

Научная статья

УДК 620.179.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-235-246

**ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА
ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПО ГЛУБИНЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО TiAl-СПЛАВА,
ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

С.С. Пичугин¹, Е.И. Косарина¹, Р.Р. Акбулатов¹, П.В. Панин¹

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

Аннотация. Продемонстрирована принципиальная возможность получения распределения электропроводности образцов из TiAl-сплава, выполненных методом селективного электронно-лучевого сплавления, с помощью вихретокового метода неразрушающего контроля. Для корреляционной связи электропроводности образцов и остаточных напряжений проведена рентгеновская дифракция. Показаны зависимости механических напряжений по глубине образцов до и после применения горячего изостатического прессования.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, накладной вихретоковый преобразователь, математическое моделирование, оценка свойств, структуроскопия, аддитивные технологии, селективное электронно-лучевое сплавление, горячее изостатическое прессование

Для цитирования: Пичугин С.С., Косарина Е.И., Акбулатов Р.Р., Панин П.В. Применение вихретокового метода для оценки остаточных напряжений по глубине деталей из интерметаллидного TiAl-сплава, полученных с использованием аддитивных технологий // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 235–246. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-235-246.

Scientific article

**APPLICATION OF THE EDDY CURRENT METHOD
FOR ESTIMATING RESIDUAL STRESSES
OVER THE DEPTH OF INTERMETALLIC TiAl-ALLOY PARTS
OBTAINED USING ADDITIVE TECHNOLOGIES**

S.S. Pichugin¹, E.I. Kosarina¹, R.R. Akbulatov¹, P.V. Panin¹

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 demonstrates the fundamental possibility of obtaining the electrical conductivity distribution of TiAl alloy samples made by selective electron beam melting using the eddy current method of non-destructive testing. The X-ray diffraction was performed to correlate the electrical conductivity of the samples with the residual stresses. The dependences of mechanical stresses with the depth of the studied samples before and after the application of hot isostatic pressing were shown.

Keywords: eddy current testing, surface eddy current probe, mathematical modeling, property evaluation, structuroscopy, additive manufacturing, electron beam melting, hot isostatic pressing

For citation: Pichugin S.S., Kosarina E.I., Akbulatov R.R., Panin P.V. Application of the eddy current method for estimating residual stresses over the depth of intermetallic TiAl-alloy parts obtained using additive technologies. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 235–246. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-235-246.

Введение

Аддитивные технологии быстро развиваются и находят применение в различных областях, в том числе в авиационной промышленности [1]. Аддитивные технологии получили широкое распространение ввиду высокой производительности, возможности изготовления деталей со сложной геометрической формой и улучшенными свойствами в сравнении с традиционными методами [2, 3]. Селективное электронно-лучевое сплавление (СЭЛС) – технология аддитивного производства, в которой электронный луч послойно расплавляет металлический порошок для создания деталей. Циклические нагрев и охлаждение в процессе СЭЛС приводят к формированию значительных остаточных напряжений, которые могут вызывать деформации, снижение сопротивления усталости и растрескивание готовых деталей [4–8]. Для снижения уровня остаточных напряжений используют горячее изостатическое прессование (ГИП) [9–12]. Оценка остаточных напряжений в процессе аддитивного производства является актуальной задачей [13–15].

Для оценки свойств токопроводящих материалов перспективно применение вихретокового метода. Вихретоковый неразрушающий контроль, основанный на анализе характеристик электромагнитного поля вихревых токов, возбуждаемых в объекте контроля внешним электромагнитным полем, способен фиксировать изменение электропроводности токопроводящих материалов [16–18]. Таким образом, при существовании корреляционной зависимости между значениями электропроводности материала в зонах остаточных напряжений и их отсутствия появляется реальная возможность косвенно их зафиксировать. Применение вихретокового контроля имеет ряд преимуществ:

- неразрушающий характер;
- высокая скорость;
- отсутствие прямого контакта с контролируемыми деталями.

Основное достоинство метода – возможность контроля свойств материалов относительно их глубины, что достигается применением различного возбуждения вихретокового преобразователя [16, 17].

В данной статье проанализирована принципиальная возможность оценки остаточных напряжений на образцах из интерметаллидного TiAl-сплава, сформированных в результате СЭЛС, а также получения корреляционной связи механических напряжений и электропроводности материала.

Материалы и методы

Эффективность практического применения вихретокового метода для оценки физико-механических и структурных свойств обусловлена наличием устойчивой корреляционной зависимости между анализируемыми параметрами микроструктуры и удельной электропроводностью материала объекта контроля [19, 20]. В зависимости от частоты тока возбуждения изменяются затухание электромагнитного поля и величина вихревых токов. Таким образом, варьированием частоты возбуждающего тока можно получить распределение электропроводности по глубине исследуемого объекта.

Изменение частоты тока возбуждения приводит к изменению фазы вихревых токов на конкретной глубине, что, в свою очередь, вызывает изменение фазы соответствующей части вносимого напряжения. Глубину проникновения электромагнитного поля можно определить с помощью функциональной зависимости

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

где δ – глубина проникновения, м; σ – удельная электропроводность, См/м; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м; f – частота тока возбуждения, Гц.

