

---

Научная статья

УДК 620.79

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-83-92

## РАСЧЕТ РЕЖИМОВ НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

*И.С. Леднев<sup>1</sup>, Е.А. Ходакова<sup>1</sup>*

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

**Аннотация.** Рассмотрены зависимости образования индикаторного рисунка от рассчитанного режима намагничивания объекта контроля и концентрации магнитного порошка. Описаны особенности выбора способа намагничивания. Определены магнитные характеристики, от которых зависит рассчитанный ток. Приведены формулы расчета задаваемого тока для обеспечения необходимого значения магнитного поля на поверхности контролируемой детали. Проведен эксперимент, показывающий важность соблюдения требуемой концентрации магнитного порошка.

**Ключевые слова:** магнитный неразрушающий контроль, магнитопорошковый контроль, индикация магнитного порошка, выбор способа намагничивания, уровни чувствительности контроля, расчет значения тока, концентрация магнитного порошка

**Для цитирования:** Леднев И.С., Ходакова Е.А. Расчет режимов намагничивания деталей авиационной техники // Труды ВИАМ. 2024. № 9 (139). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-83-92.

Scientific article

## CALCULATION OF THE MAGNETIZATION MODES OF AIRCRAFT PARTS

*I.S. Lednev<sup>1</sup>, E.A. Khodakova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Federal 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 considers the dependences of the formation of the indicator pattern on the calculated magnetization mode of the object of control and the concentration of magnetic powder. The features of the choice of the magnetization method are described. The magnetic characteristics on which the calculated current depends are determined. Formulas for calculating the set current are given to ensure the required value of the magnetic field on the surface of the controlled part. An illustrative experiment was conducted showing the importance of observing the required concentration of magnetic powder.

**Keywords:** magnetic non-destructive testing, magnetic powder control, indication of magnetic powder, choice of magnetization method, sensitivity levels of control, calculation of the current value, concentration of magnetic powder

**For citation:** Lednev I.S., Khodakova E.A. Calculation of the magnetization modes of aircraft parts. *Trudy VIAM*, 2024, no. 9 (139), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-83-92.

**Введение**

Одно из приоритетных направлений повышения инновационного роста отечественной промышленности – развитие авиастроения [1–3]. Большой спрос на авиационную технику среди гражданских авиакомпаний способствует увеличению производственных мощностей в авиационной промышленности. Поддержание высокого качества с одновременным увеличением объемов производимой продукции способствует эффективной реализации изделий, выпускаемых предприятиями авиационной отрасли. Определение качества деталей и узлов (без их разрушения или повреждения) изготавливаемой авиационной техники на различных этапах возможно реализовать с помощью методов неразрушающего контроля [4–7].

Среди широкой номенклатуры используемых в авиастроении материалов около 8–12 % обладают необходимыми свойствами и контролепригодны для магнитных методов неразрушающего контроля. С помощью данных методов возможно осуществлять оценку качества структуры материала или исследовать материал на наличие недопустимых несплошностей. Оценить качество состояния поверхности материалов можно с помощью магнитопорошкового метода контроля, которому подвергают элементы крепления и корпуса, входящие в состав вертолетных рулевых и несущих винтов; детали и элементы шасси самолетов, обшивок летательных аппаратов и турбовентиляторных двигателей.

Широкое применение на производстве магнитопорошковая дефектоскопия получила благодаря максимальной чувствительности, наглядным результатам контроля и высокой производительности. Наименьшие параметры, которые позволяет детектировать данный метод, по раскрытию и расстоянию от поверхности обнаруживаемых несплошностей составляют 0,001 и 0,010 мм соответственно [8].

Жидкие и сухие индикаторные материалы используются в качестве визуального регистратора местного перераспределения намагничивающего поля, формирующегося в зоне несплошностей исследуемого объекта. Подобные поверхностные перераспределения намагничивающего поля исследуемой детали получили определение «поле рассеяния несплошности». Любой жидкий индикаторный материал имеет две составляющие – смесь из жидкого носителя и ферромагнитных песчинок порошка оксида железа размерами около 5–60 мкм. Ферромагнитные частицы порошка скапливаются в валики за счет притяжения некоторого количества частиц между собой, образуя индикаторный след порошка над искажениями магнитного поля в пределах поверхности исследуемой детали или материала (рис. 1).



