

621.792.05

**Имитация дефектов методом занижения сотового заполнителя в
многослойных сотовых конструкциях из полимерных
композиционных материалов**

Русаков Д.Ю.,* Чернушин В.А.**

Обнинское научно-производственное предприятие

«Технология» им. А.Г. Ромашина», Киевское шоссе, 15, Обнинск,

Калужская область, 249031, Россия

**e-mail: tigra47@gmail.com*

***e-mail: ximik99911@yandex.ru*

Аннотация

Проведено сравнение двух способов имитации дефектов непроклеев в многослойных сотовых конструкциях из полимерных композиционных материалов: метод занижения сотового заполнителя и метод имитации плоскодонными отверстиями. Метод занижения сотового заполнителя позволяет произвести настройку дефектоскопа с большей точностью, чем при настройке на плоскодонном отверстии. Применение метода занижения сотового заполнителя увеличивает достоверность неразрушающего контроля при производстве и эксплуатации изделий из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, полимерные композиционные материалы, имитация дефектов, метод свободных колебаний, импедансный метод.

Неразрушающий контроль (НК) трёхслойных конструкций из композиционных материалов с сотовым наполнителем имеет важное значение для определения качества изготовленных изделий [1-4, 7-13]. Основным методом контроля таких конструкций является импедансный [1,2,5,6] с использованием двух типов преобразователей: совмещённым (СП) и раздельно-совмещённым (РСП). На рис. 1 показана трёхслойная конструкция с обозначением мест возможных дефектов типа непроклей.

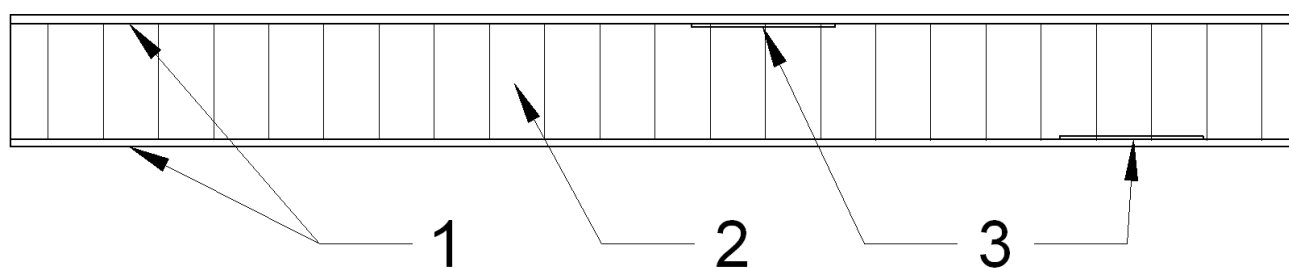


Рис. 1. Трёхслойная конструкция из композиционных материалов с сотовым наполнителем. 1 – обшивки; 2 – сотовый наполнитель; 3 – непроклеи.

Для настройки и проверки дефектоскопов используются рабочие стандартные образцы (РСО) с выполненными в них имитаторами дефектов. Образцы имеют идентичную структуру с изделием. Для настройки используются бездефектная и дефектная области на РСО. Важнейшей задачей является имитация дефектов с необходимой площадью. Чем меньше площадь уверенно выявляемого имитатора дефектов, тем выше чувствительность.

Распространённым способом имитации непрочлея на РСО является плоскодонное отверстие с площадью минимально допустимого дефекта. Но с появлением заполнителей с крупной сотовой ячейкой (с гранями более 5 мм) вскрываются недостатки таких имитаторов. Площадь одной ячейки может превосходить площадь необходимого для имитации плоскодонного отверстия. Так как в процессе фрезерования плоскодонного отверстия, сотовый заполнитель удаляется случайным образом, и, как правило, повреждаются соседние несколько ячеек сот, то фактическая площадь имитируемого непрочлея, на которой производится настройка дефектоскопа, превосходит площадь плоскодонного отверстия (рис.2).

