

Научная статья

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112

## НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

С.С. Пичугин<sup>1</sup>, В.С. Шитиков<sup>1</sup>, А.Н. Головков<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 наиболее распространенные и перспективные неразрушающие методы оценки остаточных напряжений. Представлены дифрактометрические, ультразвуковой, магнитный, электропотенциальный и вихретоковый методы оценки остаточных напряжений, проведен их сравнительный анализ. Приведены достоинства и недостатки каждого метода, а также сделаны выводы об особенностях их применения для объектов контроля из различных материалов. Данная статья актуальна для специалистов, изучающих проблему оценки напряженно-деформированного состояния материалов.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, дифрактометрия, неразрушающий контроль, вихретоковый контроль, электропотенциальный контроль, ультразвуковой контроль, магнитный контроль, шум Баркгаузена

**Для цитирования:** Пичугин С.С., Шитиков В.С., Головков А.Н. Неразрушающие методы оценки остаточных напряжений // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.

Scientific article

## NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR RESIDUAL STRESS ASSESSMENT

S.S. Pichugin<sup>1</sup>, V.S. Shitikov<sup>1</sup>, A.N. Golovkov<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 gives an overview of the most common and promising nondestructive methods of residual stress evaluation. Diffractometric, ultrasonic, magnetic, potential drop and eddy current methods of residual stress assessment are presented and their comparative analysis is carried out. Advantages and disadvantages of each method are given, and conclusions are made about application specifics of testing objects made of different materials. This article is relevant for specialists studying the problem of stress-strain state estimation of materials.

**Keywords:** residual stresses, diffractometry, nondestructive testing, eddy current testing, potential drop, ultrasonic testing, magnetic testing, Barkhausen noise

**For citation:** Pichugin S.S., Shitikov V.S., Golovkov A.N. Non-destructive methods for residual stress assessment. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-101-112.

### Введение

Развитие авиационной промышленности, внедрение новых материалов и технологий требуют применения особых подходов к контролю качества на всех этапах производства [1–4]. При проектировании и оценке надежности деталей и элементов изделий

авиационной техники в реальных условиях эксплуатации важным этапом является анализ напряженно-деформированного состояния. При выполнении технологических операций, которые сопровождаются пластической деформацией, неравномерным нагревом (охлаждением), изменением фазы или структуры, в деталях возникают механические напряжения, которые влияют на эксплуатационные характеристики материала [5, 6].

Механические напряжения, которые возникают при изготовлении или эксплуатации деталей и сохраняются при отсутствии внешних воздействий, называют остаточными. Их разделяют на три рода. К I роду относятся макроостаточные напряжения, которые локализованы в объеме  $>1$  мм. Макронапряжения I рода, как остаточные, так и приложенные, являются одной из причин возникновения микронапряжений II рода – микроостаточных напряжений, распространяющихся в микронном объеме, например между зернами в металлах. К III роду относят остаточные напряжения, возникающие на атомном уровне вокруг дислокаций и границ раздела кристаллов [7, 8].

Для измерения и оценки остаточных напряжений в различных деталях разработано множество разрушающих и неразрушающих методов. Объектом большинства методов измерения являются макронапряжения I рода, некоторые методы можно также использовать для определения напряжений II и III родов.

Разрушающие методы основаны на измерении деформаций, возникающих вследствие снятия остаточных напряжений при удалении материала образца. К наиболее распространенным разрушающим методам, применяемым для измерения остаточных напряжений в элементах конструкций, относят секционирование, контурный метод, сверление отверстий, метод послойного удаления. Основными недостатками разрушающих методов являются перераспределение остаточных напряжений в результате обработки, применяемой в процессе измерения, а также невозможность повторения измерений вследствие разрушения образца. В работе [9] представлен обзор наиболее распространенных разрушающих методов определения остаточных напряжений.

Неразрушающие методы контроля основаны на косвенной оценке напряженно-деформированного состояния по параметрам, связанным с механическими напряжениями. Эти методы уступают по точности разрушающим методам, однако обладают рядом важных преимуществ: позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние непосредственно при эксплуатации деталей, не влияют на распределение остаточных напряжений, что позволяет проводить повторный контроль или оценку различными методами.

В данной работе приведен обзор наиболее распространенных и перспективных в настоящее время неразрушающих методов оценки остаточных напряжений.

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

### **Дифрактометрические методы**

В основе дифрактометрических методов лежит измерение расстояний между атомными плоскостями кристаллических решеток материалов, которые связаны с величиной и направлением механического напряжения в материале. Эти измерения проводятся посредством регистрации рассеянного рентгеновского или нейтронного излучения и не зависят от вида напряжений (остаточные или приложенные).