Рис. 1. Индикации магнитного порошка

Одним из основных параметров, влияющих на индикации магнитного порошка, является величина магнитного поля в контролируемой детали, которая зависит от режима намагничивания. Режимы для проведения контроля могут быть рассчитаны или замерены в процессе намагничивания. Чаще всего определяются значения тока, которые необходимо задать на пульте управления стационарной или переносной установки для намагничивания объекта контроля.

Несколько характеристик объекта контроля могут повлиять на определение намагничивающего тока. Расчет тока намагничивания зависит от способа магнитопорошкового контроля, физических характеристик стали и геометрических параметров контролируемого объекта [9]. Цель данной статьи – выявление факторов, влияющих на формирование индикаторного следа, при проведении магнитопорошкового контроля.

### Материалы и методы

При магнитопорошковом контроле необходимо провести расчет режимов намагничивания – как правило, это расчет значения тока, которое задается, чтобы получить необходимую величину магнитного поля на поверхности контролируемой детали.

В качестве контролируемых материалов можно рассматривать сплавы на основе Fe, Co и Ni. В практике магнитопорошкового контроля на производствах авиационной отрасли применяются различные марки стали – например, сталь 45, 30ХГСА, ШХ15, 95Х18 и др. Перечисленные стали относятся к ферромагнитным материалам с такими свойствами, которые позволяют проводить магнитный контроль. При помещении ферромагнетика в переменное магнитное поле и по зависимости напряженности  $H$  от магнитной индукции  $B$  получают график магнитного гистерезиса. Из-за этого явления при уменьшении напряженности магнитного поля магнитная индукция убывает не по кривой начального намагничивания до 0, а по траектории, проходящей через точку  $B_r$  (рис. 2). При убывании внешнего намагничивающего поля до 0 ферромагнетик остается намагниченным с остаточной индукцией  $B_r$ . Значение параметра  $B_r$  определяется магнитными свойствами контролируемой марки стали и характером магнитных воздействий, предшествовавших рассматриваемому состоянию. Остаточная индукция  $B_r$  принимает максимальное значение в том случае, если ферромагнитный материал предварительно намагнитить до насыщения, а затем напряженность магнитного поля уменьшить до нуля. Из данных графика видно, что магнитная индукция будет равна 0 лишь под действием коэрцитивной силы  $H_c$ , приложенной в обратном направлении магнитному полю, изначально намагничивающему деталь.

Параметры  $H_s$ ,  $B_r$ ,  $H_c$  – справочные величины, зависящие от химического состава стали, применяемые при расчетах режимов намагничивания. Данные характеристики могут быть различными для одной марки стали с разными режимами термообработки.

Контролировать изделия или материалы возможно двумя различными способами [10]. Различия в технологиях использования приложенного поля и остаточной намагниченности заключаются в последовательности операций обработки объекта контроля магнитным индикатором и его намагничиванием. Применяется тот или иной способ исходя из марки стали и габаритов объекта контроля.

Контроль на остаточную намагниченность проводится с разницей во времени операций намагничивания и обработки поверхности объекта контроля магнитной суспензией. Детали могут быть перемещены из рабочей зоны стационарного дефектоскопа после намагничивания и установлены на необходимую поверхность или оснастку. Полив суспензией осуществляется после снятия намагничивающего поля. Подобный способ контроля позволяет обрабатывать магнитной суспензией одновременно любое количество деталей. Время действия остаточного магнитного поля такой величины, которая позволяет проводить магнитопорошковый контроль, выбирается исходя из рекомендаций нормативной документации, которые учитывают марку стали, геометрическую форму объекта контроля и массу изделия.