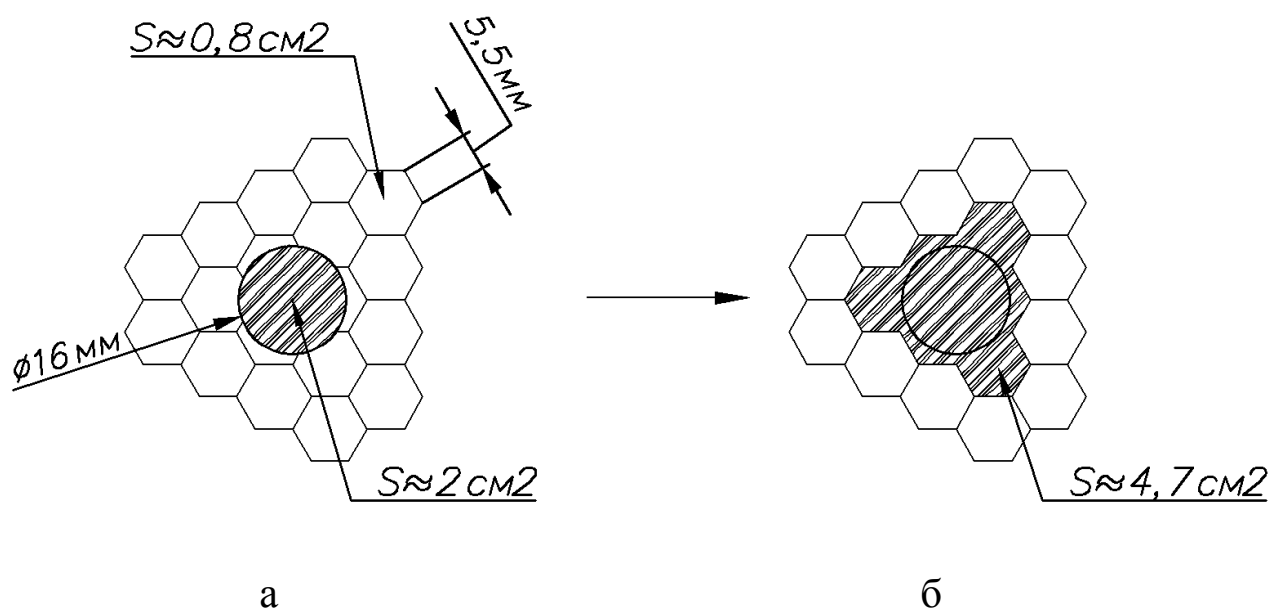


Рис. 2. Сравнение теоретической (а) и реальной (б) площадей дефекта от имитатора в виде плоскодонного отверстия.

Для того чтобы имитировать дефект с чётко заданной площадью, существует так называемый метод занижения сотового заполнителя. Грани сот до конечного этапа формования занижаются до определенной высоты (рис. 3).

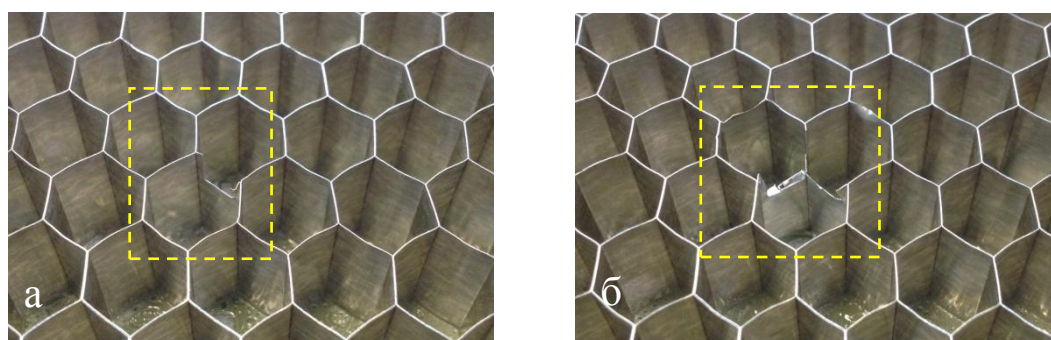


Рис. 3. Имитация дефектов методом занижения сотового заполнителя (вид до приклейки внешней обшивки). Грани занижены на $1/3$ высоты. а – 1 грань, б – 3 грани.