На рис. 1 представлен накладной вихретоковый преобразователь с возбуждающей и измерительной катушкой, расположенный над электропроводящим объектом контроля.

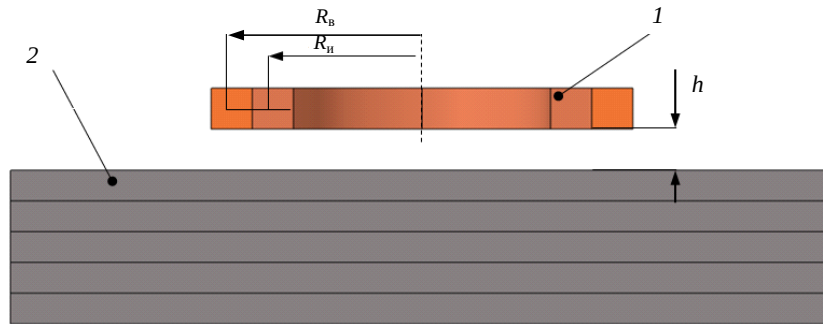


Рис. 1. Вихретоковый преобразователь (1), размещенный над объектом контроля (2): $R_{и}$, $R_{в}$ – радиус измерительной и возбуждающей катушки соответственно; h – зазор между преобразователем и поверхностью объекта контроля

Для конфигурации преобразователя, представленного на рис. 1, вносимая электродвижущая сила определяется по формуле [20, 21]

$$\dot{E}_{вн} = \omega I W_{в} W_{и} \mu_0 R j \pi \cdot \int_0^{\infty} \frac{x(q_{в}A + q_{с}B \operatorname{th}(q_{в}T_{в})) - q_{в}(q_{в}A \operatorname{th}(q_{в}T_{в}) + q_{с}B)}{x(q_{в}A + q_{с}B \operatorname{th}(q_{в}T_{в})) + q_{в}(q_{в}A \operatorname{th}(q_{в}T_{в}) + q_{с}B)} G dx. \quad (2)$$

Здесь обозначены параметры:

$$R = \sqrt{R_{в} R_{и}}; \quad (3)$$

$$A = q_{с} + q_{и} \operatorname{th}(q_{с}T_{с}); \quad (4)$$

$$B = q_{и} + q_{с} \operatorname{th}(q_{с}T_{с}); \quad (5)$$

$$G = J_1\left(\frac{R_{в}}{R}x\right)J_1\left(\frac{R_{и}}{R}x\right)e^{-Hx}; \quad (6)$$

$$q_{в, с, и} = \sqrt{x^2 + j\beta_{в, с, и}^2}; \quad (7)$$

$\beta_{в, с, и}$ – обобщенные параметры, характеризующие удельную электропроводность верхнего, среднего и нижнего слоя ($\sigma_{в, с, и}$):

$$\beta_{в, с, и} = R \sqrt{\omega \mu_0 \sigma_{в, с, и}}; \quad (8)$$

$T_{в, с}$ – обобщенные параметры, характеризующие толщину верхнего ($t_{в}$) и среднего ($t_{с}$) слоя:

$$T_{в, с} = \frac{t_{в, с}}{R}; \quad (9)$$

$$H = \frac{2h}{R}; \quad (10)$$

H – обобщенный параметр, характеризующий величину зазора (h); $W_{в}$, $W_{и}$ – количество витков возбуждающей и измерительной обмотки соответственно, ед.; $R_{и}$, $R_{в}$ – радиус измерительной и возбуждающей катушки соответственно, м; $J_1\left(\frac{R_{в}}{R}x\right)$, $J_1\left(\frac{R_{и}}{R}x\right)$ – функции Бесселя первого рода первого порядка; ω – круговая частота тока $\dot{I}$ в возбуждающей обмотке датчика, рад/с; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Используя формулу (2), можно рассчитать вносимое напряжение вихретокового преобразователя в зависимости от частоты питающего тока и электропроводности неоднородного объекта контроля.

Одним из мешающих факторов при определении колебаний электропроводности, связанных с неоднородным состоянием материала, является зазор h (рис. 1) между объектом контроля и преобразователем, который может изменяться из-за шероховатости

поверхности, колебаний преобразователя и др. Сигнал, вызванный колебаниями величины зазора, может превышать полезный сигнал от изменения электропроводности, вызванный наличием остаточных напряжений.

Отстройку от влияния зазора осуществляли изменением фазы питающего тока (амплитудно-фазовый метод [16]). Таким образом, информативным параметром будет являться проекция вектора приращения напряжения вихретокового преобразователя в зависимости от изменения электропроводности.

Вторым мешающим фактором является краевой эффект. При расположении преобразователя вдали от края объекта контроля вихревые токи распределяются равномерно по поверхности, плотность тока максимальна под обмоткой преобразователя и равномерно уменьшается по мере удаления от нее. При приближении к границе объекта контроля происходит перераспределение вихревых токов, плотность тока концентрируется на границе под преобразователем вблизи края [22–24]. На рис. 2 показано распределение плотности тока и вихревых токов под обмоткой преобразователя для двух положений – по центру и на границе объекта контроля.