Для измерения напряжений с использованием дифракции сканируется диапазон углов рассеяния, регистрируется зависимость интенсивности рассеяния от угла дифракции. Угол, при котором регистрируется дифракционный максимум, определяется как угол Брэгга, который связан с расстоянием между кристаллографическими плоскостями:

$$n\lambda = 2d\sin\theta,$$

где  $n$  – порядок дифракционного максимума;  $\lambda$  – длина волны излучения, нм;  $d$  – межплоскостное расстояние, нм;  $\theta$  – угол падающего луча, градус.

Брэгговское отражение от кристаллической решетки показано на рис. 1.

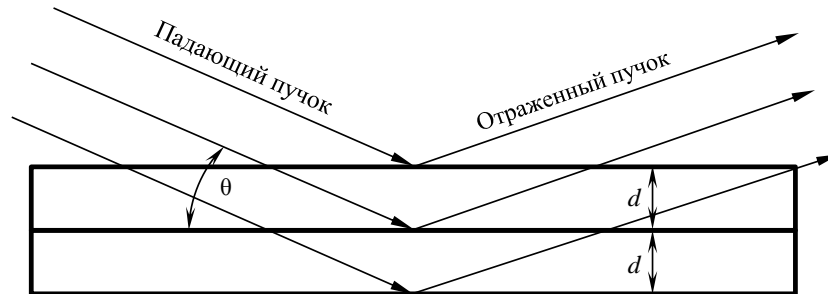


Рис. 1. Брэгговское отражение от кристаллической решетки

Небольшие изменения межплоскостного расстояния  $d$ , приводящие к уширению дифракционного максимума, отражают напряжения II и III родов (микронапряжения).

Деформация всего образца вызывает изменение размеров каждого отдельного зерна. Растяжение или сжатие кристалла приводит к изменению межплоскостных расстояний. При однородной деформации изменение межплоскостного расстояния соответствует относительной деформации образца. Во всех одинаково ориентированных относительно приложенной нагрузки зернах изменение межплоскостных расстояний идентично, поэтому при наличии в образце остаточных напряжений на рентгенограмме наблюдается смещение линий. Оценивая изменение межплоскостных расстояний по смещению рентгеновских линий относительно рентгеновских линий ненапряженного образца, можно определить деформации и рассчитать величину упругих напряжений.

В отличие, например, от тензометрического метода, с помощью которого можно измерить изменение деформации только после закрепления датчика на поверхности объекта контроля, дифракционные методы позволяют определить абсолютную величину деформации, т. е. значение деформации относительно состояния ненапряженного образца (напряжения I рода).

В рентгеновском методе обычно используется характеристическое рентгеновское излучение от определенного анода или мишени рентгеновской трубки, например, из меди, хрома или железа [10]. Диапазон длин волн рентгеновского излучения составляет от 0,07 до 0,2 нм. Глубина проникновения рентгеновского излучения для большинства материалов не превышает 20 мкм, поэтому метод рентгеновской дифракции позволяет оценить напряжения только в поверхностных слоях. Метод получил широкое распространение для оценки остаточных напряжений благодаря наличию отработанных методик и измерительных приборов, позволяющих определить угол дифракции. В отличие от других методов дифракции, рентгеновский метод можно реализовать на базе портативных приборов.

Метод дифракции нейтронов отличается от рентгеновского источником излучения. В этом случае используют источники, которые обеспечивают нейтронное излучение с энергией, соответствующей длине волны в диапазоне от 0,07 до 0,3 нм [11]. Нейтронное излучение взаимодействует непосредственно с ядром атома, что позволяет контролировать детали, выполненные из материалов на основе химических элементов как с большим, так и с низким атомным номером. При использовании рентгеновского

метода контроль материала на основе химических элементов с низким атомным номером затруднен.

Преимуществом методов нейтронной дифракции по сравнению с рентгеновским методом является большая проникающая способность: измеряемая толщина объектов контроля составляет 0,1–1,5 мм.

По сравнению с рентгеновским методом нейтронная дифракция более трудоемка, измерение спектра занимает продолжительное время. Для определения напряжения в одном измерительном объеме детали ( $\sim 1 \text{ мм}^3$ ) требуется не менее трех измерений деформации. В отличие от остальных неразрушающих методов оценки остаточных напряжений, методы нейтронной и рентгеновской дифракции стандартизованы международными нормативными документами [12, 13].

