

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕНЕВОГО БЕСКОНТАКТНОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2020 г. В.К. Качанов<sup>1,\*</sup>, И.В. Соколов<sup>1</sup>, М.А. Караваев<sup>1</sup>, Р.В. Концов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

\*E-mail: kachanovvk@mail.ru

Поступила в редакцию 18.08.2020; после доработки 07.09.2020

Принята к публикации 08.09.2020

Показано, что для повышения чувствительности ультразвукового (УЗ) бесконтактного теневого контроля изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) необходимо наряду с известными методами (увеличением амплитуды зондирующего сигнала, использованием радиотехнических методов обработки сигналов, использованием высокочувствительных электроакустических преобразователей) оптимизировать параметры бесконтактного контроля. Определены критерии выбора протяженности воздушных промежутков между излучающим преобразователем и объектом контроля и между объектом контроля и приемным преобразователем, а также определены критерии выбора длительности зондирующих сигналов. Предложены методы повышения надежности контроля краевых областей изделий из ПКМ с небольшой толщиной. Приведены результаты автоматического бесконтактного сканирования изделий из ПКМ в теневом режиме с помощью адаптивного измерительного комплекса, позволяющего адаптировать параметры контроля для каждого нового контролируемого изделия.

**Ключевые слова:** ультразвуковой бесконтактный теневой контроль, композиционные материалы, протяженность воздушного промежутка, длительность импульса, стробирование сигналов.

DOI: 10.31857/S0130308220100061

### ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковой неразрушающий контроль (НК) большинства изделий осуществляется контактным способом, однако в ряде случаев непосредственный механический контакт электроакустического преобразователя (ЭАП) с объектом контроля (ОК) не допускается по технологическим соображениям. В этом случае используют бесконтактный контроль, при котором УЗ сигнал вводится в ОК с помощью излучающего преобразователя (ИП) через воздушный промежуток, а информационный сигнал поступает на приемный преобразователь (ПП) также через воздух. Бесконтактный УЗ контроль имеет очевидные преимущества: кроме решения проблемы механического контакта он позволяет производить сканирование изделий со сложной конфигурацией поверхности, что дает возможность использовать его в автоматизированных сканирующих системах с целью повышения производительности НК.

Однако этому способу присущ ряд недостатков, основным из которых является низкая чувствительность [1, 2], обусловленная рядом причин. Во-первых, при контроле через воздушный промежуток в изделие поступает только малая часть УЗ зондирующего сигнала из-за большой разницы акустических сопротивлений на границах ЭАП — воздушная среда и воздушная среда — ОК. Коэффициент отражения УЗ сигнала по энергии на границе двух сред с акустическим сопротивлениями  $Z_1$  и  $Z_2$  определяется известной формулой  $R = (Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2$ . Так как акустическое сопротивление для воздуха  $Z_{\text{в}} = 420 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ , а для оргстекла  $Z_{\text{орг}} = 3,1 \cdot 10^6 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ , то на границе сред воздух—оргстекло коэффициент отражения по энергии составляет  $R \approx 0,9995$ , т.е. менее 0,1 % энергии проходит через границу сред и поступает в изделие. В результате, чувствительность УЗ бесконтактного контроля в сотни раз меньше по сравнению с иммерсионным способом контроля [3, 4]. Кроме того, на чувствительность бесконтактного контроля влияет ослабление сигнала в материале контролируемого изделия и в воздухе.

УЗ бесконтактный способ активно используется при контроле изделий из ПКМ, используемых в авиационной промышленности и представляющих собой многослойные конструкции толщиной в несколько сантиметров. В ПКМ велико частотно-зависимое затухание ультразвука, из-за чего контроль осуществляется на частотах до 500 кГц [3—7], а при контроле изделий с несколькими сотовыми слоями используют УЗ сигналы с частотами ниже 150 кГц. На таких низких частотах длина УЗ волны в композитном материале соизмерима с толщиной ОК, поэтому такие изделия с помощью эхоимпульсного способа не контролируются, а используется более чувствительный теневой способ.

Наличие дефекта в изделии при теневом контроле определяется по изменению амплитуды прошедшего через ОК сигнала: при относительно большом размере дефекта он полностью перекрывает акустическое поле и на приемном преобразователе сигнал отсутствует; при небольшом размере дефекта амплитуда прошедшего на ПП сигнала уменьшается незначительно. Получить же информацию о реальном размере дефекта позволяет двухмерная томограмма изделия (С-скан), построенная по результатам сканирования парой датчиков ИП—ПП вдоль поверхности контролируемого ОК.

Однако и теневому способу контроля изделий из ПКМ присущи проблемы, среди которых основными являются проблема чувствительности и проблема точности измерения дефекта. Для повышения чувствительности используют разнообразные методы. Во-первых, повышают амплитуду зондирующего сигнала. Однако этот путь имеет естественные ограничения, определяемые свойствами пьезокерамики и выходным каскадом генератора зондирующих сигналов [1]. Во-вторых, используют известные из радиолокации сложно-модулированные зондирующие сигналы с последующей их оптимальной обработкой с целью выделения информационного сигнала из шумов и помех [8,9]. Этот метод имеет большие перспективы, однако он существенно усложняет аппаратуру. В-третьих, стараются использовать высокочувствительные ЭАП. Однако, как это отмечается в [1], достаточно сложно создать УЗ низкочастотный широкополосный ЭАП, эффективно излучающий сигнал в воздушную среду.

Различные варианты решения проблемы чувствительности бесконтактных преобразователей отражены в многочисленных публикациях [4, 5, 10—15], в том числе в наших работах [16—18]. Наиболее эффективными являются преобразователи на изгибных колебаниях [1, 14], которые хорошо согласуются с воздушной средой (их акустическое сопротивление заметно ниже сопротивлений пьезоэлектрических преобразователей). Однако недостатком изгибных ЭАП является тот факт, что они работают на частотах не выше 60 кГц. Используются также электростатические (конденсаторные) преобразователи, но их свойства сильно зависят от температуры окружающей среды, влажности, загрязненности и т.п., что ограничивает их применение в производственных условиях и на открытом воздухе [14, 16]. В результате большинство используемых в настоящее время бесконтактных ЭАП представляют собой пьезоэлектрические преобразователи с согласующими слоями. У таких преобразователей полоса пропускания  $\Delta f$  расширяется за счет механического демпфирования пьезоэлементов, что приводит к снижению чувствительности ЭАП. В результате на частотах  $f_0 < 200\text{—}300$  кГц относительная полоса пропускания бесконтактных ЭАП не превышает  $\Delta f/f_0 \approx 30\text{—}40\%$ , а протяженность излучаемых в воздух импульсов  $t_n = nT_0$  составляет не менее 5 периодов несущей частоты (где  $T_0$  — период колебаний;  $n$  — число периодов в импульсе).