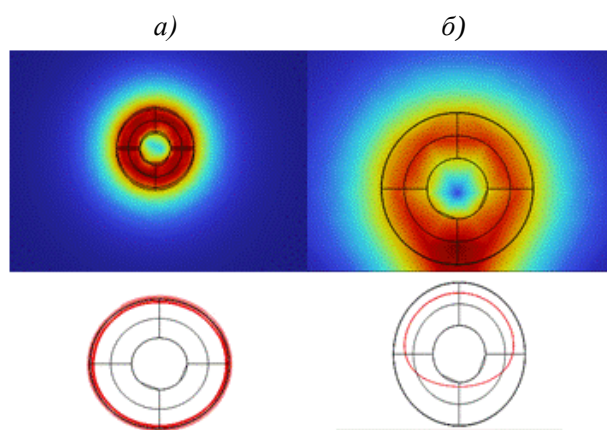


Рис. 2. Распределение плотности тока и вихревых токов под обмоткой вихретокового преобразователя, расположенного по центру (а) и на границе (б) объекта контроля

Для оценки влияния краевого эффекта в работе [25] представлена трехмерная аналитическая модель вихревых токов в электропроводящей пластине конечной ширины, которая учитывает искажения полей на границах пластины. В статье приведены погрешности моделирования, вызванные пренебрежением влияния поля источника на краях проводящей пластины.

Методом конечных элементов в работе [26] исследовано влияние краевого эффекта для различных параметров вихретокового преобразователя. Авторы предложили систематический подход, основанный на моделировании, для понимания и минимизации влияния краевого эффекта на обнаружение дефектов. По итогам работы продемонстрированы оптимальные параметры преобразователя для эффективного обнаружения трещин на границах объекта контроля.

В работе [27] представлен метод аналитического моделирования поперечного перемещения вихретоковых преобразователей с прямоугольными катушками. С использованием методов разложения по собственным функциям усеченной области и векторного потенциала второго порядка получены аналитические выражения для плотности вихревых токов и сопротивления катушки при ее поперечном перемещении относительно границы объекта. Авторы провели эксперименты, подтверждающие аналитические данные.

Для формулирования требований к габаритам образцов (ширине и длине объекта контроля) при помощи численного моделирования методом конечных элементов исследовано влияние краевого эффекта для примененного вихретокового преобразователя. Параметры преобразователя, используемые при моделировании:

Диаметр возбуждающей обмотки, мм	5,4
Диаметр измерительной обмотки, мм	4,6
Частота возбуждающего тока, кГц	100
Зазор между преобразователем и образцом, мм	1

Параметры пластины, имитирующей объект контроля:

Толщина образца, мм	15
Ширина (поперечный размер пластины), мм	80
Электропроводность образца, МСм/м	0,7

Суть моделирования заключается в изменении размера пластины по отношению к размеру преобразователя. Вихретоковый преобразователь передвигался вдоль образца с шагом 1 мм, начальная точка соответствовала краю пластины. Фиксировали относительное изменение сигнала вихретокового преобразователя в зависимости от расположения контролируемого объекта для разных длин (продольного размера) пластины: 10, 20, 30, 40 и 50 мм. Сигнал нормирован относительно максимального значения, т. е. значения сигнала, при котором пластина располагалась по центру преобразователя. Для получения более точного результата проведены расчеты с замененными (на свойства окружающее преобразователь пространство (воздух)) свойствами пластины. Требование к моделированию: получение значения длины пластины, при котором бы сформировалась площадка с постоянным сигналом преобразователя протяженностью, составляющей три диаметра преобразователя. Полученные зависимости показаны на рис. 3.

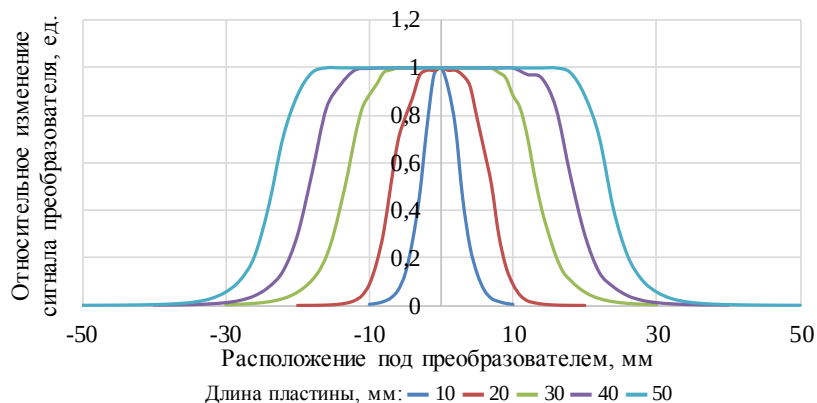


Рис. 3. Зависимости относительного изменения сигнала преобразователя от его расположения для разных поперечных размеров (длин) пластины

При поперечном размере пластины >40 мм краевой эффект не влияет на сигнал преобразователя, т. е. формируется площадка, при которой отклонение от центра пластины более чем на диаметр вихретокового преобразователя не воздействует на измеряемый сигнал.

