

Научная статья

УДК 678.8:620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-98-109

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ГЛУБИНЫ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

С.С. Пичугин¹, С.И. Яковлева¹, В.В. Кулаков², М.А. Измайлов², А.П. Королев²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Публичное акционерное общество «Авиационная корпорация «Рубин», Балашиха, Московская область, Россия; info@acrubin.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность оценки специфических дефектов, возникающих в углерод-углеродных композиционных материалах, вихретоковым методом неразрушающего контроля. С помощью разработанной математической модели распределения электромагнитных полей проанализировано влияние ряда параметров на оценку глубины дефектов: диаметр абсолютного трансформаторного накладного вихретокового преобразователя, частота возбуждающего тока и ориентация дефектов относительно поверхности. Определена чувствительность при оценке глубины дефекта для разных значений частоты возбуждающего тока и диаметра преобразователя. Возможность оценки крупных дефектов подтверждена результатами испытаний на образце-имитаторе с пропилами разной глубины из углерод-углеродного композиционного материала.

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, вихретоковый контроль, оценка глубины, накладной вихретоковый преобразователь, математическое моделирование

Для цитирования: Пичугин С.С., Яковлева С.И., Кулаков В.В., Измайлов М.А., Королев А.П. Выбор параметров вихретокового контроля при оценке глубины дефектов, возникающих в углерод-углеродных композиционных материалах // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-98-109.

Scientific article

SELECTION OF EDDY CURRENT TESTING PARAMETERS DURING THE ESTIMATION OF DEFECTS' DEPTH IN CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS

S.S. Pichugin¹, S.I. Yakovleva¹, V.V. Kulakov², M.A. Izmailov², A.P. Korolev²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Public Joint Stock Company «Rubin Aviation Corporation», Balashikha, Moscow region, Russia; info@acrubin.ru

Abstract. The article treats the possibility of estimation of specific defects occurring in carbon-carbon composite materials by eddy current method of nondestructive testing. With the help of the developed mathematical model of electromagnetic field distribution, there has been analyzed the influence of the range of parameters on the estimation of the defects' depth including the diameter of the absolute transformer overhead eddy current converter and the frequency of the excitation current on the estimation of the depth of such defects, as well as the influence of the defect orientation relative to the surface. The article analyzes sensitivity of defect depth estimation for different values of excitation current frequency and transducer

diameter. The possibility of large defects estimation is confirmed by means of tests on specimens-simulators with kerfs of different depth made of carbon-carbon material.

Keywords: carbon-carbon composite material, eddy current testing, depth estimation, surface eddy current probe, mathematical modeling

For citation: Pichugin S.S., Yakovleva S.I., Kulakov V.V., Izmailov M.A., Korolev A.P. Selection of eddy current testing parameters during the estimation of defects' depth in carbon-carbon composite materials. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-98-109.

Введение

Тормозные системы имеют ключевое значение для обеспечения безопасности транспортных средств, в том числе в авиастроении. Они должны обеспечивать надежную работу в различных условиях, включая высокую температуру, влажность и механические нагрузки. Для достижения этих целей используются специальные фрикционные материалы, которые обладают высокой износостойкостью, необходимыми теплопроводностью и коэффициентом трения, обеспечивают эффективное торможение в различных условиях эксплуатации.

Примером таких материалов служат углерод-углеродные фрикционные материалы (УУФМ), которые могут быть адаптированы под конкретные условия эксплуатации и имеют улучшенные характеристики по сравнению с традиционными материалами на основе керамики и металлов [1–4]. Основными компонентами УУФМ являются углеродные волокна и матрицы на основе синтетических полимеров, пеков и пиролитического углерода. В зависимости от используемого сырья и технологии изготовления УУФМ могут существенно различаться как по схемам армирования, так и по макро- и микроструктуре матрицы, что позволяет создавать материалы с необходимыми эксплуатационными характеристиками [5, 6]. Процесс производства УУФМ многостадийный, включает ряд технологических этапов, таких как подготовка и совмещение компонентов, формование и высокотемпературные обработки для осуществления процессов карбонизации, уплотнения и графитации [7–10].

Контроль продукции после механической и чистовой обработки является важным этапом производства, который позволяет убедиться, что детали соответствуют требуемым допустимым параметрам дефектности и обладают необходимыми свойствами. Контроль может включать различные методы, в том числе визуальный осмотр, определение размеров, проверку на прочность и др. В зависимости от типа и области применения УУФМ могут использоваться специализированные испытания, такие как испытания на усталость, ударные, гидравлические и т. д.

Дефектами заготовок изделий из УУФМ на разных технологических этапах производства являются пористость, расслоения, трещины, выкрашивания. Внедрение неразрушающего контроля на промежуточных стадиях до финальной механической обработки позволит снизить затраты, вызванные браковкой готовой детали из-за дефектов, вышедших на поверхность и вызвавших отклонение по геометрическим параметрам [11–13].