В настоящее время все большее распространение в качестве мощных источников рентгеновского излучения получают так называемые накопительные кольца, в которых возникает синхротронное излучение. Это излучение используется в том числе для решения тех же задач, что излучение рентгеновских трубок. Синхротронные источники по сравнению с рентгеновской трубкой обеспечивают рентгеновское излучение с большей интенсивностью и более высокой энергией [14]. Поскольку спектр синхротронного излучения полихроматический, для решения большинства задач необходима его монохроматизация отражением от кристалла-монокроматора. Интенсивность при этом снижается в 10–100 раз, но излучение остается в  $10^4$  раз интенсивнее, чем излучение рентгеновской трубки.

Низкая угловая расходимость обеспечивает малое инструментальное уширение дифракционных максимумов, поэтому необходимо применять специальный гониометр с небольшим шагом поворота образца и детектор с высокой точностью отсчета этого угла. Необходимо использовать приборы, характеристики которых по крайней мере на порядок превосходят характеристики рентгеновских гониометров. По сравнению с нейтронным методом синхротронный метод менее трудоемок, одно измерение проводится в течение нескольких миллисекунд [8].

Несмотря на преимущества методов нейтронной и синхротронной дифракции, работа с источниками таких излучений возможна только в специализированных лабораториях. Например, в работе [15] исследования проводили на реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт».

### Ультразвуковой метод

Одним из перспективных направлений в развитии неразрушающих методов измерения остаточных напряжений является ультразвуковой метод, основанный на акустоупругом эффекте, когда скорость распространения упругих волн в твердых телах зависит от механического напряжения [16, 17]. Интенсивность и характер изменения скоростей ультразвуковых волн зависят от свойств материала и могут отличаться для различных сплавов. Метод не ограничен типами исследуемых материалов и может использоваться для измерения остаточных напряжений на образцах с большой толщиной. Максимальная глубина, на которой возможна оценка напряженно-деформированного состояния ультразвуковым методом, определяется затуханием упругих колебаний в объекте контроля и значительно превышает глубину, которая исследуется дифрактометрическими методами.

Наиболее простой реализацией ультразвукового метода оценки остаточных напряжений является эхо-импульсный метод. При исследовании данным методом для возбуждения и приема ультразвуковых волн используется один и тот же преобразователь. В этом случае измеряется среднее значение остаточных напряжений по толщине.

На рис. 2 показана схема измерения остаточных напряжений с помощью прямого пьезоэлектрического преобразователя, который является излучателем и приемником. По времени прихода сигнала  $\Delta t$  на пьезоэлектрический преобразователь и толщине  $T$  объекта контроля вычисляется значение скорости распространения ультразвуковых колебаний.

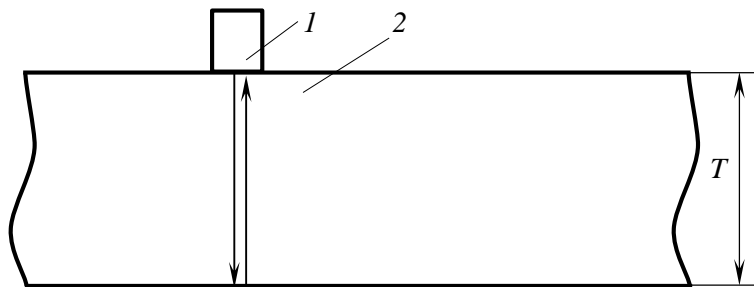


Рис. 2. Схема измерения остаточных напряжений ультразвуковым методом: 1 – пьезоэлектрический преобразователь; 2 – объект контроля

Напряжения, появляющиеся при механической обработке, приводят к изменению скорости распространения ультразвуковых колебаний на  $\leq 0,1\%$ . Поэтому оборудование для практического применения ультразвукового метода измерения остаточных напряжений должно иметь высокое разрешение во временной области [18]. Недостаток данного метода заключается в том, что на скорость распространения волны влияет не только напряженно-деформированное состояние, но и другие микроструктурные характеристики, такие как размер зерен, кристаллографическая текстура и т. д. Наиболее важным преимуществом метода является возможность определения остаточных и приложенных напряжений в эксплуатируемых элементах конструкции.

### Магнитный метод

Данный метод применяется для оценки напряженно-деформированного состояния только магнитных материалов. Метод основан на измерении параметров петли гистерезиса или магнитных шумов Баркгаузена. Магнитные материалы состоят из элементарных областей, называемых доменами, направление намагниченности в каждом из которых совпадает с одной из эквивалентных осей легкого намагничивания. Однако векторы (спины) намагниченности внутри доменов ориентированы таким образом, что полная намагниченность материала близка к нулю, за исключением естественных магнитов.

