

УДК 620.179

А.С. Бойчук<sup>1</sup>, И.А. Диков<sup>1</sup>, А.С. Генералов<sup>1</sup>, А.В. Славин<sup>1</sup>

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ОБРАЗЦОВ ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-74-80

*Приведены результаты неразрушающих исследований и контроля образцов трехслойных сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов с сотовым наполнителем из полимерсотопласта и алюминиевой фольги. Показано, что автоматизация ультразвукового теневого метода контроля образцов трехслойных сотовых конструкций позволяет повысить чувствительность контроля за счет использования струйного способа создания акустического контакта с малым диаметром струи и соблюдения точной соосности приемного и передающего преобразователей. В этом случае в образцах с сотовым наполнителем возможно выявлять дефекты типа непрочлея, расслоений и посторонних включений в обшивках размером от 6 мм.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, образцы трехслойных сотовых конструкций, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, теневой метод, чувствительность.

A.S. Boychuk<sup>1</sup>, I.A. Dikov<sup>1</sup>, A.S. Generalov<sup>1</sup>, A.V. Slavin<sup>1</sup>

## AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF THREE-LAYER HONEYCOMB STRUCTURES' SAMPLES BY ULTRASONIC THROUGH-TRANSMISSION TECHNIQUE

*The article presents the results of non-destructive inspection of samples of three-layer honeycomb structures made of polymer composite materials with polymer honeycomb cores and aluminum foil cellular cores. It is shown that the automation of ultrasonic through-transmission technique of three-layer honeycomb structures' samples allows to increase testing sensitivity due to application of water jet method of acoustic contact creation with a small jet's diameter and observance of accurate alignment of transmitting and receiving transducers. In this case it is possible to check such defects as disbonds, delaminations and outside inclusions in skins with size of more than 6 mm.*

**Keywords:** polymer composite materials, three-layer honeycomb structures' samples, non-destructive inspection, ultrasonic inspection, through-transmission technique, sensitivity.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

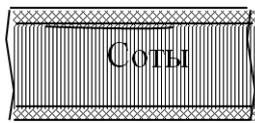
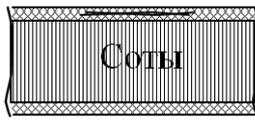
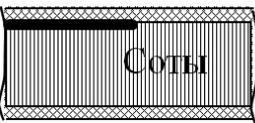
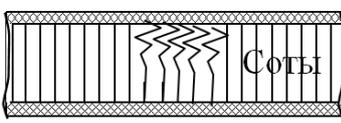
В последнее время в России ведется большое количество разработок авиационной и космической техники, в деталях и элементах конструкций которой все шире используются полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1]. В связи с высокими требованиями, предъявляемыми к деталям и конструкциям, ученые непрерывно проводят исследования по созданию материалов нового поколения, в том числе ПКМ [2–4], и технологий их изготовления [5, 6]. Одним из перспективных направлений по снижению массы конструкции летательных аппаратов является развитие технологий изготовления трехслойных конструкций [7, 8],

элементы которых состоят из двух обшивок, соединенных легким наполнителем. Наиболее распространенный тип наполнителя, использующийся в трехслойных конструкциях, – сотовый наполнитель.

В процессе изготовления образцов трехслойных конструкций с сотовым наполнителем могут возникать нарушения сплошности (дефекты) [9], оказывающие влияние на определяемые в процессе физико-механических испытаний характеристики. Основные виды дефектов в трехслойных конструкциях из ПКМ с сотовым наполнителем представлены в таблице.

В настоящее время контроль качества образцов трехслойных сотовых конструкций

Виды дефектов трехслойных конструкций из ПКМ с сотовым наполнителем

Виды дефектов	Схематичное изображение
Неприклеены между обшивкой и сотовым наполнителем	
Расслоения в обшивках	
Инеродные включения (полимерные пленки, бумага и пр.) в сотовых конструкциях	
Подмятие сотового наполнителя (потеря устойчивости)	

осуществляется в основном тепловыми [10], рентгеновскими [11] и акустическими методами неразрушающего контроля [12]. Тем не менее наибольшее применение находят акустические методы (импедансный, теневой и метод свободных колебаний), у которых есть как свои преимущества, так и недостатки. Основной характеристикой любого используемого метода является чувствительность контроля, зависящая от физических принципов метода, применяемой аппаратуры, материала и геометрических особенностей объекта контроля и других факторов.

