

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-132-144

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

И.С. Леднев¹, Е.А. Ходакова¹

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

Аннотация. Рассмотрены основные направления развития методов неразрушающего контроля, в частности магнитопорошкового неразрушающего контроля деталей авиационной техники. Приведены возможности магнитопорошкового контроля и причины необходимости его развития. В качестве основных перспективных направлений развития неразрушающего магнитопорошкового контроля обозначены внедрение автоматизации контроля и применение нейронных сетей, а также математического моделирования процессов при проведении магнитопорошкового контроля.

Ключевые слова: магнитный неразрушающий контроль, магнитопорошковый контроль, несплошности, авиационное производство, оборудование для контроля, магнитный индикатор

Для цитирования: Леднев И.С., Ходакова Е.А. Перспективы развития магнитопорошкового контроля деталей авиационной техники // Труды ВИАМ. 2023. № 9 (127). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-132-144.

Scientific article

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MAGNETIC PARTICLE INSPECTION OF AIRCRAFT PARTS

I.S. Lednev¹, E.A. Khodakova¹

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

Abstract. The article discusses the main directions of development of methods of non-destructive testing, and in particular magnetic powder non-destructive testing of aircraft parts. The possibilities of magnetic powder control and the reasons for its development are given. with their help, discontinuities, depending on the purpose of control. The development of control automation and the use of neural networks, as well as mathematical modeling of processes in IPC, are identified as the main promising areas for the development of non-destructive magnetic particle control. The experience of the work carried out in these areas is given.

Keywords: magnetic non-destructive testing, magnetic particle inspection, discontinuity, aviation production, monitoring equipment, magnetic indicator

For citation: Lednev I.S., Khodakova E.A. Prospects for the development of magnetic particle inspection of aircraft parts. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-132-144.

Введение

Внедрение в России современных технологий способно ускорить развитие многих направлений отечественной промышленности [1–3]. В современных реалиях ценится каждая деталь, каждая возможность ремонта и повторного использования деталей, так как производство является очень дорогостоящим.

Практика показывает, что недостаточно создать материал, деталь или технологию, нужно проверить качество созданного продукта. Проверить только что изготовленную деталь или деталь, поступившую на ремонт, не разрушив ее, возможно с помощью методов неразрушающего контроля [4–7]. Один из них – магнитопорошковый метод, зарекомендовал себя как простой в исполнении и эффективный, не требующий больших затрат на материалы. Он позволяет за короткое время определить наличие поверхностных и подповерхностных несплошностей на деталях и может применяться для широкой номенклатуры изделий. Метод удобен при определении технического состояния различных машин, механизмов и других технических устройств и сооружений в процессе эксплуатации. Существует также возможность его применения в полевых условиях. Метод ограничен лишь требованиями к уровню магнитной восприимчивости проверяемой детали. Контролю подлежат только ферромагнитные материалы, такие как железо, никель, кобальт и некоторые их сплавы [8].

Благодаря возможности исследовать детали и образцы на наличие большой номенклатуры дефектов магнитопорошковый контроль (МПК) является наиболее распространенным методом магнитного неразрушающего контроля. Он позволяет выявлять такие несплошности, как трещины различного происхождения, надрывы, флокены, расслоения материала, непровары, плены, волосовины, неметаллические и шлаковые включения, пустоты, закаты, пористость и т. д. [9]. Метод рекомендуется для обнаружения мелких трещин на поверхности или под поверхностью материалов, а также поверхностных несплошностей.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Перспективы развития магнитопорошкового контроля в авиационной отрасли

В настоящее время большинство авиастроительных предприятий переоснащает участки МПК новыми стационарными дефектоскопами или проводит модернизацию устаревших дефектоскопов, изготовленных в 1970–1980-х годах, для обеспечения актуальных потребностей проведения контроля выпускаемой продукции. Автоматизация процесса проведения контроля до сих пор применяется редко, что связано с высокой стоимостью подобных систем и с проблемами внедрения передовых технологий контроля качества продукции. Основной объем деталей на авиационных предприятиях контролируется вручную. Как известно, вследствие влияния человеческого фактора контроль, проводимый дефектоскопистом вручную, характеризуется высокой трудоемкостью, невысокими надежностью и достоверностью полученных результатов [10]. Поэтому введение автоматизированного контроля может снизить брак на производствах авиационной техники и повысить качество выпускаемых деталей и материалов. Обнаружение большего количества дефектов особенно важно для особо ответственных изделий, так как зарождение и рост усталостных трещин, которые приводят к разрушению материала изделия, происходят под действием циклических нагрузок во время эксплуатации [11]. На основании данных из методических материалов документа [12] можно сделать вывод, что актуальное решение задачи определения безопасного ресурса газотурбинных двигателей сводится к расчету заложенных