Материалы и методы

Для деталей, изготовленных из УУФМ, помимо расслоений, характерны специфические дефекты в виде уплотнений, которые сопровождаются «потемнением» на поверхности изделия. Специфика таких дефектов заключается в том, что они не всегда связаны с несплошностью, т. е. потемнения могут быть вызваны особенностью материала. На рис. 1 представлена поверхность изделия с несплошностью, значительная глубина которой подтверждена результатами рентгеновской компьютерной томографии. Данная заготовка не соответствовала требованиям нормативной документации по

величине плотности. На рис. 2 представлена поверхность изделия с «потемнением» без несплошности.

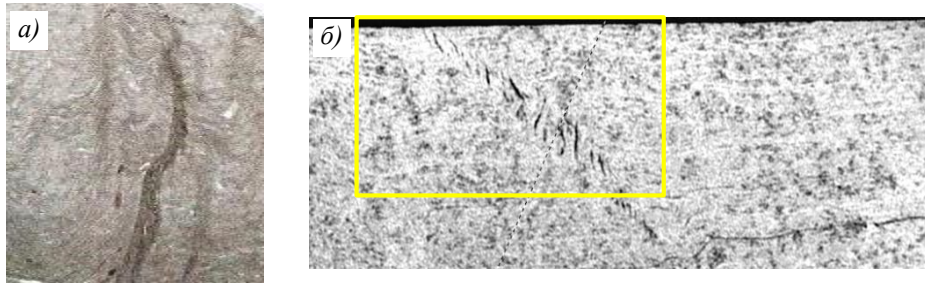


Рис. 1. Несплошность на поверхности изделия (а) и рентгеновская компьютерная томограмма с определением глубины дефекта (б). Цветом выделена область несплошности

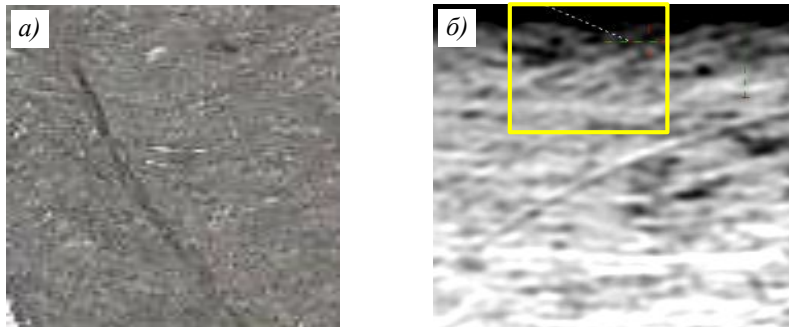


Рис. 2. «Потемнение» на поверхности (а) и рентгеновская компьютерная томограмма, подтверждающая отсутствие несплошности (б). Цветом выделена область «потемнения»

Попадание подобных несплошностей в чистовой контур готовой детали недопустимо, в связи с этим задача оценки их линейной глубины является актуальной. На рис. 3 показан фрагмент образца с несплошностью глубиной t , которую требуется оценить.

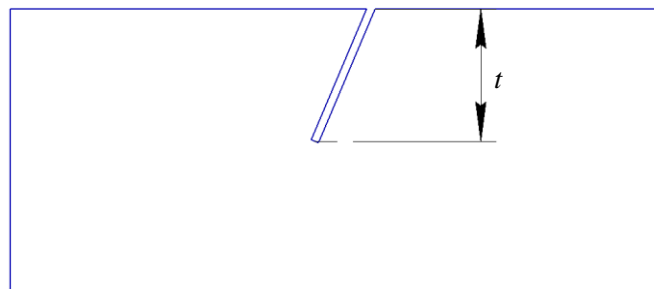


Рис. 3. Фрагмент образца с несплошностью глубиной t , которую требуется оценить

Поскольку УУФМ являются электропроводящими, а подобные дефекты поверхностные, их оценка возможна вихретоковым методом неразрушающего контроля [14].

Вихретоковый метод основывается на использовании электромагнитных полей для обнаружения дефектов и измерения характеристик материала [15, 16]. Приближение вихретокового преобразователя к электропроводящему материалу приводит к возникновению в нем вихревых токов. Наличие дефектов влияет на направление и интенсивность вихревых токов, вызывая изменение напряжения измерительной катушки преобразователя. Данный метод чувствителен к дефектам типа «трещина» и широко применяется для измерения их параметров, в том числе для материалов с низкой электропроводностью.

Дефекты глубиной >10 мм обычно затруднительно оценить с помощью вихретокового метода неразрушающего контроля, так как глубина проникновения вихревых токов ограничивается электропроводимостью материала σ . Глубину проникновения δ можно определить по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu_a \sigma f}},$$

где σ – удельная электропроводимость, См/м; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м; f – частота возбуждающего тока, Гц.

Однако электропроводимость УУФМ мала [17], поэтому оценка дефектов глубиной >10 мм теоретически возможна. В данной работе анализируется возможность применения вихретокового метода неразрушающего контроля для оценки глубины несплошностей, возникающих в УУФМ.