Удалив одну грань между двумя ячейками, получают имитатор дефекта с минимальной площадью – площадью, сравнимой с площадью двух ячеек. Настройка на имитатор дефекта с минимальной площадью повышает вероятность обнаружения естественных дефектов той же площади или более крупных дефектов в глубине конструкции.

Для проверки выдвинутых предположений, уточнения зависимости реальных площадей имитаторов дефекта от теоретически рассчитанных и демонстрации преимущества метода занижения сотового заполнителя перед методом имитации

плоскодонными отверстиями, был изготовлен трёхслойный образец с обшивками из стеклопластика и алюминиевым сотовым наполнителем.

Толщина каждой обшивки 0,7 мм, высота сотового наполнителя 15 мм, площадь ячейки ~ 0,8 см², длина грани 5,5 мм. В образце выполнено 4 имитатора дефекта с занижением сотового наполнителя с разным количеством заниженных граней: 1 (дефект площадью в 2 ячейки), 3 (дефект площадью в 3 ячейки), 5 (дефект площадью в 4 ячейки), 12 (дефект площадью в 7 ячеек).

Был проведен контроль образца дефектоскопом ИД-91М (СП с внешней стороны и РСП с внутренней) и очерчены контуры выявленных дефектов. В таблице 1 представлены расчётные характеристики дефектов и результаты контроля.

Таблица 1

Имитаторы дефектов	I	II	III	IV
Сумма площадей всех ячеек, см ²	1,57	2,36	3,14	5,5
Диаметр окружности с площадью, равной сумме площадей всех ячеек, мм	14,15	17,33	20,01	26,47
Площадь вписанной окружности, см ²	0,24	0,95	1,66	3,8
Диаметр вписанной окружности, мм ²	5,5	11	14,55	22
Площадь имитатора дефекта, определённая с помощью импедансного дефектоскопа, см ²	*	1,6	2,2	3,8
Площадь имитатора дефекта, определённая с помощью импедансного дефектоскопа с обратной стороны, см ²	*	0,4	1,3	3,8

* - минимальный дефект, обнаруживается точно.

Наблюдается характерная тенденция: с увеличением количества заниженных ячеек сотового заполнителя, площадь дефекта, выявленного при контроле импедансным методом, приравнивается к площади, вписанной в дефект окружности. Для IV-го типа имитатора эти площади равны (3,8 см²). Интерес вызывают более мелкие имитаторы I-III типов, так как обнаружение подобных дефектов в изделиях наиболее затруднено. Занижение одной грани (имитатор I-го типа) не создаёт имитатор дефекта, с площадью, сравнимой с двумя площадями ячеек сотового заполнителя, как предполагалось ранее. Данный имитатор имеет низкую вероятность обнаружения при поисковом ручном контроле.

Следует отдельно упомянуть о том, что в отличие от метода имитации дефектов плоскодонными отверстиями, данный способ имитации позволяет провести контроль и с обратной стороны. Результаты показывают, что II, III, IV имитаторы дефектов полностью выявляются с обратной стороны раздельно-совмещённым преобразователем, но имеют меньшую площадь по сравнению с контролем с лицевой стороны. I-й дефект обнаруживается точно. Предположительно, с увеличением высоты сотового заполнителя, увеличивается разница в площадях одних и тех же дефектов с лицевой и обратной стороны. Совмещённым преобразователем с обратной стороны выявляются имитаторы: IV – уверенно, III, II - точно. I-й не выявляется.

В ходе контроля образца рентгеновским методом подматий сотового заполнителя выявлено не было. Что подтверждает достоверность результатов контроля импедансным методом.

Далее в образце были выполнены плоскодонные отверстия диаметрами: 14; 17; 20; 26,5 мм (рис. 4).

