

05;06;15

Идентификация дефектов в слоистых композитах с помощью импульсного вихретокового метода

© А.М. Кокуров^{1,2}, Д.С. Малушин^{3,4}, Б.А. Чичигин⁴, Д.Е. Субботин¹, А.О. Кузнецов^{4,5}¹ ПАО „Туполев“, Москва, Россия² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия³ ИНПЦ „Средства неразрушающего контроля“, МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия⁴ Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия⁵ АО „ЦНИИСМ“, Хотьково, Россия

E-mail: and-kokurov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 4 июня 2020 г.

В окончательной редакции 30 июля 2020 г.

Принято к публикации 30 июля 2020 г.

Продemonстрирована практическая возможность определения размера области расслоения и глубины его расположения в неметаллических многослойных слабопроводящих материалах с помощью уникального импульсного вихретокового оборудования. Работоспособность и эффективность применения разработанных методик и технических решений подтверждаются результатами экспериментальных исследований, проведенных на образцах из углепластика с искусственно созданными дефектами в виде расслоений различных размеров и форм.

Ключевые слова: импульсный вихретоковый метод, дефект, повреждение, слоистый композитный материал, углеволокно.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.22.50301.18410

Общие тенденции развития промышленного производства характеризуются возрастающей потребностью применения многослойных композитных материалов (КМ), которые уже получили широкое распространение в машиностроении, в частности в авиационной и космической промышленности [1]. В процессе производства или эксплуатации изделий из слоистых КМ в толще материала нередко возникают локальные структурные нарушения различных видов, наиболее опасными из которых являются непрочности, расслоения и расщепления. Нарушение связи слоев композитного материала, а также их частичное разрушение способны привести к резкому снижению прочностных характеристик конструкции [2]. Для корректной оценки поведения поврежденного изделия из КМ под нагрузкой необходимо выполнение комплексного экспериментально-расчетного исследования, неотъемлемой частью которого является точное и достоверное определение истинных границ дефектов, их площадей и расположения по толщине композитного пакета.

Для решения задач диагностики композитных элементов конструкций активно применяются различные методы неразрушающего контроля, в том числе и вновь разработанные. В частности, интенсивно развиваются такие методы диагностики, как, например, оптическая интерферометрия (голография, широграния, электронная и цифровая спекл-интерферометрия) [3]. В то же время классические методики неразрушающего контроля используются для решения этих задач чаще [4]. Несмотря на это, опыт проведения диагностики конструкций из КМ позволяет утверждать, что применения какого-либо

отдельного метода недостаточно для получения информации в объеме, необходимом для уверенного определения всех перечисленных геометрических параметров дефекта.

Широко распространенные методики акустического контроля позволяют определить глубину и размер расслоения, однако их применение связано с рядом трудностей, например с контролем приповерхностных областей изделия (из-за наличия области нечувствительности преобразователя), относительно низкой пороговой чувствительностью измерительного тракта, необходимостью подготовки поверхности контролируемого изделия и др. [4]. Радиационные методы позволяют определять точные границы расслоения даже в объектах сложной формы, но тем не менее узкий динамический диапазон измерительных систем ограничивает чувствительность оборудования к тонким расслоениям.

Подобных недостатков лишены вихретоковые методы. Однако для проведения диагностики изделий из слабопроводящих материалов необходимо применение специальных высокочувствительных измерительных систем с дифференциальными преобразователями. Ключевые особенности работы одной из них и результат ее применения представлены в настоящей публикации.

Цель исследования состояла в отработке методики идентификации дефектов, уточнении области ее применения и оценке точности определения локализации дефектов. Для оценки эффективности использования разработанной методики и подтверждения работоспособности технических компонентов и системы сканирования в целом была решена задача нахождения

