

УДК 620.193

В.С. Шитиков<sup>1</sup>, Н.П. Кодак<sup>1</sup>

## К ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ КОРРОЗИОННЫХ ПОРАЖЕНИЙ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ КОНТРОЛЯ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-96-104

*Рассмотрена возможность определения степени коррозионных поражений различных типов вихретоковым методом контроля с помощью накладного преобразователя. Проведен сравнительный анализ использования отстройки амплитудно-фазовым и фазовым методами. Разработана конечно-элементная модель, позволяющая получать сигналы преобразователя от коррозионных поражений различного типа. Проведены экспериментальные исследования, которые позволили убедиться в правильности разработанной модели и подтвердить результаты, полученные математическим моделированием.*

**Ключевые слова:** вихретоковый контроль, коррозионные поражения, питтинговая коррозия, межкристаллитная коррозия, амплитудно-фазовый метод, конечно-элементная модель.

V.S. Shitikov<sup>1</sup>, N.P. Kodak<sup>1</sup>

## THE ABILITY TO ASSESS THE DEGREE OF CORROSION DAMAGE BY EDDY CURRENT TESTING

*Considers possibility of corrosion damage evaluation using eddy current method implemented with surface probe. Comparative analysis of amplitude-phase and phase suppression methods implementation has been conducted. Finite-element model for calculating probe signal response to defects of different corrosion type was designed. Experimental research has been conducted that allowed to verify the designed model and to confirm results gained with mathematical simulation.*

**Keywords:** eddy current testing, corrosion, pitting corrosion, intergranular corrosion, amplitude-phase method, finite element model.

---

<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 Российской Федерации ежегодные потери металлов из-за их коррозии составляют до 12 % общей массы металлофонда, что соответствует утрате до 30 % ежегодно производимого металла [1, 2]. Коррозионная стойкость оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства, ресурс и долговечность авиационных деталей из алюминиевых сплавов. Результаты исследования коррозионной стойкости алюминиевых сплавов позволяют обосновать рекомендации по необходимому уровню защиты материала, а также прогнозировать изменение его свойств в процессе эксплуатации [3–7].

В настоящее время для обнаружения коррозионных поражений различного типа в основном применяются ультразвуковой, вихретоковый и капиллярный методы контроля. Капиллярный метод контроля наряду с множеством достоинств, таких как относительная простота технологического процесса, высокая производительность, наглядность при

регистрации результатов, имеет ряд недостатков, среди которых следует выделить невозможность определения глубины коррозионного поражения с использованием данного метода [8, 9]. Реализация капиллярного и ультразвукового методов контроля предполагает подготовку поверхности объекта контроля и использование контактной жидкости, что дополнительно ограничивает области применения данных методов.

Вихретоковый метод позволяет не только обнаруживать, но и оценивать степень коррозионных поражений различного типа [10]. Поскольку большая часть практических задач связана с контролем плоских поверхностей на наличие коррозионных поражений или односторонним доступом к объекту контроля, то в данной статье рассматривается применение вихретокового преобразователя наиболее распространенного накладного типа. Появление и развитие коррозии приводит к изменению сигнала вихретокового преобразователя за счет уменьшения толщины проводящего слоя, а также из-за изменения топологии распределения вихревых токов в объекте контроля. Рассмотрим межкристаллитную и точечную (питтинговую) коррозию. Коррозионные поражения заданной степени могут быть получены электрохимическим способом.

### Материалы и методы

Основное влияние на достоверность определения степени коррозионных поражений вихретоковым методом оказывают такие факторы, как нестабильность зазора и угла наклона преобразователя. Для разработки эффективных методов отстройки от перечисленных мешающих факторов применяется численное моделирование. Рассмотрим и проанализируем эффективность применения распространенных двухпараметровых способов выделения информативного сигнала: фазового и амплитудно-фазового методов [11–13]. Эффективность метода отстройки определяется увеличением отношения сигнала, характеризующего степень коррозионного поражения, к уровню помех, вызванных влиянием мешающих факторов.