Акустический импедансный метод контроля сотовых панелей [12] – наиболее простой в использовании и не требует контактной жидкости и двухстороннего доступа в некоторых случаях. Тем не менее при увеличении толщины обшивки и уменьшении жесткости сотового наполнителя чувствительность контроля падает. Метод эффективен при толщине обшивки до 3 мм, выявляет дефекты с глубиной залегания не более 15–20 мм. Импедансным методом обычно выявляют дефекты под обшивкой, со стороны которой ведется контроль. Поэтому для контроля всего объекта требуется контроль панели с обеих сторон.

Контроль теневым амплитудным методом [12] возможен только при наличии двухстороннего (с двух противоположных сторон) доступа к контролируемой конструкции. Необходима также соосность передающего и приемного преобразователей. Чувствительность контроля с размером грани ячейки не более 4 мм и высотой сотового

наполнителя не более 80 мм в настоящее время составляет:

- 10 мм – для трехслойных конструкций с сотовым наполнителем высотой не более 8 мм;
- 10–15 мм – для трехслойных конструкций с сотовым наполнителем высотой от 8 до 80 мм.

Чуть реже для контроля трехслойных сотовых конструкций используют метод свободных колебаний [12]. Контроль ведут при одностороннем доступе без смачивания изделий. Метод эффективен для сотовых образцов с тонкими обшивками. С увеличением толщины обшивок чувствительность падает.

Анализ научно-технических литературных источников по применению методов неразрушающего контроля трехслойных конструкций из ПКМ с высокими разрешением и чувствительностью показывает, что при автоматизированном контроле:

- существует возможность для трехслойных конструкций из ПКМ с сотовым наполнителем выявлять ультразвуковым теневым методом дефекты меньшего размера, чем круг диаметром 10 мм. При этом чувствительность контроля зависит от размера ячейки сот – выявляют только те дефекты, которые больше размера описанной вокруг ячейки сот окружности или которые пересекают несколько граней ячеек сот;
- для повышения чувствительности контроля используют фокусирующие преобразователи. В этом случае чувствительность контроля зависит также и от размера фокусного пятна.

Так, в статье [13] показано, что с использованием автоматизированной установки и применением теневого метода контроля с анализом результатов контроля в виде С-сканов можно в трехслойных сотовых конструкциях обнаруживать дефекты, соизмеримые с размером ячейки сот. В этой работе исследовали образцы трехслойных конструкций с алюминиевыми сотами с размером ячейки 4,5 мм, а также пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) с рабочей частотой 2 МГц, с шагом сканирования 1 мм и скоростью 300 мм/с.

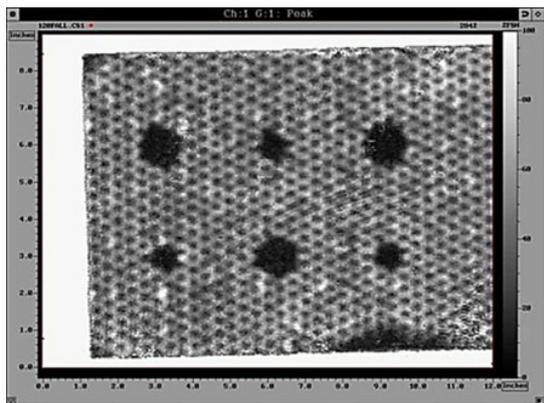


Рис. 1. Результаты выявления непоклей в образце трехслойной сотовой конструкции с алюминиевым наполнителем

В работе [14] исследовали образцы с алюминиевым сотовым наполнителем, используя теновый метод ультразвукового контроля и применяя низкочастотные фокусирующие датчики с воздушным вводом с рабочей частотой 120 кГц и диаметром 3/4 дюйма. Испытывали образцы с обшивками толщиной 0,032 дюйма и сотовым наполнителем с размером ячейки 3/8 дюйма – выявлены дефекты в виде непоклей (рис. 1).