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

Результаты и обсуждение

Для опробования вихретокового метода с целью оценки структурного состояния TiAl-сплава [28–31] изготовлены образцы в виде цилиндров диаметром 50 мм и толщиной 14 мм. Печать методом СЭЛС осуществляли при двух режимах: для образца 10 – энергия 250 Дж/м, ток луча 13,3 мА, скорость сканирования 3,2 м/с; для образца 12 – энергия 150 Дж/м, ток луча 8 мА, скорость сканирования 3,2 м/с. Диаметр образцов выбран таким образом, чтобы влияние от края образца на измерительный сигнал отсутствовало. Диаметр возбуждающей и измерительной катушки составил 5,4 и 4,6 мм соответственно, выбран зазор между преобразователем и образцами, равный 1 мм. Частота возбуждающего тока f изменялась с 2 до 400 кГц с шагом 2 кГц [32]. Электропроводность образцов 10 и 12, предварительно определенная вихретоковым методом при частоте 100 кГц, составила 0,69 и 0,67 МСм/м соответственно.

Влияние краевого эффекта оценено путем сканирования вихретоковым преобразователем вдоль поверхности образца, зависимость проекции сигнала от расположения преобразователя относительно образца показана на рис. 4.

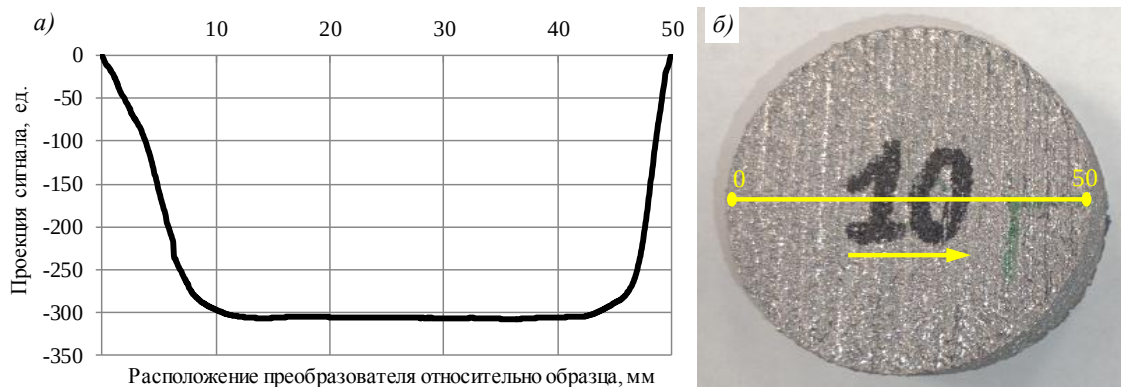


Рис. 4. Зависимость проекции сигнала от расположения преобразователя относительно образца (а); движение преобразователя вдоль образца (б), стрелкой показано направление сканирования

Сигнал можно разделить на три зоны: I (от 0 до ~10,4 мм) – начало движения преобразователя над образцом, проекция сигнала от края начинает уменьшаться при приближении к центру; II (от ~10,4 до ~40 мм) – зона, в которой проекция сигнала не зависит от положения датчика; III (от ~40 до ~50 мм) – окончание движения преобразователя над образцом, проекция сигнала от края начинает увеличиваться при приближении к краю. Протяженность зоны достаточна для решения обратной задачи расчета, полученного по формуле (2).

Калибровку экспериментальных данных с расчетными осуществляли на образцах-эталопах с электропроводностью 0,63 и 0,73 МСм/м (электропроводность образцов-эталонных распределена равномерно по всей толщине). Калибровка заключалась в умножении расчетных значений на калибровочный коэффициент

$$K(f)_p = \frac{U73(f)_{\text{экс}}}{U73(f)_{\text{рас}}},$$

где $U73(f)_{\text{экс}}$ – экспериментальное значение напряжения на образце с электропроводностью 0,73 МСм/м; f – частота возбуждающего тока; $U73(f)_{\text{рас}}$ – расчетное значение напряжения.

Проекцию экспериментального сигнала и расчетных значений для образца с электропроводностью 0,73 МСм/м осуществляли относительно образца с электропроводностью 0,63 МСм/м.

Для оценки распределения электропроводности по глубине преобразователь разместили на поверхности образцов 10 и 12. На рис. 5 представлена полученная проекция сигналов в зависимости от частоты возбуждающего тока, данные фиксировали относительно образца-эталона с электропроводностью 0,63 МСм/м. На рис. 5 также показана проекция сигнала образца-эталона с электропроводностью 0,73 МСм/м.