Сигнал, регистрируемый вихретоковым дефектоскопом при перемещении преобразователя над дефектом, зависит от многих факторов: частоты возбуждающего тока, диаметра вихретокового преобразователя, зазора, геометрических параметров и ориентации дефекта относительно преобразователя и т. п. [16–19]. Для анализа возможности оценки глубины дефекта и влияния различных параметров систем контроля разработана конечно-элементная модель распределения электромагнитных полей в зоне контроля [19, 20]. В качестве вихретокового датчика в модели применяли абсолютный трансформаторный накладной преобразователь, дефект (трещина) ориентирован перпендикулярно поверхности образца. Требуемыми свойствами при моделировании являются магнитная проницаемость и электропроводимость материала. УУФМ является немагнитным, электропроводимость фрагмента исследуемого образца оценена с помощью вихретокового метода в диапазоне от 70 до 100 кСм/м в зависимости от участка контроля.

По итогам численного моделирования получены зависимости относительного изменения сигнала вихретокового преобразователя от глубины дефекта. Зависимости построены относительно максимальной глубины дефекта (28 мм). Возможность оценки глубины определяется наклоном зависимости относительного изменения сигнала (производной приращения) от размера дефекта.

На рис. 4 представлены зависимости относительного изменения сигнала преобразователя диаметром 8 мм от глубины дефекта для разных значений частоты возбуждающего тока, а также наклон зависимости, по которому определяется возможность оценки глубины.

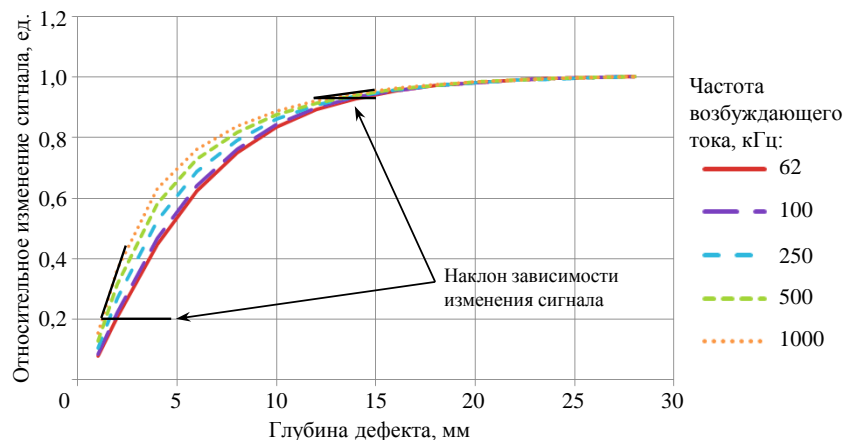


Рис. 4. Зависимости относительного изменения сигнала преобразователя диаметром 8 мм от глубины дефекта для разных частот возбуждающего тока

При частоте возбуждающего тока 1 МГц и глубине дефекта >15 мм наклон зависимости напряжения существенно сокращается. С уменьшением частоты возбуждающего тока производная приращения напряжения снижается при больших значениях глубины дефекта. Незначительное влияние частоты возбуждающего тока на сигнал вызвано низкой проводимостью материала. В металлах влияние частоты будет значительнее, однако максимально возможная глубина оценки дефекта существенно уменьшится [19]. Проанализировав результаты, представленные на рис. 4, можно сделать вывод, что для оценки дефектов требуется уменьшение частоты. Однако вихретоковые преобразователи с небольшим диаметром работают только в диапазоне высоких частот.

На рис. 5 показаны зависимости относительного изменения сигнала преобразователя с разными диаметрами от глубины дефекта при частоте возбуждающего тока 500 кГц.

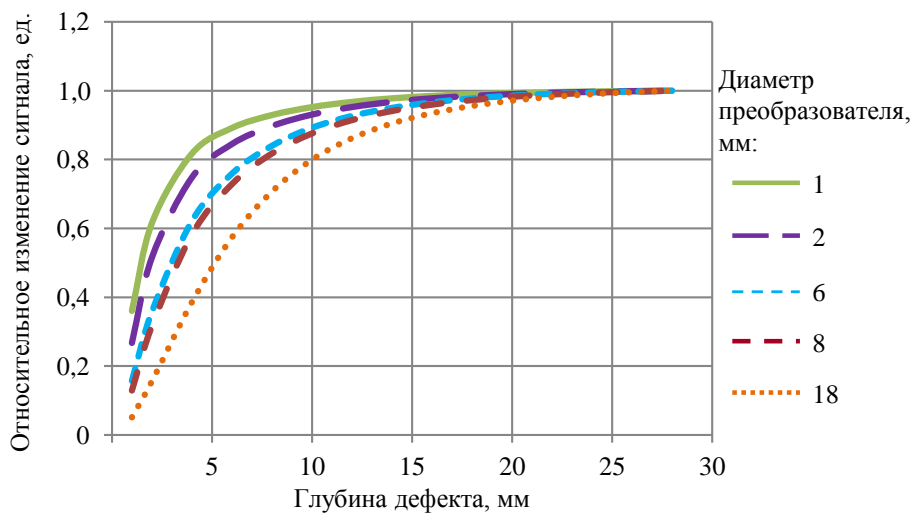


Рис. 5. Зависимости относительного изменения сигнала преобразователя с разными диаметрами от глубины дефекта при частоте возбуждающего тока 500 кГц