несплошностей с предусмотренными количественными параметрами дефектности материала. Таким образом, выводится зависимость ожидаемого количества дефектов в единице массы материала от их размера и/или вероятности их обнаружения при МПК на производствах отраслевых заводов и при эксплуатации изделий газотурбинных двигателей. Считается необходимым проводить анализ возможного разрушения изделия в пределах рассчитанного ресурса из-за несплошностей в материале или несплошностей, образовавшихся в процессе изготовления или эксплуатации. Расчетом вероятности разрушения детали при эксплуатации, в том числе и из-за внутренних несплошностей, не обнаруженных методами неразрушающего контроля, подтверждается ресурс газотурбинных двигателей [12]. Применение метода оценки вероятности нахождения несплошностей позволяет заводу-производителю провести объективное сравнение и определить наиболее эффективную методику контроля и необходимое оборудование. Вероятностные подходы расчета требуют знания количественного параметра, используемого при контроле, – например, размеры металлургических дефектов в материале заготовок дисков газотурбинных двигателей [13]. В настоящее время проведение оценки вероятности обнаружения несплошностей – актуальная задача в основном для конструкторов или проектировщиков деталей и узлов авиационной техники для расчета срока службы, рекомендуемого международными нормативными документами. Сложность проведения подобных расчетов вероятности обнаружения несплошностей заключается в необходимости наработки большого количества данных из экспериментов, которые проводят на образцах с натурными дефектами. Проведение подобных работ всегда очень трудоемко и иногда затруднено производственными обстоятельствами. Альтернативой подобным работам является проведение моделирования процессов МПК. В результате такого моделирования, применяемого в дальнейшем для оценки вероятности обнаружения дефектов, получают массив информации о размерах, типах и расположении несплошностей. В связи с этим моделирование процессов МПК (написание методик, выбор оптимальных режимов контроля, проведение оценки вероятности обнаружения дефектов по методикам МПК) может иметь важное значение при проектировании деталей или узлов и при выборе оборудования для проведения МПК, схем и режимов намагничивания в процессе производства, эксплуатации и ремонта, а также при последующем производстве подобных деталей (проведение МПК изделий с аналогичными конструктивными особенностями).

Помимо повышения спроса на внедрение новых методик неразрушающего контроля, в связи с ростом отечественных производственных мощностей с каждым годом повышается кадровая потребность в компетентных инженерах и дефектоскопистах в области контроля качества продукции. В настоящее время решается сложная задача по созданию и последующему развитию центров обучения, подготовки и сертификации работников в области неразрушающего контроля деталей и узлов авиационной техники [14].

С учетом опыта изучения иностранных нормативных документов по МПК [15–18] и проведения обзора научно-технической литературы можно предположить, что основные перспективы развития неразрушающего контроля, включая и МПК, связаны в первую очередь с развитием автоматизации, а также моделированием процессов с применением нейронных сетей [19–28].

Автоматизация и нейронные сети

В статье [29] рассматривается полностью автоматизированная система технического зрения для проверки всей поверхности коленчатых валов в реальном времени, основанная на методе МПК, позволяющего лучше визуализировать дефекты поверхности

(рис. 1), с последующим визуальным осмотром, который в основном остается ручным процессом, проводимым операторами. Предлагаемая система заменяет этот ручной контроль только в конце процедуры МПК, что позволяет легко интегрировать предлагаемое решение в любую существующую производственную линию без необходимости замены установленного на ней дефектоскопа.

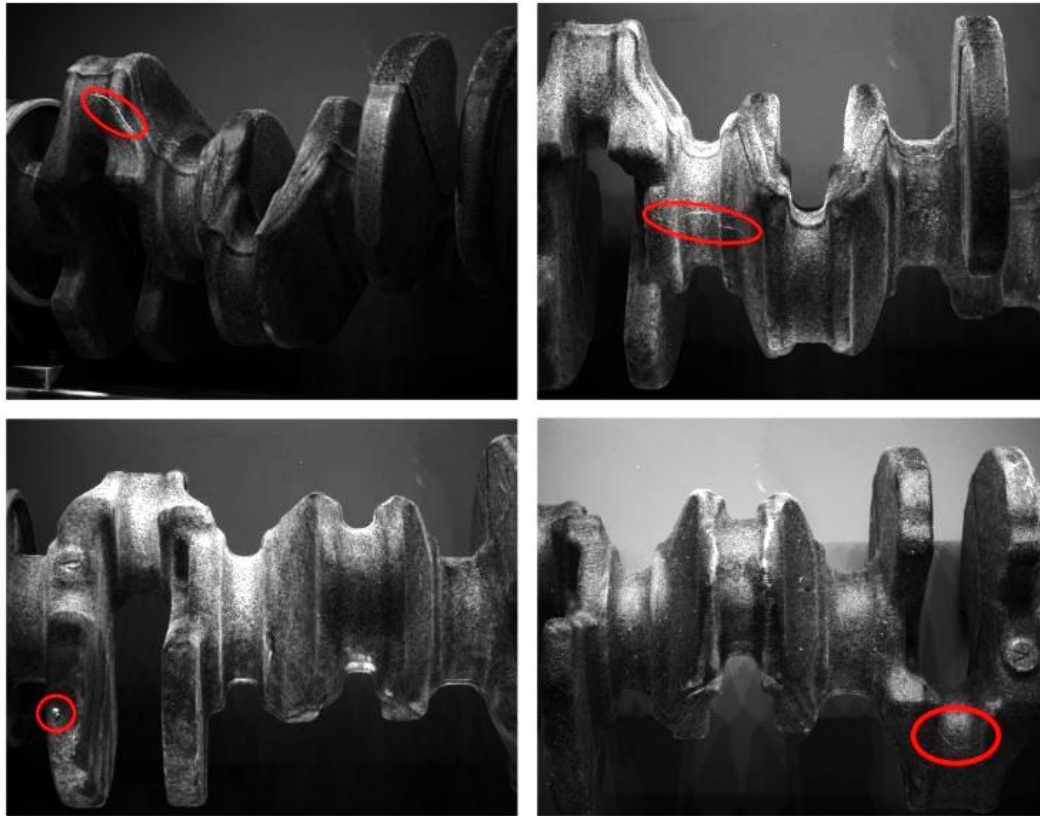


Рис. 1. Индикаторные следы магнитного порошка на поверхности контролируемых коленчатых валов