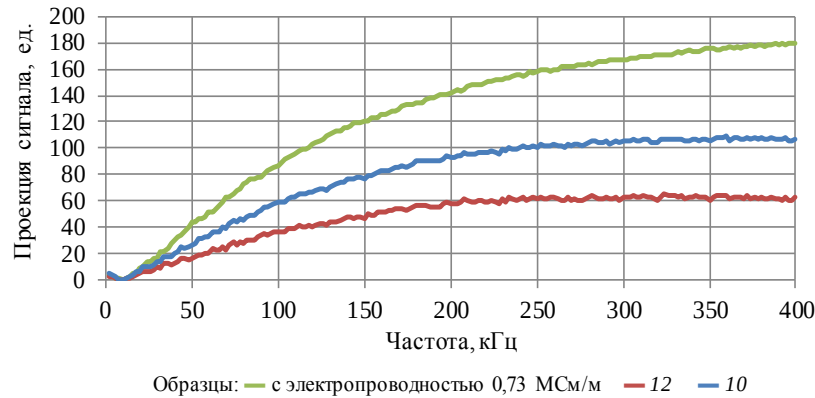


Рис. 5. Зависимости проекции сигнала от частоты возбуждающего тока

Зависимость проекции вносимого напряжения, полученная для равномерного изменения электропроводности, при частоте до ~220 кГц можно совместить с зависимостями исследованных образцов масштабированием. Однако при частоте >240 кГц проекция отличается по наклону к оси и не может быть совмещена с зависимостями образцов 10 и 12 масштабированием.

При решении обратной задачи получены зависимости распределения электропроводности образцов по глубине. На рис. 6 показаны зависимости для образцов 10 и 12, а также образца-эталона с электропроводностью 0,73 МСм/м (соответствует равномерному изменению электропроводности). Это позволяет визуализировать неравномерное изменение электропроводности исследованных образцов.

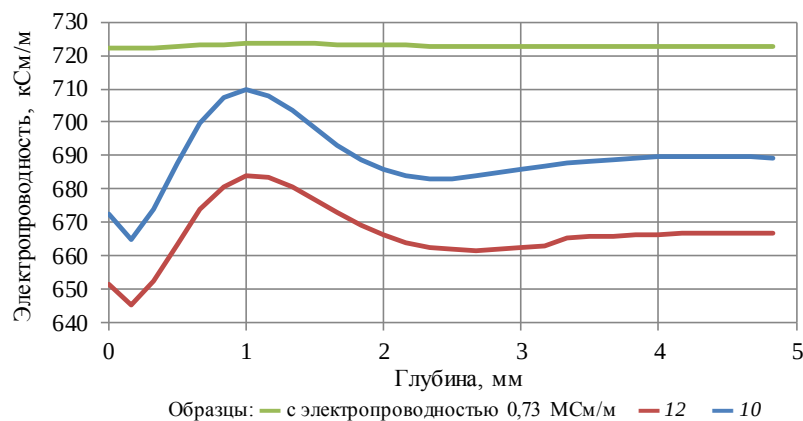


Рис. 6. Распределение электропроводности по глубине образцов

Для снятия напряжений на образцах 10 и 12 проведено ГИП, после чего повторно рассчитаны зависимости распределения электропроводности по глубине (рис. 7).

Электропроводность после применения ГИП стала распределяться равномерно по глубине образцов 10 и 12, т. е. так же, как и у образца-эталона с электропроводностью 0,73 МСм/м. Кроме того, электропроводность образцов 10 и 12 уменьшилась после применения ГИП и достигла одного значения (0,64 МСм/м).

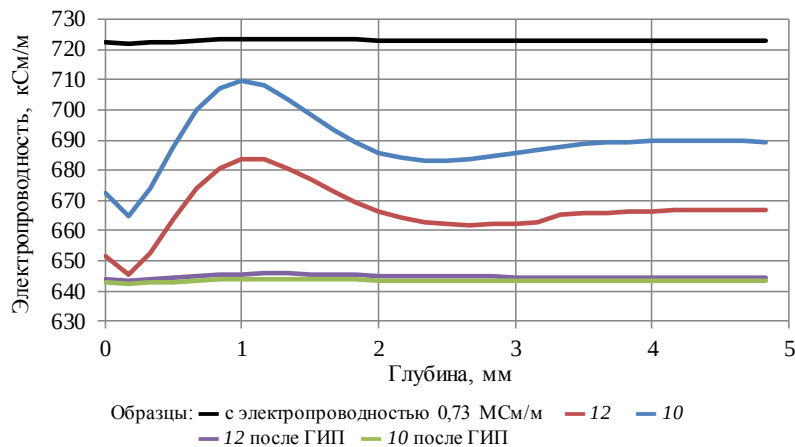


Рис. 7. Распределение электропроводности по глубине образцов до и после горячего изостатического прессования (ГИП)

Методом рентгеновской дифракции определено, что на поверхности образцов напряжение составляет -230 МПа. Исходя из этих данных, с использованием корреляционного коэффициента получены зависимости распределения остаточных напряжений, показанные на рис. 8.