При оценке глубины дефекта преобразователем диаметром 1 мм производная приращения напряжения снижается при глубине дефекта >5 мм. С увеличением диаметра преобразователя наклон зависимости уменьшается при больших значениях глубины, следовательно, чем больше диаметр преобразователя, тем большую глубину дефекта возможно оценить.

Для объективного анализа влияния частоты возбуждающего тока и диаметра вихретокового преобразователя требуется оценить чувствительность к изменению глубины дефекта. Чувствительность рассчитывали по формуле

$$S = \frac{dU}{dt},$$

где S – чувствительность, ед.; U – относительное изменение сигнала, ед.; t – глубина дефекта, мм.

На рис. 6 показаны зависимости чувствительности преобразователя с разными диаметрами от глубины дефекта при частоте возбуждающего тока 500 кГц.

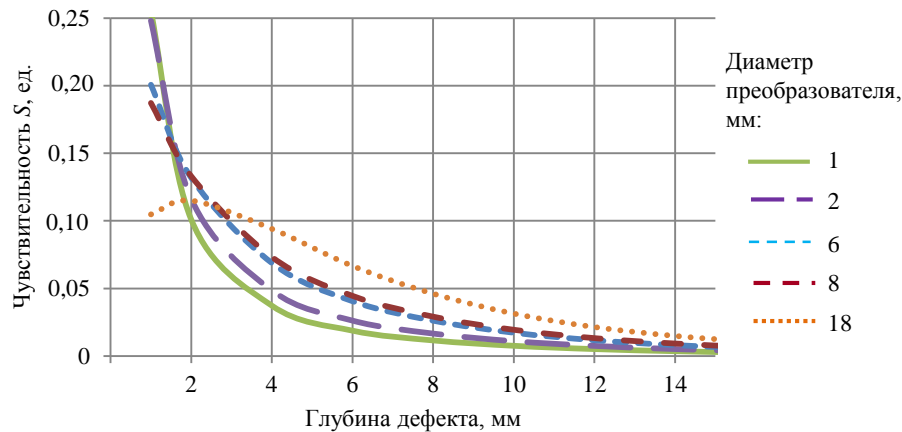


Рис. 6. Зависимости чувствительности преобразователя с разными диаметрами от глубины дефекта при частоте возбуждающего тока 500 кГц

С увеличением диаметра преобразователя повышается чувствительность к оценке более глубоких дефектов, однако уменьшается чувствительность к обнаружению и оценке небольших дефектов. При небольшом диаметре преобразователя увеличивается чувствительность к небольшим дефектам, однако оценка размеров большой глубины становится невозможна.

На рис. 7 показаны зависимости чувствительности преобразователя диаметром 8 мм от глубины дефекта при разных частотах возбуждающего тока.

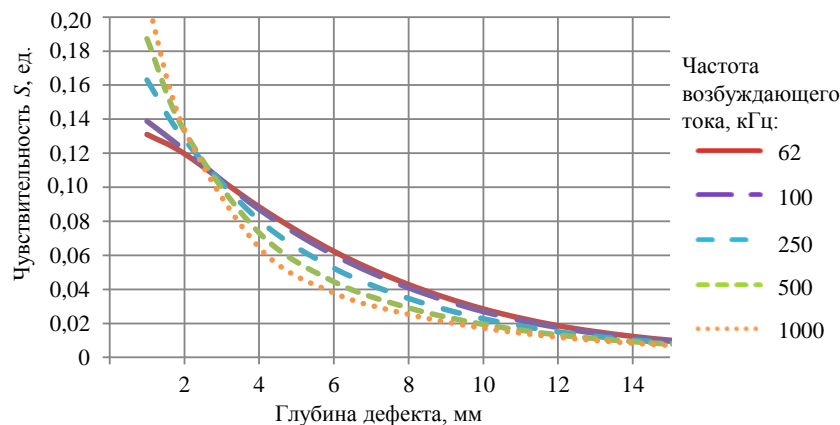


Рис. 7. Зависимости чувствительности преобразователя диаметром 8 мм от глубины дефекта при разных частотах возбуждающего тока

С уменьшением частоты преобразователя увеличивается чувствительность к оценке глубины больших дефектов, однако уменьшается возможность обнаружения и оценки дефектов малых размеров. Обратная картина зафиксирована при увеличении частоты возбуждающего тока: повышается чувствительность к обнаружению и оценке неглубоких дефектов, однако уменьшается чувствительность при оценке крупных дефектов.