При приложении к магнитному материалу внешнего магнитного поля происходит рост доменов, намагниченных по полю, а также поворот намагниченности в тех доменах, которые намагничены под углом к полю. Процесс перемагничивания в реальном ферромагнетике обусловлен наличием примесей и несовершенством кристаллической структуры материала, что определяет параметры петли гистерезиса и уровень магнитных скачков. Диаграмма, изображенная на рис. 3, иллюстрирует характерные кривые с насыщением магнитной индукции ( $B$ ) при высоких положительных и отрицательных напряженностях ( $H$ ) приложенного поля и петель гистерезиса при циклическом изменении напряженности магнитного поля. Более подробную информацию о физике доменов в магнитных материалах можно найти в работе [19].

Намагниченность материала изменяется небольшими нерегулярными скачками, соответствующими магнитным изменениям в небольших локальных областях. Такие магнитные скачки называют магнитным шумом Баркгаузена. Наличие остаточных напряжений определяет, каким образом происходят локальные магнитные изменения, влияющие на количество и характер производимого шума.

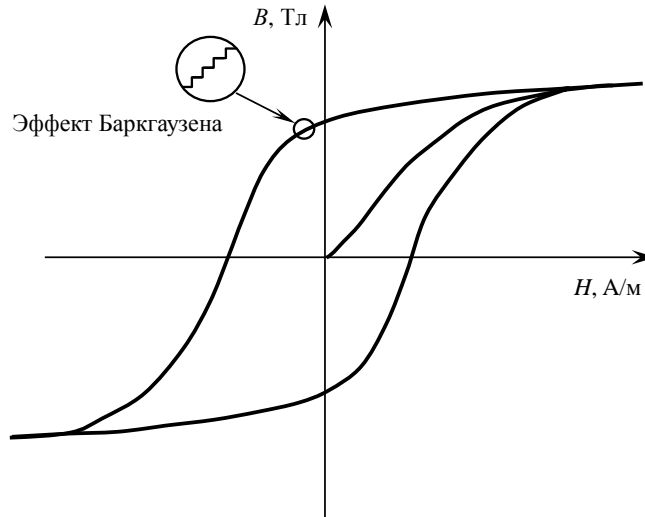


Рис. 3. Кривая намагничивания магнитного образца

Регистрируя магнитные шумы Баркгаузена [20, 21] или изменения магнитной проницаемости при перемагничивании, можно сделать вывод о напряженно-деформированном состоянии объекта контроля. Метод обладает высокой чувствительностью, так как магнитные свойства материала существенно изменяются при деформации.

#### Электропотенциальный метод

Электропроводимость материала связана с длиной свободного пробега электрона, которая определяется тепловым рассеянием и рассеянием, вызванным столкновениями электронов с нарушениями периодичности кристаллической решетки металла. Описанные нарушения и наличие примесей приводят к уменьшению электропроводимости материала. Нарушения структуры объекта контроля в свою очередь связаны с напряженно-деформированным состоянием [22]. Одним из методов, позволяющих оценить изменение электропроводимости, является электропотенциальный [23, 24].

Реализацией электропотенциального метода, в частности, является четырехэлектродная схема (рис. 4). Методика измерения по данной схеме заключается в следующем: четыре электрода подключаются к поверхности проводящего объекта контроля, ток  $I$  подается на два токовых электрода, разность потенциалов  $U$  контролируется на двух измерительных (потенциальных) электродах, после чего рассчитывается сопротивление электропередачи [25].

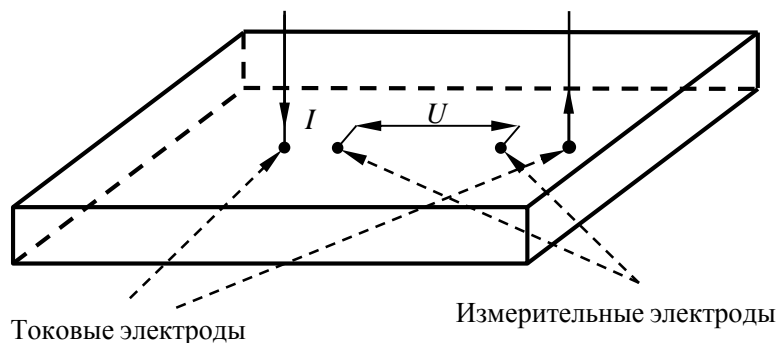


Рис. 4. Четырехэлектродная схема измерения остаточных напряжений электропотенциальным методом

Измерения можно проводить как при постоянном, так и переменном токе. Такие мешающие факторы, как случайный шум, электрический дрейф и термоэлектрические составляющие постоянного тока, оказывают меньшее влияние на измерение при использовании переменного тока. Увеличение частоты тока возбуждения приводит к уменьшению глубины проникновения электрического поля в объект контроля за счет поля вихревых токов. Таким образом, путем варьирования частоты тока можно получить информацию о распределении остаточных напряжений по глубине.