Шаговый двигатель в сочетании с несколькими камерами обеспечивает контроль всей поверхности коленчатого вала в режиме реального времени. Из-за очень текстурированной поверхности коленчатых валов и разнообразия форм и типов дефектов методы их обнаружения, основанные на алгоритмах глубокого обучения, а точнее сверточных нейронных сетях (convolutional neural network – CNN или ConvNet), становятся более эффективным решением, чем традиционные методы. В статье [30] обсуждаются различные подходы к обнаружению дефектов с помощью CNN – в основном классификация, обнаружение объектов и семантическая сегментация. Приведены преимущества и недостатки каждого подхода для обнаружения дефектов в реальном времени. Сделан вывод, что методы, основанные на семантической сегментации, обеспечивают высочайшую точность локализации дефектов и при этом являются самыми быстрыми для приложений реального времени, хотя и требуют самого большого набора обучающих данных, поскольку для обучения сети можно использовать только дефектные изображения.

Нейронные сети CNN применяются как инструмент по обработке и распознаванию изображений. Встроенный сверточный слой уменьшает большой размер изображений без потери информации, поэтому CNN особенно подходят для МПК.

EfficientNet – это архитектура сверточной нейронной сети и метод масштабирования, который равномерно масштабирует все измерения глубины/ширины/разрешения с использованием составного коэффициента. В отличие от традиционной практики произвольного масштабирования этих факторов, метод EfficientNet равномерно масштабирует ширину, глубину и разрешение сети с помощью набора фиксированных коэффициентов масштабирования.

Авторами статьи [30] изучен метод сегментации дефектов с использованием набора данных о дефектах, обнаруженных с помощью МПК (рис. 2). Подтверждено, что кодировщик EfficientNet, используемый в качестве основы U-Net, эффективен и не требует модели, содержащей большое количество параметров. Авторам удалось достичь показателя В2 в 84,04 %, используя U-Net в качестве модели сегментации, мощный кодировщик и оптимальную функцию потерь.

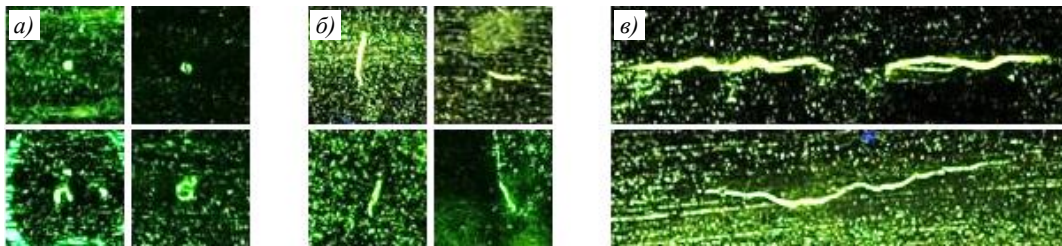


Рис. 2. Примеры дефектов: точечные (а), линейные (б) и линейные протяженные (в)

Сверточная нейронная сеть U-Net считается одной из стандартных архитектур CNN для задач сегментации изображений, когда нужно не только определить класс изображения целиком, но и сегментировать его области по классу, т. е. создать маску, которая будет разделять изображение на несколько классов.

В статье [31] авторы сосредоточились только на областях, содержащих дефекты, но необходимо также рассмотреть бездефектные области. Поэтому создан набор изображений бездефектной области из ~3000 исходных изображений размером 512×512 пикселей. В результате определено несколько случаев, когда ошибочно обнаружены ложные индикаторные следы, похожие на дефекты.

В области компьютерного зрения функции представляют изображения, которые можно использовать для описания и понимания информации. Углы, края и цвета – это примеры функций низкого уровня, тогда как отдельные элементы являются примерами функций высокого уровня.

Особенности имеют решающее значение в компьютерном зрении, поскольку они облегчают представление и анализ визуального ввода. Алгоритмы могут находить закономерности и корреляции в фотографиях, извлекая и описывая их с помощью функций, а затем делая прогнозы или выводы на основе этих знаний.

Алгоритмы компьютерного зрения могут достигать высокого уровня точности и понимания визуального ввода путем интеграции информации низкого и высокого уровня. Так, алгоритм компьютерного зрения может идентифицировать наличие объектов на изображении, используя низкоуровневые характеристики, такие как края и углы. Затем система может использовать характеристики высокого уровня, такие как объекты или сцены, для классификации и идентификации содержимого или сценария изображения.