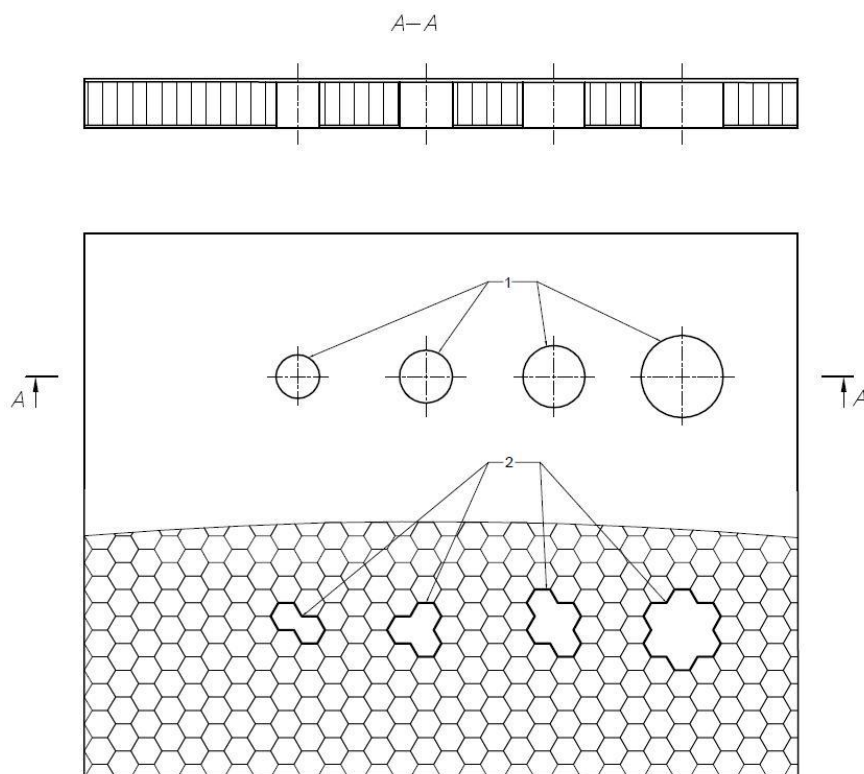


Рис. 4. Схема образца с двумя типами имитации дефектов: плоскодонные отверстия (1) и занижения сотового заполнителя (2).

Для сравнения имитаторов дефектов, выполненных двумя разными методами имитации, использовался локальный метод свободных колебаний (МСК) [1-6, 12-20]. Сравнивая длительности соударения [2, 3, 12-18] бойка ударного преобразователя УДП-10-02 дефектоскопа ДАМИ-С в центральных точках имитаторов дефектов на образце (колебания бойка анализируются пьезоэлектрическим приёмником, расположенным в бойке), косвенно сравнивались значения механических импедансов в зонах каждого имитатора дефекта.

Используя теоретическую модель, покажем взаимосвязь длительности соударения с механическим импедансом, т. е. комплексным отношением силы, действующей на поверхности механической системы к средней колебательной скорости на этой поверхности в направлении силы [1]. Если рассмотреть отделённый дефектом участок обшивки в виде закреплённой по контуру круглой пластинки с диаметром \mathbf{d} , то в отсутствие потерь её входной механический импеданс [1]

$$Z = j \left(\omega m_э - \frac{1}{\omega K_э} \right), \quad (1)$$

где ω – круговая частота, $m_э$ – эквивалентная масса пластинки, $K_э$ – не зависящая от частоты эквивалентная сосредоточенная гибкость, $j = \sqrt{-1}$. Зная параметры пластинки, можно точно рассчитать [1]

$$K_э = \frac{3(1 - \mu^2)d^2}{16\pi E h^3}, \quad (2)$$

где μ , E – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала пластинки, h , d – толщина и диаметр пластинки. Длительность соударения бойка преобразователя с объектом контроля в МСК рассчитывается по формуле [12-14,16-18]

$$\tau = \pi \sqrt{\frac{m_Б}{k}}, \quad (3)$$

где $m_Б$ – масса бойка; k – локальная жёсткость объекта контроля. Известно [1], что жёсткость есть обратная величина гибкости, поэтому $k = 1/K_э$. Получим

$$K_{\text{Э}} = \frac{\tau^2}{\pi^2 m_{\text{Б}}} \quad (4)$$

Согласно представленным зависимостям (1) и (4) достаточно экспериментально сравнить значения длительностей соударения (рис. 5) для разных имитаторов дефектов для оценки изменения импеданса и, соответственно, схожести выполненных имитаторов.