В ферромагнитных материалах при использовании переменного тока локальные изменения магнитных свойств, не связанные с механическими напряжениями, приводят к существенным изменениям глубины проникновения, вызывая ложные нежелательные изменения сопротивления. Поэтому измерения при переменном токе непригодны для испытаний ферромагнитных материалов [26].

Существенным недостатком метода является необходимость обеспечения надежного электрического контакта между образцом и преобразователем.

### Вихретоковый метод

Для оценки остаточных напряжений по изменению электропроводимости также можно применять вихретоковый метод [27, 28]. Данный метод основан на анализе электромагнитного поля вихревых токов в электропроводящем материале [29, 30]. На рис. 5 показан физический принцип вихретокового метода. Под действием электромагнитного поля вихретокового преобразователя в объекте контроля индуцируются вихревые токи, поле которых можно зарегистрировать по изменению комплексного сопротивления преобразователя. Поскольку величина и распределение вихревых токов в объекте контроля связаны с электропроводимостью, по полю вихревых токов можно судить о свойствах материала. В отличие от электропотенциального, вихретоковый метод бесконтактен и не требует снятия непроводящих покрытий или предварительной подготовки поверхности.

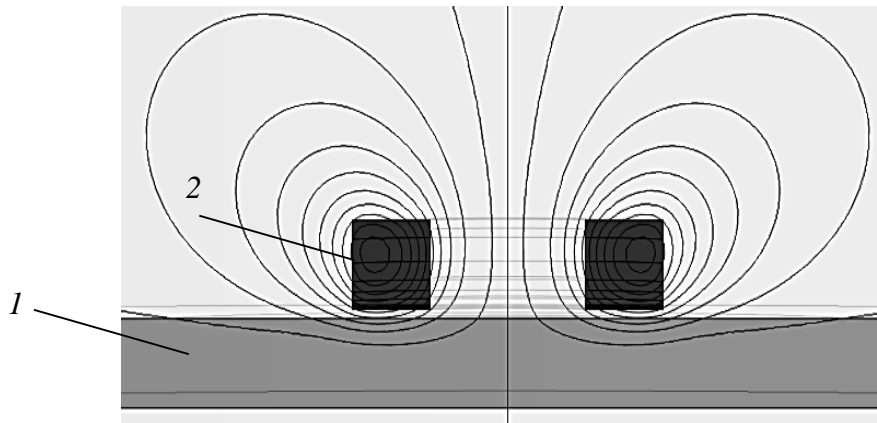


Рис. 5. Физический принцип вихретокового метода:  
1 – объект контроля; 2 – вихретоковый преобразователь

Чем выше частота тока возбуждения, тем меньше глубина проникновения поля в объект контроля. Таким образом, варьируя частоту возбуждающего тока, можно изменять чувствительность к изменению электропроводимости различных слоев объекта контроля, которая в свою очередь связана с напряженно-деформированным состоянием.

Остаточные напряжения приводят к изменению электропроводимости металла не более чем на 2 %, поэтому система вихретокового контроля должна обладать высокой чувствительностью и обеспечивать эффективное выделение информативных параметров на фоне многочисленных мешающих факторов.

Вихретоковый метод не получил широкого распространения при оценке уровня остаточных напряжений, поскольку анализ связи сигнала первичного преобразователя с напряженно-деформированным состоянием в зоне контроля затруднен.

### Заключения

Рассмотрены различные неразрушающие методы оценки остаточных напряжений, сделаны выводы о возможности применения этих методов в различных областях, приведены их достоинства и недостатки.

Основным преимуществом дифрактометрических методов неразрушающего контроля является наличие приборной базы и нормативной документации, обеспечивающих достоверный контроль. Однако рентгеновский метод позволяет оценить напряжения лишь в поверхностных слоях, а применение нейтронного и синхротронного излучений возможно только в лабораторных условиях.