В статье [31] предложен новый метод идентификации трещин при МПК колец подшипников, который основан на визуальных характеристиках и функциях высокого

уровня. Дефектные участки с несплошностями в виде трещин определяют путем выделения осевой линии для получения приблизительного местоположения дефектов, что сокращает время вычислений модели CNN. При применении модуля СА к оригинальной модели MobileNetV3 предложенная модель может автоматически извлекать высокоуровневые характеристики предполагаемых областей с дефектами и идентифицировать их с высокой точностью. Эксперименты проведены на основе набора данных о дефектах колец подшипников (рис. 3). Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемый метод обеспечивает скорость запоминания 96,5 %, точность 91,7 % и среднее время обнаружения 9,33 с. Предполагается, что модель может уменьшить влияние сложного текстурированного фона и ложных индикаций, а извлеченные высокоуровневые характеристики из моделей CNN обладают высокой степенью детектирования и эффективностью идентификации индикаций магнитного порошка.

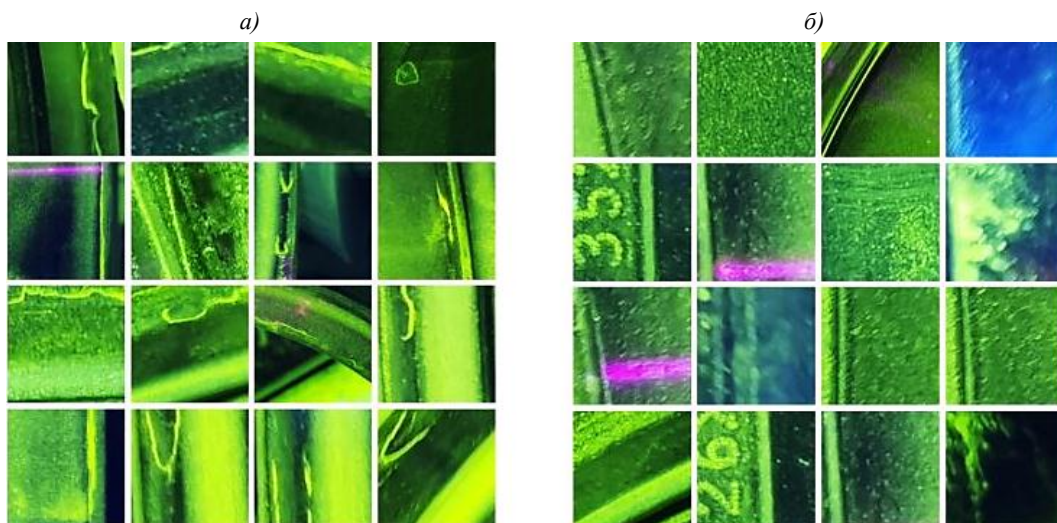


Рис. 3. Дефектные (а) и бездефектные участки (б), подобранные для обучения нейронной сети

В статье [32] предложен метод автоматизации магнитопорошкового люминесцентного контроля, основанный на оценке возникающего магнитного поля. Измерения показывают, что величина магнитного поля не является достаточным показателем способности обнаружения дефекта. Результаты сравниваются с обычно используемыми датчиками. Метод основан на измерении векторного магнитного поля и последующей обработке данных, т. е. вычислении магнитного импульса на сферической детектирующей частице.

Вероятность обнаружения (Probability of Detection – POD) – это статистически оцениваемая функция вероятности обнаружения дефекта в зависимости от его длины, т. е. вероятность того, что возможный дефект будет детектирован, полагая при этом, что он находится на контролируемой поверхности. Подробности применения МПК, такие как метод намагничивания, направление и напряженность магнитного поля, а также используемые магнитные порошки для обнаружения, в этих исследованиях не упоминаются. Оценивается только средняя производительность МПК. При этом правильная технология МПК имеет важное значение для успешного обнаружения дефектов. Новый метод оценки магнитного поля, предложенный в данной статье, может быть использован для оптимизации применения МПК и увеличения POD. Метод является более быстрым и подходящим для тестирования, проектирования и разработки современных устройств для МПК, а также для автоматической генерации и оптимизации магнитного поля.

Моделирование процесса

В работе [33] представлены две модели и численные методы для моделирования полного процесса намагничивания и размагничивания объектов, которые проходят МПК. В частности, рассчитана остаточная плотность магнитного потока в цилиндрических образцах после каждого из следующих этапов: продольное намагничивание, циркулярное намагничивание и окончательное размагничивание после контроля. Предлагаемая методология основана на скалярных моделях, включающих магнитный гистерезис. На рис. 4 и 5 представлены кривые остаточной плотности магнитного потока после циркулярного и продольного намагничивания соответственно.

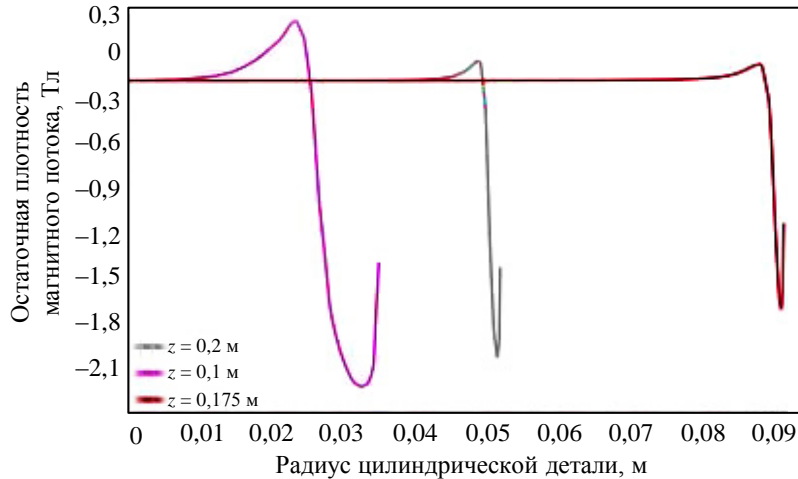


Рис. 4. Остаточная плотность магнитного потока (θ -составляющая) после циркулярного намагничивания (z – радиус цилиндрической детали)

