

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО БЕСКОНТАКТНОГО ТЕНЕВОГО КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2023 г. В.К. Качанов^{1,*}, И.В. Соколов¹, М.А. Караваев¹, Д.В. Минаев²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 14

²ФГУП «ФЦДТ «Союз», Россия 140090 Московская область, г. Дзержинский,
ул. Академика Жукова, 42
E-mail: *kachanovvk@mail.ru

Поступила в редакцию 12.08.2022; после доработки 22.10.2022

Принята к публикации 28.10.2022

Показано, что для повышения чувствительности ультразвукового (УЗ) бесконтактного теневого контроля изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) необходимо разрабатывать высокочувствительные низкочастотные широкополосные бесконтактные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Рассмотрены способы обеспечения одновременно высокой чувствительности и широкой полосы УЗ бесконтактных ПЭП. Предложены и разработаны УЗ бесконтактные высокочувствительные широкополосные ПЭП, основанные на использовании технологии мозаичных контактных ПЭП, выборе оптимальных согласующих слоев и использования различных вариантов возбуждения излучающих ПЭП. Показано, что с помощью мозаичных низкочастотных широкополосных бесконтактных ПЭП возможно обеспечить высокую чувствительность контроля и обеспечить точность измерения акустических характеристик (скорости ультразвука, плотности и пр.) при УЗ низкочастотном теневом бесконтактном контроле крупногабаритных изделий из ПКМ.

Ключевые слова: ультразвуковые низкочастотные широкополосные мозаичные преобразователи, бесконтактный контроль изделий из полимерных материалов.

DOI: 10.31857/S0130308223010013, EDN: BVDIYJ

ВВЕДЕНИЕ

Среди проблем, возникающих при ультразвуковом бесконтактном неразрушающем контроле изделий из полимерных композиционных материалов, основной проблемой является низкая чувствительность контроля, обусловленная высоким частотно-зависимым затуханием ультразвука в полимере, а также ослаблением сигнала как в самих воздушных промежутках, так и при прохождении границы раздела разнородных сред «ПЭП — воздух» и «воздух — изделие» [1]. Особенно сильно эта проблема проявляется при контроле изделий, толщина которых превышает 4-5 см. Поэтому для увеличения чувствительности контроля таких крупногабаритных изделий из ПКМ снижают частоту зондирующего сигнала до $f_0 = 50\text{—}100$ кГц, увеличивают амплитуду зондирующего сигнала до нескольких сотен вольт, используют сложно-модулированные сигналы с последующей фильтрацией принятых сигналов в оптимальном для них фильтре [2—4], а также применяют теневой метод контроля, при котором интегральное ослабление УЗ сигнала существенно меньше, чем при УЗ эхо-импульсном методе. Однако при УЗ бесконтактном теневом контроле возникают дополнительные проблемы, в том числе появляется проблема точного определения времени прохождения сигнала через изделие, по которому возможно определить скорость ультразвука в материале при известной толщине изделия. Проблема определения времени прохождения сигнала возникает из-за того, что в воздушных промежутках происходят многочисленные переотражения УЗ сигнала, маскирующие сквозной информационный сигнал [5]. Для решения этой проблемы следует использовать короткие (широкополосные) зондирующие сигналы. Это означает, что разрабатываемые для УЗ бесконтактного теневого контроля преобразователи должны иметь одновременно как большой коэффициент электроакустического преобразования (ЭАП), так и широкую полосу пропускания.

Разработка таких высокоэффективных и одновременно широкополосных УЗ бесконтактных преобразователей представляет собой достаточно сложную проблему, поэтому за рубежом ее решением занимаются многие исследователи, предлагающие разнообразные способы создания таких ПЭП [6—14]. В данной статье предлагается решение этой проблемы для низкочастотных (НЧ) бесконтактных преобразователей, основанное на использовании составных мозаичных датчиков [15], а также за счет использования преобразователей с различными способами возбуждения УЗ сигнала.

ТРЕБОВАНИЕ К ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫМ ШИРОКОПОЛОСНЫМ БЕСКОНТАКТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ

При создании УЗ бесконтактных ПЭП возникают проблемы, нехарактерные для контактных датчиков, так как при контроле через воздушный промежуток УЗ сигнал сильно ослабевает из-за большой разницы в значениях акустических сопротивлений воздуха ($Z_{\text{возд}} = 420 \text{ кг/м}^2\text{с}$), пьезокерамики (для PZT-5 $Z_{\text{ПЭП}} = 34 \times 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$) и контролируемого изделия (например, для изделий из оргстекла $Z_{\text{орг}} = 3,1 \times 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$). При таких соотношениях импедансов из излучающего преобразователя (ИП) в воздух поступает лишь 0,01 % энергии, так как коэффициент прохождения ультразвука $T_{\text{ПЭП—возд}}$ через границу сред «ПЭП — воздух» составляет:

$$T_{\text{ПЭП—возд}} = \frac{4Z_{\text{возд}}Z_{\text{ПЭП}}}{(Z_{\text{ПЭП}} + Z_{\text{возд}})^2} \approx \frac{4Z_{\text{возд}}}{Z_{\text{ПЭП}}} = 4,9 \times 10^{-5}. \quad (1)$$

Аналогичное ослабление УЗ сигнала происходит и в приемной части при прохождении ультразвука из изделия в воздух и из воздуха в приемный преобразователь (ПП).

Из (1) очевидно, что для увеличения коэффициента прохождения ультразвука $T_{\text{ПЭП—возд}}$ следует снижать акустическое сопротивление $Z_{\text{ПЭП}}$. С этой целью при изготовлении бесконтактных ПЭП используют пьезокерамику с низким акустическим сопротивлением (например, PMN-PT керамику [10, 11]). Другой путь — использование ПЭП с изгибными колебаниями [1]. Такие ПЭП имеют низкое акустическое сопротивление, что обеспечивает хорошее согласование ПЭП с воздушной средой. Однако ПЭП с изгибными колебаниями являются узкополосными и не годятся для контроля изделий с помощью широкополосных сигналов.

