincov M. A.. Patent RU 173773 U1, 11.09.2017.
24. Murav'eva O.V., Zlobin D.V. [The acoustic path in the method of multiple reflections during nondestructive testing of linearly extended objects]. *Defektoskopiya*, 2013, vol. 49, no. 2, C. 93-99 (in Russ.).
25. Budenkov G.A., Nedzvetskaya O.V., Strizhak V.A. [Acoustics of the annular space of producing and injection wells]. *Defektoskopiya*, 2003, vol. 39, no. 8, pp. 571-576 (in Russ.).
26. Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V. [Estimation of the sensitivity of acoustic reflectometry to flaws in heat-exchange pipes]. *Defektoskopiya*, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 190-197 (in Russ.).

### Artificial Reflector for Setting up a Flaw Detector that Implements an Acoustic Waveguide Method for Monitoring Composite Reinforcement

V.A. Strizhak, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*A method for applying an artificial reflector to a long object without destroying its body is proposed. It allows developing a tuning sample for a waveguide control method while simplifying the method for applying an artificial reflector. A computational model has been developed based on existing methods for evaluating the spectral properties of signals reflected and passed through sections with a cross-section difference. The model allows you to estimate the amplitudes of echo signals depending on the artificial reflector's height and length. Results of modeling and experimental studies of the effect of the artificial reflector overall dimensions on the echo signal are presented. It is shown that the maximum echo signal is achieved when the length of the artificial reflector is 19 % less than the value corresponding to the criterion of a quarter of the wave resonance. The amplitude of the artificial reflector is 1.2...1.3 times less than the percentage of the area increasing. As the area in the reflector zone increases, the differences grow due to decreasing its transparency coefficient.*

*The obtained dependencies allow us to estimate the internal size of the echo signal by the amplitude and visible length of the defect. The proposed method is characterized by high accuracy and efficiency. It allows for increasing the reliability of the waveguide method for monitoring long objects made of polymer composite materials (rod, pipe, armature).*

**Keywords:** composite material, acoustic testing, waveguide technique, artificial reflector.

Получено 26.04.2020

#### Образец цитирования

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.

#### For Citation

Strizhak V.A. [Artificial Reflector for Setting up a Flaw Detector that Implements an Acoustic Waveguide Method for Monitoring Composite Reinforcement]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 5-15 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15.