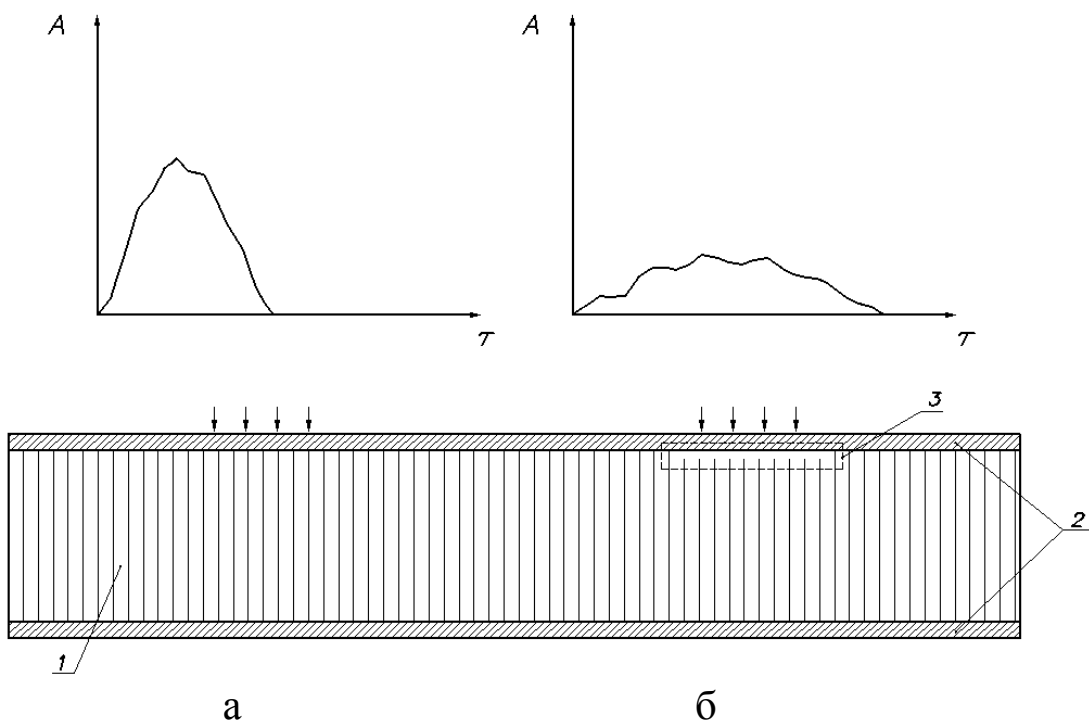


Рис. 5. Схема сравнения длительностей соударения τ для бездефектной (а) и дефектной (б) областей. 1 – сотовый наполнитель, 2 – обшивки, 3 – имитатор дефекта непрочлея.

В зависимости от площади дефекта и глубины его залегания, которая в нашем эксперименте остаётся неизменной, длительность соударения и амплитуда изменяются. На дефектной области наблюдаются увеличение длительности соударения и падение амплитуды сигнала. Это отчётливо видно по амплитудно-временным характеристикам (АВХ) на экране дефектоскопа ДАМИ-С (рис. 6).