Еще один способ повышения коэффициента прохождения ультразвука $T_{\text{ПЭП—возд}}$ заключается в использовании так называемых композитных (матричных или составных) преобразователей (рис. 1), изначально обладающих малым импедансом $Z_{\text{ПЭП}}$ [16]. Композитные ПЭП состоят из набора N одинаковых пьезоэлементов (ПЭ) с высотой h_1 и сечением $h_2 \times h_3$, которые в совокупности формируют составной датчик с площадью $H_2 \times H_3$ (рис. 1а). Такие составные ПЭП называ-

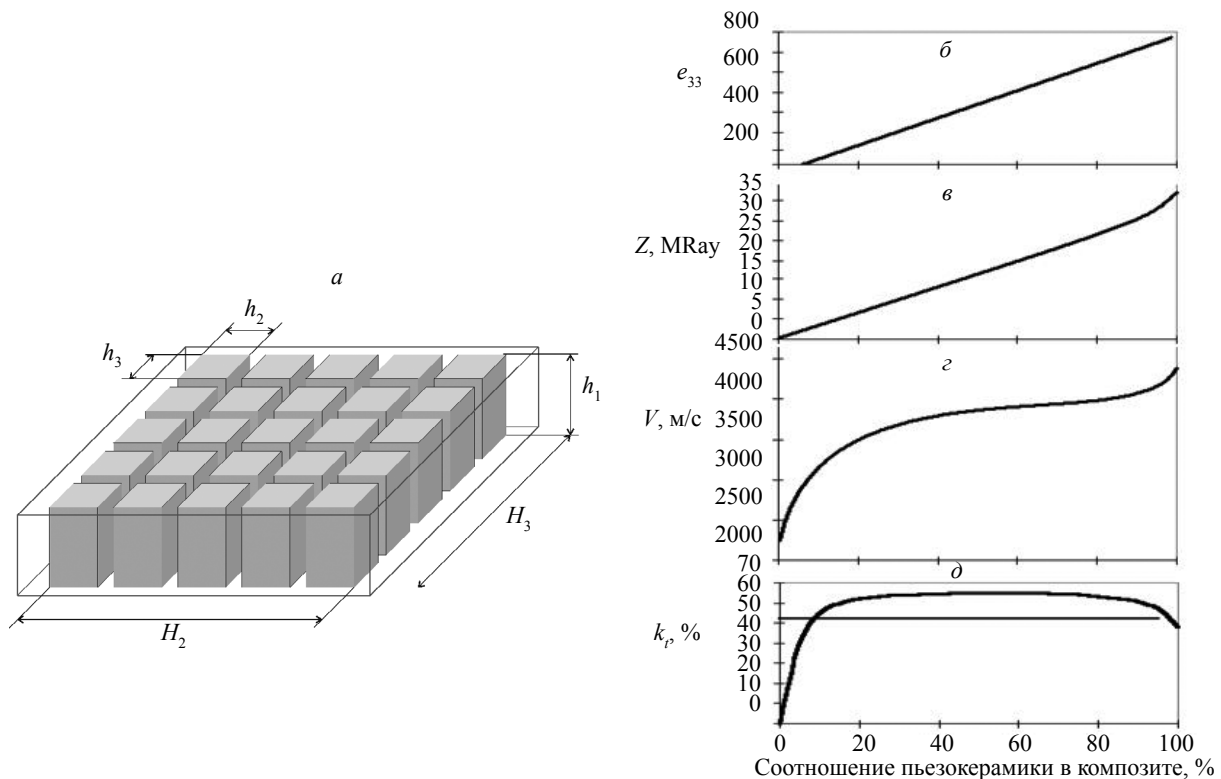


Рис. 1. Композитный ПЭП: общий вид ПЭП (а); акустические характеристики ПЭП в зависимости от процентного содержания пьезокерамики в композитном ПЭП (б, в, г, д).

ют матричными потому, что пространство между ПЭ заполняется связующим полимером (матрицей), роль которой чаще всего играет эпоксидная смола. Композитными их называют по аналогии с конструкционными композиционными материалами, представляющими композицию двух или более ярко выраженных составляющих. При этом каждая часть композиции сохраняет свои индивидуальные качества и привносит их в результирующий композитный материал.

В композитных ПЭП при уменьшении процентного соотношения пьезокерамики и эпоксидной смолы изменяются акустические характеристики: уменьшается диэлектрическая постоянная ϵ_{33} (рис. 1б); уменьшается акустическое сопротивление Z (рис. 1в); уменьшается скорость акустических колебаний (рис. 1з); увеличивается коэффициент электроакустического преобразования k_t (рис. 1д). В результате в композитных ПЭП на 30—40 % увеличивается полоса пропускания без потери в чувствительности датчика, а акустическое сопротивление значительно лучше соответствует акустическому сопротивлению воздуха по сравнению с традиционными преобразователями, в которых используются монолитные ПЭ. Именно по этой причине в основе современных бесконтактных датчиков используют композитные ПЭП [4].

Однако существенно увеличить коэффициент прохождения ультразвука $T_{\text{ПЭП—возд}}$ только за счет снижения акустического сопротивления преобразователя $Z_{\text{ПЭП}}$ не удастся. Поэтому для согласования высокого сопротивления пьезокерамики $Z_{\text{ПЭП}}$ и низкого сопротивления воздуха $Z_{\text{в}}$ используют согласующие слои, располагающиеся между ПЭП и воздушной средой и позволяющие снизить знаменатель в формуле (1). Значение акустического сопротивления слоя $Z_{\text{согл.сл}}$ находится между значениями сопротивлений двух согласуемых сред, а коэффициент пропускания согласующего слоя $T_{\text{ПЭП—возд}}$ зависит как от импедансов $Z_{\text{ПЭП}}$, $Z_{\text{согл.сл}}$, $Z_{\text{возд}}$, так и от длины волны УЗ волны в материале слоя $\lambda_{\text{сл}}$ и толщины согласующего слоя $d_{\text{сл}}$. Величина $T_{\text{ПЭП—возд}}$ достигает своего максимума при толщине слоя в четверть длины УЗ волны ($d_{\text{сл}} = \lambda_{\text{сл}}/4$), распространяющейся в материале слоя, поэтому использование четвертьволнового слоя для увеличения чувствительности эффективно только для узкополосных бесконтактных ПЭП.

В [13, 14] увеличивают количество согласующих слоев таким образом, чтобы обеспечить плавный переход от высокого значения импеданса пьезокерамики к низкому значению импеданса воздуха. При этом толщина суммарного согласующего слоя соответствует четверти длины усредненной УЗ волны в суммарном слое. В этом случае можно увеличить относительную полосу пропускания до $\Delta f_{\text{ПЭП}}/f_0 \approx 50\%$, однако реализовать такой способ удастся только в ПЭП, работающих в области высоких частот.