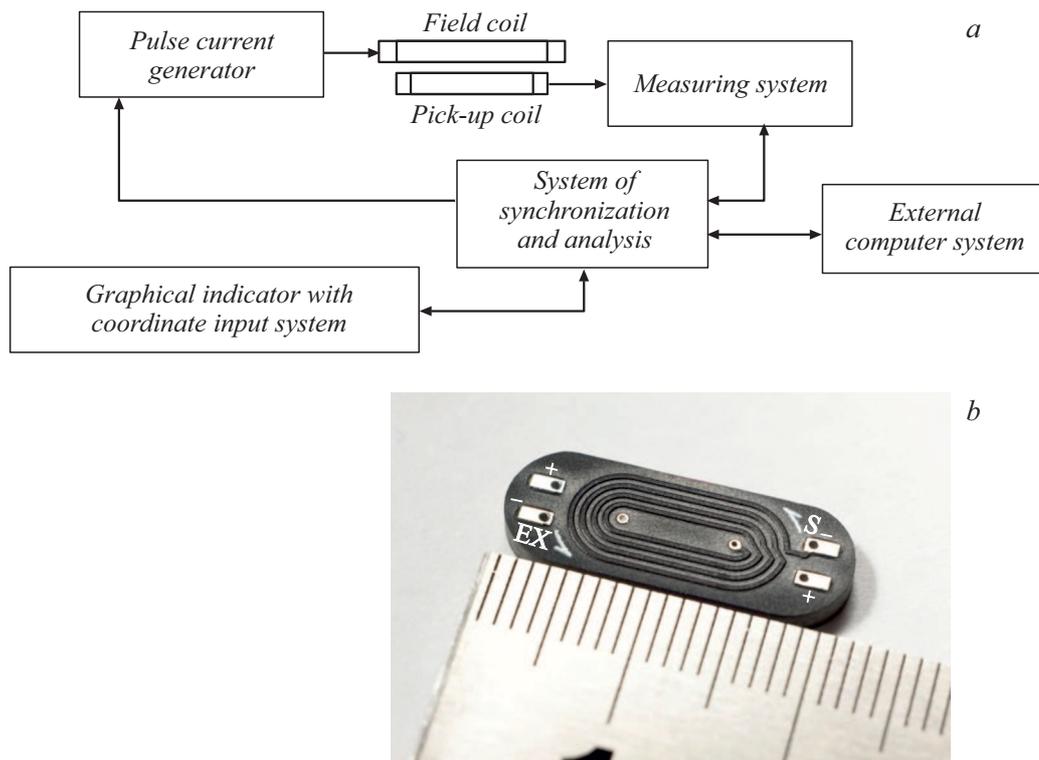


Рис. 1. Система импульсного вихретокового контроля слоистых композитов. *a* — функциональная схема взаимодействия блока анализа вихретоковых сигналов и системы возбуждения электромагнитного поля, *b* — плоский дифференциальный накладной вихретоковый датчик.

геометрических характеристик дефектов произвольной формы в слоистых композитных материалах. Данная информация необходима для проведения дальнейшего анализа характера их развития при воздействии механических нагрузок. В качестве основного диагностического инструмента было использовано оборудование, разработанное в ходе реализации исследования, описанного в [5].

Основные функциональные узлы системы вихретокового контроля, используемой для проведения экспериментальных исследований, представлены импульсным генератором напряжения, плоскими вихретоковыми преобразователями накладного типа и системой измерения, синхронизации и анализа (рис. 1, *a*). Возбуждающий генератор состоит из нескольких самостоятельных синхронизированных блоков, позволяющих за счет формирования на выводах возбуждающей катушки напряжения специальной формы значительно сократить длительность фронта импульса тока возбуждения в преобразователе. Это позволяет существенно снизить начальную глубину проникновения вихревых токов в объект, что имеет большое значение для эффективного контроля слабопроводящих материалов [6].

В связи с низкой электропроводностью композитного материала для повышения чувствительности измерительного тракта была разработана система измерительных преобразователей, обладающая высоким коэффи-

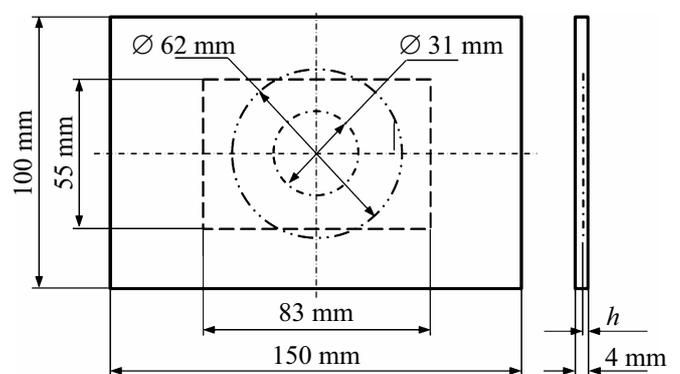


Рис. 2. Размеры объектов исследования с имитаторами внутренних дефектов различной формы.