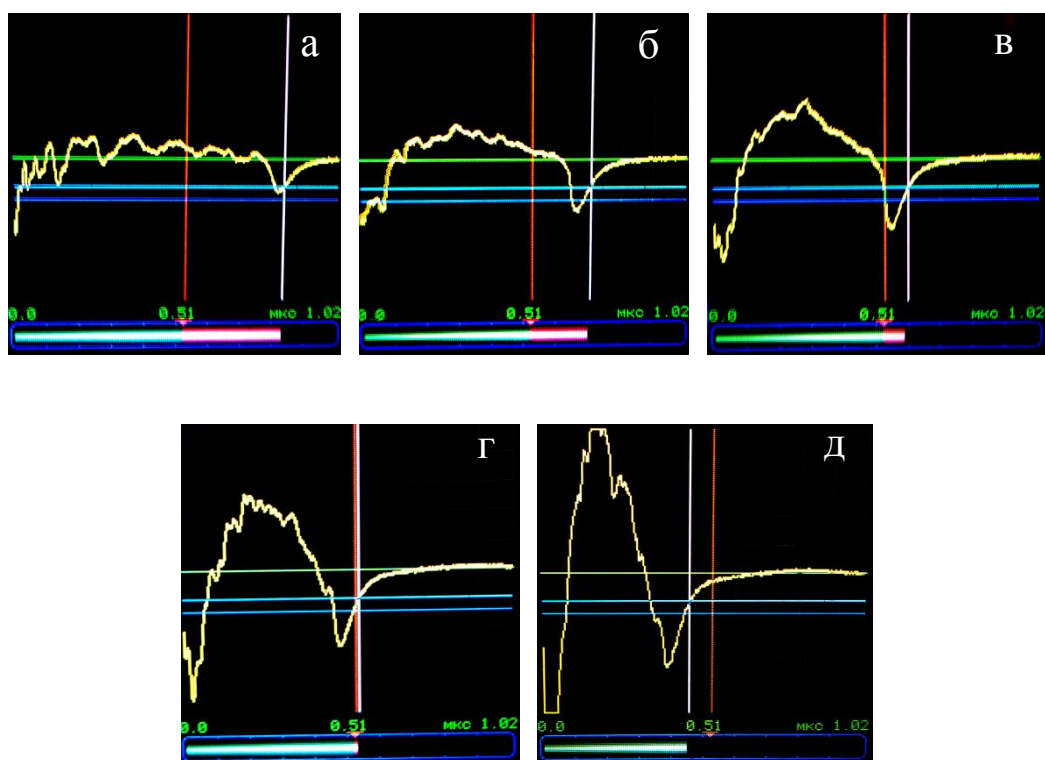


Рис. 6. АВХ для дефектных и бездефектной областей, отображаемые на экране дефектоскопа ДАМИ-С в МСК. Красная линия – порог срабатывания АСД (0,54 мс для исследуемого образца), белая линия – длительность соударения (отличается для каждой области). Имитаторы дефектов: а – IV, б – III, в - II, г - I, д – бездефектная область (АСД не срабатывает).

Подстраивая автоматический сигнализатор дефектов (АСД; регулировка уровня срабатывания АСД осуществляется кнопками на дефектоскопе и устанавливается с точностью до сотых миллисекунды), можно настроиться на выявление дефектов с заданной площадью, тогда дефект с меньшей площадью не обнаруживается. Подтверждается это следующим экспериментом: устанавливается преобразователь в центр IV-го имитатора, повышается порог срабатывания АСД так, чтобы срабатывание происходило только на данном имитаторе дефекта. В результате такой настройки, имитаторы дефектов меньшей площадью дефектоскопом не выявляются. То же повторяется и для других имитаторов дефектов.

Выполняя плоскостное отверстие диаметром 14 мм, предполагается, что имитируется дефект, примерной площадью $1,54 \text{ см}^2$. Однако, при таких настройках АСД на дефектоскопе ДАМИ-С, чтобы срабатывание происходило с наибольшей чувствительностью к данному дефекту (имитация плоскостным отверстием), имитаторы дефектов, выполненные методом занижения, не выявляются. При данной настройке дефектоскопа АСД не срабатывает на I-II типах имитаторов. Срабатывание происходит только на III-IV типах, которые имеют реальные площади (определённые импедансным дефектоскопом) $2,2$ и $3,8 \text{ см}^2$. Это доказывает, что плоскостное отверстие не имитирует дефект необходимой площади. Более того, случайный порядок удаления сот является критичным для сотового заполнителя с большой площадью ячейки, как и предполагалось ранее.