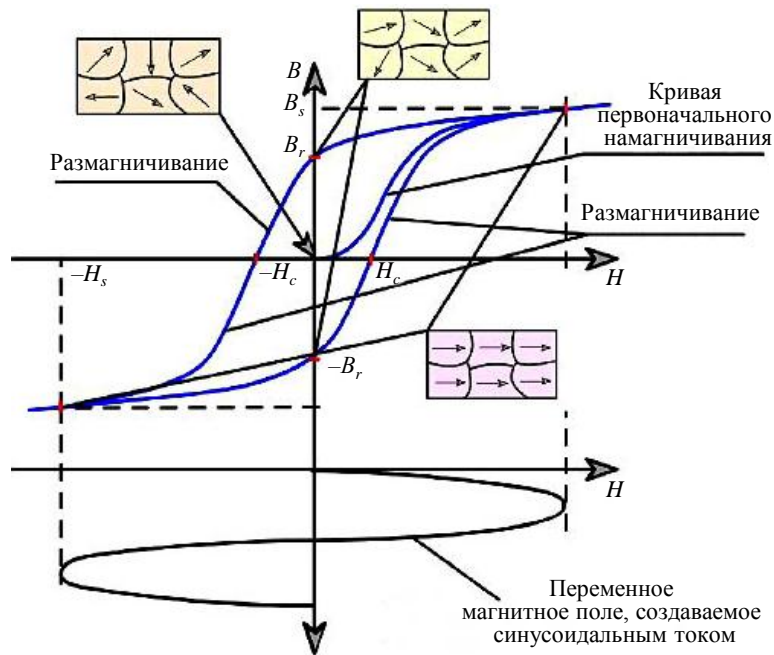


Рис. 2. Магнитный гистерезис

Контроль в приложенном намагничивающем поле не разделяет операцию намагничивания контролируемого объекта и обработку суспензией его поверхности. Исходя из практического опыта, рекомендуется дополнительно обрабатывать суспензией контролируемую деталь до помещения ее в магнитное поле. Подобный способ в технологии магнитопорошкового контроля позволяет применять ток меньшей величины. Нанесение на поверхность контролируемого объекта магнитного индикатора должно прекращаться до снятия намагничивающего поля для установления четкой картины индикаторного рисунка. При этом воздействие на деталь намагничивающего поля прекращается после окончания стекания основной массы магнитной суспензии.

Комбинированный способ контроля применяется в отдельных случаях, при возможностях используемого оборудования и сложной форме объекта контроля.

Осмотр контролируемых поверхностей на наличие индикаций магнитного порошка происходит визуально после остановки видимого движения магнитной суспензии и независимо от выбранного способа контроля, чтобы картина индикаций четко сформировалась. Контролируемую деталь рекомендуется располагать в пространстве таким образом, чтобы при обработке магнитной суспензией не образовывались застои и скопления магнитного порошка на неровных участках – например, в пазах, при изменении сечения или впадинах. Индикации магнитного порошка наиболее четко видны, если суспензия стекает по поверхности контролируемой детали по направлению предполагаемых несплошностей [11].

Выбор способа намагничивания следует начинать с нормативной документации или чертежа на контролируемый объект. В данных документах должна быть указана марка стали и термообработка объекта контроля. По справочным материалам определяются коэрцитивная сила и остаточная намагниченность марки стали.

В соответствии с графиком на рис. 3 определяется координата точки пересечения магнитных характеристик  $H_c$  и  $B_r$ , на основании расположения точки пересечения определяется возможность выбора того или иного способа намагничивания. Если координата точки пересечения расположена выше кривых, то возможен контроль объекта как способом остаточной намагниченности, так и способом приложенного поля (СПП). Если координата точки пересечения расположена ниже кривых, то рекомендуется контроль СПП.