Другая проблема теневого контроля заключается в недостаточной точности измерения дефектов. Эта проблема возникает в том числе из-за того, что не всегда обеспечиваются оптимальные параметры схемы теневого контроля. В частности, при контроле краевых областей на точность измерения влияет выбор протяженности воздушных промежутков между ИП и ОК, а также между ОК и ПП. При автоматизированном контроле изделий на качество контроля влияет длительность стробирующего импульса. Таким образом, целью настоящей статьи является определение оптимальных параметров схемы ультразвукового теневого бесконтактного контроля изделий из ПКМ с небольшой толщиной.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОТЯЖЕННОСТИ ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА МЕЖДУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ И ОК

Качество бесконтактного контроля во многом зависит от правильного выбора расстояний от ИП до ОК и от ОК до ПП. На рис. 1а показаны пути прохождения УЗ сигналов при теневом бесконтактном способе контроля [19, 20], а на рис. 1б — упрощенное представление прошедших на ПП УЗ сигналов, среди которых 1 — информативный сквозной сигнал, напрямую проходящий от ИП к ПП через ОК и через два воздушных промежутка; 2 — сигнал, поступивший на ПП после однократного переотражения внутри ОК; 3 — сигнал, прошедший на ПП после однократного переотражения в воздушном промежутке между ИП и ОК; 4 — сигнал, прошедший на ПП после однократного переотражения в воздушном промежутке между ОК и ПП. В том случае, когда ИП и ПП расположены недалеко от края изделия, возможен еще сигнал 5, огибающий край ОК по воздуху.

На упрощенной схеме на рис. 1а ИП и ПП расположены на достаточно большом расстоянии от ОК, поэтому сигналы 1—5 легко разрешаются. Однако в зависимости от длительности импульса, от протяженности воздушных промежутков и от толщины ОК сигналы 2, 3, 4 могут накладываться на сигнал 1 и искажать его. Так, например, если ИП и ПП расположены на одинаковом расстоянии от ОК, то может происходить сложение переотраженных сигналов 3 и 4. А если уменьшать протяжен-

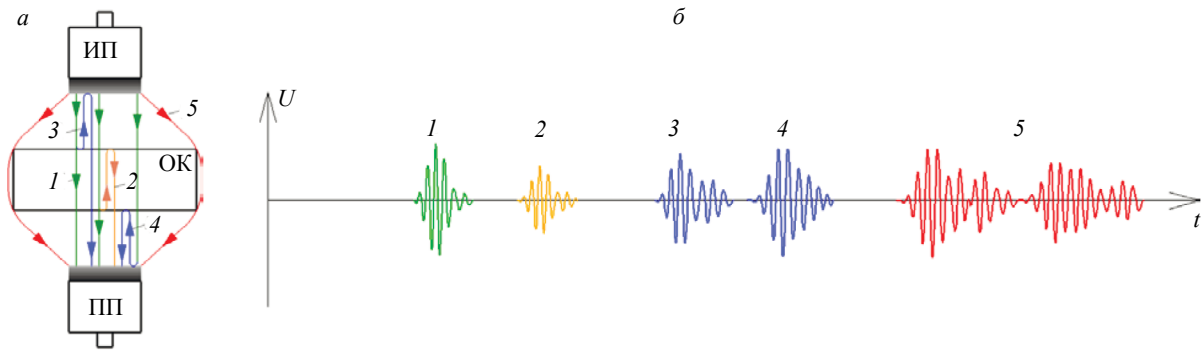


Рис. 1. Сигналы при УЗ бесконтактном теновом контроле:  
а — схема распространения сигналов; б — расположение сигналов во временной области.

ность воздушных промежутков, то сигналы 3 и 4 могут накладываться на сигнал 1, в результате чего их суммарная амплитуда может превышать амплитуду сигнала 1, что приведет к ложным результатам. Таким образом, становится очевидной задача определения оптимальной длительности импульса и оптимальных расстояний от ИП до ОК и от ПП до ОК для каждого нового изделия с целью обеспечения максимальной чувствительности контроля и получения однозначных результатов.

В общем случае для уменьшения ослабления УЗ сигналов в воздухе необходимо снижать протяженность воздушных промежутков, однако при этом нужно не допускать наложения переотраженных сигналов на сквозной сигнал. Для этого следует располагать ИП и ПП на расстоянии от ОК  $d_{\text{в}}$ , не превышающем минимально допустимое расстояние  $d_{\text{в min}}$  [16]. Однократно переотраженный сигнал 3 прежде чем «попасть» в изделие «задерживается» в воздухе (по сравнению с сигналом 1) на время  $2d_{\text{в}}/C_{\text{в}}$ , где  $C_{\text{в}}$  — скорость ультразвука в воздухе. УЗ импульс длительностью  $t_{\text{и}} = nT_0$  имеет протяженность  $d_{\text{и}} = C_{\text{в}} \cdot t_{\text{и}}$ . Очевидно, что сигнал 3 не будет накладываться на сигнал 1 при  $2d_{\text{в}} \geq d_{\text{и}}$ . Отсюда находится минимальное расстояние между ИП и ОК:  $d_{\text{в min}} = d_{\text{и}}/2 = C_{\text{в}} \cdot t_{\text{и}}/2 = n \cdot \lambda_{\text{в}}/2$ , где  $\lambda_{\text{в}}$  — длина УЗ волны.