Нами предложен вариант использования нескольких согласующих слоев в НЧ бесконтактных ПЭП, заключающийся в том, что толщина каждого слоя выбирается не из условия неискаженного

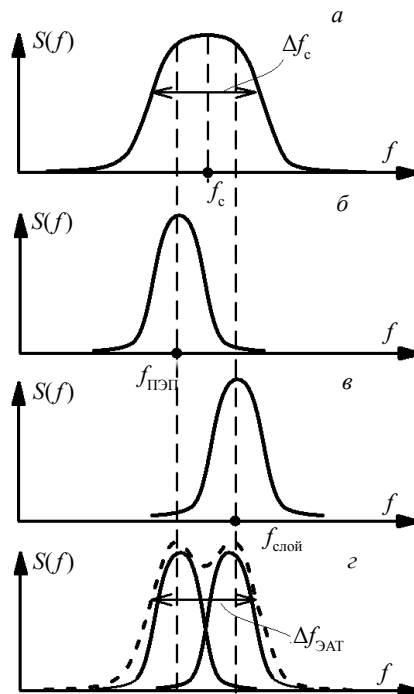


Рис. 2. Увеличение полосы пропускания $\Delta f_{\text{ПЭП—слой}}$ за счет выбора оптимальной толщины слоя.

прохождения сигнала через слой, а из желания расширить полосу пропускания для неискажающего преобразования УЗ широкополосного сигнала с полосой Δf_c . Идея такого расширения полосы пропускания ПЭП до величины $\Delta f_{\text{ПЭП}} = \Delta f_c \sim 1/T_c$ поясняется на рис. 2, где толщина согласующего слоя $d_{\text{слой}}$ выбирается так, чтобы резонансная частота ПЭ $f_{\text{ПЭП}}$ (рис. 2б) и собственная резонансная частота слоя $f_{\text{слой}} \sim 1/d_{\text{слой}}$ (рис. 2в) обеспечивали совместно расширение полосы датчика до значения $\Delta f_{\text{ПЭП}} = \Delta f_{\text{ЭАП}} \sim \Delta f_c$ (рис. 2г).

БЕСКОНТАКТНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ ПЭП С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЭ

Однако с помощью описанных выше приемов, используемых в современных УЗ бесконтактных ПЭП, не всегда удастся решить проблемы УЗ бесконтактного НЧ контроля крупногабаритных изделий из ПКМ. Поэтому мы использовали для расширения полосы пропускания бесконтактных ПЭП разработанную в МЭИ технологию мозаичных преобразователей, а с целью увеличения чувствительности бесконтактного контроля применяем бесконтактные излучающие преобразователи с разными способами возбуждения УЗ сигнала. В частности, мы предлагаем использовать в качестве излучающего преобразователя ПЭП с повышенной эффективностью ЭАП, основанный на использовании поперечного возбуждения пьезоэлемента.

На рис. 3 показаны два ПЭ, у которых УЗ колебания в направлении оси Z возбуждаются различным образом. На рис. 3а возбуждающее напряжение приложено к верхней и нижней грани ПЭ так, чтобы вектор напряженности электрического поля E , вектор поляризации пьезокерамики и вектор деформации ПЭ на основной моде колебаний были коллинеарны. При таком варианте возбуждения ПЭ возникает продольная акустическая волна с резонансной частотой f_p , обратно пропорциональной «резонансному» размеру $h_p = h_{\text{в1}}$. Величина напряженности электрического поля E также обратно пропорциональна размеру: $E \sim 1/h_{\text{в1}}$.

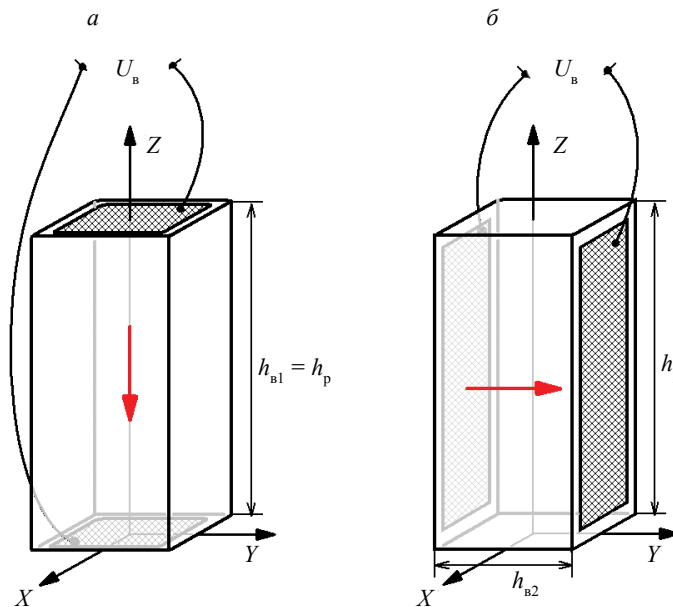


Рис. 3. ПЭ с продольным (а) и поперечным (б) возбуждениями резонансных колебаний.

Другой способ возбуждения колебаний ПЭ в направлении оси Z предполагает, что коллинеарные вектор напряженности электрического поля и вектор поляризации пьезокерамики (рис. 3б) ортогональны вектору деформации ПЭ (направлению излучения УЗ колебания). При таком варианте возбуждения возникает поперечное колебание, при котором резонансная частота f_p также обратно пропорциональна резонансному размеру h_p , а величина напряженности электрического поля E обратно пропорциональна размеру $h_{\text{в2}}$, который меньше величины h_p . Таким образом, при одинаковой амплитуде электрического напряжения напряженность электрического поля E , опреде-

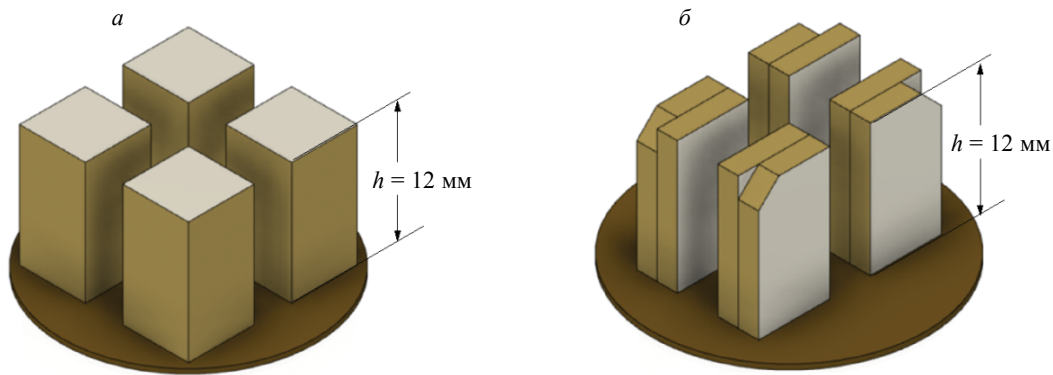


Рис. 4. Составные ПЭП одинаковой высоты $h = 12$ мм: с продольным (а) и с поперечным (б) возбуждениями ПЭ.