Интегральную оценку остаточных напряжений на значительной глубине позволяет получить ультразвуковой метод контроля. Поскольку скорость распространения волн в материале измеряется как время прохождения известного расстояния, то из полученных данных можно извлечь информацию, усредненную по всему пути распространения колебаний. Таким образом, при контроле ультразвуковым методом получение информации об отдельной области объекта контроля затруднено, а вклад изменения напряжений (даже значительных), локализованных на малом участке пути прохождения упругих колебаний, может быть неразличим на фоне колебаний свойств по всей длине пути.

Магнитный метод обладает высокой чувствительностью, однако применим только к магнитным материалам. Электропотенциальный и вихретоковый методы позволяют оценить распределение остаточных напряжений в исследуемом образце по глубине, при этом контроль может осуществляться с помощью портативного оборудования. Недостатком электропотенциального метода является необходимость обеспечения электрического контакта между объектом контроля и электродами прибора. Применение вихретокового метода осложнено тем, что каждая задача контроля требует разработки методики получения полезной информации и отстройки от многочисленных мешающих факторов.

Выбор методов и оборудования контроля для решения конкретной задачи оценки напряженно-деформированного состояния возможен только после комплексного анализа свойств материала контролируемой детали или полуфабриката, условий контроля, конструктивных особенностей и нагрузок при эксплуатации.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // Электromеталлургия. 2022. № 2. С. 2–12.
3. Гриневиц А.В., Лаптев А.Б., Скрипачев С.Ю., Нужный Г.А. Матрица прочностных характеристик для оценки предельных состояний конструкционных металлических материалов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74.

4. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Уткин Д.А. Методы определения механических характеристик материалов с помощью индентирования (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
5. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Влияние внутренних напряжений на старение полимерных композиционных материалов (обзор) // *Механика композитных материалов*. 2021. Т. 57. № 5. С. 805–822.
6. Монахов А.Д., Яковлев Н.О., Шершак П.В. Методы формирования образцов с искусственно созданным распределением остаточных напряжений // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-122-132.
7. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // *Materials and Design*. 2012. No. 35. P. 572–588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022.
8. Schajer G., Ruud C. Overview of Residual Stresses and their measurement // *Practical Residual stress: measurement methods* / ed. G.S. Schajer. John Wiley & Sons Ltd, 2013. P. 1–27. DOI: 10.1002/8402832.ch1.
9. Монахов А.Д., Яковлев Н.О., Автаев В.В., Котова Е.А. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 9 (103). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104.
10. Dolle H. Influence of Multiaxial Stress States, Stress Gradients and Elastic Anisotropy on the Evaluation of (Residual) Stresses by X-rays // *Journal of Applied Crystallography*. 1979. No. 12. P. 489–501. DOI: 10.1107.S0021889879013169.
11. Hayashi M., Ohkido S., Minakawa N., Murii Y. Residual Stress Distribution Measurement in Plastically Bent Carbon Steel by Neutron Diffraction // *V International Conference on Residual Stresses*. Sweden: Linköping University, 1997. P. 676–681.
12. ISO/TS 21432. Non-destructive testing – Standard test method for determining residual stress by neutron diffraction. Switzerland: Technical Specification, 2019. 15 p.
13. DSF/PrEN 15305. Non-destructive testing – Test method for Residual Stress by X-ray diffraction. Irish: European Standard Working Document, 2005. 88 p.
14. Reimers W., Pyzalla A., Broda M. et al. The Use of High-Energy Synchrotron Diffraction for Residual Stress Analyses // *Journal of Materials Science Letters*. 1999. No. 18. P. 581–583. DOI: 10.1023/A:1006651217517.
15. Эм В.Т., Карпов И.Д., Сумин В.В. Нейтронные измерения остаточных напряжений на реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» // *В мире неразрушающего контроля*. 2018. Т. 21. № 1. С. 20–23.
16. Ya M., Marquette P., Belahcene F., Lu J. Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods // *Materials Science Engineering*. 2004. Vol. 382. P. 257–264. DOI: 10.1016/j.msea.2004.05.020.
17. Marusina M., Fedorov A., Bychenok V., Berkutov I. Ultrasonic Laser Diagnostics of Residual Stresses // *Measurement Techniques*. 2015. No. 57. P. 1154–1159. DOI: 10.1007/s11018-015-0595-4.
18. Karabutov A., Devichensky A., Ivochkin A. et al. Laser ultrasonic diagnostics of residual stress // *Ultrasonics*. 2008. No. 48. P. 631–635. DOI: 10.1016/j.ultras.2008.07.006.
19. Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А. В мире магнитных доменов. Киев: Наукова думка, 1986. 159 с.
20. Blaow M., Evans J.T., Shaw B.A. The effect of microstructure and applied stress on magnetic Barkhausen emission in induction hardened steel // *Journal of Materials Science*. 2007. No. 42. P. 4364–4371. DOI: 10.1007/s10853-006-0631-5.
21. Ilker Y.H., Cam I., Hakan G.C. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique // *NDT&E International*. 2010. No. 43. P. 29–33. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.08.003.