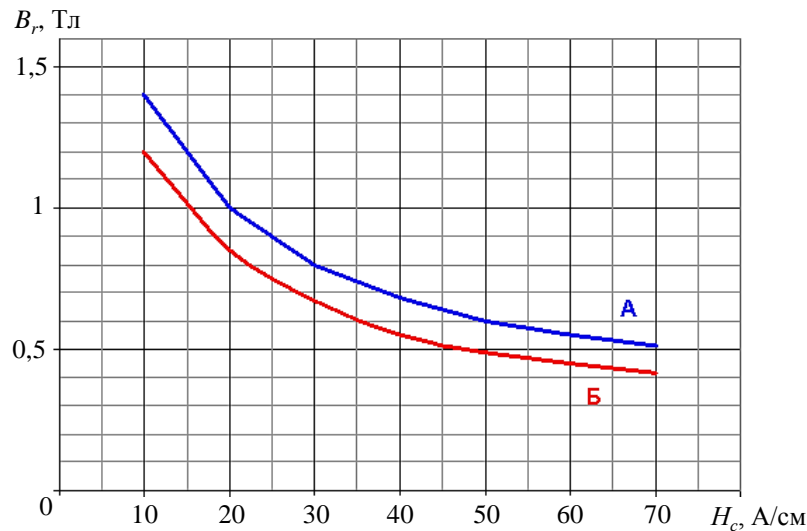


Рис. 3. Определение способа намагничивания

В российской нормативной документации на проведение магнитопорошкового контроля основным параметром чувствительности является поперечный размер раскрытия несплошности. Для проведения расчета тока размер минимальных несплошностей, которые можно обнаружить, принято делить на три уровня [12]. В зависимости от заложенных требований конструктора к прочностным характеристикам изделия осуществляется поиск несплошностей с различной шириной раскрытия. Уровень А применяется для особо ответственных деталей – например, деталей двигателей или элементов крепления с повышенной нагрузкой. Уровень Б применяется для менее ответственных и нагруженных деталей – например, корпусов элементов. Уровень В редко применяется в авиастроении.

Определение режимов для намагничивания объектов контроля начинается с расчета силы тока, проходящего через деталь или по стержню, проходящему через отверстия детали, для циркулярного намагничивания или тока в намагничивающем устройстве при полюсном намагничивании.

Напряженность магнитного поля при контроле СПП, необходимую для обеспечения заданного уровня чувствительности, можно определить с помощью зависимости значения коэрцитивной силы исследуемой марки стали от тангенсальной составляющей напряженности магнитного поля (рис. 4), значения которой необходимо достичь в контролируемом изделии для выявления несплошностей с выбранным уровнем чувствительности при контроле в приложенном поле. При контроле остаточной намагниченности необходимо выбрать значение поля насыщения. Синяя линия соответствует уровню чувствительности несплошностей с раскрытием 2 мкм, красная линия – с раскрытием 10 мкм.

Необходимо получить ординату точки задаваемого значения поля намагничивания для использования в расчете режима. В качестве абсциссы брали значение коэрцитивной силы контролируемой марки стали и проводили линию до пересечения с линией выбранного уровня чувствительности. Значение по оси ординат и будет являться необходимой напряженностью приложенного магнитного поля на поверхности контролируемого изделия  $H_{пр}$ .

Величину тока, проходящего по детали (при циркулярном намагничивании) или по обмотке намагничивающего устройства (при продольном намагничивании), необходимую для заданного магнитного поля на поверхности контролируемых деталей, можно определить экспериментально или расчетным путем.

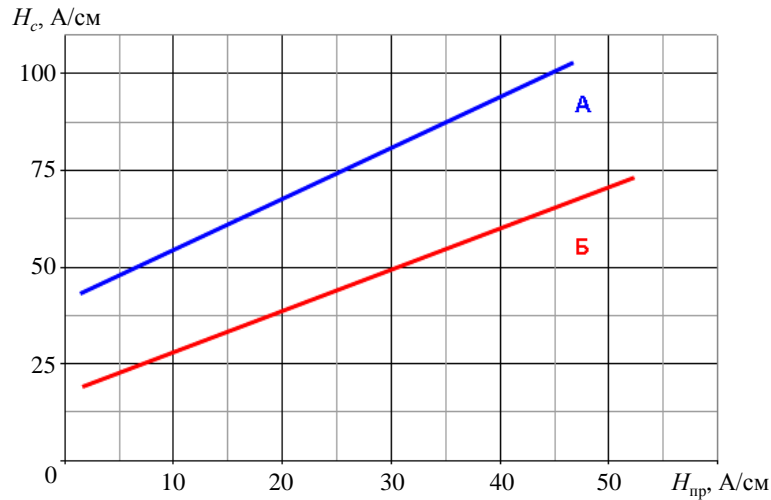


Рис. 4. Определение уровня чувствительности

Расчетным путем величина тока  $I$  может быть определена в случаях циркулярного намагничивания деталей относительно простого поперечного сечения контролируемого участка детали по следующим формулам (где  $H$  – требуемая напряженность магнитного поля, А/см) [13]:

– для детали цилиндрической формы с диаметром наибольшего сечения  $D$  (мм):

$$I = 0,3HD;$$

– для детали прямоугольной формы длиной  $L$  (мм) и высотой  $H$  (мм):

$$I = 0,2HL \text{ при } L/H > 10;$$

$$I = 0,2H(L + H) \text{ при } L/H < 10;$$

– для детали с крупногабаритными участками:

$$I = 0,15H \sqrt{X^2 + Y^2},$$

где  $X$  и  $Y$  – длина и ширина контролируемого участка, мм.