Для того, чтобы сигналы 2—5 не накладывались на сигнал 1, необходимо определять оптимальную длительность зондирующего сигнала. На рис. 2 показаны зависимости минимального расстояния  $d_{\text{в min}}$  между преобразователем и ОК от длительности импульса (от ширины спектра сигнала) для разных частот (50, 75, 100 и 150 кГц). Из графика видно, что минимальное расстояние  $d_{\text{в min}}$  уменьшается с уменьшением длительности импульса  $t_{\text{и}}$  (с увеличением ширины спектра сигнала  $\Delta f \sim 1/t_{\text{и}}$ , которая зависит, как правило, от полосы пропускания используемых ЭАП) и с увеличением частоты сигнала. На самой низкой частоте  $f_0 = 50$  кГц при относительно узкополосном сигнале длительностью  $t_{\text{и}} = 10T_0$  минимальное расстояние  $d_{\text{в min}} = 34$  мм. Такое расстояние почти не приводит к уменьшению амплитуды сигнала из-за затухания ультразвука в воздухе на частоте 50 кГц.

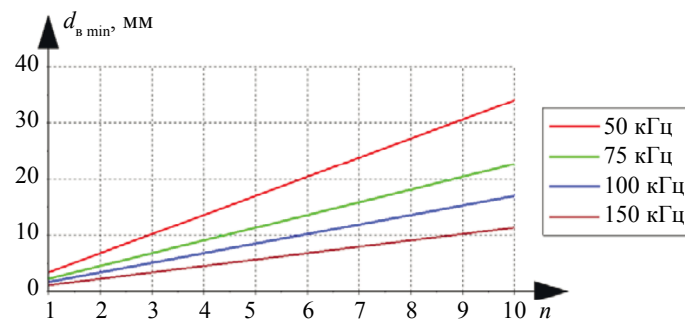


Рис. 2. Зависимость минимального расстояния  $d_{\text{в min}}$  от числа периодов сигнала  $n$  для разных частот.

При выборе протяженности воздушного промежутка необходимо также учитывать пространственные характеристики УЗ луча. Как известно, УЗ луч имеет поршневой характер распространения в пределах ближней зоны преобразователя  $r_{\text{бл}}$  и расширяется в дальней зоне. Поэтому, если ОК расположен в дальней зоне ИП (рис. 3а), то это приводит к расширению вводимого в изделий

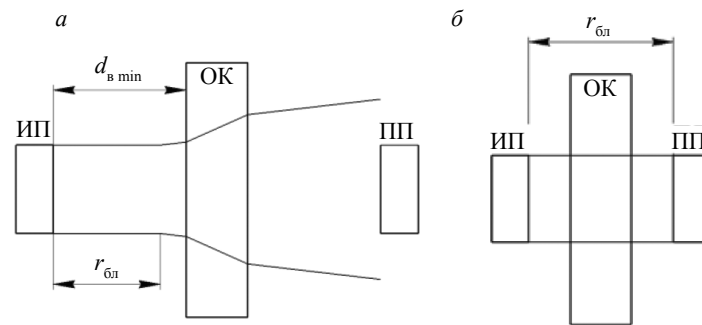


Рис. 3. Расположение ОК относительно ИП:  
а — ОК расположен в дальней зоне; б — ОК и ПП расположены в ближней зоне.

УЗ луча, что уменьшает долю энергии, попадающей на ПП по сравнению со случаем, когда объект контроля располагается в ближней зоне ИП (рис. 3б). Таким образом, для получения максимальной чувствительности желательно располагать ОК на расстоянии от ИП, не превышающем протяженности ближней зоны ИП:  $d_{в\ min} \leq r_{бл}$ .

Протяженность ближней зоны круглого преобразователя составляет  $r_{бл} = S/\pi\lambda = (a/2)^2/\lambda$ , где  $S$  — площадь,  $a$  — диаметр ЭАП [1]. Для ЭАП с апертурой  $a = 30$  мм и частотой  $f_0 = 100$  кГц протяженность ближней зоны в воздухе составляет  $r_{бл} = 66$  мм. Это означает, что для сигнала длительностью  $t_{и} = 10T_0$  условие  $d_{в\ min} \leq r_{бл}$  выполняется, т.к.  $d_{в\ min} = 17$  мм. С уменьшением апертуры ЭАП протяженность ближней зоны уменьшается. Так, для преобразователя с частотой  $f_0 = 100$  кГц ближняя зона уменьшается до  $r_{бл} = 30$  мм при уменьшении апертуры до 20 мм, однако при этом она превышает величину  $d_{в\ min} = 17$  мм для сигнала длительностью 10 периодов.

Протяженность ближней зоны  $r_{бл}$  в воздухе становится меньше  $d_{в\ min}$  при снижении частоты. При  $f_0 = 50$  кГц и апертуре  $a = 30$  мм протяженность ближней зоны составляет  $r_{бл} = 33$  мм и тем самым она становится меньше, чем расстояние  $d_{в\ min} = 34$  мм для сигнала длительностью 10 периодов. В результате при расположении ЭАП на минимально допустимом расстоянии  $d_{в\ min}$  от объекта контроля последний оказывается в дальней зоне и УЗ луч начинает расходиться до его ввода в ОК. Это приводит к снижению чувствительности и увеличению минимального размера выявляемого дефекта.

Из этого следует, что для каждого конкретного случая (для каждого изделия) следует определять оптимальные параметры схемы контроля: исходя из величины затухания УЗ сигнала в изделии следует выбирать частоту зондирующего сигнала, а по выбранной частоте использовать (разрабатывать) преобразователи с соответствующими характеристиками (средней частотой  $f_0$ , шириной полосы пропускания  $\Delta f$  и апертурой  $a$ ). Ширина полосы пропускания разработанного ЭАП будет определять ширину спектра зондирующего импульса (его минимальную длительность  $t_{и\ min}$ ), а его апертура будет в том числе определять ближнюю зону ЭАП, которая должна быть больше минимального расстояния  $d_{в\ min}$ . При этом нужно учитывать, что на выбор параметров УЗ бесконтактного контроля влияет большое число взаимозависимых факторов. Так, например, условие расположения ОК в ближней зоне ЭАП удовлетворительно выполняется при использовании сигналов со средней частотой  $f_0 \geq 100$  кГц, а при снижении рабочей частоты ниже 100 кГц (что необходимо для уменьшения затухания УЗ сигнала в ОК) для выполнения условия  $d_{в\ min} \leq r_{бл}$  нужно уменьшать длительность сигнала, которая, в свою очередь, зависит от полосы пропускания преобразователей. При этом величина ближней зоны зависит также от апертуры ЭАП.