Расчеты сигналов преобразователя проводили с помощью метода конечных элементов. При разбиении области решения на конечные элементы учитываются геометрические размеры составных частей модели: увеличение детализации и уменьшение относительного размера областей модели с разными свойствами или элементов границ этих областей приводят к увеличению количества элементов. Разбиение модели на более подробную сетку конечных элементов значительно увеличивает продолжительность расчета. Имитация коррозионных поражений путем изменения толщины позволяет качественно оценить закономерности, сравнить различные режимы работы и конструкции преобразователей без необходимости моделировать сложные структуры, такие как межкристаллитная и питтинговая коррозия. При проведении экспериментальных исследований образцы с переменной толщиной (набор пластин, образцы в виде клина или с глухими отверстиями) могут также применяться для сравнения возможностей оборудования и проверки работоспособности математической модели.

Для экспериментальной реализации амплитудно-фазового метода отстройки компенсацию сигнала вихретокового преобразователя производили на образце с номинальной толщиной 1 мм, а годограф изменения вносимого напряжения при изменении зазора совмещался с осью  $X$  на комплексной плоскости. Усиление по оси  $X$  выставляли минимальным, а по мнимой оси таким, чтобы амплитуда сигнала от образца не превышала диапазон значений входного усилителя вихретокового дефектоскопа. После реализации настройки для применения амплитудно-фазового метода получены сигналы вносимого напряжения на образце толщиной 0,9 мм на разных частотах – в диапазоне от 30 до 100 кГц.

Для экспериментальной реализации фазового метода отстройки компенсацию сигнала вихретокового преобразователя производили на воздухе. Далее фиксировали значения фазы, получаемые на образцах с различной толщиной (0,9 и 1 мм). Изменение фазы сигнала фиксировали при перестановке преобразователя с образца толщиной 1 мм на образец толщиной 0,9 мм.

Для сравнения существующих методов отстройки влияния воздушного зазора на сигнал построена математическая модель взаимодействия вихретокового преобразователя с объектом контроля (рис. 1). Расчет сигналов вихретокового преобразователя реализован с помощью метода конечных элементов, который заключается в разбиении области решения на конечные элементы. Внутри каждого элемента вводится аппроксимация исходной функции, а решение определяется путем минимизации соответствующего функционала.

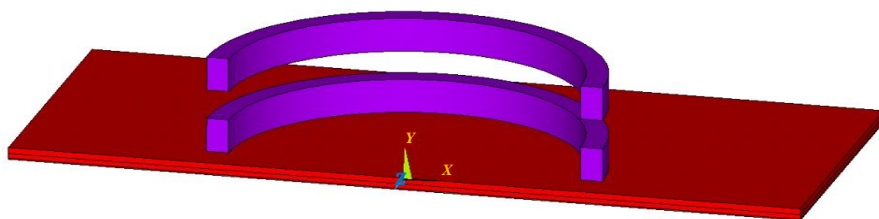


Рис. 1. Математическая модель вихретокового преобразователя

Верификацию модели проводили с использованием образцов в виде пластин из алюминиевого сплава 1163 толщиной 1 и 0,9 мм. Образцы изготовлены из одного листа алюминиевого сплава 1163 с предварительно снятым лакировочным слоем. Толщина одной пластины уменьшена с помощью травления на 0,1 мм. Удельная электрическая проводимость образцов определена вихретоковым методом контроля и составляет 17,5 МСм/м [14]. Параметры накладного вихретокового дифференциального преобразователя в математической модели задавали соответствующими параметрам датчика 700P11A со средним радиусом катушки возбуждения 2,65 мм [15].