22. Кекало И.Б. Физические свойства металлов. Раздел: Электрические свойства: лабораторный практикум. М., 1998. 139 с.
23. Васильков Д.В., Александров А.С., Голикова В.В., Кочина Т.Б. Неразрушающий контроль остаточных напряжений в поверхностном слое деталей из жаропрочных сплавов после механической обработки // IPDME-2021: сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции. СПб: СПбГУ, 2021. С. 12–17.
24. Марченков А.Ю., Шкатов П.Н., Пичугин С.С., Данильченко С.А., Руденко Е.М., Чернов Д.В. Разработка методики оценки изменения удельной электрической проводимости деформированного материала с помощью электропотенциального метода неразрушающего контроля // МИКМУС–2021. М.: Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2021. С. 563–569.
25. Bowler N. Four-point potential drop measuring for materials characterization // *Measurement Science and Technology*. 2010. No. 22. P. 1–11. DOI: 10.1088/0957-0233/22/1/012001.
26. Hognestad H., Honne A. Determination of stress in ferromagnetic steel by potential drop measurements // *Journal of Materials Science and Technology*. 1998. Vol. 14. P. 1109–1114.
27. Blodgett M.P., Nagy P.B. Eddy current assessment of nearsurface residual stress in shot-peened nickel-base superalloys // *Journal of nondestructive evaluation*. 2004. No. 23. P. 107–123. DOI: 10.1063/1.1916828.
28. Sekine Y., Soyama H. Evaluation of equibiaxial compressive stress introduced into austenitic stainless steel using an eddy current method // *Journal of nondestructive evaluation*. 2011. No. 31. P. 99–107. DOI: 10.1007/s10921-011-0125-5.
29. 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.
30. Шитиков В.С., Кодак Н.П., Кутырев А.Е., Вдовин А.И. Применение импульсного возбуждения для оценки степени коррозионных поражений алюминиевых сплавов вихретоковым методом // *Электротехнология*. 2022. № 9. С. 34–39. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-9-34-39.

### References

1. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Electrometallurgiya*, 2022, no. 2, pp. 2–12.
3. Grinevich A.V., Laptev A.B., Skripachev S.Yu., Nuzhnyj G.A. Matrix strength characteristics for the assessment of limit states of structural metallic materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74.
4. Oreshko E.I., Erasov V.S., Yakovlev N.O., Utkin D.A. Methods for determining the mechanical characteristics of materials using indentation (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 23, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-1-104-118.
5. Kablov E.N., Startsev V.O. The influence of internal stresses on the aging of polymer composite materials (review). *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 805–822.
6. Monakhov A.D., Yakovlev N.O., Shershak P.V. Methods for the formation of objects with artificially created residual stresses. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 23, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-122-132.
7. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review). *Materials and Design*, 2012, no. 35, pp. 572–588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022.