Очевидно, что предусмотреть влияние всех этих факторов для каждого конкретного изделия достаточно сложно, поэтому одним из путей решения такой многофакторной проблемы определения оптимальных параметров схемы бесконтактного теневого контроля изделий является разработка адаптивных методов и устройств, с помощью которых возможно в процессе НК изменять параметры зондирующего сигнала ( $f_0$ ,  $t_{и}$ ), а также протяженность воздушных промежутков  $d_{в}$  с целью получения достоверных результатов контроля.

### ОСОБЕННОСТИ УЗ БЕСКОНТАКТНОГО ТЕНЕВОГО КОНТРОЛЯ НА КРАЯХ ИЗДЕЛИЙ

В том случае, когда ИП и ПП находятся вблизи края контролируемого изделия, возникает путь прохождения сигнала 5, огибающего ОК по воздуху (см. рис.1). Аналогичная задача наблюдается

при приближении преобразователей к сквозным отверстиям. В обоих случаях при контроле изделий небольшой толщины на низких частотах ( $f_0 < 150$  кГц) возникает ситуация, когда огибающий по воздуху сигнал 5 начинает накладываться на сквозной сигнал 1 (рис. 4). В результате происходит искажение результатов контроля на краях ОК, а в некоторых случаях возможна ситуация, при которой края изделия (рис. 5) достоверно не контролируются.

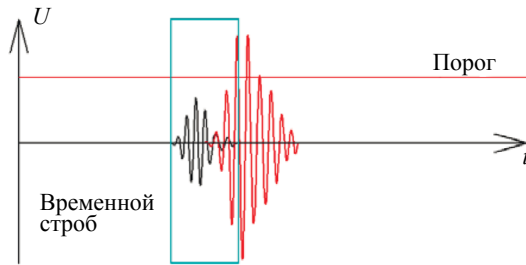


Рис. 4. Сквозной сигнал и сигнал, огибающий край ОК по воздуху.

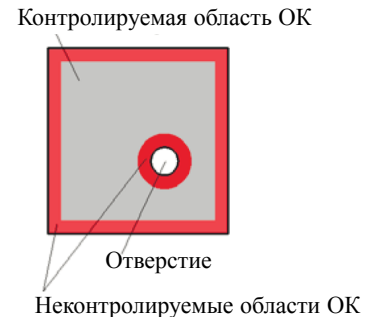


Рис. 5. Области ОК небольшой толщины, не контролируемые теньвым методом.

Для того, чтобы уменьшить ширину неконтролируемой области возможно ограничить амплитуду огибающего по воздуху сигнала с помощью порогового напряжения (см. рис. 4). Более эффективным методом является стробирование — выделение сквозного сигнала 1 и удаление сигнал 5, огибающего ОК по воздуху, с помощью строба, длительность которого равняется длительности сквозного сигнала [20]. Однако при контроле изделий небольшой толщины на низких частотах применение порога и стробирования не обеспечивает контроля всей площади краевых зон изделия. Для повышения точности результатов контроля краевых зон необходимо оптимизировать параметры контроля.

Действительно, для уменьшения неконтролируемой области необходимо или уменьшить длительность сквозного сигнала 1, или увеличить разницу времени регистрации  $t_p = t_5 - t_1$  приемным преобразователем сигналов 1 и 5, показанных на рис. 1. Для увеличения разницы времени регистрации  $t_p$  следует уменьшить расстояние  $d_2$  между преобразователями и ОК (рис. 6). При уменьшении  $d_2$  уменьшается и расстояние  $d_1$  от преобразователей до края ОК, но это уменьшение менее значительно. Поэтому при уменьшении  $d_2$  происходит увеличение отношения  $d_1/d_2$ , что как раз и приводит к увеличению разницы времени регистрации сигналов 5 и 1 на ПП.

Время, за которое сигнал 5, огибающий ОК по воздуху, приходит на ПП при одинаковом расстоянии от ИП до ОК и от ПП до ОК, составляет  $t_5 = (2 \cdot d_1 + d_3)/C_{\text{в}}$ . Сквозной сигнал 1 приходит на ПП за время  $t_1 = 2 \cdot d_2/C_{\text{в}} + d_3/C_{\text{ОК}}$ , где  $C_{\text{ОК}}$  — скорость ультразвука в материале ОК. Разница времени регистрации  $t_p = t_5 - t_1$  зависит практически от всех параметров схемы контроля  $d_1, d_2, d_3$ , а также от расстояния  $d_4$ , определяющего удаление датчиков от края изделия.

На рис. 7 приведены зависимости времени регистрации на ПП сигналов 1 и 5 от расстояния  $d_2$ . Зависимости приведены для изделия толщиной  $d_3 = 10$  мм при скорости звука в изделии  $C_{\text{ОК}} = 2600$  м/с для двух положений датчиков ИП и ПП, удаленных относительно края изделия на расстояния  $d_4$ , равные 20 и 5 мм (см. рис. 6). Из этой зависимости видно, что при относительно большом удалении ИП и ПП от края изделия ( $d_4 = 20$  мм) разница времени регистрации сигналов  $t_p = t_5 - t_1$  увеличивается при уменьшении расстояния от  $d_2 \approx 20$  мм до  $d_2 \approx 5$  мм. При уменьшении  $d_2$  менее 5 мм разрешение сигналов улучшается незначительно. При приближении ИП и ПП к краю ОК ( $d_4 = 5$  мм) различие в расстояниях  $d_1$  и  $d_2$  уменьшается и поэтому величина  $d_2$  существенного влияния не оказывает.

Из приведенных зависимостей также видно, что разрешение сигналов 1 и 5 зависит от длительности зондирующего импульса. При  $d_4 = 20$  мм и  $d_2 = 10$  мм длительность сквозного сигнала 1, при которой он разрешается с сигналом по воздуху 5, составляет  $t_{\text{и}} = 100$  мкс, что соответствует 5 периодам на частоте 50 кГц или 10 периодам на частоте 100 кГц. При приближении преобразователей к краю ОК на расстояние  $d_4 = 5$  мм сигналы 1 и 5 разрешаются во времени только при длительности сквозного сигнала меньшей 50 мкс, что соответствует 5 периодам сигнала на частоте 100 кГц и меньше 2,5 периодов на частоте 50 кГц. Из сказанного можно сделать вывод, что для надежного контроля краевых областей изделий с небольшой толщиной и с высоким затуханием УЗ