Основным фактором, определяющим чувствительность вносимого напряжения к изменению зазора как при амплитудно-фазовом, так и при фазовом методах отстройки, является кривизна годографа вносимого напряжения, образованного при изменении зазора. Для оценки влияния зазора рассчитаны значения вносимого напряжения при отклонении зазора на 0,1 и 0,5 мм от номинального значения 1 мм. Для имитации амплитудно-фазового метода отстройки от влияния зазора, вручную полученные сигналы при изменении зазора и толщины преобразованы поворотом фазы на угол вектора вносимого напряжения, соответствующего изменению зазора на 0,5 мм. Для сравнения экспериментальных данных с данными численного моделирования рассчитана мнимая часть преобразованных векторов вносимого напряжения, соответствующая изменению зазора и толщины. Изменение зазора на 0,1 мм использовали для имитации случайных колебаний зазора между поверхностью объекта контроля и преобразователем в процессе контроля.

На рис. 2, а приведены зависимости проекции вносимого напряжения при изменении частоты в диапазоне от 30 Гц до 100 кГц. Результаты математического моделирования сопоставлены с результатами, полученными экспериментальным путем.

Фазовый метод отстройки с помощью численного моделирования реализован вычитанием фазы сигнала, рассчитанного при номинальных параметрах, из фазы, получаемой при изменении толщины и зазора. Для компенсации сигнала вихретокового

преобразователя использовали вычитание сигнала без объекта контроля из значений сигнала при изменении параметров толщины и зазора. На рис. 2, б приведены зависимости изменения значений фазы вносимого напряжения от частоты в диапазоне от 30 Гц до 100 кГц, полученные с помощью математической модели и экспериментально, при различных значениях толщины образца. Видно, что частота тока возбуждения, соответствующая максимальному приращению амплитуды и фазы вносимого напряжения, зависит от диаметра вихретокового преобразователя.