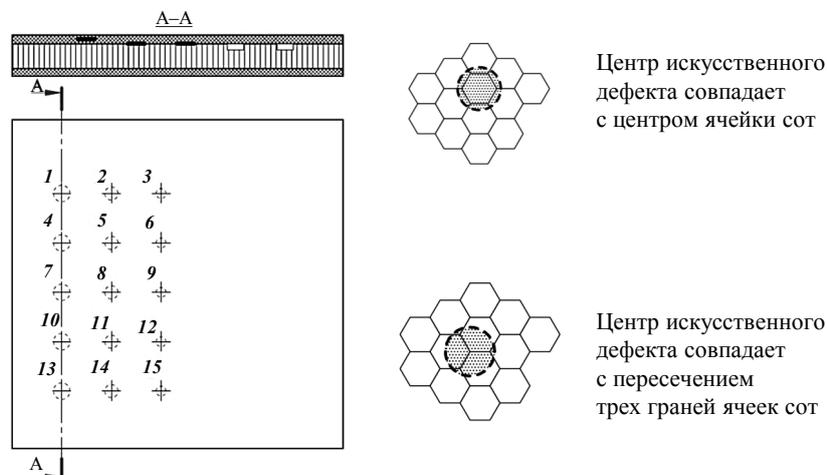


Рис. 2. Эскиз образца трехслойной сотовой конструкции из полимерного композиционного материала с искусственными дефектами

Во ФГУП «ВИАМ» в автоматизированном режиме проведены исследования трехслойных образцов с сотовым наполнителем и специальными оправками с целью повышения чувствительности неразрушающего контроля образцов, предназначенных для определения физико-механических характеристик разрабатываемых материалов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

### Материалы и методы

Исследования по контролю образцов трехслойных сотовых конструкций проводили на образцах с обшивками из углепластика и сотовым наполнителем из полимерсотопласта (ПСП) высотой 15 мм и алюминиевой фольги высотой 16 мм. Испытывали образцы с размером сторон ячейки сот 2,0 и 3,5 мм – для сотового наполнителя из ПСП и 1,6 и 3,2 мм – для сотового наполнителя из алюминиевой фольги. Искусственные дефекты диаметром 6; 8 и 10 мм в образцах получали двумя способами:

- дефекты, имитирующие непоклей, – путем подфрезерования сотового наполнителя (10–15 – на рис. 2);

- дефекты, имитирующие посторонние включения, – путем закладывания фрагментов фторопластовой пленки между слоями обшивки (1–3 – на рис. 2) и между обшивкой и сотовым наполнителем (4–9 – на рис. 2).

Формование образцов проводили за один технологический цикл, т. е. отверждение обшивок и склеивание их с сотовым наполнителем выполняли одновременно.

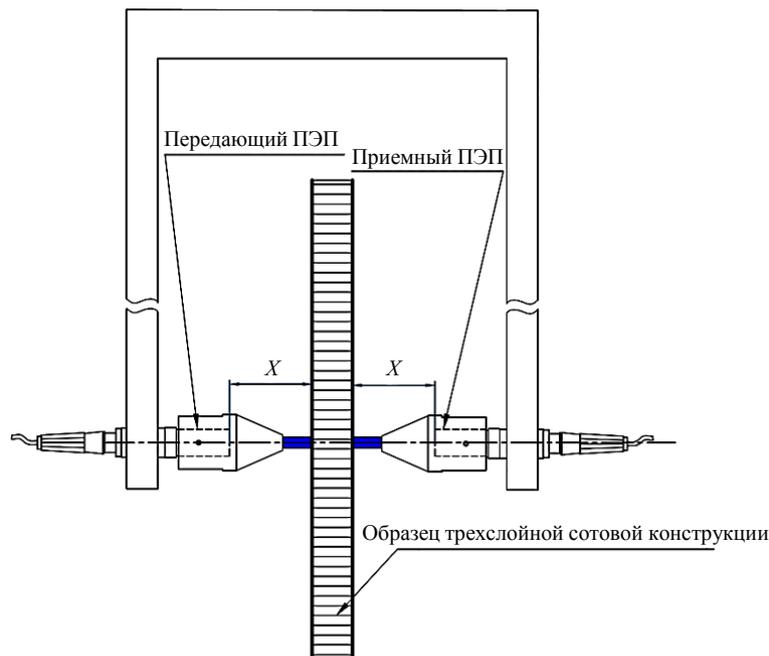


Рис. 3. Схема проведения исследований на автоматизированной установке LS-500 производства фирмы ScanMaster (ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь)