циентом балансировки (более 80 dB). Для повышения уровня дискретизации сигналов переходный процесс в объекте был замедлен путем увеличения эффективного радиуса возбуждающей катушки. Вызванное этим снижение пространственного разрешения вихретокового датчика было скомпенсировано корректировкой формы возбуждающих и измерительных катушек (рис. 1, *b*). Разрешающая способность представленного датчика определяется шириной его короткой стороны.

Демонстрационные объекты (рис. 2) представляют собой углепластиковые пластины размером

Геометрические характеристики дефектов в образцах

Номер образца	Форма и размеры дефекта	Глубина залегания дефекта h , mm
1	Круг, \varnothing 31 mm	0.678
2	Круг, \varnothing 62 mm	0.678
3	Круг, \varnothing 62 mm	1.356
4	Прямоугольник, 55 × 83 mm	0.678

150 × 100 × 4.068 mm. При производстве образцов в односвязную область между парой соседних слоев в пакете были добавлены различные по форме и расположению имитаторы дефектов (см. таблицу), выполненные из фторопластовой пленки толщиной 0.12 mm. Она обладает схожими электрофизическими свойствами с транспортировочной пленкой, применяемой для защиты препрегов на соответствующей технологической стадии.

На представленных образцах был выполнен ряд лабораторных исследований, направленных на определение формы дефекта и оценки глубины его расположения. На каждый из образцов была предварительно нанесена контрастная маркировка, позволяющая определять точное положение каждого датчика. В процессе сканирования один из преобразователей находился над бездефектным участком образца с номинальными параметрами, а другой свободно перемещался над исследуемым участком. Исследование структуры каждого образца начиналось с регистрации исходного нескомпенсированного напряжения дифференциальной системы датчиков. Для этого оба датчика размещались над бездефектными участками объекта слева и справа. При этом геометрические особенности датчиков и их положение на поверхности объекта исключали влияние его кромок на амплитудно-временное распределение регистрируемого начального напряжения.

В процессе сканирования подвижный датчик смещался вдоль длинной стороны образца по направлению к его геометрическому центру (соответствующему отметке 75 mm) с шагом 5 mm. На каждом шаге выполнялась регистрация значения дифференциального напряжения и положения датчика. По измерениям сигнала с учетом фиксируемых координат положения датчика были восстановлены диаграммы электромагнитного отклика продольных срезов образца. На рис. 3 на примере образца № 2 показаны характерные данные сканирования и результаты их последующей обработки.

Кусочно-линейные зависимости характеризуют пространственное распределение нормированных по максимуму амплитуд дифференциального сигнала вдоль одной (длинной) стороны каждого образца.

На каждой из четырех диаграмм определены реальные границы имитатора дефекта в продольном срезе (показаны штрихпунктиром с двумя точками на рис. 3, *a*). Как видно из рисунка, при приближении датчика к дефекту амплитуда дифференциального сигнала нелинейно