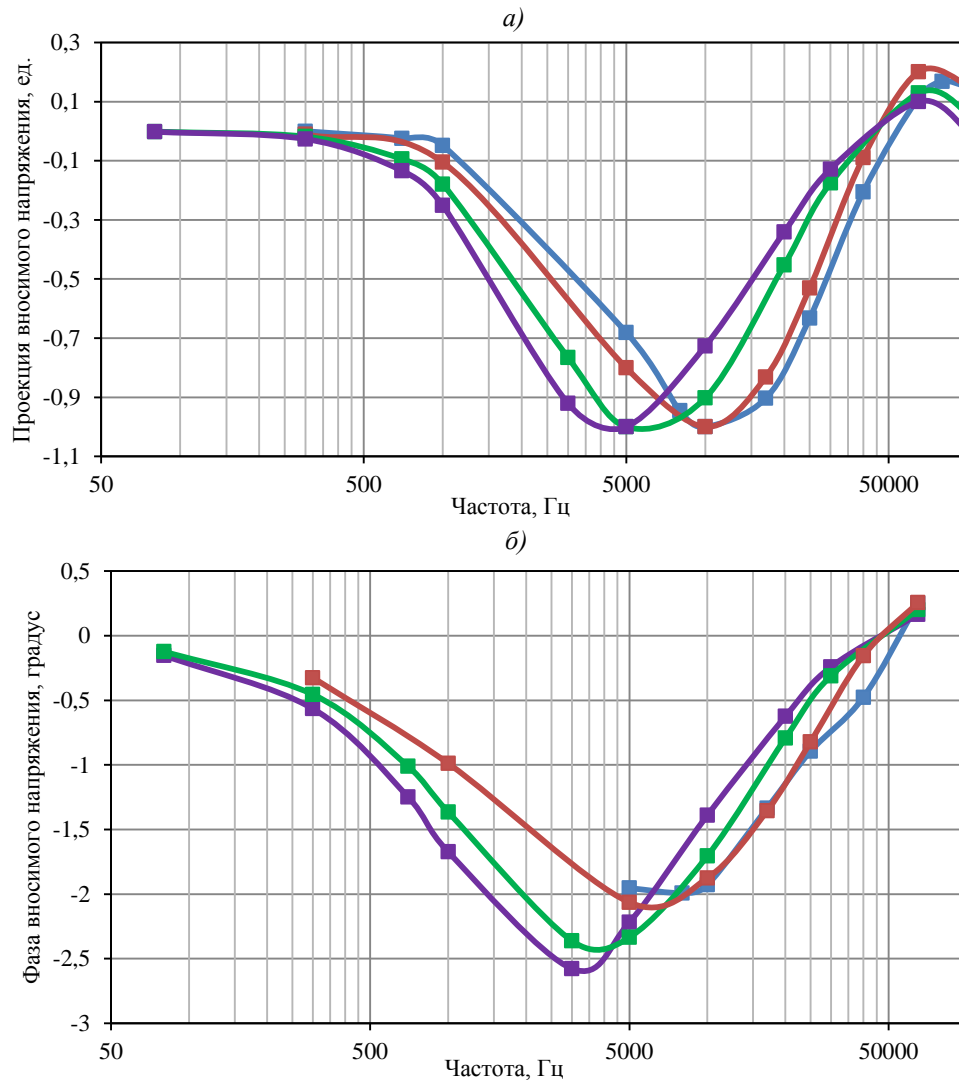


Рис. 2. Зависимости проекции (а) и фазы (б) вносимого напряжения от частоты, полученные с помощью математической модели (датчики радиусом 1,9 (■), 6 (■) и 12 мм (■)) и экспериментально (радиус датчика 1,9 мм (■))

Для численной оценки эффективности применения метода отстройки от влияния мешающего фактора можно использовать коэффициент  $k$ , который рассчитывается как отношение вносимого напряжения при изменении зазора ( $U_{\Delta z}$ ) к вносимому напряжению при изменении толщины ( $U_{\Delta h}$ ):

$$k = \frac{U_{\Delta z}}{U_{\Delta h}} \cdot 100 \%.$$

Результаты расчета для коэффициента  $k$  для различных радиусов вихретокового преобразователя при реализации амплитудно-фазового и фазового методов отстройки приведены на рис. 3.

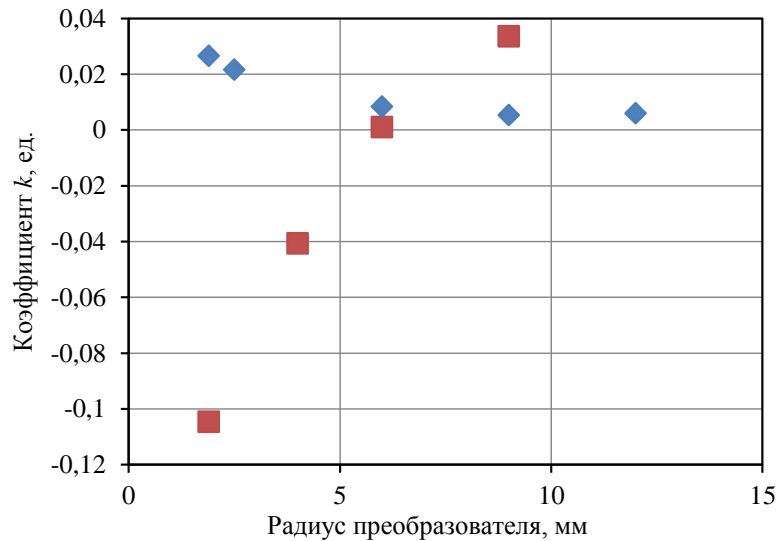


Рис. 3. Зависимости коэффициента  $k$  от диаметра вихретокового преобразователя для сравнения фазового (■) и амплитудно-фазового (◆) методов отстройки

Видно, что при применении амплитудно-фазового метода отстройки соотношение сигнал/шум значительно меньше, чем при фазовом методе. Значение коэффициента  $k$  также зависит от диаметра накладного вихретокового преобразователя. Пересечение графика зависимости коэффициента  $k$  с осью абсцисс на рис. 3 соответствует изменению кривизны годографа зазора для данной комбинации параметров объекта контроля и частоты тока возбуждения преобразователя. При изменении параметров объекта контроля, в том числе при возникновении коррозионных поражений, соотношение между изменением вносимого напряжения, вызванного изменением воздушного зазора, и изменением вносимого напряжения от изменяемого параметра может значительно ухудшиться. Для амплитудно-фазового метода отстройки характерно приемлемое подавление влияния зазора в широком диапазоне параметров объекта контроля и диаметров преобразователя.