Дефекты естественного происхождения отличаются от смоделированных углом наклона γ относительно поверхности образца (естественный дефект показан на рис. 1), что предположительно может сильно изменить сигнал преобразователя и привести к неправильной оценке глубины дефекта. На рис. 8 продемонстрированы угол наклона γ

и линейная глубина дефекта t , которая оценивается в данной работе. Для анализа влияния угла наклона дефекта в модели скорректирован угол γ . Зависимости сигнала преобразователя от угла наклона дефекта представлены на рис. 9. Данные определяли с помощью преобразователя диаметром 8 мм при частоте возбуждающего тока 500 кГц для дефектов линейной глубины 4, 6, 8 и 10 мм относительно дефекта, направленного под углом $\gamma = 90$ градусов.

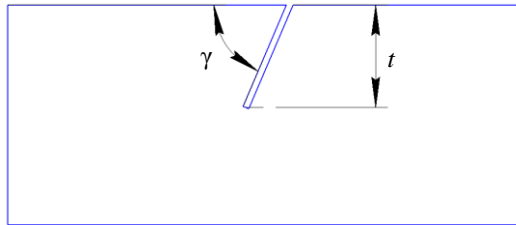


Рис. 8. Угол наклона дефекта γ с линейной глубиной t

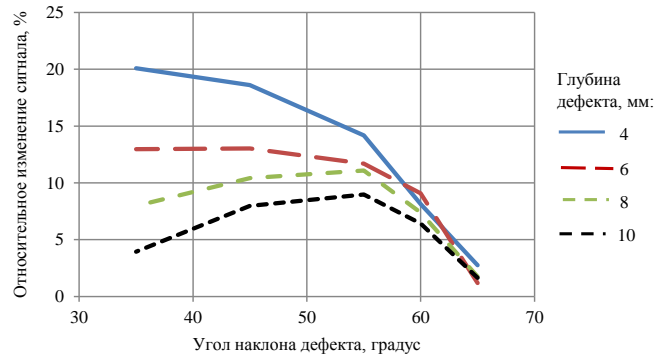


Рис. 9. Зависимости относительного изменения сигнала преобразователя диаметром 8 мм от угла наклона дефектов разной глубины при частоте возбуждающего тока 500 кГц

Сигнал от преобразователя при критическом значении угла наклона $\gamma = 35$ градусов и линейной глубине дефекта $t = 4$ мм изменяется не более чем на 20 % относительно дефекта, перпендикулярного поверхности. При этом с увеличением линейной глубины дефекта этот показатель уменьшается: при глубине дефекта 10 мм максимальное изменение сигнала не превысило 9 % (при $\gamma = 55$ градусов). Таким образом, при расчете глубины естественного дефекта установлено незначительное влияние угла наклона дефекта, что в свою очередь позволяет калибровать показания на образцах-имитаторах с дефектами, перпендикулярными поверхности.

Из результатов моделирования следует:

- удельная электропроводимость УУФМ достаточна для оценки дефектов;
- из-за низкой электропроводимости УУФМ возможна оценка глубины крупных дефектов;
- чем больше диаметр преобразователя, тем больше будет сигнал, по которому возможна оценка глубины дефекта;
- при увеличении частоты возбуждающего тока уменьшается глубина проникновения вихревых токов в материал, в результате повышается чувствительность к выявлению и оценке небольших дефектов, но оценка глубины больших дефектов становится невозможной;
- угол наклона дефекта оказывает незначительное влияние на оценку линейной глубины.

Результаты и обсуждение

Для подтверждения результатов математического моделирования при оценке глубины дефектов в УУФМ проведены испытания на образце-имитаторе, выполненном из УУФМ, с дефектами разной глубины. Искусственные дефекты № 1–4 выполнены в форме пропила глубиной 5, 10, 15 и 20 мм соответственно, раскрытие не превышает 0,4 мм (рис. 10).

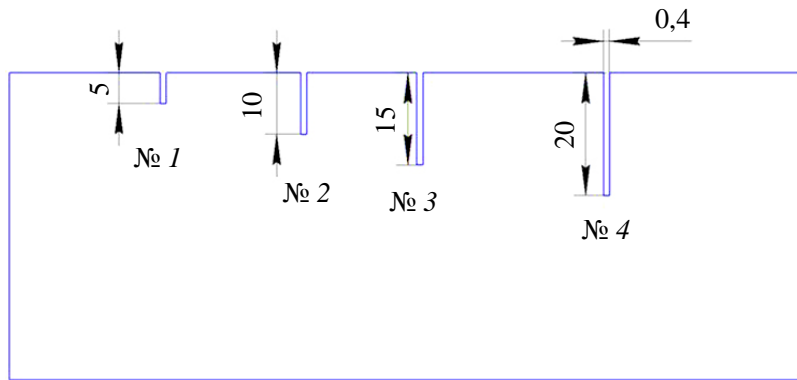


Рис. 10. Искусственные дефекты № 1–4 разной глубины

Опробование проводили с использованием вихретокового преобразователя диаметром 5 мм. После отстройки от мешающих факторов [20] выполнено сканирование участков с пропилами, результаты которого представлены на рис. 11.