ляющая амплитуду акустического сигнала, оказывается значительно больше для ПЭ с поперечным возбуждением УЗ сигнала.

Для сравнения эффективности продольного и поперечного возбуждений излучающего ПЭ были изготовлены из керамики ЦТС-19 две пары составных датчиков (рис. 4). Одна пара (рис. 4а) представляет собой четыре продольно возбуждаемых ПЭ одинакового размера $7 \times 7 \times 12$ мм. Во второй паре (рис. 4б) используются не стержневые продольно возбуждаемые ПЭ, а установленные на ребро пьезопластины с поперечным возбуждением сигнала.

При этом для того, чтобы поперечный размер пластины был сопоставим с размером стержневого ПЭ, используются биморфные пластины (представляющие собой соединение из двух одинаковых ПЭ толщиной 2 мм) с одинаковой высотой 12 мм и с поперечным размером 4×7 мм. В обоих датчиках все четыре составных элемента закреплены на общем основании, а пространство между ними заполнено воздухом.

Эксперимент по сравнению эффективности датчиков проводился для трех комбинаций включения датчиков с помощью схемы, в которой контактные ИП и ПП располагались на противоположных гранях ОК из оргстекла (рис. 5).

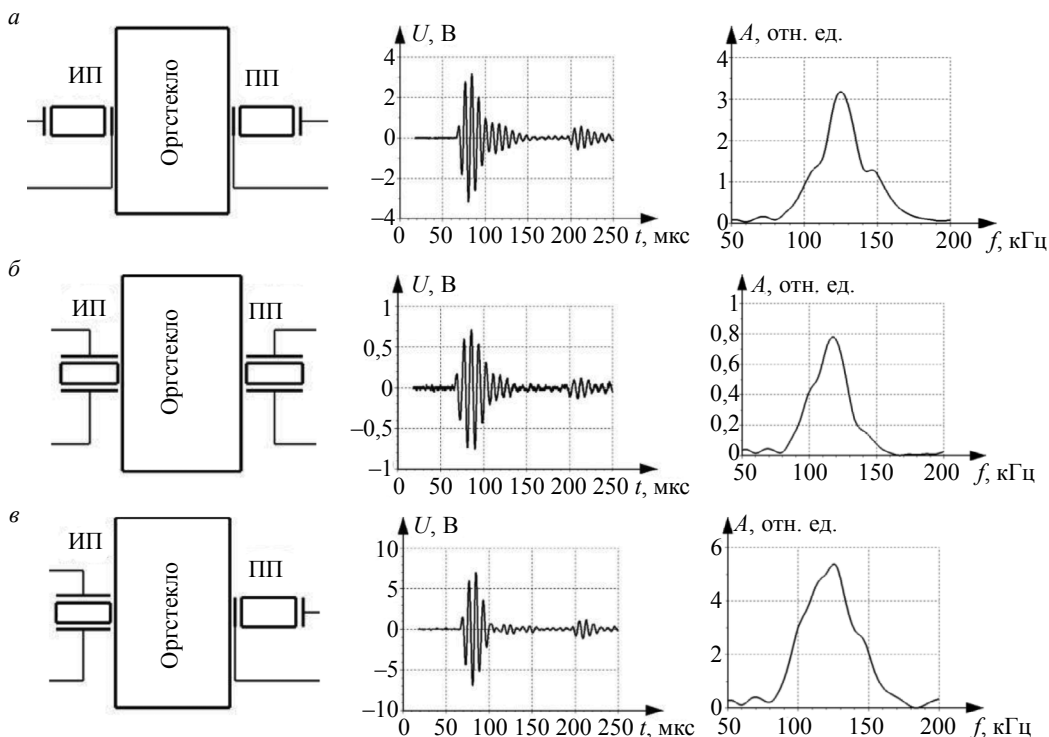


Рис. 5. Импульсные и частотные характеристики для трех схем: ИП и ПП с продольным пьезоэффектом (а); ИП и ПП с поперечным пьезоэффектом (б); ИП с поперечным пьезоэффектом, ПП с продольным пьезоэффектом (в).

Результаты измерения коэффициентов электроакустического преобразования всего электроакустического тракта (ЭАТ) показывают, что для схемы, в которой для излучения и для приема использовались ПЭП с поперечным возбуждением (см. рис. 5б), коэффициент ЭАП в несколько раз меньше, чем для схемы, в которой для излучения и для приема использовались составные ПЭП с продольным возбуждением (см. рис. 5а). Наилучший же результат достигается в схеме, в которой на излучении используется составной ПЭП с поперечным возбуждением, а на приеме используется составной ПЭП с продольным возбуждением (см. рис. 5в).

Рассмотренный выше способ увеличения коэффициента ЭАП при УЗ теновом иммерсионном контроле наблюдается и при УЗ бесконтактном контроле. В случае бесконтактного контроля к ИП на основе ПЭ с поперечным возбуждением и к ПП на основе ПЭ с продольным возбуждением были приклеены по два согласующих слоя, резонансные частоты которых позволили расширить полосу пропускания ЭАТ. При этом ширина полосы пропускания ПЭП определялась как шириной полосы пропускания согласующих слоев, так и полосой пропускания собственно композитного преобразователя, состоящего из ПЭ одинаковой высоты (см. рис. 4).