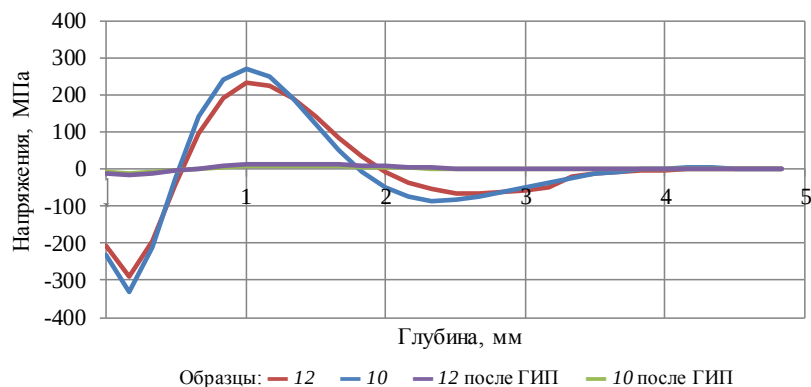


Рис. 8. Распределение электропроводности по глубине образцов до и после горячего изостатического прессования (ГИП), полученное путем корреляции данных рентгеновской дифракции

Чувствительность по глубине к изменению электропроводности вихретокового метода ограничена ~ 3 мм, поскольку происходит затухание электромагнитной волны. В связи с этим нельзя сделать вывод о распределении механических напряжений на глубине > 3 мм. Следует отметить, что изменение электропроводности также может быть связано со структурой материала.

Заключения

С помощью математического моделирования и экспериментальных исследований образцов показано влияние краевого эффекта на сигнал вихретокового преобразователя.

Для построения распределения электропроводности по глубине образцов из интерметаллидного TiAl-сплава, выполненных СЭЛС, многочастотным вихретоковым методом получены зависимости проекции вектора приращения напряжения вихретокового преобразователя.

Путем корреляции данных, полученных при помощи рентгеновской дифракции, построены зависимости распределения остаточных напряжений до и после ГИП.

Для применения описанного подхода для изделий со сложной геометрической формой либо небольших размеров необходимы моделирование и верификация численных моделей или калибровка на образцах со схожей геометрической формой с известным распределением механических напряжений. Ввиду незначительных изменений электропроводности в зависимости от возникающих механических напряжений перспективным направлением развития метода является повышение чувствительности.

Исследование выполнено при финансировании Российского научного фонда, грант № 24-19-00717, <https://rscf.ru/project/24-19-00717/>.

Список источников

1. 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 2. Компенсация и контроль отклонений, ГИП и термическая обработка // Электрометаллургия. 2022. № 2. С. 2–12.
2. Бакрадзе М.М., Пескова А.В., Капланский Ю.Ю. Влияние термической пост-обработки на текстуру и анизотропию свойств конструкционного сплава системы Cu–Cr, полученного с помощью селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). С. 3–16. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-3-16.
3. Impey S., Saxena P., Salonitis K. Selective Laser Sintering Induced Residual Stresses: Precision Measurement and Prediction // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2021. Vol. 5. Is. 3. P. 1–16. DOI: 10.3390/jmmp503010.
4. Bian P., Jammal A., Xu K. et al. A Review of the Evolution of Residual Stresses in Additive Manufacturing During Selective Laser Melting Technology // Materials. 2025. Vol. 18. Is. 8. P. 1–21. DOI: 10.3390/ma1808170.
5. Schajer G., Ruud C. Overview of Residual Stresses and their measurement // Practical Residual stress: measurement methods / ed. G.S. Schajer. John Wiley and Sons Ltd, 2013. P. 1–27. DOI: 10.1002/8402832.ch1.
6. Segovia R., García F., Papaalias M. Review on additive manufacturing and non-destructive testing // Journal of Manufacturing Systems. 2023. Vol. 66. P. 260–286.
7. Bartlet J.L., Li X. An overview of residual stresses in metal powder bed fusion // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 27. P. 131–149.
8. Nabin B., Muhammad J., Nithin R., Sekhar R. A review of the residual stress generation in metal additive manufacturing: analysis of cause, measurement, effects, and prevention // Micromachines. 2023. Vol. 14. Is. 7. P. 1–30. DOI: 10.3390/M114071480.
9. Tillmann W., Schaak C., Nellesen J. et al. Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting // Additive Manufacturing. 2017. Vol. 13. P. 93–102.
10. Yamamoto Y., Fujikawa T. Mechanical Properties of Ti–6Al–4V Materials Prepared by Additive Manufacturing. Technology and HIP Process // Proceedings of 11th International Conference on Hot Isostatic Pressing. Stockholm, 2014. P. 398–404.
11. Панин П.В., Лукина Е.А., Богачев И.А., Наприенко С.А. Влияние технологических параметров селективного электронно-лучевого сплавления на химический состав, микроструктуру и пористость TiAl-сплава системы Ti–Al–V–Nb–Cr–Gd // Металлург. 2023. № 5. С. 54–66.
12. Vastola G., Zhang G., Pei Q.X., Zhang Y. Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling // Additive Manufacturing. 2016. Vol. 12. P. 231–239.
13. Мовенко Д.А., Шуртаков С.В. Причины образования микротрещин и снижение плотности их распределения в изделиях из никелевых жаропрочных сплавов, изготовленных методом СЛС (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). С. 43–51. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.