Проанализируем степень влияния питтинговой коррозии на сигнал накладного вихретокового преобразователя. С помощью разработанной конечно-элементной модели взаимодействия вихретокового преобразователя 701P11 с объектом контроля рассчитаны зависимости вносимого напряжения от количества поражений в виде питтингов, попавших в область распределения вихревых токов под датчиком. Расчет выполняли на трех частотах: 5, 20 и 100 кГц. Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных, значения реальной и мнимой частей вносимого напряжения преобразовывали в значение проекции изменения вносимого напряжения на ось, ортогональную изменению вносимого напряжения, обусловленного изменением зазора. Это аналогично применению амплитудно-фазового метода для отстройки от влияния зазора при экспериментальных исследованиях. На рис. 4 приведена зависимость приращения вносимого напряжения от количества питтингов.

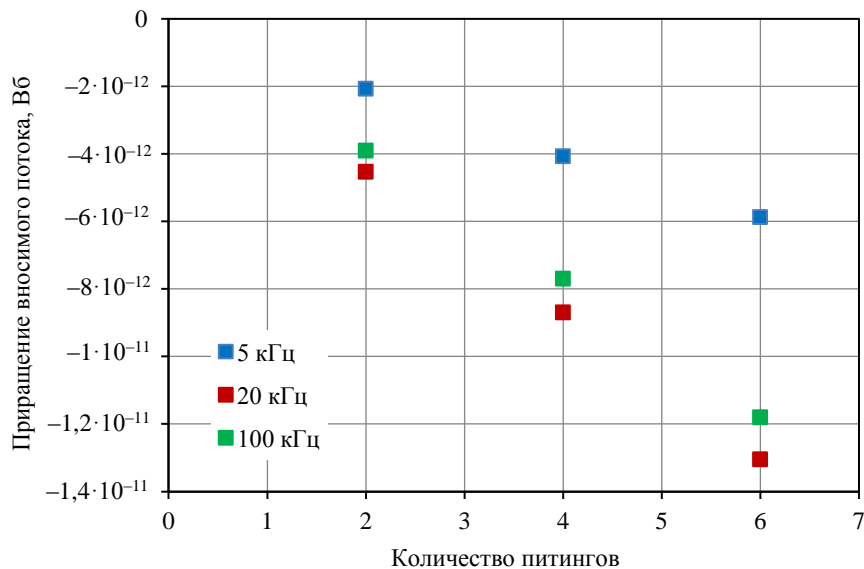


Рис. 4. Изменение вносимого потока в зависимости от количества питтингов и частоты

Видно, что приращение вносимого напряжения практически линейно меняется с увеличением количества поражений. Таким образом, вносимое напряжение от нескольких питтинговых поражений можно с приемлемой точностью оценивать суммой вносимых напряжений от каждого отдельного поражения. Во всем диапазоне частот, который доступен с применяемым преобразователем, сохраняется чувствительность вносимого напряжения к появлению питтинговых поражений. Увеличение чувствительности с увеличением частоты с 5 до 20 кГц объясняется увеличением угла между вектором вносимого напряжения, обусловленного появлением питтинга, и вектором, обусловленным изменением воздушного зазора.

Степень коррозионных поражений связана с изменением времени экспозиции образцов, которое, в свою очередь, приводит к изменению количества электричества, отнесенного к экспонируемой площади образца  $Q/S$  (Кл/см<sup>2</sup>). Коррозионные поражения наносили электрохимическим способом в специальной ячейке, сконструированной специалистами ФГУП «ВИАМ», которая позволяет равномерно наносить коррозию с обеих сторон плоского образца. В ячейке, заполненной раствором специального состава, фиксировали образец между электродами, которые подключали к источнику тока. Процесс получения коррозионных поражений проводили при плотностях электрического тока от 0,001 до 0,04 А/см<sup>2</sup> с продолжительностью электрохимического процесса от 30 мин до 1 ч. Для получения питтинговой коррозии использовали раствор состава: 1 г/л NaCl и 13 г/л Na<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>, а для получения межкристаллитной коррозии в совокупности с питтингами использовали раствор, получаемый из 1 г/л NaCl и 10 г/л Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> (безнитратный раствор) [16].