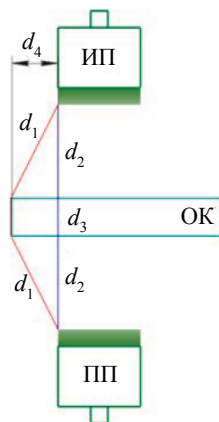
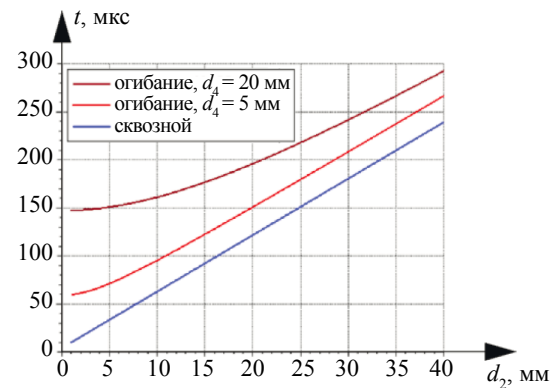


Рис. 6. Огибание УЗ сигналом краев ОК.

Рис. 7. Зависимость времени регистрации сигналов от расстояния  $d_2$  при  $d_4 = 20$  мм и  $d_4 = 5$  мм.

необходимо использовать широкополосные преобразователи, обеспечивающие излучение и прием более коротких сигналов.

Другой вывод означает, что и при оптимизации параметров УЗ бесконтактного контроля краевых зон изделий проявляется многофакторная зависимость при выборе оптимальных параметров контроля. Поэтому и в данном случае желательно осуществлять в процессе контроля адаптивное изменение параметров сигналов и регулирование протяженностей воздушных промежутков с целью повышения достоверности результатов контроля.

#### ПРОБЛЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАД КРАЕМ ОК И ЗА ЕГО ПРЕДЕЛАМИ

При бесконтактном теневом контроле изделий из ПКМ часто возникает ситуация, когда преобразователи находятся одновременно и над изделием, и частично за его краем (рис. 8).

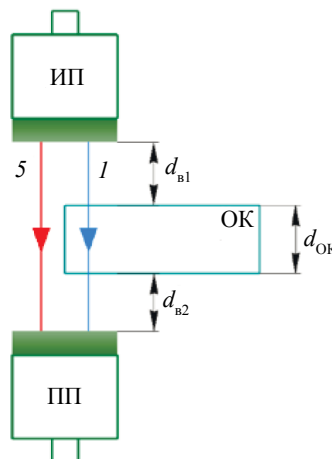


Рис. 8. Расположение преобразователей над краем ОК.

При таком расположении преобразователей на ПП поступают два прямо проходящих сигнала: сигнал 5 проходит от ИП к ПП напрямую по воздуху; сигнал 1 попадает на ПП через ОК и через воздушные промежутки между преобразователями и ОК. Из-за того, что скорость ультразвука в твердом теле  $C_{\text{тв.т.}}$  больше, чем скорость  $C_{\text{в}}$  в воздухе, сигнал 1 приходит на ПП раньше сигнала 5. Вместе с тем амплитуда сигнала 5 кратно превышает амплитуду сигнала 1, который ослабевает при отражениях на границах раздела сред воздух—твердое тело—воздух (рис. 9).

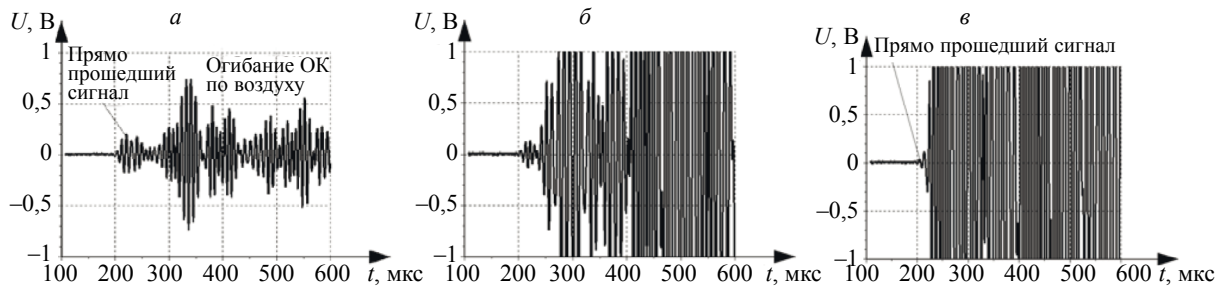


Рис. 9. Осциллограммы пришедших на ПП сигналов при различном положении ИП и ПП относительно края ОК (толщина ОК 4,5 мм):

*a* — ИП и ПП расположены на некотором расстоянии до края ОК; *б* — ИП и ПП расположены на более близком расстоянии до края ОК; *в* — ИП и ПП расположены над краем ОК.

Время поступления сигналов 1 и 5 на ПП может быть найдено по формулам:  $t_1 = (d_{b1} + d_{b2})/C_b + d_{ок}/C_{ок}$ ;  $t_5 = (d_{b1} + d_{b2})/C_b + d_{ок}/C_b$ , где  $d_{b1}$  — расстояния между ИП и ОК;  $d_{b2}$  — расстояние между ПП и ОК;  $d_{ок}$  — толщина ОК. Длительность излучаемого импульса, при которой сигналы 1 и 5 не накладываются друг на друга, определяется по формуле:  $t_{и} \leq t_5 - t_1 = d_{ок}/C_b - d_{ок}/C_{ок}$ . Из этого следует, что условием качественного обнаружения информационного сигнала 1 является необходимость сокращения длительности зондирующего импульса. Толщина ОК, при которой сигналы 1 и 5 не накладываются друг на друга, определяется по формуле:  $d_{ок} \geq t_{и} C_{ок} / (C_{ок} - C_b)$ . При длительности сигнала 1, равной 100 мкс (10 периодов при частоте  $f = 100$  кГц или 5 периодов при  $f = 50$  кГц), минимальная толщина ОК ( $C_{ок} = 2500$  м/с), при которой сигнал 5 не будет накладываться на сигнал 1, составляет 40 мм. При длительности сигнала 1, равной 50 мкс (5 периодов при  $f = 100$  кГц или 2,5 периода при  $f = 50$  кГц), минимальная толщина ОК составляет 20 мм. Из этих расчетов становится ясно, что проблема обнаружения информационного сигнала 1 на фоне проходящего через воздух сигнала 5 возрастает при снижении толщины контролируемого изделия, так как в этом случае уменьшается разница во времени поступления сигналов 1 и 5 на ПП.