8. Schajer G., Ruud C. Overview of Residual Stresses and their measurement. *Practical Residual stress: measurement methods*. Ed. G.S. Schajer. John Wiley & Sons, Ltd, 2013, pp. 1–27. DOI: 10.1002/8402832.ch1.
9. Monakhov A.D., Yakovlev N.O., Avtaev V.V., Kotova E.A. Destructive methods for determining residual stresses (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104.
10. Dolle H. Influence of Multiaxial Stress States, Stress Gradients and Elastic Anisotropy on the Evaluation of (Residual) Stresses by X-rays. *Journal of Applied Crystallography*, 1979, no. 12, pp. 489–501. DOI: 10.1107.S0021889879013169.
11. Hayashi M., Ohkido S., Minakawa N., Murii Y. Residual Stress Distribution Measurement in Plastically Bent Carbon Steel by Neutron Diffraction. *V International Conference on Residual Stresses*. Sweden: Linkoping University, 1997, pp. 676–681.
12. ISO/TS 21432. *Non-destructive testing – Standard test method for determining residual stress by neutron diffraction*. Switzerland: Technical Specification, 2019, 15 p.
13. DSF/PrEN 15305. *Non-destructive testing – Test method for Residual Stress by X-ray diffraction*. Irish: European Standard Working Document, 2005, 88 p.
14. Reimers W., Pyzalla A., Broda M. et al. The Use of High-Energy Synchrotron Diffraction for Residual Stress Analyses. *Journal of Materials Science Letters*, 1999, no. 18, pp. 581–583. DOI: 10.1023/A:1006651217517.
15. Em V.T., Karpov I.D., Sumin V.V. Neutron measurements of residual stresses at the IR-8 reactor of the National Research Center «Kurchatov Institute». *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 20–23.
16. Ya M., Marquette P., Belahcene F., Lu J. Residual stresses in laser welded aluminium plate by use of ultrasonic and optical methods. *Materials Science Engineering*, 2004, vol. 382, pp. 257–264. DOI: 10.1016/j.msea.2004.05.020.
17. Marusina M., Fedorov A., Bychenok V., Berkutov I. Ultrasonic Laser Diagnostics of Residual Stresses. *Measurement Techniques*, 2015, no. 57, pp. 1154–1159. DOI: 10.1007/s11018-015-0595-4.
18. Karabutov A., Devichensky A., Ivochkin A. et al. Laser ultrasonic diagnostics of residual stress. *Ultrasonics*, 2008, no. 48, pp. 631–635. DOI: 10.1016/j.ultras.2008.07.006.
19. Baryakhtar V.G., Ivanov B.A. *In the world of magnetic domains*. Kyiv: Naukova Dumka, 1986, 159 p.
20. Blaow M., Evans J.T., Shaw B.A. The effect of microstructure and applied stress on magnetic Barkhausen emission in induction hardened steel. *Journal of Materials Science*, 2007, no. 42, pp. 4364–4371. DOI: 10.1007/s10853-006-0631-5.
21. Ilker Y.H., Cam I., Hakan G.C. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique. *NDT&E International*, 2010, no. 43, pp. 29–33. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.08.003.
22. Kekalo I.B. *Physical properties of metals. Section: Electrical properties: Laboratory workshop*. Moscow, 1998, 139 p.
23. Vasilkov D.V., Aleksandrov A.S., Golikova V.V., Kochina T.B. Non-destructive testing of residual stresses in the surface layer of parts made of heat-resistant alloys after machining. *IPDME-2021: collection of abstracts of the VIII Int. Scientific and Practical Conf.* St. Petersburg: St. Petersburg State Univ., 2021, pp. 12–17.
24. Marchenkov A.Yu., Shkatov P.N., Pichugin S.S., Danilchenko S.A., Rudenko E.M., Chernov D.V. Development of a methodology for assessing changes in the specific electrical conductivity of a deformed material using the electropotential method of non-destructive testing. *MIKMUS-2021*. Moscow: Blagonravov Institute of Mechanical Science, 2021, pp. 563–569.
25. Bowler N. Four-point potential drop measuring for materials characterization. *Measurement Science and Technology*, 2010, no. 22, pp. 1–11. DOI: 10.1088/0957-0233/22/1/012001.
26. Hognestad H., Honne A. Determination of stress in ferromagnetic steel by potential drop measurements. *Journal of Materials Science and Technology*, 1998, vol. 14, pp. 1109–1114.

27. Blodgett M.P., Nagy P.B. Eddy current assessment of nearsurface residual stress in shot-peened nickel-base superalloys. *Journal of nondestructive evaluation*, 2004, no. 23, pp. 107–123. DOI: 10.1063/1.1916828.
28. Sekine Y., Soyama H. Evaluation of equibiaxial compressive stress introduced into austenitic stainless steel using an eddy current method. *Journal of nondestructive evaluation*, 2011, no. 31, pp. 99–107. DOI: 10.1007/s10921-011-0125-5.
29. 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 using the eddy current method for the presence of cracks. *Electrometallurgiya*, 2020, no. 8, pp. 20–29. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-8-20-29.
30. Shitikov V.S., Kodak N.P., Kuttyrev A.E., Vdovin A.I. Application of pulse excitation to assess the degree of corrosion damage of aluminum alloys using the eddy current method. *Electrometallurgiya*, 2022, no. 9, pp. 34–39. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-9-34-39.

### *Информация об авторах*

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

**Шитиков Владислав Сергеевич**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Головков Алексей Николаевич**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

### *Information about the authors*

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

**Vladislav S. Shitikov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Alexey N. Golovkov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.12.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.01.2024.  
The article was submitted 29.12.2023; approved and accepted for publication after reviewing 11.01.2024.