УЗ БЕСКОНТАКТНЫЕ МОЗАИЧНЫЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ПЭП

Для дальнейшего увеличения полосы пропускания НЧ бесконтактных ПЭП мы использовали составные мозаичные преобразователи, в которых используются разновысокие пьезоэлементы. Высокочувствительные и одновременно широкополосные мозаичные преобразователи были разработаны в МЭИ в 1970-е годы для УЗ НЧ контактного контроля изделий из ПКМ [15]. Такие ПЭП были названы мозаичными потому, что с их помощью можно синтезировать датчики для различных задач УЗ НК любой конфигурации подобно тому, как с помощью мозаичной смальты художник формирует желаемое мозаичное изображение. В отличие от композитного ПЭП, у которого расширение полосы происходит за счет выбора оптимального сочетания материалов пьезокерамики и полимерной матрицы, в мозаичных ПЭП расширение полосы пропускания происходит за счет набора парциальных АЧХ высокочувствительных недемпфированных разновысоких ПЭ с частотами $f_1, f_2, f_3 \dots$.

Использование технологии мозаики при изготовлении бесконтактных ПЭП позволяет существенно расширить полосу пропускания датчика без снижения его чувствительности. Однако полностью использовать все возможности мозаики для расширения полосы пропускания не удастся из-за того, что бесконтактные ПЭП представляют собой сочетание собственно ПЭП и набора согласующих слоев, полоса пропускания которых ограничена. Вместе с тем, в [10] была разработана технология изготовления составных ПЭП, при которой на каждый ПЭ наклеивается четвертьволновой согласующий слой. С использованием этой технологии нами был изготовлен УЗ широкополосный бесконтактный мозаичный ПЭП, в котором на каждый элемент мозаики был наклеен свой собственный четвертьволновой слой из твердого пенопласта, толщина которого рассчитывалась для каждого ПЭ индивидуально. Относительная полоса пропускания такого бесконтактного мозаичного ПЭП с рабочей частотой $f_0 \sim 100$ кГц, состоящего из шести частотных групп (шести различных по высоте ПЭ с соответствующими толщинами согласующих слоев), достигала $\Delta f_{\text{ПЭП}}/f_0 \approx 40$ %. Однако изготовление таких многоэлементных мозаичных бесконтактных ПЭП достаточно трудоемко, поэтому оказалось, что более целесообразно изготавливать мозаичные ПЭП с ограниченным числом разновысоких ПЭ. При этом использовать единые (цельные) согласующие слои, охватывающие рабочие поверхности всех ПЭ, благодаря чему увеличивается площадь суммарного слоя.

Еще одно достоинство мозаичных ПЭП заключается в возможности синтезировать среднюю частоту $f_{\text{ср}}$ и оптимальную полосу пропускания преобразователя, что иллюстрируется на примере трех бесконтактных ПЭП с апертурой 30 мм, состоящих из двух частотных групп разновысоких ПЭ (рис. 6). Все три ПЭП состоят из девяти стержневых ПЭ с квадратным сечением 6×6 мм. Для согласования ПЭ с воздушной средой используются два слоя. Первый выполнен из эпоксидной смолы с микросферами, а второй слой — из пенопласта ПС-1-100. Широкая полоса датчиков обеспечивается за счет использования ПЭ двух разных высот, имеющих разные резонансные частоты, а также за счет согласующих слоев, резонансные частоты которых отличны от резонансных частот ПЭ. На рис. 6а, в, д показаны топологии расположения девяти ПЭ, состоящих из ПЭ высотой 14 и 11 мм (а), 13 и 12 мм (в) и 12 и 11 мм (д). Соответствующие АЧХ датчиков показаны на рис. 6б, г, е. Средняя частота датчика, состоящего из ПЭ высотой 14 и 11 мм, равна $f_{\text{ср}} = 105$ кГц. Полоса пропускания $\Delta f \approx 25$ кГц; $K_{\text{УУ}} = -54$ дБ. Средняя частота датчика, состоящего из ПЭ высотой 13 и 12 мм, равна $f_{\text{ср}} = 115$ кГц; $\Delta f \approx 35$ кГц; $K_{\text{УУ}} = -40$ дБ. Средняя частота датчика, состоящего из ПЭ высотой 11 и 12 мм, равна $f_{\text{ср}} = 120$ кГц; $\Delta f \approx 35$ кГц; $K_{\text{УУ}} = -52$ дБ.

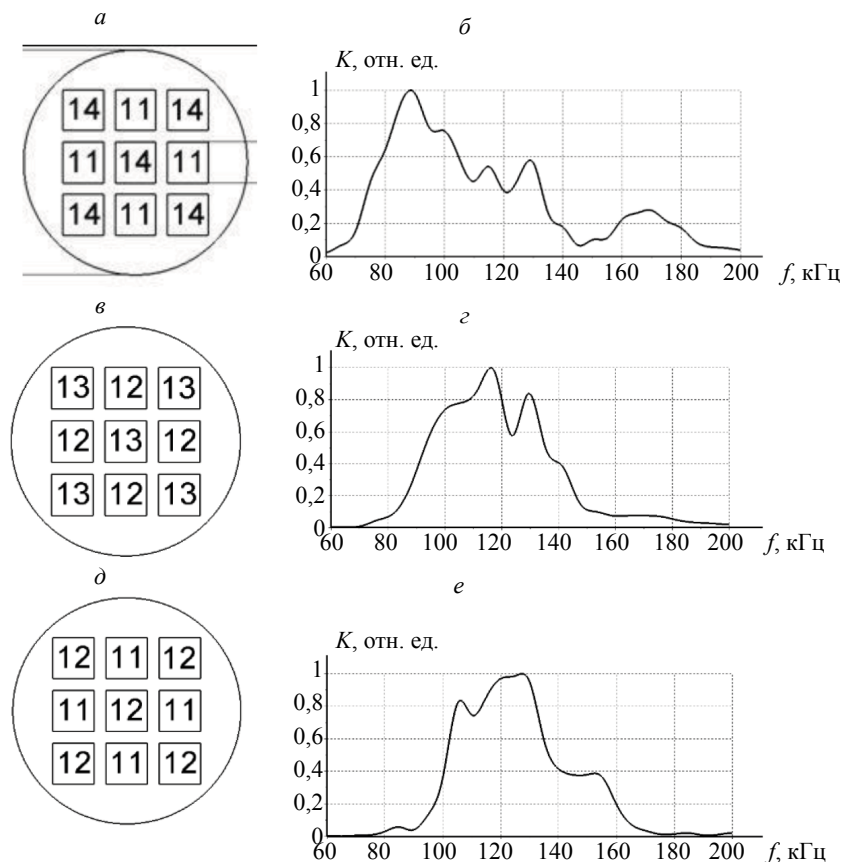


Рис. 6. Топология (а, в, д) и АЧХ (б, г, е) бесконтактных ПЭП, состоящих из 9 ПЭ с различными высотами ПЭ: 11 и 14 мм; 12 и 13 мм; 11 и 12 мм.