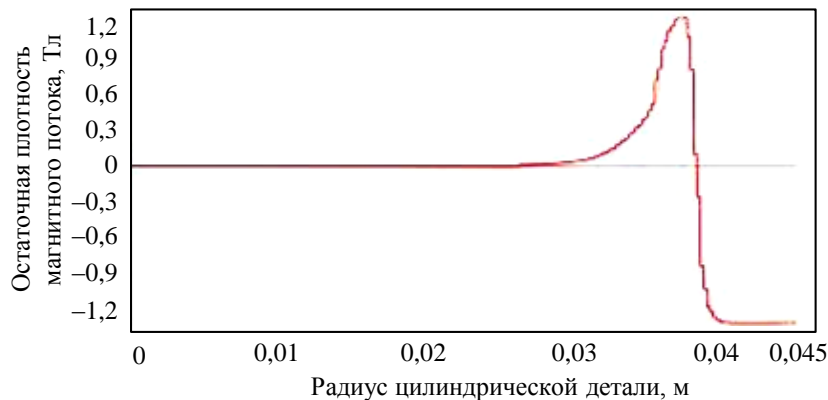


Рис. 5. Остаточная плотность магнитного потока (z -составляющая) после продольного намагничивания

Полученные результаты этапа размагничивания свидетельствуют о том, что для достижения лучших результатов следует использовать циркулярное размагничивание. При сравнении рис. 6 и 7 видно, что при циркулярном размагничивании (за исключением случая с 12 циклами) существует не такая большая зависимость остаточной плотности потока от количества циклов, как в случае продольного намагничивания. Кроме того, при циркулярном размагничивании достигаются более низкие значения остаточной плотности магнитного потока.

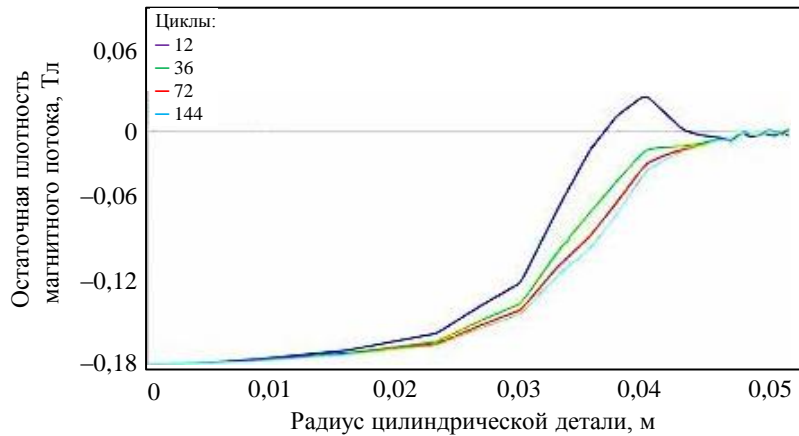


Рис. 6. Зависимость плотности остаточного магнитного потока (θ -составляющая) от радиуса цилиндрической детали при циркулярном размагничивании (сравнение количества циклов)

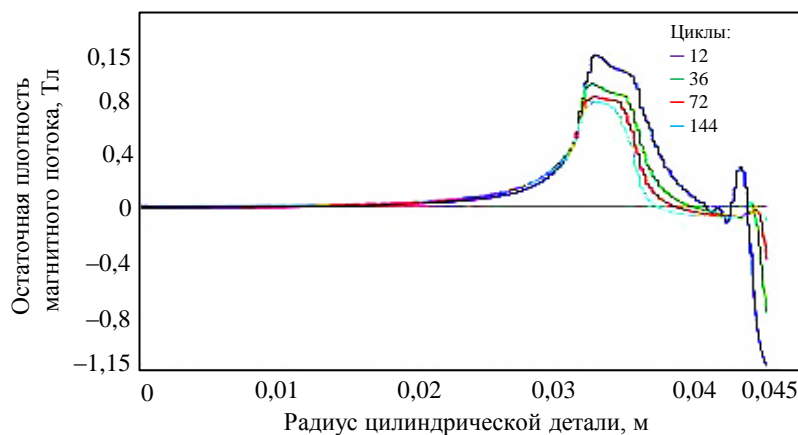


Рис. 7. Зависимость остаточной плотности потока (z -составляющая) от радиуса цилиндрической детали при продольном размагничивании (сравнение количества циклов)

Для создания магнитного поля с регулируемой интенсивностью и высокой однородностью с помощью специализированного программного обеспечения авторами статьи [34] создана имитационная модель магнитного поля полого цилиндра, помещенного в соленоид, путем изменения частоты источника возбуждения внешнего магнитного поля, стационарных условий и низкочастотного магнитного поля обмотки соленоида. Методами численного анализа электромагнитного поля являются дифференциальный и интегральный методы. Дифференциальный метод также включает методы конечно-разностного и конечно-элементного анализа, в то время как разностный метод не подходит для граничных условий, являющихся сложными и нерегулярными. Метод конечных элементов – это численный метод, основанный на интерполяции разбиения по вариационному принципу, при котором делят область решения на множество небольших блоков, находят приближенное решение для каждого блока, а затем выводят глобальное решение. Чем точнее построение сетки и меньше площадь искажения, тем точнее решение. Применяемое программное обеспечение используется для анализа электромагнитного поля полого цилиндра, помещенного в соленоид.