14. Мараховский П.С., Баринев Д.Я., Шорстов С.Ю., Воробьев Н.Н. Вопрос создания физических и математических моделей тепло- и массопереноса при изготовлении деталей методом аддитивных технологий (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). С. 111–119. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
15. 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). С. 122–132. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-122-132.
16. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля / под ред. В.Е. Шатерникова. М.: Издательский дом «Спектр», 2010. 256 с.
17. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль: в 5 кн. М.: Высшая школа, 1992. Кн. 3. Электромагнитный контроль / под ред. В.В. Сухорукова. 312 с.
18. Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. 224 с.
19. Кекало И.Б. Физические свойства металлов. Раздел: Электрические свойства: лабораторный практикум. М., 1998. 139 с.
20. Шитиков В.С., Пичугин С.С. Оценка распределения электрических свойств при упругой деформации объекта контроля вихретоковым методом // *Труды ВИАМ*. 2024. № 11 (141). С. 89–99. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-89-99.
21. Дорофеев А.Л., Любашев Г.А., Останин Ю.Я. Измерение толщины покрытий с помощью вихревых токов. М.: Машиностроение, 1975. 64 с.
22. Theodoulidis T. End effect modelling in eddy current tube testing with bobbin coils // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2004. Vol. 19. P. 207–212.
23. Bowler J.R., Theodoulidis T.P. Coil impedance variation due to induced current at the edge of a conductive plate // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2006. Vol. 39. P. 2862–2868.
24. Zec M., Uhlig R.P., Ziolkowski M., Brauer H. Finite element analysis of nondestructive testing eddy current problems with moving parts // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2013. Vol. 49. P. 4785–4794.
25. Paul S., Bird J.Z. Analytic 3-D eddy current model of a finite width conductive plate including edge-effects // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2014. Vol. 45. P. 535–542. DOI: 10.3233/jae-141874.
26. Xie Y., Li J., Tao Y. et al. Edge Effect Analysis and Edge Defect Detection of Titanium Alloy Based on Eddy Current Testing // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. P. 15. DOI: 10.3390/app10248796.
27. Lv C., Liu W., Jiang Y., Zhao H. Analytical modelling for edge effects and impedance characteristics of the transverse eddy current displacement sensors with rectangular coils // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2014. Vol. 46. P. 823–834. DOI: 10.3233/jae-130060.
28. Сплав на основе интерметаллида титана и изделие, выполненное из него: пат. 2606368 Рос. Федерация; заявл. 15.10.15; опубл. 10.01.17.
29. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд., с изм. и доп. М.: ВИАМ, 2019. 316 с.
30. Панин П.В., Богачев И.А., Смирнов А.В., Лукина Е.А. Количественный анализ пористости TiAl-сплава системы Ti–Al–V–Nb–Cr–Gd после селективного электронно-лучевого сплавления и горячего изостатического прессования // *Металлург*. 2025. № 11. С. 66–71. DOI: 10.52351/00260827_2025_11_66.
31. Акбулатов Р.Р., Ефремова А.П., Богачев И.А., Панин П.В. Исследование кинетики изотермических фазовых превращений в жаропрочных сплавах на основе гамма-алюминиды титана TiAl // *Труды ВИАМ*. 2024. № 11 (141). С. 22–32. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-22-32.
32. Шитиков В.С., Пичугин С.С., Акбулатов Р.Р., Панин П.В. Особенности оценки вихретоковым методом свойств деталей из интерметаллидного TiAl-сплава, полученных с применением аддитивных технологий // *Труды ВИАМ*. 2025. № 11 (153). С. 124–134. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-124-134.