Искусственные дефекты, получаемые путем подфрезеровки сот и закладки фрагментов пленки между обшивкой и сотовым наполнителем, изготавливали таким образом, чтобы центр искусственного дефекта совпадал:

- с центром ячейки сот (дефекты 4–6 и 10–12 – на рис. 2);
- с пересечением трех граней ячеек сот (дефекты 7–9 и 13–15 – на рис. 2).

Исследования образцов проводили на автоматизированной установке серии LS-500 фирмы ScanMaster со специальной оправкой для реализации ультразвукового теневого метода неразрушающего контроля – схема приведена на рис. 3. В качестве преобразователей использовали фокусирующие (с фокусным расстоянием 1,5 дюйма) и нефокусирующие ПЭП с центральной частотой 2,25 МГц и диаметром пьезопластины 12,7 мм, а в качестве акустического контакта между преобразователями и исследуемыми образцами – струю воды диаметром 4,7 мм, которую формировали в корпусе баблеров, специально изготовленных для проведения испытаний.

Исследуемый образец помещали посередине между передающим и приемным преобразователями. С целью определения влияния расстояния от преобразователя до поверхности образцов на результат контроля, расстояние  $X$  между приемным (передающим) преобразователем и образцом трехслойной конструкции устанавливали

равным 50 и 80 мм (рис. 3). Сканирование образцов осуществляли с шагом 1 мм по осям  $X$  и  $Y$ . Напор воды через шланги регулировали с помощью специальных кранов и делали таким, чтобы струи воды от передающего и приемного баблеров пересекались соосно посередине расстояния между ними при отсутствии образца.

При исследовании каждого образца трехслойной сотовой конструкции настройку усиления дефектоскопической части автоматизированной установки проводили таким образом, чтобы максимальная амплитуда прошедшего через образец ультразвукового сигнала в зонах отсутствия искусственных дефектов составляла  $80 \pm 10\%$  экрана развертки типа А. При такой настройке проводили автоматическое сканирование образцов по всей площади, сохраняли результаты сканирования в виде С-сканов и затем анализировали результаты в программе CSI ScanMaster (режим «Анализ»).

Анализ результатов сканирования проводили путем подбора порогового уровня и идентификации на С-скане полученных в образце искусственных дефектов. Если амплитуда прошедших через образец ультразвуковых сигналов в месте расположения искусственного дефекта была меньше выбранного порогового уровня, а площадь зоны, где выполняли это условие, была не менее площади описанной вокруг ячейки сот окружности, то считали, что дефект выявлен.

### Результаты и обсуждение

Для того чтобы достичь высокой чувствительности при проведении неразрушающего

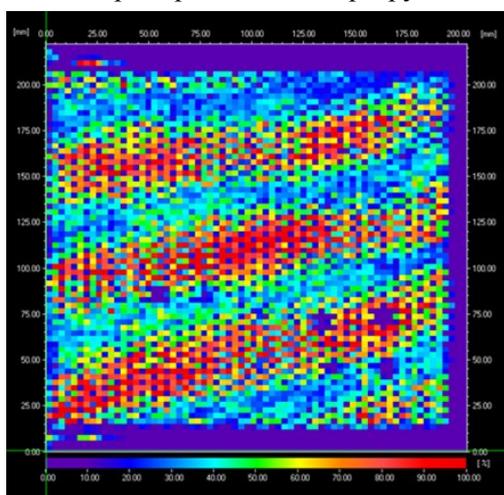


Рис. 4. Муаровый эффект на С-скане образца, полученный вследствие неправильно выбранного шага

контроля ультразвуковым теневым методом, очень важно соблюдать соосность приемного и передающего преобразователей, а также шаг сканирования, делая его при этом как можно меньше (не более половины диаметра минимального выявляемого дефекта). Неправильно подобранный шаг сканирования может привести к образованию муарового эффекта (рис. 4), т. е. к появлению ярко выраженных зон с повышенным и пониженным значениями амплитуд прошедших через образец ультразвуковых сигналов. Поэтому по результатам расчета и экспериментов шаг сканирования выбран 1 мм.