Такой же эксперимент был проведён на остальных имитаторах в виде плоскодонных отверстий, диаметрами 17, 20, 26,5 мм.

Как и в предыдущем случае, образец контролировался импедансным методом дефектоскопом ИД-91М (СП) и МСК дефектоскопом ДАМИ-С с УДП-10-02. Были очерчены контуры выявленных дефектов, выполненных в виде плоскодонных отверстий. В таблице 2 представлены расчётные характеристики дефектов и результаты контроля.

Таблица 2

Диаметры имитаторов дефектов (плоскодонные отверстия), мм	14	17	20	26,5
Площадь плоскодонного отверстия, см ²	1,54	2,27	3,14	5,51
Площадь имитатора дефекта, определённая с помощью импедансного дефектоскопа, см ²	1,73	3,17	3,38	6,45
Имитаторы, выявляемые МСК, выполненные методом занижения, которые находятся при настройках на имитатор дефекта в виде плоскодонного отверстия	III, IV	IV	IV	*

* - при настройке на имитатор в виде плоскодонного отверстия, другие имитаторы, выполненные методом занижения, не выявляются.

Показанные в таблице площади имитаторов дефектов, определённые с помощью импедансного дефектоскопа, подтверждают высокую погрешность в исполнении заданной площади методом имитации плоскодонными отверстиями. Площади двух имитаторов дефектов в виде плоскодонных отверстий 17 и 20 мм близки по значению: 3,17 и 3,38 см². Это связано с тем, что в этих имитаторах случайным образом было удалено сравнимое количество граней сотового заполнителя: 10 и 11.

В имитаторе дефекта в виде плоскодонного отверстия диаметром 14 мм случайным образом было удалено 3 грани сотового заполнителя, что в точности совпало с выполнением II-го имитатора дефектов методом занижения сотового заполнителя. Площади этих имитаторов, определённые импедансным дефектоскопом, также сравнимы: 1,6 и 1,73 см². Это позволило сравнить длительности соударения двух разных типов имитаторов, отличия которых заключались в отсутствии нижней обшивки в плоскодонном отверстии. Сравнение показало, что длительность соударения для имитатора в виде плоскодонного отверстия больше, чем для имитатора методом занижения. Это доказывает, что отсутствие нижней обшивки в имитаторах в виде плоскодонного отверстия в целом влияет на жёсткость конструкции. Соответственно снижается и чувствительность обнаружения дефектов, особенно небольшой площади.

Выводы

1. Экспериментально показаны преимущества нового метода занижения сотового заполнителя перед аналогом - методом имитации плоскодонными

отверстиями. Доказано, что плоскодонное отверстие не имитирует дефект с необходимой площадью для многослойных конструкций с сотовым наполнителем с крупной ячейкой (длина грани более 5 мм). Случайное удаление сотового наполнителя в этом методе имитации является критичным – отсутствует воспроизводимость выполнения имитаторов с необходимой площадью.

2. Доказано, что отсутствие нижней обшивки в имитаторах в виде плоскодонного отверстия в целом влияет на жёсткость конструкции, что является ещё одним недостатком этого метода.

3. Рассмотренный в работе метод занижения сотового наполнителя позволяет имитировать дефекты со строго нормированной площадью. При этом любую площадь имитатора дефекта задать невозможно. Из-за сотовой структуры наполнителя площадь имитируемого дефекта изменяется дискретно. Также метод позволяет проводить двусторонний контроль, используя только один имитатор дефекта. Разработан и изготовлен образец с имитаторами дефектов разных типов и площадей, который не имеет естественных дефектов.

4. В рассмотренном образце с увеличением количества заниженных ячеек сотового наполнителя, площадь имитатора дефекта, выявленного при контроле импедансным методом, приравнивается к площади, вписанной в дефект окружности.

5. Метод занижения следует внедрять при проектировании РСО для изделий с крупными ячейками сотового наполнителя, а также комбинировать

различные методы имитации в зависимости от особенностей конструкций, требований к качеству изделий.