На рис. 5 представлена полученная экспериментальным путем зависимость сигнала вихретокового преобразователя от количества электричества для частоты 5 кГц.

Видно, что существует корреляция между степенью коррозионных поражений в виде питтингов и сигналом вихретокового преобразователя. Полученные экспериментальные данные подтверждают линейную зависимость сигнала преобразователя от степени поражения.

На рис. 6 представлены полученные экспериментальные зависимости сигнала вихретокового преобразователя от количества электричества для частоты 5 кГц для образцов с межкристаллитной коррозией.

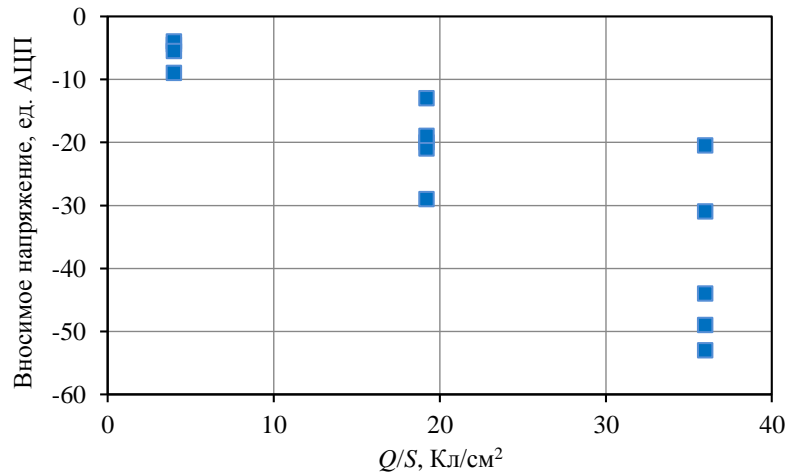


Рис. 5. Изменение сигнала вихретокового преобразователя в зависимости от степени питтинговых коррозионных поражений для сплава 1163 (АЦП – аналого-цифровой преобразователь)

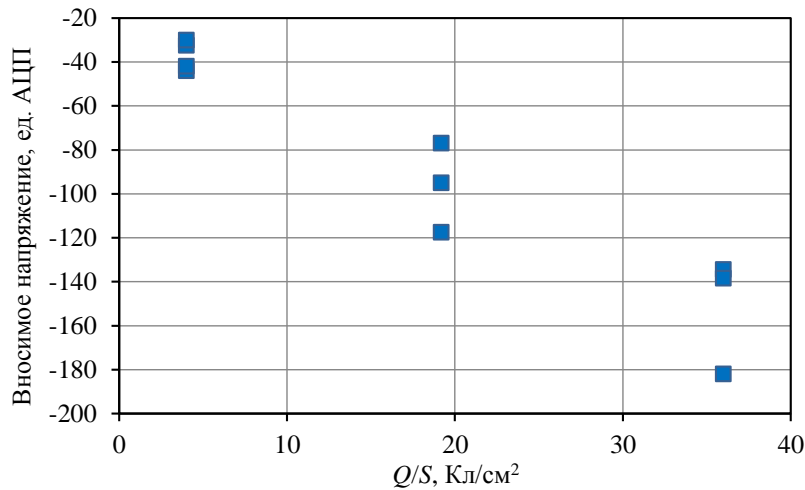


Рис. 6. Изменение сигнала вихретокового преобразователя в зависимости от степени коррозионных поражений в виде межкристаллитной коррозии для сплава 1163 (АЦП – аналого-цифровой преобразователь)

Как видно из представленных зависимостей, полученных для образцов с межкристаллитной коррозией, сигнал вихретокового преобразователя также хорошо коррелирует со степенью поражений, но при тех же экспозициях величина сигнала на образцах с межкристаллитной коррозией значительно больше, чем для образцов с питтинговой коррозией. Это обусловлено тем, что межкристаллитное растрескивание приводит к появлению на поверхности практически непроводящего слоя, что эквивалентно уменьшению толщины образца. Таким образом, небольшая по глубине межкристаллитная коррозия или язва под преобразователем могут маскировать глубокие питтинговые поражения.