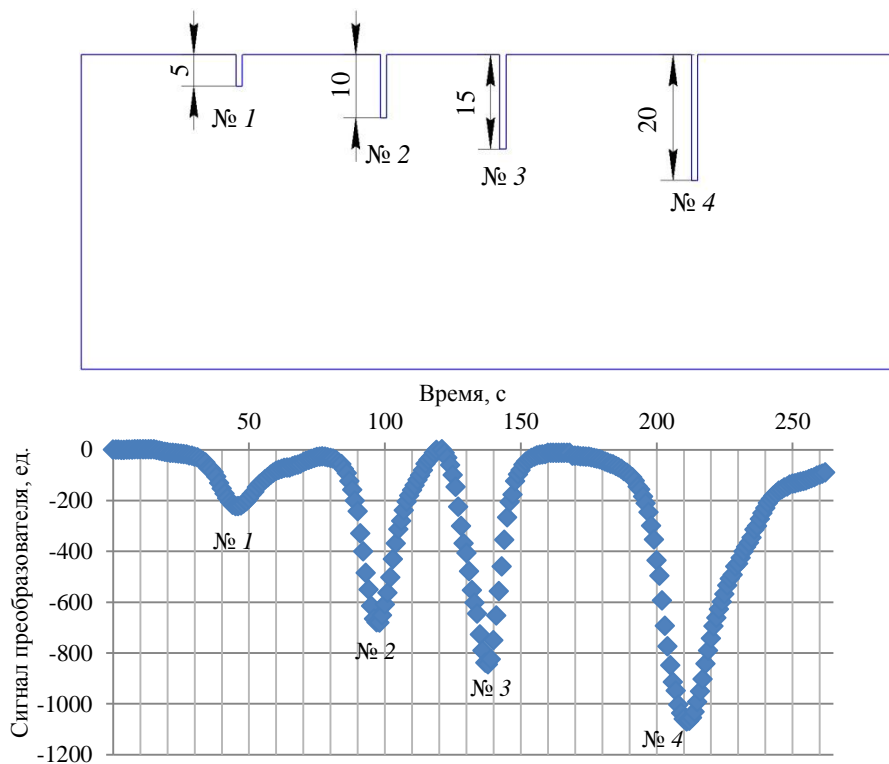


Рис. 11. Результаты сканирования участков с пропилами № 1–4 преобразователем диаметром 5 мм

На рис. 12 представлена зависимость максимума огибающей сигнала, полученной при прохождении преобразователя над пропилом, от глубины дефекта. Применение преобразователя диаметром 5 мм позволяет получить сигналы, по которым можно определить глубину дефекта.

На рис. 13 представлены результаты сканирования образца-имитатора дефектов преобразователем диаметром 0,5 мм (зависимость сигнала преобразователя от времени прохождения над пропилом).



Рис. 12. Зависимость максимума сигнала преобразователя диаметром 5 мм от глубины пропилов № 1–4

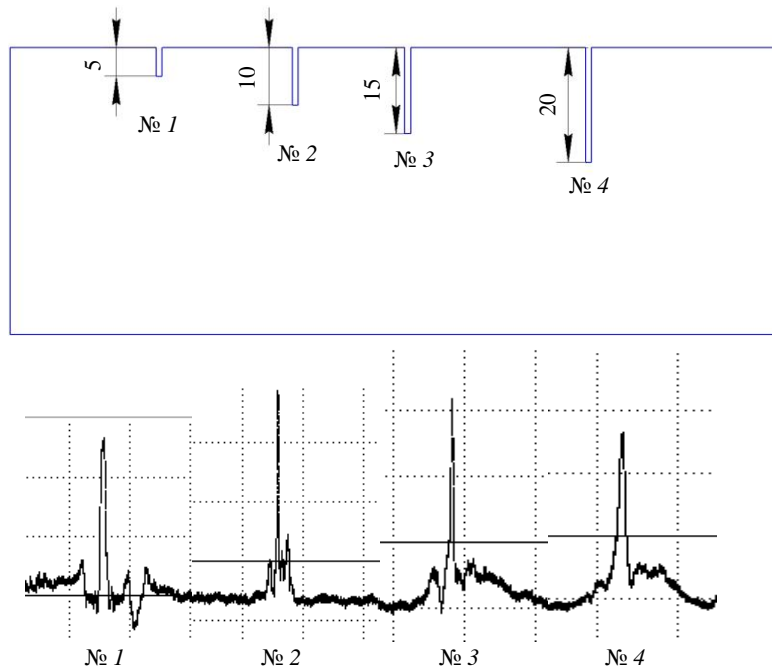


Рис. 13. Результаты сканирования участков с пропилами № 1–4 преобразователем диаметром 0,5 мм

Перемещение преобразователя диаметром 0,5 мм над дефектом также приводит к резкому изменению сигнала, который обозначает обнаружение дефекта, но величина максимального отклонения не зависит от размера пропила. Аналогичный результат получен при использовании преобразователя диаметром 1 мм.