Погрешность расчетов будет возрастать по мере увеличения различия форм деталей. В этих случаях необходимую силу тока следует определять экспериментально.

При полюсном намагничивании также можно рассчитать значение задаваемого тока, но результат может не обеспечивать необходимое значение магнитного поля на поверхности контролируемой детали. Поэтому на практике чаще применяют метод подбора с измерением значения магнитного поля во время намагничивания, а также специальные приборы, обеспечивающие необходимую точность.

При полюсном намагничивании деталей с помощью соленоида или обмотки гибким кабелем намагничивающий ток можно рассчитать:

$$I = m \cdot H \cdot L/N,$$

где  $L$  – длина соленоида или обмотки, см;  $H$  – требуемая напряженность магнитного поля, А/см;  $N$  – число витков соленоида или обмотки;  $m$  – коэффициент, определяемый в зависимости от соотношения радиуса и длины соленоида или обмотки.

### Результаты и обсуждение

От выбранного режима, необходимого для достижения заданных значений магнитного поля, напрямую зависят параметры индикации магнитного порошка над дефектом [14].

В качестве исследуемого объекта контроля применена полая цилиндрическая деталь из стали ВКС-1, термообработанная по режиму: закалка при 980 °С + отпуск при 230 °С. На деталь также нанесено хромовое покрытие толщиной 60 мкм, она имеет подтвержденный дефект в виде продольной волосовины длиной ~50 мм.

Контроль проведен на стационарном универсальном дефектоскопе с возможностью широкой регулировки задаваемого тока. В качестве магнитного индикатора использована черная магнитная суспензия в баллончике. Деталь помещена на стержень, зажатый между контактными поверхностями установки для пропускания тока по детали. Контроль проведен в приложенном поле, обработка суспензией из баллончика осуществлена до и во время намагничивания. Расчетный ток намагничивания равен 1,8 кА.

При соблюдении выбранной технологии контроля и расчетного режима на поверхности цилиндрического объекта контроля отображается контрастный индикаторный рисунок (рис. 5).

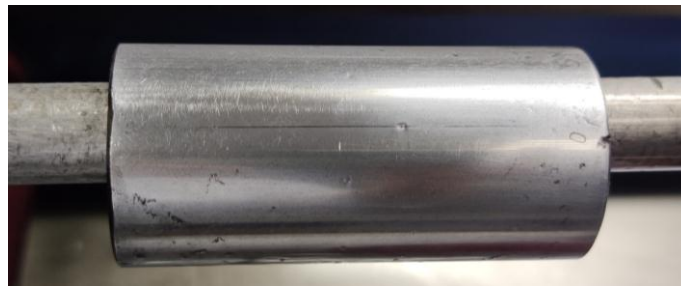


Рис. 5. Деталь с волосовиной

Установлено, что при увеличении или уменьшении расчетного циркулярного тока намагничивания длина индикации над дефектом изменяется (см. таблицу): при снижении тока намагничивания длина дефекта уменьшается, а при увеличении остается практически неизменной, но увеличивается фон из порошка, что ухудшает расшифровку индикации (рис. 6).

**Длина индикации в зависимости от величины тока**

Величина тока намагничивания, кА	Длина выявленной индикации, см
3,0	4,8
2,8	4,7
2,6	5,2
2,4	5,0
2,2	4,9
2,0	4,9
1,8	5,0
1,6	4,4
1,4	4,9
1,2	4,1
1,0	3,5
0,8	3,6
0,5	0,9

Большое влияние на индикацию несплошностей и, соответственно, на четкость и контрастность изображения поверхности индикации любого магнитного порошка оказывает концентрация частиц оксида железа в применяемом при контроле магнитном индикаторе [15]. Дефектоскопист-оператор может визуально оценить данное влияние и дать субъективную оценку.