Результаты экспериментов, полученные при различном положении ИП и ПП относительно края ОК толщиной 4,5 мм, приведены на рис. 9. В эксперименте использовались разработанные в МЭИ мозаичные ПЭП с апертурой 33 мм и средней частотой  $f = 100$  кГц. На рис. 9а показаны сигналы, поступившие на ПП, для ситуации, когда ИП и ПП находятся на относительно большом расстоянии от края ОК. В этом случае сквозной сигнал, прошедший через ОК, и сигнал, огибающий ОК по воздуху, разрешаются во времени. При приближении ИП и ПП к краю ОК эти сигналы перестают разрешаться во времени (рис. 9б). Если ИП и ПП расположены так, что их излучающая и приемная поверхности только частично находятся над ОК, то сквозной сигнал, прошедший через ОК, сложно выделить на фоне сигнала, идущего напрямую по воздуху от ИП к ПП (рис. 9в), и соответственно невозможно измерить его амплитуду.

Как это будет показано ниже, нам удалось решить эту проблему с помощью строба, захватывающего только несколько первых периодов сквозного сигнала, идущего через ОК (рис. 10). Однако этот способ удовлетворительно работает при автоматизированном сканировании изделий с постоянной толщиной в том случае, когда возможно обеспечить адаптивную настройку длительности зондирующего сигнала и протяженности строба.

Рассмотренная проблема УЗ бесконтактного контроля краевых зон наиболее сложно решается для относительно тонких изделий. С увеличением толщины ОК разница времени регистрации сигналов 1 и 5 (см. рис. 8) увеличивается, в результате при большей толщине ОК требование к разрешению сигналов во времени ослабляется.

Таким образом, при контроле изделий с переменной толщиной следует использовать адаптивную аппаратуру, с помощью которой возможно регулировать параметры схемы контроля с целью надежного контроля краевых зон изделий. Другой вывод означает, что для надежного контроля краевых зон следует использовать УЗ широкополосные бесконтактные преобразователи, позволяющие обеспечивать регулирование длительности зондирующих сигналов.

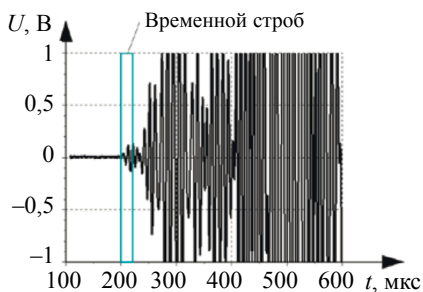


Рис. 10. Использование строба, захватывающего часть сквозного сигнала.



## СКАНИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для автоматического бесконтактного сканирования изделий из ПКМ нами была создана на базе станда TRITON 1000 фирмы TechTest (Испания) установка (рис. 11), управляемая с помощью разработанного в МЭИ адаптивного многофункционального измерительного комплекса (ИК) [21]. Адаптивный ИК формирует зондирующий сигнал, осуществляет радиотехническую обработку (в том числе стробирование) принятых сигналов, обеспечивает построение двумерных изображений контролируемого изделия (С-сканов), а также управляет шаговыми двигателями системы позиционирования ИП и ПП, позволяющими в том числе изменять в процессе контроля протяженность воздушных промежутков.

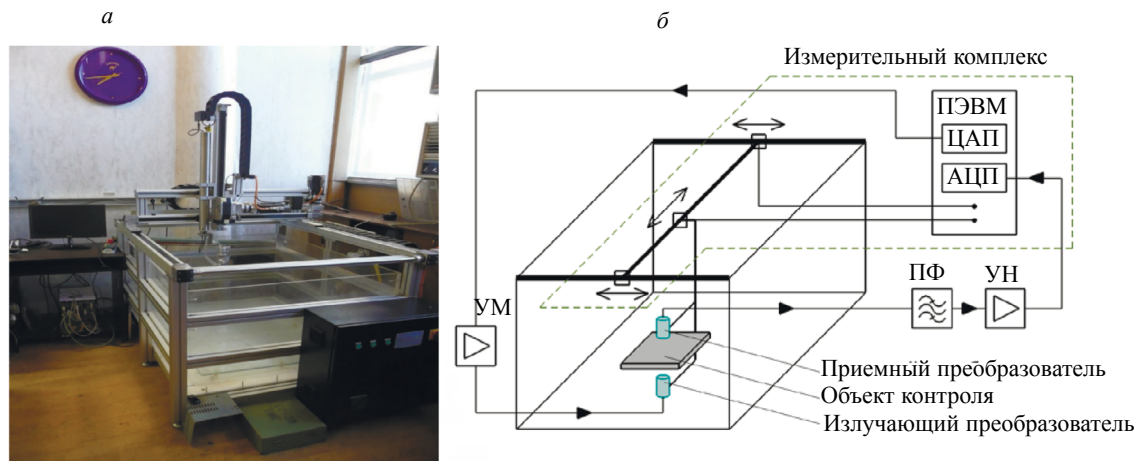


Рис. 11. Фотография (а) и схема установки (б) для УЗ бесконтактного теневого сканирования.

Сканирование изделий осуществлялось с минимальным шагом 1 мм. В качестве зондирующего сигнала использовался радиоимпульсный сигнал, у которого с помощью ИК обеспечивалась адаптивная подстройка частоты  $f_0$  и длительности импульса  $t_{\text{и}}$ .

Прошедшие через изделие сигналы подвергались накоплению с целью увеличения отношения сигнал/белый шум. Амплитуда зондирующего сигнала составляла 40 В. В эксперименте использовались разработанные в МЭИ бесконтактные широкополосные мозаичные преобразователи с апертурой  $a = 33$  мм, средней частотой  $f_0 = 100$  кГц и с относительной полосой пропускания  $\Delta f_{\text{пп}}/f_0 \approx 35\%$ . Расстояние между ИП, ПП и ОК изменялось в широких пределах от 35 до 70 мм.

С помощью сканирования осуществлялся контроль образца из ПКМ толщиной 6 мм с искусственно созданными дефектами двух видов: дефекты типа «расслоение» шириной 18—25 мм (рис. 12а) и круглые дефекты диаметром 20 мм, созданные путем изъятия нескольких слоев ПКМ на противоположной стороне ОК (рис. 12б).