References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New-generation materials and digital additive manufacturing technologies for critical components at FSUE VIAM. Part 2. Compensation and control of deviations, HIP, and heat treatment. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 2, pp. 2–12.
2. Bakradze M.M., Peskova A.V., Kaplansky Yu.Yu. Influence of thermal post-treatment on the texture and anisotropy of mechanical properties in the Cu–Cr construction alloy manufactured by laser powder bed fusion. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 3–16. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-3-16.
3. Impey S., Saxena P., Salonitis K. Selective Laser Sintering Induced Residual Stresses: Precision Measurement and Prediction. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2021, vol. 5, is. 3, pp. 1–16. DOI: 10.3390/jmmp503010.
4. Bian P., Jammal A., Xu K. et al. A Review of the Evolution of Residual Stresses in Additive Manufacturing During Selective Laser Melting Technology. *Materials*, 2025, vol. 18, is. 8, pp. 1–21. DOI: 10.3390/ma1808170.
5. Schajer G., Ruud C. Overview of Residual Stresses and their measurement. *Practical Residual stress: measurement methods*. Ed. G.S. Schajer. John Wiley and Sons Ltd, 2013, pp. 1–27. DOI: 10.1002/8402832.ch1.
6. Segovia R., García F., Papaelias M. Review on additive manufacturing and non-destructive testing. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, vol. 66, pp. 260–286.
7. Bartlett J.L., Li X. An overview of residual stresses in metal powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 27, pp. 131–149.
8. Nabin B., Muhammad J., Nithin R., Sekhar R. A review of the residual stress generation in metal additive manufacturing: analysis of cause, measurement, effects, and prevention. *Micromachines*, 2023, vol. 14, is. 7, pp. 1–30. DOI: 10.3390/M14071480.
9. Tillmann W., Schaak C., Nellesen J. et al. Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 13, pp. 93–102.
10. Yamamoto Y., Fujikawa T. Mechanical Properties of Ti–6Al–4V Materials Prepared by Additive Manufacturing. Technology and HIP Process. *Proceedings of 11th International Conference on Hot Isostatic Pressing*. Stockholm, 2014, pp. 398–404.
11. Panin P.V., Lukina E.A., Bogachev I.A., Naprienko S.A. Influence of selective electron beam melting process parameters on the chemical composition, microstructure, and porosity of a Ti–Al–V–Nb–Cr–Gd system TiAl alloy. *Metallurg*, 2023, no. 5, pp. 54–66.
12. Vastola G., Zhang G., Pei Q.X., Zhang Y. Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling. *Additive Manufacturing*, 2016, vol. 12, pp. 231–239.
13. Movenko D.A., Shurtakov S.V. Microcrack formation and controlling in nickel superalloys processed by selective laser melting (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 43–51. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.
14. Marakhovskij P.S., Barinov D.Ya., Shorstov S.Yu., Vorobev N.N. On creation of physical and mathematical models of heat and mass transfer during manufacturing by additive technologies (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 111–119. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
15. 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), pp. 122–132. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-122-132.
16. Gerasimov V.G., Klyuev V.V., Shaternikov V.E. *Methods and Instruments for Electromagnetic Testing*. Ed. V.E. Shaternikov. Moscow: Spektr, 2010, 256 p.
17. Gerasimov V.G., Pokrovsky A.D., Sukhorukov V.V. *Nondestructive Testing*: in 5 books. Moscow: Vysshaya Shkola, 1992, book 3: Electromagnetic Testing. Ed. V.V. Sukhorukov, 312 p.
18. Fedosenko Yu.K., Shkatov P.N., Efimov A.G. *Eddy-Current Testing*. Moscow: Spektr, 2014, 224 p.
19. Kekalo I.B. *Physical Properties of Metals. Section: Electrical Properties*: Laboratory Manual. Moscow, 1998, 139 p.

20. Shitikov V.S., Pichugin S.S. Estimation of electrical properties distribution under elastic deformation of the control object by eddy current method. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), pp. 89–99. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-89-99.
21. Dorofeev A.L., Lyubashev G.A., Ostanin Yu.Ya. *Measurement of Coating Thickness Using Eddy Currents*. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 64 p.
22. Theodoulidis T. End effect modelling in eddy current tube testing with bobbin coils. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2004, vol. 19, pp. 207–212.
23. Bowler J.R., Theodoulidis T.P. Coil impedance variation due to induced current at the edge of a conductive plate. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, pp. 2862–2868.
24. Zec M., Uhlig R.P., Ziolkowski M., Brauer H. Finite element analysis of nondestructive testing eddy current problems with moving parts. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol. 49, pp. 4785–4794.
25. Paul S., Bird J.Z. Analytic 3-D eddy current model of a finite width conductive plate including edge-effects. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2014, vol. 45, pp. 535–542. DOI: 10.3233/jae-141874.
26. Xie Y., Li J., Tao Y. et al. Edge Effect Analysis and Edge Defect Detection of Titanium Alloy Based on Eddy Current Testing. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, p. 15. DOI: 10.3390/app10248796.
27. Lv C., Liu W., Jiang Y., Zhao H. Analytical modelling for edge effects and impedance characteristics of the transverse eddy current displacement sensors with rectangular coils. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2014, vol. 46, pp. 823–834. DOI: 10.3233/jae-130060.
28. *Titanium intermetallic-based alloy and article made therefrom*: pat. 2606368 Rus. Federation; appl. 15.10.15; publ. 10.01.17.
29. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Titanium- and Nickel-Based Intermetallic Alloys*. Ed. E.N. Kablov. 2nd ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2019, 316 p.
30. Panin P.V., Bogachev I.A., Smirnov A.V., Lukina E.A. Quantitative analysis of porosity in a Ti–Al–V–Nb–Cr–Gd system TiAl alloy after selective electron beam melting and hot isostatic pressing. *Metallurg*, 2025, no. 11, pp. 66–71. DOI: 10.52351/00260827_2025_11_66.
31. Akbulatov R.R., Efremova A.P., Bogachev I.A., Panin P.V. Study of isothermal phase transformations kinetics in heat-resistant alloys based on gamma titanium aluminide TiAl. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), pp. 22–32. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-22-32.
32. Shitikov V.S., Pichugin S.S., Akbulatov R.R., Panin P.V. Features of the eddy current method assessment of properties parts made of intermetallic TiAl alloy, obtained using additive technologies. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), pp. 124–134. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-124-134.

Информация об авторах

Пичугин Сергей Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Косарина Екатерина Ивановна, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Акбулатов Рустам Раисович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Панин Павел Васильевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergey S. Pichugin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Ekaterina I. Kosarina, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Rustam R. Akbulatov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Pavel V. Panin, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.08.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.08.2026.

The article was submitted 26.08.2026; approved and accepted for publication after reviewing 31.08.2026.