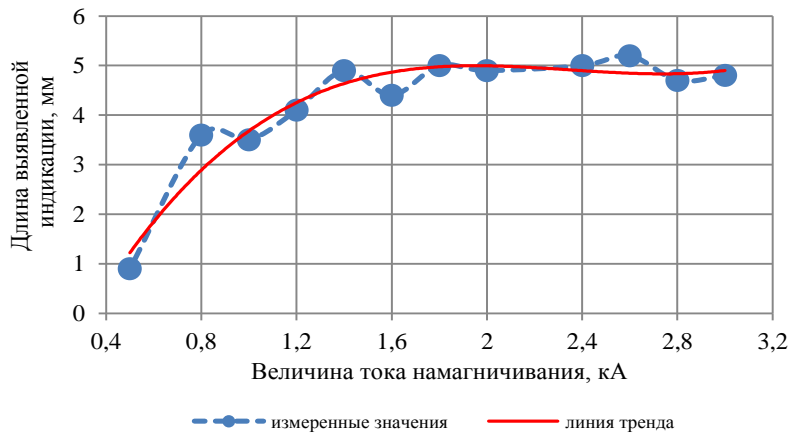


Рис. 6. Влияние величины тока намагничивания на длину выявленной индикации



Рис. 7. Контрольный образец из стали 40X13

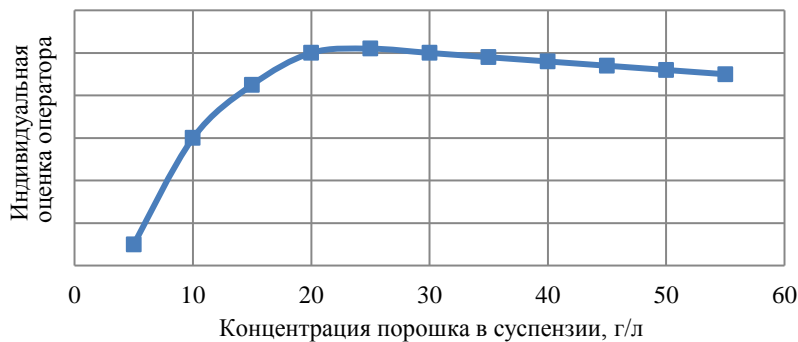


Рис. 8. Визуальная оценка выявляемости дефекта

Выполнен эксперимент, в результате которого проведена субъективная оценка выявляемости дефекта на контрольном образце из стали 40X13 (рис. 7), соответствующей уровню чувствительности А, в зависимости от рекомендуемой, а также от увеличенной и уменьшенной концентрации порошка (рис. 8). Использована суспензия на основе черного магнитного порошка (ТУ 6-36-05800165-1009-93) и трансформаторного масла. Рекомендуемая концентрация по ТУ составляет  $25 \pm 5$  г/л магнитного порошка. Визуальная оценка выявляемости дефекта на контрольном образце показала, что при требуемой концентрации порошка в суспензии дефект выявляется наиболее четко; при снижении концентрации порошка  $\leq 20$  г/л дефект выявляется наименее четко; при повышении концентрации порошка  $\geq 30$  г/л начинает накапливаться фон из магнитного порошка вокруг выявленного дефекта, что визуально снижает качество индикаторного следа над дефектом.

### Заключения

Приведен порядок расчета режимов намагничивания деталей при магнитопорошковым контроле, который включает определение тока намагничивания в зависимости от способа контроля и того, в каком положении намагничивается деталь. Определены

магнитные характеристики, от которых зависит рассчитанный ток. Проведена оценка зависимости образования индикаторного рисунка от рассчитанного режима намагничивания объекта контроля. Показано, что при увеличении или уменьшении рассчитанного тока намагничивания полученная индикация магнитного порошка становится менее заметной для дефектоскописта-оператора. Это свидетельствует о том, что необходимо придерживаться расчетных режимов намагничивания, так как отклонение не приводит к лучшим результатам контроля.

Показано также, что необходимо следить за концентрацией магнитной суспензии, которая применяется при магнитопорошковом контроле. Уменьшение концентрации приводит к ухудшению выявляемости дефекта, а увеличение – к росту фона магнитного порошка вокруг индикаторного рисунка, что также снижает выявляемость дефекта.