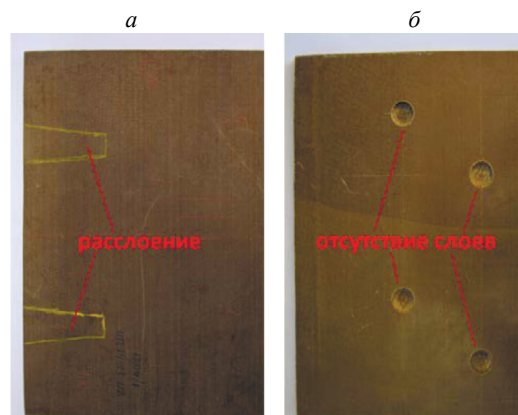


Рис. 12. Внешний вид ОК из ПКМ:  
а — передняя сторона; б — задняя сторона.



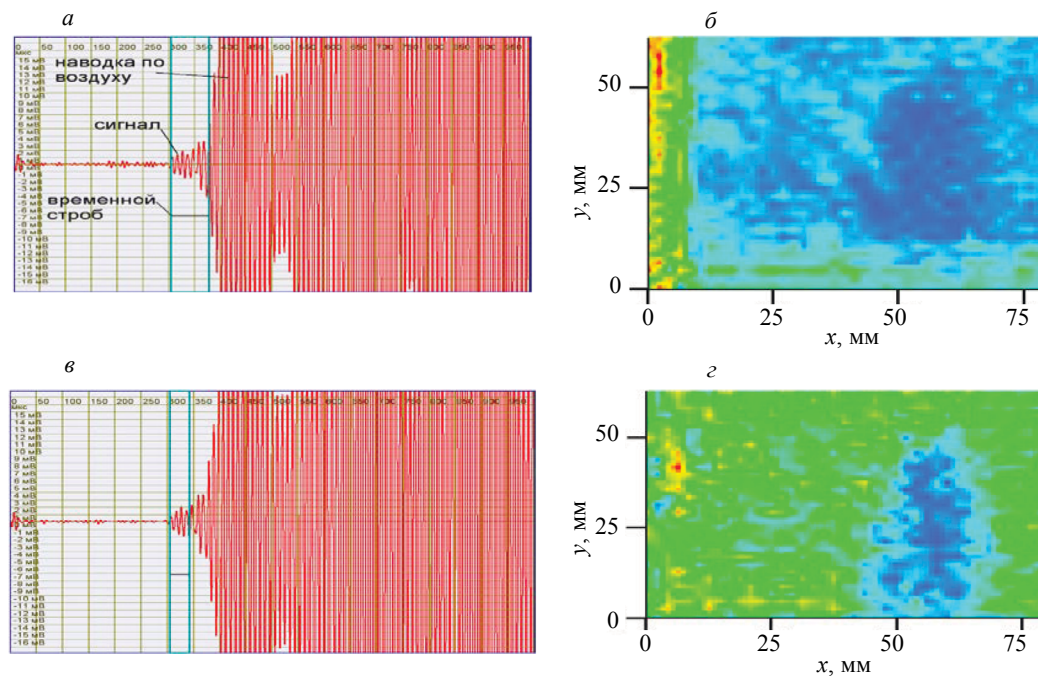


Рис. 13. Результаты временного стробирования протяженного по времени сигнала:

*а* — А-скан и длинный строб; *б* — томограмма части изделия из ПКМ при стробировании всей длительности сигнала; *в* — А-скан и короткий строб; *г* — С-скан части изделия при стробировании переднего фронта сигнала.

При сканировании использовалось стробирование принимаемого импульса. На рис. 13*а, б* показаны результаты сканирования части изделия из ПКМ с заложенным дефектом типа «расслоение» для случая, когда протяженность строба соответствовала всей длительности принимаемого сигнала. Видно, что в этом случае заложенные дефекты однозначно не определялись. На рис. 13*в, г* приведены результаты контроля этой же части изделия при стробировании только переднего фронта прошедшего через изделие сигнала. Сравнение результатов эксперимента показывает, что определенные выше оптимальные параметры контроля, использование временного стробирования принятых сигналов и осуществление адаптивной подстройки параметров контроля с помощью адаптивного ИК позволили обеспечить надежное обнаружение заложенных дефектов и четкое отображение краевых зон изделия из ПКМ.

В дополнение к временному стробированию на следующем этапе была проведена адаптация протяженности воздушных промежутков. На рис. 14*а* показан С-скан всего изделия, полученный

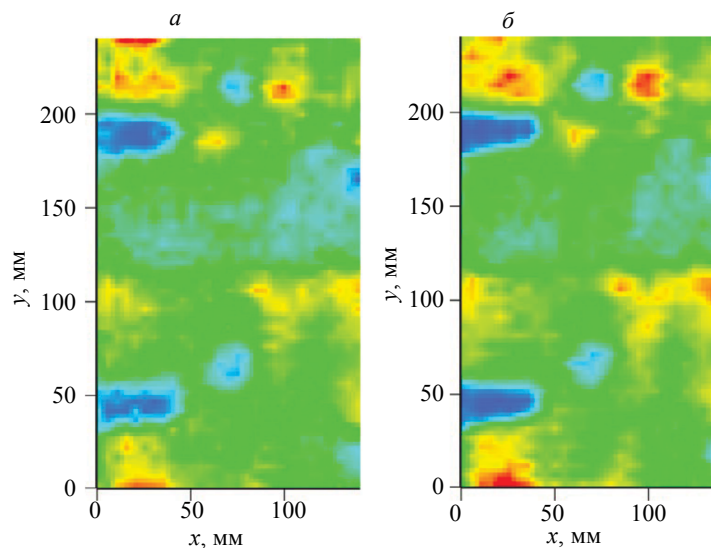


Рис. 14. С-сканы образца при расстоянии между преобразователями и ОК 70 мм (*а*) и 35 мм (*б*).

при использовании бесконтактных ЭАП, расположенных на расстоянии 70 мм от ОК. На С-скане хорошо видны два дефекта типа «расслоение» и менее отчетливо видны круглые дефекты типа «отсутствия слоев».