При проведении испытаний с применением преобразователя диаметром 5 мм выявлено, что приближение к краю образца на расстояние ~10 мм влияет на сигнал, из-за искажений которого могут возникнуть проблемы с точностью определения глубины. Это означает, что при проведении испытаний требуется применение автоматических систем контроля.

Заключения

Разработана конечно-элементная модель абсолютного трансформаторного накладного вихретокового преобразователя для анализа влияния параметров контроля (диаметр преобразователя, частота возбуждающего тока) и геометрических параметров (глубина, ориентация относительно поверхности) дефекта типа «трещина».

На основе результатов математического моделирования и испытаний на образце-имитаторе показана принципиальная возможность оценки глубины дефекта, возникающего в УУФМ, с помощью вихретокового метода неразрушающего контроля. Установлено, что для оценки глубоких дефектов рекомендуется использовать преобразователи большого диаметра (>6 мм) при низкой частоте возбуждающего тока (<100 кГц в зависимости от типа датчика). В свою очередь, при обнаружении неглубоких дефектов чувствительность будет выше у датчиков небольшого диаметра (<2 мм) при высокой частоте возбуждающего тока (>1 МГц в зависимости от типа датчика). Полученные результаты также справедливы для оценки дефектов типа «трещина».

Проанализирована чувствительность к дефектам различной глубины для разных вариаций диаметров преобразователя и частоты возбуждающего тока. Установлено незначительное влияние угла наклона дефекта на оценку его линейной глубины.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Кулаков В.В., Голубков А.К., Кириллова Л.Н. Выявление факторов повышенного износа фрикционных углерод-углеродных материалов на режимах рулений самолетов // Трение и износ. 2024. Т. 45. № 1. С. 59–67.
2. Гаршин А.П., Нилов А.С., Галинская О.О., Краснов В.И. Перспективы развития и пути совершенствования авиационных тормозных систем на базе керамоматричных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.
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. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиационного строения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
6. Чертищев В.Ю. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 65–79. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79.
7. Кенигфест А.М., Крамаренко Е.И., Кулаков В.В. и др. Углерод-углеродные фрикционные материалы для тормозных систем автомобильной и другой современной техники // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 5. С. 32–34.
8. Кулаков В.В., Шмелев Д.С., Иванова А.Н., Голубков А.К. Особенности конструирования углерод-углеродных композитов фрикционного назначения, изготовленных аэродинамическим методом, на основе дискретных волокон // Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Т. 27. № 2. С. 261–271.
9. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. № 3–4. С. 24–42.
10. Сидорина А.И. Тканые металлоуглеродные армирующие наполнители для ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-101-113.

11. Agarwal N., Rangamani A., Bhavsar K., Virnedkar S.S. An overview of carbon-carbon composite materials and their applications // *Frontiers in Materials*. 2024. Vol. 11. P. 1–21.
12. Scarponi C. Carbon-carbon composites in aerospace engineering // *Advanced Composite Materials Aerospace Engineering* / eds. S. Rana, R. Fanguero. Woodhead Publishing, Elsevier, 2016. P. 385–412. DOI: 10.1016/b978-0-08-100037-3.
13. Charitidis J.P. Theoretical Review for Non-Destructive Techniques of Composite Materials // *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*. 2024. Vol. 9. Is. 2. P. 127–136.
14. James R., Haider M., Giurgiutiu V., Lilienthal D. A simulative and experimental approach toward eddy current nondestructive evaluation of manufacturing flaws and operational damage in CFRP composite // *Nondestructive evaluation, diagnostics and prognostics of engineering systems*. 2019. Vol. 3. P. 1–14.
15. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля / под ред. В.Е. Шатерникова. М.: Изд. дом «Спектр», 2010. 256 с.
16. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль: практ. пособие в 5 кн. / под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высшая школа, 1992. Кн. 3: Электромагнитный контроль. 312 с.
17. Шкатов П.Н., Ермолаев А.А., Хвостов А.А. Повышение эффективности вихретокового контроля углепластиковых объектов путем увеличения чувствительности к ориентации углеродных волокон // *Приборы*. 2022. № 4 (262). С. 10–15.
18. Bowler J.R., Theodoulidis T.P., Poulakis N. Eddy current probe signals due to a crack at a right-angled corner // *IEEE Transactions on magnetics*. 2012. Vol. 45. P. 4735–4746.
19. Шитиков В.С., Кодак Н.П., Головков А.Н., Кудинов И.И. Применение вихретокового метода контроля при изготовлении образцов с искусственными дефектами // *Электротехнология*. 2023. № 2. С. 23–31. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-2-23-31.
20. Шитиков В.С., Кодак Н.П., Головков А.Н., Кудинов И.И. Анализ особенностей контроля деталей из титановых и жаропрочных сплавов вихретоковым методом на наличие трещин // *Электротехнология*. 2020. № 8. С. 20–29. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-8-20-29.