Из рис. 6 видно, что с помощью технологии мозаики возможно синтезировать оптимальную АЧХ и удастся подбирать среднюю частоту (в данном примере средняя частота находится в диапазоне от 105 до 120 кГц).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО КОНТРОЛЮ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ С ПОМОЩЬЮ УЗ БЕСКОНТАКТНЫХ МОЗАИЧНЫХ ПЭП

Разработанные УЗ НЧ мозаичные бесконтактные широкополосные ПЭП использовались в экспериментах по УЗ теневого бесконтактному контролю изделий, выполненных из полимерного материала со следующими характеристиками: скорость звука $C \approx 1380$ м/с; плотность $\rho \approx 1300$ кг/м³; акустическое сопротивление $Z \approx 1,8 \cdot 10^6$ кг/(м²с). Такие изделия в производственных условиях контролируются с помощью непрерывного (узкополосного) гармонического сигнала с частотой $f_0 \approx 80$ кГц, при использовании которого наличие дефекта устанавливается по изменению амплитуды прошедшего через изделие сигнала, а возможное изменение акустических характеристик (скорости ультразвука, плотности материала и др.) при этом не определяется. В наших экспериментах выявлялась возможность измерения акустических характеристик полимера по скорости звука в ПКМ, которая определялась по времени прихода на приемный преобразователь прошедшего через изделие короткого зондирующего импульса в тестовом изделии с заранее известной толщиной.

С этой целью было изготовлено тестовое изделие из ПКМ размером 500×250×40 мм, в котором был заложен искусственный дефект — на поверхности ОК было сделано углубление на 1 мм в виде прямоугольника с габаритами 50×100 мм. В процессе контроля определялась возможность выявления разницы во времени прихода прошедшего через тестовое изделие УЗ сигнала в дефектном месте (в котором толщина составляла 39 мм) и в бездефектном месте (где толщина составляла 40 мм).

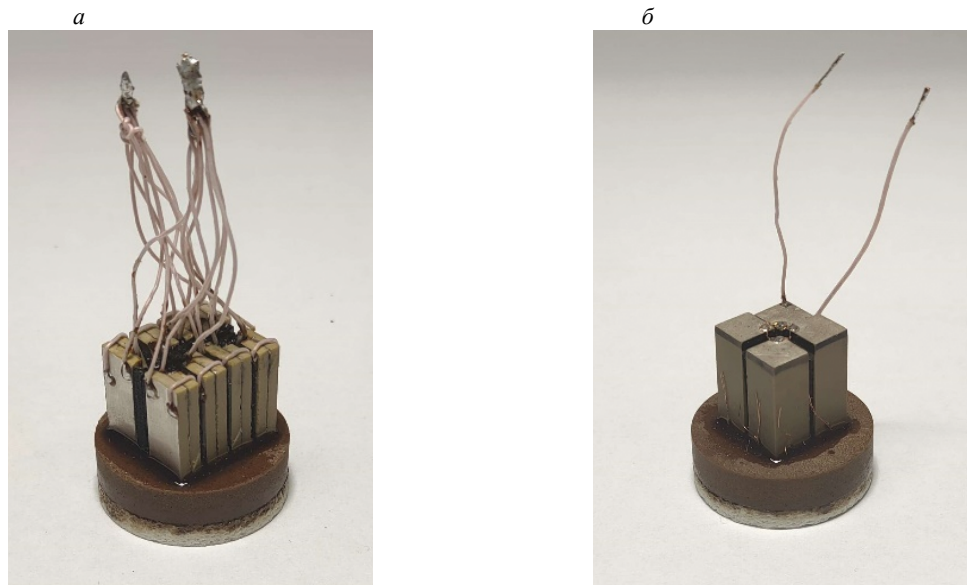


Рис. 7. Бесконтактные мозаичные НЧ ПЭП без корпуса с едиными согласующими слоями:
a — ИП; *б* — ПП.

Для того, чтобы бесконтактным теневым способом определить столь малую разницу во времени прихода сигнала при такой низкой частоте, следует использовать короткие сигналы. С этой целью были изготовлены УЗ низкочастотные бесконтактные мозаичные ПЭП с поперечным возбуждением и с продольным возбуждением УЗ сигнала (рис. 7) с одинаковыми частотными характеристиками ($f_0 \approx 80$ кГц, $\Delta f_{\text{ПЭП}}/f_0 \approx 25\%$), позволяющие осуществлять неискажающее преобразование сигнала длительностью 3 периода несущей частоты ($T_c = 3T_0$). Апертура обоих датчиков составляла 30 мм. Бесконтактный ПЭП с поперечным возбуждением (рис. 7*а*) использовался в экспериментах в качестве излучающего преобразователя, а ПЭП с продольным возбуждением (рис. 7*б*) применялся и как приемный, и как излучающий преобразователь.

В обоих датчиках использовались две группы разновысоких ПЭ из керамики ЦТС-19. В ПЭП с продольным возбуждением применяли 4 пьезостолбика квадратного сечения 7×7 мм — два ПЭ высотой 17 мм и два ПЭ высотой 18 мм. Резонансная частота, соответствующая размеру 7 мм, находится выше 150 кГц и поэтому не оказывает влияния на частотную характеристику ПЭП, формируемую совокупностью резонансных частот, обусловленных размерами 17 и 18 мм. Для ПЭП с поперечным возбуждением применялись биморфные пьезопластины из керамики ЦТС-19 толщиной 2×2 мм и шириной 7 мм. Высота пьезопластин, определяющая основной резонанс, составляла 16 и 17 мм. Относительно небольшая толщина биморфного ПЭ (2×2 мм) выбрана, исходя из желания повысить величину напряженности электрического поля: при использовании ПЭ с большей толщиной напряженность поля будет уменьшаться и поэтому будет снижаться коэффициент ЭАП. Первый согласующий слой изготовлен из низковязкой эпоксидной смолы с микро-сферами. Второй согласующий слой изготовлен из плотного пенопласта. Склеивание согласующих слоев между собой осуществлялось с помощью высоковязкой эпоксидной смолы.