При применении ручного контроля теневым методом соблюдение данных условий обеспечить довольно трудно. При автоматизированном контроле эти сложности устраняют за счет использования жесткой оправки и автоматического сканирования, что позволяет выявлять более мелкие дефекты, чем при ручном контроле.

На рис. 5 и 6 в виде С-сканов представлены результаты исследования образцов трехслойных сотовых конструкций с обшивками

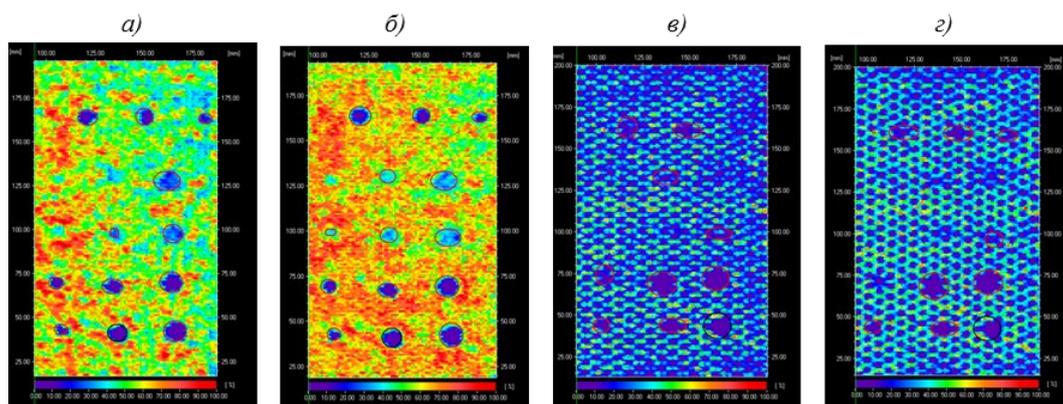


Рис. 5. С-сканы исследования образцов трехслойных сотовых конструкций с алюминиевым сотовым заполнителем со стороны ячейки 1,6 (а, б) и 3,2 мм (в, з), полученные с помощью фокусирующих (а, в) и нефокусирующих (б, з) пьезоэлектрических преобразователей

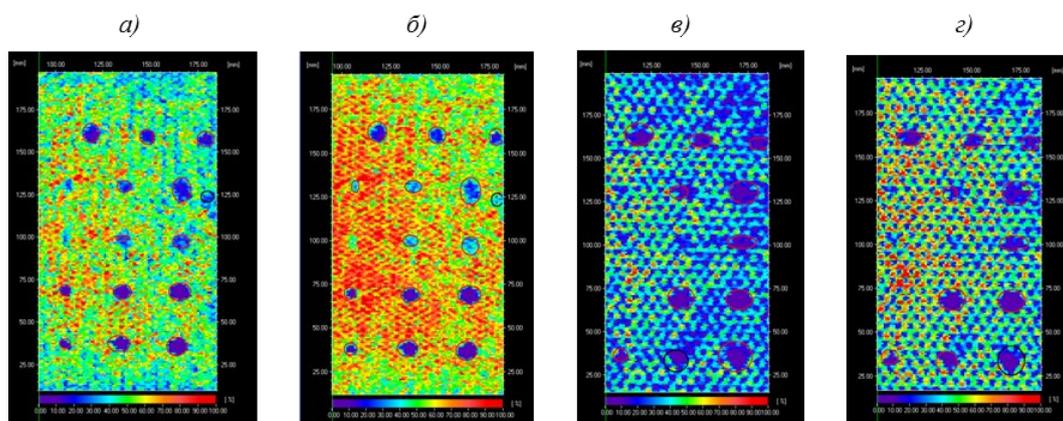


Рис. 6. С-сканы исследования образцов трехслойных сотовых конструкций с сотовым заполнителем из полимерсотопласта со стороны ячейки 2,0 (а, в) и 3,5 мм (б, з), полученные с помощью фокусирующих (а, в) и нефокусирующих (б, з) пьезоэлектрических преобразователей