References

1. Kulakov V.V., Golubkov A.K., Kirillova L.N. Identification of factors of increased wear of friction carbon-carbon materials in aircraft taxiing modes. *Treniye i iznos*, 2024, vol. 45, no. 1, pp. 59–67.
2. Garshin A.P., Nilov A.S., Galinskaya O.O., Krasnov V.I. Prospects for development and ways to improve aircraft braking systems on the base ceramic matrix composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.
3. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE VIAM in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
4. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
6. Chertishchev V.Yu. The estimation of the probability of defects detection by the acoustic methods, depending on their size in constructions from PCM for output control data in the form of binary. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 3, pp. 65–79. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79.
7. Kenigfest A.M., Kramarenko E.I., Kulakov V.V. et al. Carbon-carbon friction materials for brake systems of automobiles and other modern equipment. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh*, 2008, no. 5, pp. 32–34.

8. Kulakov V.V., Shmelev D.S., Ivanova A.N., Golubkov A.K. Design features of carbon-carbon composites for friction purposes, manufactured by the aerodynamic method, based on discrete fibers. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 261–271.
9. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Yu. Prospects for the use of carbon-containing nanoparticles in binders for polymer composite materials. *Rossiyskie nanotekhnologii*, 2013, vol. 8, no. 3–4, pp. 24–42.
10. Sidorina A.I. Woven metal-carbon reinforcing fillers for PCM. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-101-113.
11. Agarwal N., Rangamani A., Bhavsar K., Virnedkar S.S. An overview of carbon-carbon composite materials and their applications. *Frontiers in Materials*, 2024, vol. 11, pp. 1–21.
12. Scarponi C. Carbon-carbon composites in aerospace engineering. *Advanced Composite Materials Aerospace Engineering*. Eds. S. Rana, R. Fanguero. Woodhead Publishing, Elsevier, 2016, pp. 385–412. DOI: 10.1016/b978-0-08-100037-3.
13. Charitidis J.P. Theoretical Review for Non-Destructive Techniques of Composite Materials. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 2024, vol. 9, is. 2, pp. 127–136.
14. James R., Haider M., Giurgiutiu V., Lilienthal D. A simulative and experimental approach toward eddy current nondestructive evaluation of manufacturing flaws and operational damage in CFRP composite. *Nondestructive evaluation, diagnostics and prognostics of engineering systems*, 2019, vol. 3, pp. 1–14.
15. Gerasimov V.G., Klyuev V.V., Shaternikov V.E. *Methods and devices of electromagnetic control*. Ed. V.E. Shaternikov. Moscow: Spectr, 2010, 256 p.
16. Gerasimov V.G., Pokrovsky A.D., Sukhorukov V.V. *Non-destructive testing: a practical guide in 5 books*. Ed. V.V. Sukhorukov. Moscow: Vysshaya shkola, 1992, book 3: Electromagnetic testing, 312 p.
17. Shkatov P.N., Ermolaev A.A., Khvostov A.A. Improving the efficiency of eddy current testing of carbon-fiber objects by increasing sensitivity to the orientation of carbon fibers. *Pribory*, 2022, no. 4 (262), pp. 10–15.
18. Bowler J.R., Theodoulidis T.P., Poulakis N. Eddy current probe signals due to a crack at a right-angled corner. *IEEE Transactions on magnetics*, 2012, vol. 45, pp. 4735–4746.
19. Shitikov V.S., Kodak N.P., Golovkov A.N., Kudinov I.I. Application of the eddy current testing method in the manufacture of samples with artificial defects. *Elektrometallurgiya*, 2023, no. 2, pp. 23–31. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-2-23-31.
20. Shitikov V.S., Kodak N.P., Golovkov A.N., Kudinov I.I. Analysis of the features of testing parts made of titanium and heat-resistant alloys for cracks by the eddy current method. *Elektrometallurgiya*, 2020, no. 8, pp. 20–29. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-8-20-29.

Информация об авторах

Пичугин Сергей Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Яковлева Светлана Ивановна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кулаков Валерий Васильевич, заместитель главного конструктора, ПАО АК «Рубин», info@acrubin.ru

Измайлов Михаил Андреевич, инженер-технолог 3 категории, ПАО АК «Рубин», info@acrubin.ru

Королев Александр Павлович, начальник лаборатории, ПАО АК «Рубин», info@acrubin.ru

Information about the authors

Sergey S. Pichugin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Svetlana I. Yakovleva, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valery V. Kulakov, Deputy Chief Design, PJSC «Rubin Aviation Corporation», info@acrubin.ru

Mikhail A. Izmailov, Third Category Engineer-Technologist, PJSC «Rubin Aviation Corporation», info@acrubin.ru

Alexander P. Korolev, Head of Laboratory, PJSC «Rubin Aviation Corporation», info@acrubin.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.02.2025.
The article was submitted 27.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 04.02.2025.