Результаты моделирования показывают, что при частоте внешнего возбуждения <100 Гц напряженность магнитного поля после проникновения в объект контроля составляет 61,9 % от напряженности магнитного поля возбуждения и экспоненциально

убывает с увеличением частоты возбуждения. Пространственное распределение магнитного поля соленоида (помимо параметров самого соленоида) оказывает большее влияние на распределение магнитного потока в пространстве.

Заключения

Описаны и проанализированы основные перспективы развития неразрушающего МПК:

- внедрение и развитие систем автоматизации контроля;
- применение нейронных сетей при обработке результатов контроля;
- математическое моделирование физических процессов контроля.

Анализ перспективных направлений показал, что:

- существует необходимость развития и внедрения систем автоматизации контроля;
- применение нейронных сетей при обработке результатов контроля снизит влияние человеческого фактора;
- математическое моделирование физических процессов контроля поможет лучше понимать процессы при МПК;
- необходимо внедрение новых методик при сертификации персонала – сертифицированный работник должен владеть навыками работы с новым оборудованием, определять, в каком направлении возможна автоматизация МПК, проводить оценку вероятности нахождения дефектов.

Помимо основных направлений, указанных в данной статье, также следует отметить дополнительное обучение и повышение квалификации персонала, проводящего контроль. Несмотря на сложность физических основ МПК, технология проведения контроля не вызывает сложностей у исполнителя, если он руководствуется грамотно составленной документацией, имеет качественные дефектоскопические материалы и исправное оборудование. Повышение квалификации дефектоскопистов может снизить влияние человеческого фактора при невыявлении дефектов.

Список источников

1. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Каблов Е.Н., Шевченко Ю.Н., Гриневиц А.В., Кочанов Д.И. Проблемы паспортизации авиационных материалов на современном этапе // *75 лет. Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 2007. С. 388–396.
4. Чертищев В.Ю., Оспенникова О.Г., Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Определение размера и глубины залегания дефектов в многослойных сотовых конструкциях из ПКМ по величине механического импеданса // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94.
5. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Михайлова Н.А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (56). С. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.
6. Скоробогатько Д.С., Головкин А.Н., Кудинов И.И., Куличкова С.И. К вопросу об экологичности и эффективности различных классов промышленных неионогенных ПАВ, используемых при очистке металлических поверхностей в процессе капиллярного контроля деталей авиационной техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.06.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106.

7. Краснов И.С., Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок из титановых сплавов для вероятностного расчета риска разрушения дисков газотурбинных двигателей в эксплуатации // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.06.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
8. ГОСТ Р 56512–2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы. М.: Стандартинформ, 2016. 56 с.
9. ГОСТ Р ИСО 9934-1–2011. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Часть 1. Основные требования. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.
10. Ложкова Д.С., Краснов И.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок дисков ГТД из титановых сплавов // *Контроль. Диагностика*. 2016. № 7. С. 61–67. DOI: 10.14489/td.2016.07.pp.061-067.
11. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твёрдых тел. М.: Металлургия, 1971. 264 с.
12. Методические материалы для реализации требований к основным деталям двигателя, ресурс которых устанавливается в циклах: РЦ АП-33.70-1 / Межгосударственный авиационный комитет. М.: Авиаиздат, 2012. 31 с.
13. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кудинов И.И., Головков А.Н., Генералов А.С., Князев А.В. Оценка вероятности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства // *Дефектоскопия*. 2021. № 1. С. 64–71.
14. СДАНК-01-2020. Правила аттестации и основные требования к лабораториям неразрушающего контроля. URL: <https://ntsexpert.ru/documents/sdank-01-2020.pdf> (дата обращения: 13.06.2023).
15. ISO 9934-1. Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Part 1: General principles. Geneva: ISO, 2001. 14 p.
16. DIN EN 1369-2013. Founding – Magnetic particle testing. Deutsches Institut für Normung e.V., 2013, 26 p.
17. ASTM E1444/E1444M. Standard Practice for Magnetic Particle Testing for Aerospace. ASTM International (ASTM), 2022. 16 p.
18. ASTM E709-21. Standard Guide for Magnetic Particle Testing. ASTM International (ASTM), 2021. 48 p.
19. Mariani S., Rendu Q., Urbani M., Sbarufatti C. Causal dilated convolutional neural networks for automatic inspection of ultrasonic signals in non-destructive evaluation and structural health monitoring // *Mechanical Systems and Signal Processing*. Elsevier, 2021. 21 p. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107748.
20. Rawat W., Wang Z. Deep Convolutional Neural Networks for Image Classification: A Comprehensive Review // *Neural Computation*. 2017. Vol. 29. No. 9. P. 2352–2449. DOI: 10.1162/neco_a_00990.
21. Tout K., Meguenani A., Urban J.P. et al. Automated vision system for magnetic particle inspection of crankshafts using convolutional neural networks // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 112. P. 3307–3326. DOI: 10.1007/s00170-020-06467-4.
22. Link R., Riess N. NDT 4.0-significance and implications to NDT–automated magnetic particle testing as an example // *12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018)*. 2018. Vol. 15. P. 6.
23. Antonio S., Fulginei F., Faba A. et al. Vector Hysteresis Processes for Innovative Fe-Si Magnetic Powder Cores: Experiments and Neural Network Modeling // *Magnetochemistry*. 2021. Vol. 7. No. 2. P. 18. DOI: 10.3390/magnetochemistry7020018.
24. Ferguson M., Ak R., Lee Y.-T.T., Law K. H. Automatic localization of casting defects with convolutional neural networks // *2017 International conference on big data*. 2017. P. 1726–1735.
25. Chen Y., Feng B., Kang Y. et al. A novel thermography-based dry magnetic particle testing method // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. Vol. 71. P. 1–9. DOI: 10.1109/TIM.2022.3165742.