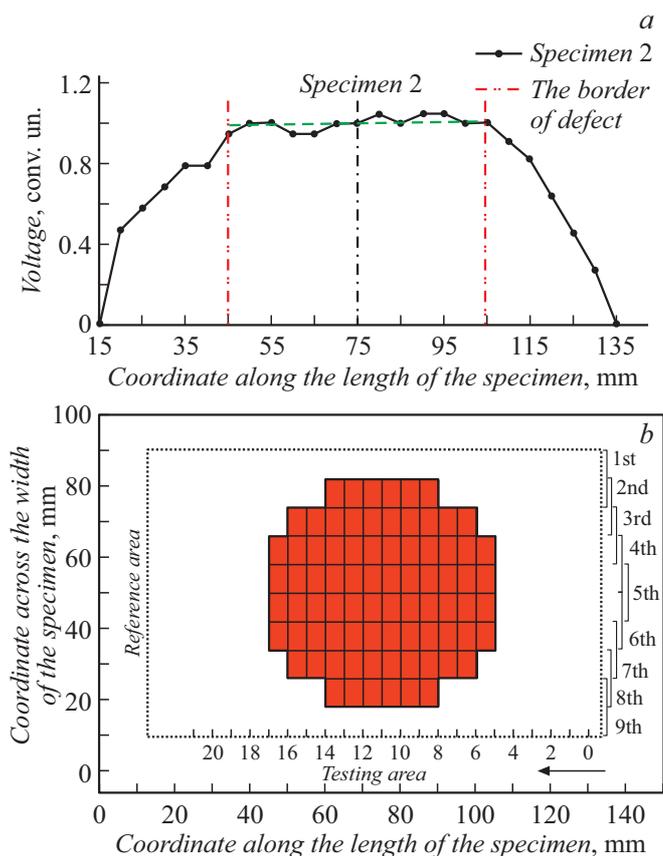


Рис. 3. Результаты исследования образца № 2. *a* — экспериментальная зависимость величины дифференциального напряжения от координаты положения датчика при продольном сканировании образца, *b* — условное обозначение геометрической формы дефекта, восстановленной по результатам сканирования на поле контрастной маркировки.

возрастает, а при его заходе на дефект практически не претерпевает изменений. При этом образуется плато (штриховая линия на рис. 3, *a*), соответствующее максимальному значению напряжения. Расположение реальных границ дефекта соответствует фазе изменения характера нарастания дифференциального напряжения на его пространственном распределении.

После проведения нескольких продольных сканирований со смещением, равным половине большего радиуса возбуждающей катушки датчика, были восстановлены изображения областей дефектов (рис. 3, *b*). Точность

определения их границ зависит от размера возбуждающей секции вихретокового датчика. Для преобразователя, применяемого в экспериментах, этот параметр равен 1.5 mm.

При проведении сканирования образцов № 2 и 3, различающихся глубиной расположения дефекта, максимум дифференциального сигнала, полученного от более глубокого дефекта, смещается вправо по оси времени. Поэтому для определения значения глубины расслоения применима методика, описанная в [5].

В ходе проведенной работы с приемлемой достоверностью были определены геометрические характеристики имитаторов дефектов композитного пакета, имеющих различные формы и размеры. Результаты экспериментальных исследований также демонстрируют возможность нахождения расстояния от поверхности объекта контроля до дефекта.

Полученные по разработанной методике данные могут быть использованы при решении задач, направленных на установление законов и характера роста локальных нарушений сплошности структуры композитного материала при воздействии механической нагрузки. В данной постановке вихретоковый метод позволяет определять несколько ключевых параметров расслоения в объекте контроля: форму и периметр границы дефекта, его площадь и расположение по толщине композитного пакета.

Результаты апробирования методики в конкретных технических решениях позволяют рекомендовать ее в качестве диагностического инструмента при реализации многопараметровой идентификации различных структурных нарушений в новых слоистых слабопроводящих неметаллических композитных материалах различного промышленного назначения.

Финансирование работы

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 18-08-00372 А).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Arif M., Asif M., Ahmed I.* // Int. J. Eng. Manufactur. Sci. 2017. V. 7. N 2. P. 393–409.
- [2] *Беспалов В.А., Петрова Е.С.* Исследование прочности и механизмов разрушения элементов конструкции летательного аппарата из композиционных материалов // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности. Материалы X Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Барнаул: АлтГТУ, 2017. С. 227–229.
- [3] *Zhao Q., Dan X., Sun F., Wang Y., Wu S., Yang L.* // Appl. Sci. 2018. V. 8. N 12. P. 2662.

- [4] *Wronkowicz-Katunin A., Mihaylov G., Dragan K., Timofiejczuk A.* // J. Nondestruct. Eval. 2019. V. 38. N 3. P. 82 (1–20). <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0622-5>
- [5] *Малушин Д.С.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 15. С. 17–20.
- [6] *Shkatov P.N., Didin G.A., Subbotin D.E., Kokurov A.M.* // Mater. Sci. Forum. 2019. V. 970. P. 305–313.