Библиографический список

1. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. - М.: Машиностроение, 1991. - 272 с.
2. Егоров В.Н., Бахтин А.Г., Добромыслов В.А. и др. Методы неразрушающего контроля сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 1999. № 6. С. 24 – 28.
3. Мурашов В.В. Исследование характеристик акустического метода свободных колебаний // Контроль. Диагностика. 2017. № 3. С. 4 - 10.
4. Мурашов В.В., Яковлева С.И. Применение акустического метода свободных колебаний для контроля конструкций, содержащих слои из неметаллических материалов // Контроль. Диагностика. 2017. № 10. С. 28 - 35.
5. Ланге Ю.В., Воропаев С.И., Мужичкий В.Ф., Нефедов С.В. Спектры импульсных сигналов преобразователей низкочастотных акустических дефектоскопов // Дефектоскопия. 1996. № 5. С. 9 – 19.
6. Ланге Ю.В., Мужичкий В.Ф., Нефедов С.В. О работе преобразователей низкочастотных акустических дефектоскопов со спектральной обработкой информации // Дефектоскопия. 1999. № 1. С. 55 – 64.

7. Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юргенсон С.А. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: http://trudymai.ru/published.php?ID=28061&PAGEN_2=2
8. Русаков Д.Ю., Скоморохов А.О. Анализ результатов теплового неразрушающего контроля изделий из полимерных композиционных материалов // XXI Международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов». Тезисы докладов. Обнинск, Калужская область, 5-7 октября 2016. С. 133 - 134.
9. Русаков Д.Ю., Скоморохов А.О. Автоматизация анализа термографических изображений при диагностике состояния сотовых конструкций // XIII Международная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики». Тезисы докладов. Обнинск, Калужская область, 27-30 ноября 2017, С. 195 – 197.
10. Русаков Д.Ю., Скоморохов А.О. Робастный метод оценки скоростей нагрева при активном тепловом контроле композиционных материалов // VI Международная молодежная научная школа-конференция, посвященная 75-летию НИЯУ МИФИ и 95-летию академика Н.Г. Басова «Современные проблемы физики и технологий». Тезисы докладов. Москва, 17-21 апреля 2017, С. 291 - 292.
11. Rusakov D.Y., Skomorohov A.O. Automation of analysis of thermographic images in diagnostics of honeycomb core structure states // Knowledge E Life Sciences, Dec. 2017, pp. 350 - 356.

12. Gryzagoridis J., Findeis D. Tap testing of composites benchmarked with digital shearography // *Insight*, 2014, vol. 56, no. 1, pp. 35 - 38.
13. Gryzagoridis J., Findeis D. Tap testing vs. Thermography // Mechanical Engineering Department, University of Cape Town, 10-13 July 2018. URL: http://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/1_Gryzagoridis.pdf
14. Wu H., Siegel M. Correlation of Accelerometer and Microphone Data in the “Coin Tap Test” // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, vol. 49, issue 3, pp. 493 – 497.
15. Kim S.J., Kim T.U. Damage detection in sandwich structure using tap test // 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Hamburg, Germany, 21-24 August 2016, pp. 4299 - 4303.
16. Cawley P., Adams R.D. The Mechanics of the Coin-Tap Method of Non-Destructive Testing // *Journal of Sound and Vibration*, 1988, vol. 122, pp. 299 - 316.
17. Cawley P., Adams R.D. Sensitivity of the Coin-Tap Method of Non-Destructive Testing // *Materials Evaluation*, 1989, vol. 47, pp. 558 - 563.
18. Cawley P. High Frequency Coin-Tap Method Of Non-Destructive Testing // *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1991, no. 5(1), pp. 1 - 11.
19. Cheng C., Sansalone M. The impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies // *Materials and Structures*, 1993, no. 26, pp. 274 - 285.
20. Pratt D., Sansalone M. Impact-echo signal interpretation using artificial intelligence // *ACI Materials Journal*, 1992, vol. 89, no. 2, pp. 178 - 187.