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

#### Список источников

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
2. Kablov E.N., Startsev V.O. The influence of internal stresses on the aging of polymer composite materials: a review // *Mechanics of Composite Materials*. 2021. Vol. 57. No. 5. P. 565–576. DOI: 10/1007/s11029-021-09979-6.
3. Каблов Е.Н. Материалы на все времена // Наука и жизнь. 2010. № 10. С. 12–19.
4. Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.
5. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С., Славин А.В. Автоматизированный неразрушающий контроль образцов трехслойных сотовых конструкций ультразвуковым теневым методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 74–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-74-80.
6. Скоробогатько Д.С., Головков 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: 16.05.2024). 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: 16.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
8. Шелихов Г.С. Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов. М.: Эксперт, 1995. 224 с.
9. ГОСТ Р 56512–2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы. М.: Стандартинформ, 2016. 56 с.
10. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.
11. ГОСТ Р ИСО 9934-1–2011. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Часть 1. Основные требования. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.
12. ГОСТ 21105–87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. М.: Изд-во стандартов, 2003. 14 с.
13. Беда П.И., Выборнов Б.И., Глазков Ю.А. и др. Неразрушающий контроль металлов и изделий: справочник / под ред. Г.С. Самойловича. М.: Машиностроение, 1976. 456 с.
14. Александров А.Г., Глазков Ю.А. Технологические карты по магнитопорошковому контролю деталей авиационной техники: методич. рекомендации по составлению. Люберцы: 13 ГНИИ МО РФ, 1995. Вып. ВВС 6878. 76 с.

15. Леднев И.С. Исследование свойств дефектоскопических материалов для проведения магнитопорошкового контроля // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-122-132.

### References

1. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
2. Kablov E.N., Startsev V.O. The influence of internal stresses on the aging of polymer composite materials: a review. *Mechanics of Composite Materials*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 565–576. DOI: 10/1007/s11029-021-09979-6.
3. Kablov E.N. Materials for all times. *Nauka i zhizn*, 2010, no. 10, pp. 12–19.
4. Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhaylova N.A., Kosarina E.I. Investigation of polymer composite material samples by x-ray computed tomography and processing of tomograms with the image of the volume fraction of porosity. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.
5. Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S., Slavin A.V. Automated non-destructive inspection of three-layer honeycomb structures' samples by ultrasonic through-transmission technique. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 74–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-74-80.
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: May 16, 2024). 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://www.journal.viam.ru> (accessed: May 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
8. Shelikhov G.S. *Magnetic particle inspection of parts and assemblies*. Moscow: Expert, 1995, 224 p.
9. State Standard R 56512–2015. *Non-destructive testing. Magnetic particle method. Typical technological processes*. Moscow: Standartinform, 2016, 56 p.
10. Klyuev V.V., Sosnin F.R., Filinov V.N. et al. *Non-destructive testing and diagnostics: handbook*. Ed. V.V. Klyuev. Moscow: Mashinostroyeniye, 1995, 488 p.
11. State Standard R ISO 9934-1–2011. *Non-destructive testing. Magnetic particle method. Part 1. Basic requirements*. Moscow: Standartinform, 2019, 16 p.
12. State Standard 21105–87. *Non-destructive testing. Magnetic particle method*. Moscow: Publishing House of Standards, 2003, 14 p.
13. Beda P.I., Vybornov B.I., Glazkov Yu.A. et al. *Non-destructive testing of metals and products: reference book*. Ed. G.S. Samoylovich. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976, 456 p.
14. Aleksandrov A.G., Glazkov Yu.A. *Technological maps for magnetic particle testing of aircraft parts: methodological recommendations for compilation*. Lyubertsy: 13th State Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 1995, is. VVS 6878, 76 p.
15. Lednev I.S. Inquiry of the properties of detection media for magnetic particle inspection. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-122-132.

### Информация об авторах

**Леднев Игорь Сергеевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ходакова Елизавета Александровна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

### Information about the authors

**Igor S. Lednev**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Elisaveta A. Khodakova**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 16.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.08.2024.  
The article was submitted 16.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 05.08.2024.