26. Wong B.S., Low Y.G., Wang X. et al. 3D finite element simulation of magnetic particle inspection // 2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology. 2010. P. 50–55. DOI: 10.1109/STUDENT.2010.5687008.
27. Zolfaghari A., Zolfaghari A., Kolahan F. Reliability and sensitivity of magnetic particle nondestructive testing in detecting the surface cracks of welded components // Nondestructive Testing and Evaluation. 2018. Vol. 33. No. 3. P. 290–300. DOI: 10.1080/10589759.2018.1428322.
28. Apostol E.S., Nedelcu A., Daniel D.V. et al. Mathematical modeling of eddy current non-destructive testing // 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering. 2017. P. 469–474. DOI: 10.1109/ATEE.2017.7905088.
29. Tout K., Meguenani A., Urban J.-P., Cudel C. Automated vision system for magnetic particle inspection of crankshafts using convolutional neural networks // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 112. P. 3307–3326. DOI: 10.1007/s00170-020-06467-4.
30. Ueda A., Lu H., Kamiya T. Deep-Learning Based Segmentation Algorithm for Defect Detection in Magnetic Particle Testing Images // Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics. 2021. Vol. 26. P. 235–238. DOI: 10.5954/ICAROB.2021.GS3-1.
31. Yang Y., Yang Y., Li L. et al. Automatic Defect Identification Method for Magnetic Particle Inspection of Bearing Rings Based on Visual Characteristics and High-Level Features // Applied Sciences. 2022. Vol. 12 (3). P. 1293. DOI: 10.3390/app12031293.
32. Staněk P., Škvor Z. Automated Magnetic Field Evaluation for Magnetic Particle Inspection by Impulse // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. Vol. 38. Art. 75. DOI: 10.1007/s10921-019-0615-4.
33. Bermúdez A., Gómez D., Piñeiro M. et al. Numerical Simulation of Magnetization and Demagnetization Processes // IEEE Transactions on Magnetics. 2017. Vol. 53. No. 12. P. 1–6. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2743069.
34. Mao B., Lan T., Deng W. Simulation of Magnetic Field Penetration of Cylindrical Cavity with Wound Solenoid // Advances in Computer Science Research. 2016. Vol. 58. URL: <https://www.atlantis-press.com/article/25868834.pdf> (дата обращения: 07.06.2023).

References

1. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
2. Kablov E.N. Materials of the new generation – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
3. Kablov E.N., Shevchenko Yu.N., Grinevich A.V., Kochanov D.I. Problems of certification of aviation materials at the present stage. *75 years. Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 388–396.
4. Chertishchev V.Yu., Ospennikova O.G., Boichuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. Determination of the size and depth of defects in multilayer PCM honeycomb structures based on the mechanical impedance value. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94.
5. Kosarina E.I., Krupnina O.A., Demidov A.A., Mikhaylova N.A. Digital optical pattern and its dependence on the radiation image at non-destructive testing by method of digital radiography. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.
6. Skorobogatko D.S., Golovkov A.N., Kudinov I.I., Kulichkova S.I. Revisiting the ecotoxicity and efficiency of different classes of industrial nonionic surfaces used for cleaning metal surfaces in the process of capillary control of details of the aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 07, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106.
7. Krasnov I.S., Lozhkova D.S., Dalin M.A. Evaluation of deficiency of titanium alloy forgings for probabilistic calculation of gas turbine engine disks fracture risk. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 12. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: June 07, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.