В [5] было показано, что использовать короткие зондирующие импульсы при УЗ теневого бесконтактном режиме следует в том числе и для того, чтобы можно было однозначно определить прошедший через изделие сигнал на фоне многочисленных переотражений в воздушных промежутках. Однако и при столь коротком импульсе длительностью $T_c = 3T_0$ на ПП кроме первого сквозного сигнала приходят многочисленные сигналы, переотраженные в промежутках между датчиками и ОК, а также сигналы, огибающие ОК по воздуху. На рис. 8 показан А-скан, полученный при УЗ бесконтактном контроле тестового изделия из ПКМ толщиной 40 мм. Протяженность воздушных промежутков между ИП и ОК, а также между ОК и ПП, составляла 40 мм. Первым в момент времени ≈ 240 мкс на ПП приходит сквозной сигнал, не испытывающий переотражений в воздушных промежутках. Затем в момент времени ≈ 410 мкс приходят сигналы, переотраженные в воздушных промежутках. Далее (≈ 1100 мкс) приходят многочисленные сигналы большой амплитуды, огибающие ОК по воздуху. В [5] было показано, что информативным сигналом явля-

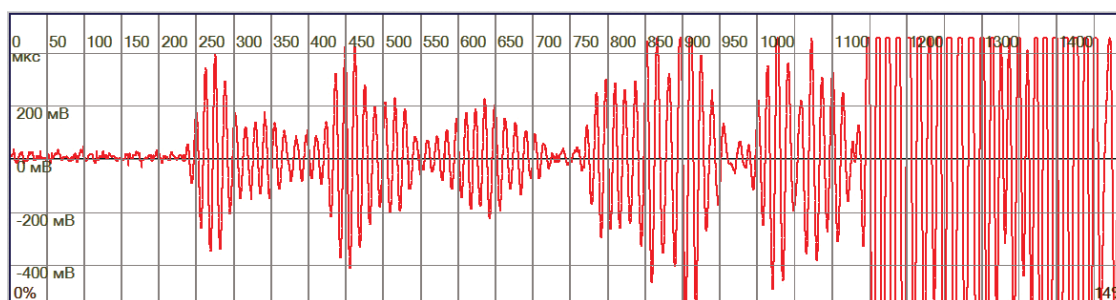


Рис. 8. А-скан, полученный на исследуемом тестовом изделии из ПКМ толщиной 40 мм.

ется только сквозной сигнал, поэтому в последующих экспериментах для его выделения использовалось стробирование.

В результате эксперимента по контролю тестового изделия из ПКМ при использовании короткого зондирующего импульса $T_c = 3T_0$ с частотой 80 кГц и с амплитудой 300 В в дефектном месте (углублении на 1 мм) происходит смещение сигнала на 2 мкс. При длительности одного периода 12,5 мкс достаточно сложно определить по А-скану такую небольшую разницу во времени прихода на ПП прошедшего через ЭАТ УЗ импульса. Поэтому на следующем этапе различие в толщине 1 мм определялось с помощью двумерных томограмм изделия (В-сканов), которые были получены посредством сканирования ИП и ПП вдоль изделия с помощью установки автоматизированного контроля, созданной на базе стенда TRITON 1000 фирмы TechTest (Испания).

На рис. 9а показана томограмма, полученная в результате сканирования тестового изделия при использовании короткого импульса ($T_c = 3T_0$) с частотой 80 кГц и с амплитудой 300 В при использовании в качестве излучающего преобразователя бесконтактного ПЭП с поперечным возбуждением сигнала. Если по А-скану достаточно сложно определить время прихода импульса, то на В-скане наблюдается четкое различие во времени прихода УЗ сигналов, прошедших через бездефектные и дефектные места. В дефектной области толщина изделия уменьшается на 1 мм, однако из-за того, что скорость звука в воздухе ($C \approx 300$ м/с) существенно ниже скорости звука в полимере, сквозной сигнал, прошедший через дефектное место, приходит позже, несмотря на уменьшенную толщину ОК. Поэтому на участках В-скана, соответствующим дефектному месту, происходит смещение линий на более поздние временные значения по сравнению с участками, соответствующими бездефектным местам.

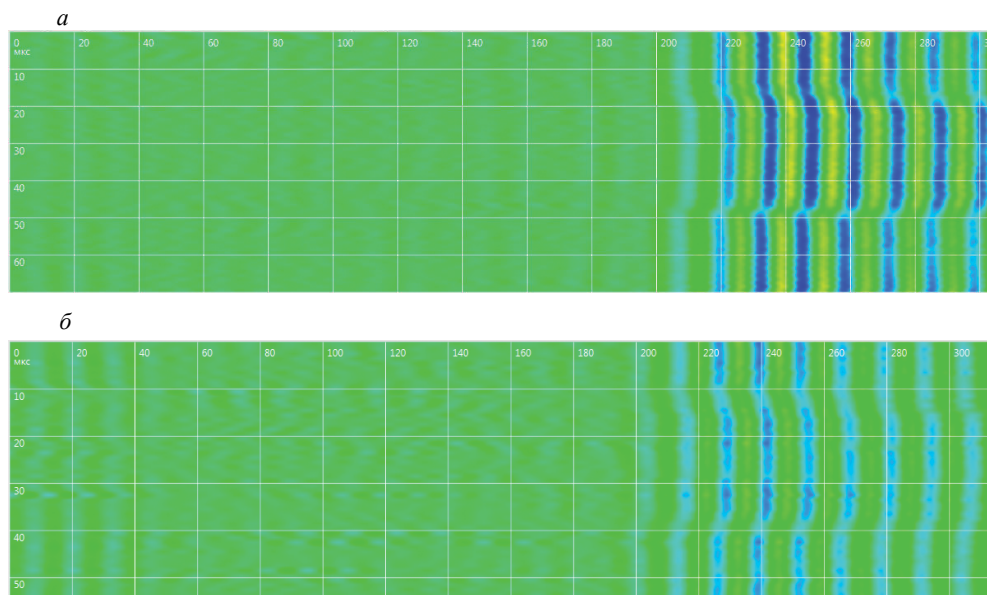


Рис. 9. Результаты УЗ бесконтактного контроля тестового изделия коротким импульсом с амплитудой 300 В: В-скан при использовании ИП с поперечным возбуждением сигнала (а); В-скан при использовании ИП с продольным возбуждением сигнала (б). В обоих случаях в качестве ПП использовался ПЭП с продольным возбуждением сигнала.