В отличие от чувствительности к питтинговым поражениям чувствительность к изменению толщины образца существенно изменяется с частотой тока возбуждения, что должно позволить дифференцировать тип коррозионного поражения при использовании многочастотного возбуждения.

### Заключения

По результатам экспериментальных исследований и математического моделирования подтверждена возможность осуществлять количественную оценку степени коррозионных поражений с помощью вихретокового метода, а также определять тип коррозии. В данной статье проведен сравнительный анализ различных методов отстройки от влияния мешающих факторов, выполненный с помощью математического моделирования. Показано, что амплитудно-фазовый метод позволяет наиболее эффективно отстроиться от влияния изменения воздушного зазора между преобразователем и объектом контроля в широком диапазоне изменения значений электрических свойств и толщины образцов.

С помощью математического моделирования также установлено, что сигнал преобразователя от нескольких точечных поражений можно оценить как сумму сигналов от каждого отдельного дефекта в зоне контроля. С помощью исследований на образцах с коррозионными поражениями различного типа подтверждена корреляция сигнала вихретокового преобразователя и степени поражений. Межкристаллитная коррозия приводит к существенно большему изменению вносимого напряжения преобразователя, чем питтинговая коррозия, при сопоставимых значениях глубины поражения. Таким образом, достоверная оценка степени поражений вихретоковым методом возможна только после предварительного определения типа коррозии.

### Библиографический список

1. 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.
2. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
3. Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Лукина Е.А. Исследование причин образования трещин на ступице диска КВД из сплава ВТ8 наземной ГТУ // *Труды ВИАМ*. 2018. № 12 (72). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-97-106.
4. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. № 3. С. 10–15.
5. Каблов Е.Н. Россия на рынке интеллектуальных ресурсов // *Эксперт*. 2015. № 28 (951). С. 48–51.
6. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
7. Луценко А.Н., Перов Н.С., Чабина Е.Б. Новые этапы развития Испытательного центра // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 460–468. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-460-468.
8. Куличкова С.И., Головков А.Н., Кудинов И.И., Лаптев А.С. Современные дефектоскопические материалы, оборудование и автоматизация процесса капиллярного неразрушающего контроля // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 2. С. 52–57. DOI: 10.14489/td.2019.02.pp052-057.
9. Головков А.Н., Куличкова С.И., Кудинов И.И., Скоробогатько Д.С. Анализ существующих контрольных образцов для проверки чувствительности дефектоскопических материалов при проведении капиллярного неразрушающего контроля (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 11 (83). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-95-103.

10. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
11. Бакунов А.С., Герасимов В.Г., Останин Ю.Я. Вихретоковый контроль накладными преобразователями. М.: Моск. энерг. ин-т, 1985. 86 с.
12. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля. М.: Спектр, 2010. 256 с.
13. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль: в 5 кн. М.: Высшая школа, 1992. Кн. 3: Электромагнитный контроль. 312 с.
14. ГОСТ 27333–87. Контроль неразрушающий. Измерение удельной электрической проводимости цветных металлов вихретоковым методом. М.: Изд-во стандартов, 2005. 6 с.
15. 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 // Электromеталлургия. 2020. № 8. С. 20–29. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-8-20-29.
16. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В., Антипов В.В., Вдовин А.И. Разработка раствора для нанесения коррозионных поражений на алюминиевых сплавах в гальваностатическом режиме // Труды ВИАМ. 2018. № 9 (69). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118.