из углепластика и сотовым наполнителем из ПСП и алюминиевой фольги при использовании фокусирующих и нефокусирующих преобразователей с центральной частотой 2,25 МГц. На С-сканах красными кружками отмечены те искусственные дефекты диаметром 6 и 8 мм, которые выявлены при автоматизированном контроле на фоне структуры исследуемых образцов. Причем падение прошедшего ультразвукового сигнала через заложенные в образцы искусственные дефекты составляет не менее 8 дБ – для фокусирующих преобразователей и не менее 6 дБ – для нефокусирующих (при уровне прошедшего через образец ультразвукового сигнала в бездефектной зоне 80% высоты экрана развертки типа А).

В образцах с размером сторон ячеек сот 1,6 и 2 мм выявляют практически все заложенные искусственные дефекты, так как размеры дефектов больше диаметров описанных вокруг ячеек сот окружностей. Для образцов с наполнителем из ПСП с размером ячейки сот 3,5 мм дефекты размером 6 мм не выявляют, за исключением тех, которые получены методом подфрезеровки, центр которой совпал с местом пересечения трех граней. Для образцов с алюминиевыми сотами размером 3,2 мм при использовании фокусирующих преобразователей диаметром 6 мм выявляют и подфрезеровку, которая практически соизмерима с диаметром описанной вокруг ячейки сот окружности. Отметим также, что благодаря малому диаметру струи воды (4,7 мм) между преобразователем и поверхностью ввода ультразвукового сигнала в образец, использование как фокусирующих, так и нефокусирующих преобразователей дает практически одинаковый результат, хотя при применении фокусирующих преобразователей амплитуда прошедших через дефекты сигналов уменьшается на 2–3 дБ в сравнении с нефокусирующими.

Влияние расстояния от преобразователей до контролируемого образца в виде С-сканов представлено на рис. 7 (красными кружками отмечены те дефекты, которые выявлены). Результаты исследования показывают, что увеличение расстояния от излучающего и приемного преобразователей до поверхности исследуемого образца на 30 мм не повлияло на выявляемость заложенных в образец дефектов. Это, в свою очередь, можно объяснить тем, что диаметр используемой струи воды (4,7 мм) меньше минимального размера заложенного в образец дефекта (6 мм), а ее применение не позволяет расходиться ультразвуковому пучку и таким образом фокусирует всю излученную энергию в пределах диаметра струи независимо от расстояния между ПЭП и образцом.

### Заключения

Исследовали образцы трехслойных сотовых конструкций из ПКМ с сотовым наполнителем из ПСП и алюминиевой фольги с различными размерами ячеек сот. Как показали результаты проведенных исследований, автоматизация ультразвукового теневого метода неразрушающего контроля позволяет повысить чувствительность контроля трехслойных сотовых образцов по сравнению с использованием ручного метода – выявляют дефекты диаметром от 6 мм. Этого достигают путем автоматического сканирования образцов с применением специальной жесткой оправки (обеспечение точной соосности приемного и передающего преобразователей) и использованием в качестве акустического контакта между преобразователями и образцом струи воды диаметром 4,7 мм, а также высокочастотных фокусирующих преобразователей (при сухом контакте, как правило, используют преобразователи с частотой не более 0,5–1 МГц).

Благодаря применению при автоматизированном ультразвуковом теневом контроле струйного контакта с малым диаметром струи (в проведенных исследованиях – равен 4,7 мм) использование фокусирующих (с фокусным расстоянием 1,5 дюйма) и нефокусирующих преобразователей с частотой 2,25 МГц и диаметром пьезопластины 12,7 мм позволяет практически одинаково выявлять дефекты в образцах трехслойных сотовых конструкций.