На рис. 14б показаны результаты сканирования со стробированием при уменьшении воздушного промежутка до 35 мм, при котором уменьшается затухание УЗ сигнала в воздушных зазорах, уменьшается расхождение луча и, как следствие, улучшается разрешающая способность (точность измерения). Как видно из сравнения С-сканов, уменьшение протяженности воздушного промежутка позволило более четко определить границы дефектов и зоны с некачественной адгезией.

Таким образом, экспериментально показано, что для улучшения качества УЗ бесконтактного контроля краевых областей ОК небольшой толщины из композитных материалов следует использовать стробирование начальной части сквозного сигнала и уменьшать расстояния между преобразователями и ОК. Для получения максимального эффекта следует производить адаптивную подстройку длительности сигнала, длительности строга и протяженности воздушного промежутка.

## ВЫВОДЫ

Как показал анализ проблем УЗ бесконтактного теневого контроля изделий из полимерных композиционных материалов, для повышения чувствительности и повышения точности измерений дефектов УЗ бесконтактного теневого контроля изделий необходимо наряду с известными методами повышения чувствительности (увеличением амплитуды зондирующего сигнала, использованием сложно-модулированных сигналов, использованием высокочувствительных электроакустических преобразователей) оптимизировать параметры бесконтактного контроля. Для этого необходимо для каждого конкретного изделия выбирать оптимальные значения используемого сигнала (частоту и длительность), оптимальные методы обработки сигналов, оптимальные расстояния от ИП до ОК и от ОК до ПП.

Показано, что для повышения качества контроля краевых зон при автоматизированном бесконтактном теневом контроле композитных изделий следует использовать стробирование начальной части сквозного сигнала. Для получения наилучшего результата при оптимизации параметров следует использовать автоматизированное измерительное устройство, обеспечивающее адаптацию параметров бесконтактного теневого контроля.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук № МК-1523.2020.8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общей ред. В.В. Ключева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Bhardwaj M.C. Non-Contact Ultrasonic Testing and Analysis of Materials. Smart Materials. Ed. Mel Schwartz. Taylor Francis Group, CRC Press, 2009.
3. Quaegebeur N., Masson P., Berry A., Ardin C., D'Anglade P.-M. Ultrasonic non-destructive testing of cardboard tubes using air-coupled transducers // NDT & E International. 2018. V. 93. P. 18—23.
4. Römmeler A., Furrer R., Sennhauser U., Lübke B., Wermelinger J., A. de Agostini, Dual J., Zolliker P., Neuenschwander J. Air coupled ultrasonic defect detection in polymer pipes // NDT & E International. 2019. V. 102. P. 244—253.
5. Banks R., O'Leary R.L., Hayward G. Enhancing the bandwidth of piezoelectric composite transducers for air-coupled non-destructive evaluation // Ultrasonics. 2017. V. 75. P. 132—144.
6. Neuenschwander J., Furrer R., Roemmeler A. Application of air-coupled ultrasonics for the characterization of polymer and polymer-matrix composite samples // Polymer Testing. 2016. V. 56. P. 379—386.
7. Chirag Anand, Hema K.S., Arumugam V. Study of commonly encountered defects in FRP composites through air-coupled ultrasonic c-scanning with different frequencies and waveforms / National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation. NDE. 2011. P. 38—44.
8. Hutchins D., Burrascano P., Davis L., Laureti S., Ricci M. Coded waveforms for optimized air-coupled ultrasonic nondestructive evaluation // Ultrasonics. 2014. V. 54. No. 7. P. 1745—1759.
9. Zhou Z., Zhang H., Wei D. Application of Pulse Compression Technique in Air-Coupled Ultrasonic Non-Destructive Testing on Composite Material / 10th European Conference on Non-Destructive Testing. 2010. P. 3228—3233.
10. Bhardwaj M. C. Ultrasonic transducer for high transduction in gases and method for non-contact ultrasound transmission into solid materials. Patent No EP1005628B1. 2008.

11. *Kazys R., Vladisauskas A., Zukauskas E.* Wideband air — coupled ultrasonic transducers // *Ultragarsas. Kaunas: Technologija.* 2004. V. 52. No. 3. P. 21—28.
12. *Kazys R., Sliteris R., SeStoke J., Vladisauskas A.* Air — coupled Ultrasonic Transducers based on an Application of the PMN32%PT Single Crystals // *Ferroelectrics.* 2015. V. 480. Is. 1. P. 85—91.
13. *Gomez Alvarez-Arenas T.E.* Air-Coupled Piezoelectric Transducers with Active Polypropylene Foam Matching Layers // *Sensors.* 2013. V. 13. Is. 5. P. 5996—6013.
14. *Горбатов А.А., Рудашевский Г.Е.* Акустические методы измерения расстояний и управления. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.
15. *Junho Song, Chimenti D.E.* Design, fabrication and characterization of a spherically focused capacitive air-coupled ultrasonic transducer // *International Journal of Applied Science and Engineering.* 2006. V. 4. No. 1. P. 1—19.
16. *Волосский В.П.* Бесконтактная ультразвуковая эхо-локация твердотельных сред // Труды Московского энергетического института. 1983. Вып. 607. С. 84—88.
17. *Качанов В. К., Соколов И. В., Караваев М. А.* Разработка ультразвукового мозаичного широкополосного пьезоэлектрического преобразователя для бесконтактного контроля изделий из полимерных композиционных материалов // *Измерительная техника.* 2015. № 2. С. 61—64.
18. *Караваев М.А., Соколов И.В.* Ультразвуковые бесконтактные низкочастотные широкополосные пьезопреобразователи с поперечным пьезоэффектом / Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Двадцать шестая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Тез. докл. М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2020. 1156 с.
19. *Bhardwaj M.C.* Evolution of Piezoelectric Transducers to full Scale Non-Contact Ultrasonic Analysis Mode / 16th World Conference on Nondestructive Testing, 2004.
20. Non-Contact Ultrasonic Inspection for Continuous Feedback in Manufacturing // JEC Europe Paris, 2013. <http://ultrangroup.com/wp-content/uploads/Non-Contact-Ultrasonic-Inspection-for-Continuous-Feedback-in-Manufacturing-JEC-Europe-2013.pdf>
21. *Качанов В.К., Соколов И.В., Концов Р.В., Сеницын А.А., Федоров М.Б.* Адаптивная аппаратура ультразвукового неразрушающего контроля крупногабаритных сложно-структурных объектов // *Дефектоскопия.* 2016. № 5. С. 3—13.