8. State Standard R 56512–2015. *The control is non-destructive. Magnetic particle method. Typical technological processes*. Moscow: Standartinform, 2016, 56 p.
9. State Standard R ISO 9934-1–2011. *The control is non-destructive. Magnetic particle method. Part 1. Basic requirements*. Moscow: Standartinform, 2019, 16 p.
10. Lozhkova D.S., Krasnov I.S., Dalin M.A. Evaluation of defectiveness of blanks of GTE disks from titanium alloys. *Kontrol. Diagnostika*, 2016, no. 7, pp. 61–67. DOI: 10.14489/td.2016.07.pp.061-067.
11. Ekobori T. *Physics and mechanics of destruction and strength of solid bodies*. Moscow: Metallurgiya, 1971, 264 p.
12. *Methodological materials for the implementation of the requirements for the main parts of the engine, the resource of which is set in cycles*: Aviation Regulations-33.70-1. Moscow: Aviaizdat, 2012, 31 p.
13. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Kudinov I.I., Golovkov A.N., Generalov A.S., Knyazev A.V. Estimation of the probability of detecting operational defects in aircraft parts made of heat-resistant alloys using domestic and foreign flaw detection liquids. *Defektoskopiya*, 2021, no. 1, pp. 64–71.
14. SDANK-01-2020. *Rules for attestation and basic requirements for non-destructive testing laboratories*. Available at: <https://ntcexpert.ru/documents/sdank-01-2020.pdf> (accessed: June 13, 2023).
15. ISO 9934-1. *Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Part 1: General principles*. Geneva: ISO, 2001, 14 p.
16. DIN EN 1369-2013. *Founding – Magnetic particle testing*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2013, 26 p.
17. ASTM E1444/E1444M. *Standard Practice for Magnetic Particle Testing for Aerospace*. ASTM International (ASTM), 2022, 16 p.
18. ASTM E709-21. *Standard Guide for Magnetic Particle Testing*. ASTM International (ASTM), 2021, 48 p.
19. Mariani S., Rendu Q., Urbani M., Sbarufatti C. Causal dilated convolutional neural networks for automatic inspection of ultrasonic signals in non-destructive evaluation and structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Elsevier, 2021, 21 p. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107748.
20. Rawat W., Wang Z. Deep Convolutional Neural Networks for Image Classification: a Comprehensive Review. *Neural Computation*, 2017, vol. 29, no. 9, pp. 2352–2449. DOI: 10.1162/neco_a_00990.
21. Tout K., Meguenani A., Urban J.P. et al. Automated vision system for magnetic particle inspection of crankshafts using convolutional neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 112, pp. 3307–3326. DOI: 10.1007/s00170-020-06467-4.
22. Link R., Riess N. NDT 4.0-significance and implications to NDT–automated magnetic particle testing as an example. *12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018)*, 2018, vol. 15, p. 6.
23. Antonio S., Fulginei F., Faba A. et al. Vector Hysteresis Processes for Innovative Fe-Si Magnetic Powder Cores: Experiments and Neural Network Modeling. *Magnetochemistry*, 2021, vol. 7 no. 2, p. 18. DOI: 10.3390/magnetochemistry7020018.
24. Ferguson M., Ak R., Lee Y.-T.T., Law K. H. Automatic localization of casting defects with convolutional neural networks. *2017 International conference on big data*, 2017, pp. 1726–1735.
25. Chen Y., Feng B., Kang Y. et al. A novel thermography-based dry magnetic particle testing method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, vol. 71, pp. 1–9. DOI: 10.1109/TIM.2022.3165742.
26. Wong B.S., Low Y.G., Wang X. et al. 3D finite element simulation of magnetic particle inspection. *2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, 2010, pp. 50–55. DOI: 10.1109/STUDENT.2010.5687008.
27. Zolfaghari A., Zolfaghari A., Kolahan F. Reliability and sensitivity of magnetic particle non-destructive testing in detecting the surface cracks of welded components. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 290–300. DOI: 10.1080/10589759.2018.1428322.
28. Apostol E.S., Nedelcu A., Daniel D.V. et al. Mathematical modeling of eddy current non-destructive testing. *10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*, 2017, pp. 469–474. DOI: 10.1109/ATEE.2017.7905088.

29. Tout K., Meguenani A., Urban J.-P., Cudel C. Automated vision system for magnetic particle inspection of crankshafts using convolutional neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 112, pp. 3307–3326. DOI: 10.1007/s00170-020-06467-4.
30. Ueda A., Lu H., Kamiya T. Deep-Learning Based Segmentation Algorithm for Defect Detection in Magnetic Particle Testing Images. *Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics*, 2021, vol. 26, pp. 235–238. DOI: 10.5954/ICAROB.2021.GS3-1.
31. Yang Y., Yang Y., Li L. et al. Automatic Defect Identification Method for Magnetic Particle Inspection of Bearing Rings Based on Visual Characteristics and High-Level Features. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12 (3), p. 1293. DOI: 10.3390/app12031293.
32. Staněk P., Škvor Z. Automated Magnetic Field Evaluation for Magnetic Particle Inspection by Impulse. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, vol. 38, art. 75. DOI: 10.1007/s10921-019-0615-4.
33. Bermúdez A., Gómez D., Piñeiro M. et al. Numerical Simulation of Magnetization and Demagnetization Processes. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, vol. 53, no. 12, pp. 1–6. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2743069.
34. Mao B., Lan T., Deng W. Simulation of Magnetic Field Penetration of Cylindrical Cavity with Wound Solenoid. *Advances in Computer Science Research*, 2016, vol. 58. Available at: <https://www.atlantispress.com/article/25868834.pdf> (accessed: June 07, 2023).

Информация об авторах

Леднев Игорь Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ходакова Елизавета Александровна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Igor S. Lednev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elizaveta A. Khodakova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.07.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.07.2023.
The article was submitted 13.07.2023; approved and accepted for publication after reviewing 18.07.2023.