Таким образом, результаты эксперимента показали, что при бесконтактном теневом контроле ОК протяженностью ~ 40 мм возможно зафиксировать различие в толщине изделия в 1 мм при использовании короткого УЗ зондирующего сигнала с относительно низкой рабочей частотой $f_0 \approx 80$ кГц. Такая точность измерения толщины позволяет определять различие в скорости ультразвука в данном изделии из ПКМ с точностью до $\Delta C = 100$ м/с.

На рис. 9б приведен В-скан, полученный при контроле тестового ОК при использовании в качестве излучающего преобразователя ПЭП с продольным возбуждением сигнала, откуда видно, что изображение изделия на томограмме недостаточно четкое (см. рис. 9б). В результате, сравнительные результаты экспериментов, полученные с помощью различных излучающих преобразователей (см. рис. 9а и б), показывают, что мозаичный ПЭП, состоящий из набора разновысоких ПЭ с поперечным возбуждением сигнала, обладает большей чувствительностью в режиме излучения по сравнению с ПЭП с продольным возбуждением сигнала.

ВЫВОДЫ

Анализ проблем УЗ бесконтактного теневого контроля крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов показал, что для повышения одновременно чувствительности бесконтактного контроля и точности измерений акустических характеристик изделий необходимо использовать высокочувствительные широкополосные бесконтактные преобразователи. Показано, что повысить чувствительность и одновременно расширить полосу пропускания УЗ бесконтактных НЧ ПЭП возможно за счет использования мозаичных преобразователей с едиными (цельными) согласующими слоями. Для повышения коэффициента электроакустического преобразования излучающего бесконтактного преобразователя следует использовать мозаичные ПЭП с поперечным возбуждением УЗ сигнала.

Приведены результаты УЗ бесконтактного теневого контроля тестового изделия из ПКМ короткими зондирующими сигналами. Показано, что мозаичный ПЭП, состоящий из набора разновысоких ПЭ с поперечным возбуждением сигнала, обладает большей чувствительностью в режиме излучения по сравнению с мозаичным ПЭП с продольным возбуждением сигнала.

Показано, что при УЗ бесконтактном теневом контроле крупногабаритных изделий из ПКМ возможно установить различие во времени прихода УЗ низкочастотного сигнала на участках изделия, толщина которых различается на 1 мм, что позволяет обеспечить высокую точность измерения толщины и иных акустических характеристик крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общей ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Li H., Zhou Z. Air-Coupled Ultrasonic Signal Processing Method for Detection of Lamination Defects in Molded Composites // Journal of Nondestructive Evaluation. 2017. V. 36, 45. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0425-5>
3. Tang J., Zhu W., Qiu X., Song A., Xiang Y., Xuan F. Non-contact phase coded excitation of ultrasonic Lamb wave for blind hole inspection // Ultrasonics. 2021. V. 119.
4. Hutchins D., Watson R., Davis L., Akanji L., Billson D., Burrascano P., Laureti S., Ricci M. Ultrasonic Propagation in Highly Attenuating Insulation Materials // Sensors. 2020. V. 20.
5. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Karavaev M.A., Kontsov R.V. Selecting Optimum Parameters of Ultrasonic Noncontact Shadow Method for Testing Products Made of Polymer Composite Materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 10. P. 831—842. [Качанов В.К., Соколов И.В., Караваев М.А., Концов Р.В. Выбор оптимальных параметров ультразвукового теневого бесконтактного способа контроля изделий из полимерных композитных материалов // Дефектоскопия. 2020. № 10. С. 60—70.]
6. Wang X., Wu H., Zhang X., Zhang D., Gong X., Zhang D. Investigation of a multi-element focused air-coupled transducer // AIP Advances 8. 2018. V. 8. Is. 9.
7. Asokkumar A., Jasiuniene E., Raišutis R., Kažys R. Comparison of ultrasonic non-contact air-coupled techniques for characterization of impact-type defects in pultruded GFRP composites // Materials. 2021. V. 14. Is. 5.
8. Patankar V.H., Chaurasia R., Nair P. Design and Development of Instrumentation for Air-Coupled Ultrasonics / Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation // NDE. 2009. P. 185—189.
9. Alvarez-Arenas T., Shrout T., Zhang S., Lee H. J. Air-coupled transducers based on 1-3 connectivity single crystal piezocomposites / 2012 International Ultrasonics Symposium. USA, 2012. P. 2230—2233.

10. *Kažys R., Šliteris R., Šeštokė J., Vladiškauskas A.* Air-coupled ultrasonic transducers based on an application of the PMN32%PT single crystals // *Ferroelectrics*. 2015. V. 480. Is. 1. P. 85—91.
11. *Kažys R.J., Šliteris R., Šeštokė J.* Application of PMN-32PT piezoelectric crystals for novel air-coupled ultrasonic transducers // *Physics Procedia*. 2015. V. 70. P. 896—900.
12. *Eschler E.* Air-coupled Ultrasound Transducers. Wiki of the Chair of Non-destructive Testing. 2016. <https://wiki.tum.de/display/zfp/Air-coupled+Ultrasound+Transducers>.
13. *Bhardwaj A.M.* Application of Non-Contact Ultrasound for In-Line Inspection and Material Qualification / Manufacturing 4 the Future conference, 2014, Hartford, CT.
14. *Bhardwaj A., Patel K., Bhardwaj M., Fetfatsidis K.* Application of advanced non-contact ultrasound for composite material qualification // *Materials Science*. 2014. URL: http://ultrangroup.com/wp-content/uploads/CAMX_SAMPE-Paper-The-Ultran-Group-Submitted.pdf
15. *Качанов В.К., Соколов И.В., Конов М.М., Синицын А.А.* Сравнение свойств композитных и мозаичных пьезопреобразователей для УЗ контроля изделий с большим уровнем затухания УЗ сигналов // *Дефектоскопия*. 2011. № 8. С. 39—53.
16. *Splitt G.* Piezocomposite Transducers — a Milestone for Ultrasonic Testing / 7-th European conference on NDT. Copenhagen, 1998. V. 3. P. 2965—2970.