При контроле таких образцов важен правильный выбор шага сканирования и его

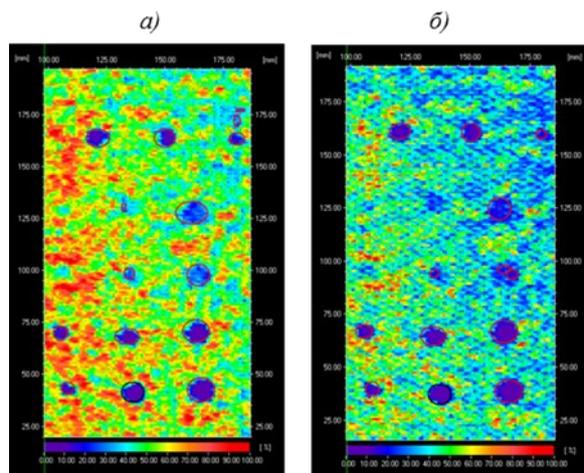


Рис. 7. С-сканы исследования образца трехслойных сотовых конструкций с алюминиевым сотовым наполнителем с размером стороны ячейки 1,6 мм при расстоянии между пьезоэлектрическим преобразователем и образцом 50 (а) и 80 мм (б)

соблюдение в процессе сканирования. Неправильно подобранный шаг сканирования может привести к образованию муарового эффекта.

Еще одним значимым результатом исследований является то, что при автоматизированном ультразвуковом теневом контроле образцов трехслойных конструкций из ПКМ со струйным контактом изменение расстояния от излучающего и приемного преобразователей до поверхности исследуемого образ-

ца в пределах 30 мм не влияет на выявляемость дефектов, что можно объяснить тем, что диаметр используемой струи воды меньше минимального размера заложеного в образец дефекта.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность сотруднице ФГУП «ВИАМ» С.И. Яковлевой за помощь в подготовке статьи к изданию.

### Библиографический список

1. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. №4 (2). С. 686–693.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. №2. С. 37–42.
4. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №5. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
5. Тимошков П.Н., Платонов А.А., Хрульков А.В. Пропитка пленочным связующим (RFI) как перспективная безавтоклавная технология получения изделий из ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №5. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-9-9.
6. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №2 (38). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-7-7.
7. Сливинский В.И., Ткаченко Г.В., Сливинский М.В. Эффективность применения сотовых конструкций в летательных аппаратах // Сибирский журнал науки и технологий. 2005. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-primeneniya-sotovyyh-konstruktsiy-v-letatelnyh-apparatah> (дата обращения: 19.06.2019).
8. Санников А.В. Анализ особенностей эксплуатации сотовых конструкций с алюминиевым наполнителем // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. №192. С. 124–126.
9. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. №4. С. 23–32.
10. Вавилов В.П., Нестерук Д.А., Ширяев В.В., Григорьев С.В. Тепловизионный контроль воды в авиационных неметаллических сотовых конструкциях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2002. URL: [http://www.https://cyberleninka.ru/article/n/teplovizionnyy-kontrol-vody-v-aviatsionnyh-nemetallicheskih-sotovyyh-konstruktsiyah](http://www.cyberleninka.ru/article/n/teplovizionnyy-kontrol-vody-v-aviatsionnyh-nemetallicheskih-sotovyyh-konstruktsiyah) (дата обращения: 23.07.2019).
11. Косарина Е.И., Степанов А.В. Радиографический контроль сотовых конструкций // В мире неразрушающего контроля. 2003. №3. С. 12–15.
12. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. Т. 3: Ультразвуковой контроль / под ред. И.Н. Ермолова, Ю.В. Ланге. 864 с.
13. Doyum B., Dürer M. Defect Characterization of Composite Honeycomb Panels by Non-Destructive Inspection Methods. URL: <https://www.ndt.net/article/dgzfp02/papers/p36/p36.htm> (дата обращения: 26.07.2019).
14. Hsu D.K., Kommareddy V., Barnard D.J., Peters J.J., Dayal V. Aerospace NDT using piezoceramic air-coupled transducers // 16th World Conference on NDT – 2004. URL: [https://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/non-contact\\_ultrasonics/410\\_hsu.pdf](https://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/non-contact_ultrasonics/410_hsu.pdf) (дата обращения: 26.07.2019).
15. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.