

Научная статья

УДК 621.762

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-124-134

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО TiAl-СПЛАВА, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.С. Шитиков¹, С.С. Пичугин¹, 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. Проанализирована возможность отдельного вихретокового контроля свойств деталей из интерметаллидного TiAl-сплава, полученных с применением аддитивных технологий. Проведен расчет изменения сигнала с помощью разработанной математической модели для случаев изменения электропроводности только поверхностного слоя, только основания, а также всего объекта контроля. Установлено, чтобы достичь необходимой устойчивости решения системы уравнений для получения свойств по глубине, нижняя частота должна быть менее 300 кГц, верхняя – более 600 кГц.

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

Для цитирования: 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). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-124-134.

Scientific article

FEATURES OF THE EDDY CURRENT METHOD ASSESSMENT OF PROPERTIES PARTS MADE OF INTERMETALLIC TiAl ALLOY, OBTAINED USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

V.S. Shitikov¹, S.S. Pichugin¹, 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 possibility of separate eddy current control of the properties of intermetallic TiAl alloy parts obtained using additive technologies is analyzed. The calculation of the signal change was carried out using the developed mathematical model for cases of changes in the electrical conductivity of only the surface layer, only the substrate, and the entire control object. It is established that in order to achieve the necessary stability of solving the system of equations for obtaining depth properties, the lower frequency should be less than 300 kHz, and the high frequency should be more than 600 kHz.

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

For citation: 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), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-124-134.

Введение

Аддитивные технологии имеют большое промышленное значение благодаря возможности высокопроизводительного изготовления изделий со сложной геометрической формой, обладающих улучшенными свойствами по сравнению с изделиями, выполненными традиционными методами [1]. Процесс изготовления включает повторяющиеся циклы нагревания и остывания материала, которые характеризуются пространственными изменениями температуры. Вблизи зоны плавления возникают локальные неоднородности расширения и сжатия материала (в первую очередь металлического), обусловленные высокими температурными градиентами, что вызывает образование тепловых деформаций и, как следствие, остаточных напряжений I рода (макронапряжений). Релаксация остаточных напряжений, превышающих предел текучести материала, может привести к деформации, короблению и даже растрескиванию готовой детали, что делает ее непригодной для использования [2, 3].

Селективное лазерное сплавление (СЛС) – один из наиболее распространенных методов аддитивного производства металлов, в котором в качестве источника энергии используется лазер. Из-за быстрого процесса плавления и затвердевания при СЛС в металле часто формируются мелкие столбчатые зерна, а также могут образовываться большие и анизотропные остаточные напряжения [3, 4] и микродефекты (поры, несплавления и иные несплошности). Для устранения дефектности и минимизации остаточных напряжений используется горячее изостатическое прессование (ГИП) [5–7]. Это вид термообработки, который включает одновременное приложение высокого давления и температуры к детали, как правило, помещенной в герметичную камеру с инертным газом (чаще всего аргоном). При этом материал уплотняется, устраняется пористость и снижаются остаточные напряжения, что может способствовать рекристаллизации и росту зерен. В зависимости от материала и параметров ГИП может изменяться микроструктура, что, в свою очередь, может повлиять на механические свойства изделия.

Селективное электронно-лучевое сплавление (СЭЛС) – аддитивная технология, при которой металлический порошок послойно расплавляется и сплавляется в вакууме с помощью сфокусированного электронного луча. Высокие температуры и скорости процесса синтеза оказывают значительное влияние на остаточные напряжения и микроструктуру [8, 9].

Для оценки структурного состояния и остаточных напряжений в аддитивном производстве используются различные методы [4, 10–13].

Для оценки напряжений наиболее распространенными методами неразрушающего контроля являются дифракционные методы. С их помощью определяют механическое напряжение в материале, измеряя расстояния между атомными плоскостями в его кристаллической решетке, которые напрямую зависят от величины и направления этого напряжения. Метод рентгеновской дифракции имеет ограничение по глубине проникновения излучения (информационная глубина для металлических материалов не превышает 15 мкм), что ограничивает его применение для оценки напряжений в деталях со сложной геометрической формой и в объектах с высокой шероховатостью поверхности. Метод дифракции нейтронов отличается большей проникающей способностью, однако является более трудоемким [13–16].

Широкое распространение получил анализ структурного состояния деталей путем расчета термомеханических моделей [17–20]. Поскольку значительные термические градиенты и неравномерное охлаждение являются основной причиной возникновения остаточных напряжений и последующих деформаций в деталях, создаваемых с помощью аддитивных технологий, создание высокопроизводительной термомеханической модели становится важнейшим этапом улучшения качества изделий и повышения стабильности производственного процесса, что способствует изготовлению изделий с оптимизированными механическими характеристиками. Точная тепловая модель помогает избежать появления дефектов структуры материала, обеспечить однородность механических свойств и снизить риск появления микротрещин и усталостных разрушений [21–23]. Однако точность таких расчетов зависит от качества данных о поле неустановившихся температур и теплофизических свойствах сплава.

Перспективным методом для оценки свойств и структурного состояния в токопроводящих изделиях является вихретоковый метод неразрушающего контроля [24, 25]. Оценка данным способом осуществляется косвенными измерениями изменений либо магнитной проницаемости (для магнитных материалов), либо электропроводности (для немагнитных материалов) [26]. Как магнитная проницаемость, так и электропроводность зависят от микроструктуры материала – размера зерна, упрочнения, термообработки и т. д. [25, 27].

В данной работе исследована возможность применения вихретокового метода для оценки раздельного контроля свойств поверхности и основания деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий [8] из нового жаропрочного интерметаллидного β -затвердевающего TiAl-сплава [28, 29], а также оценено изменение удельной электрической проводимости данного сплава в зависимости от структурного состояния образцов (до и после применения ГИП).

Материалы и методы

Основа вихретокового контроля – анализ электромагнитного поля вихревых токов в токопроводящем материале. Эффективность применения вихретокового метода контроля для оценки свойств связана, прежде всего, с корреляцией между исследуемыми физическими параметрами структуры и удельной электрической проводимостью материала объекта контроля [27]. Для оценки возможности контроля деталей из исследуемого TiAl-сплава состава (% (атомн.)) Ti–44,5Al–2V–1Nb–2Cr–0,1Gd при помощи СЭЛС-технологии изготовлены образцы в виде цилиндров диаметром 10 мм [30]. Вихретоковым методом измерена их электропроводность: до ГИП она составила 0,7 МСм/м, после ГИП – увеличилась на 2 кСм/м (+0,3 %). Зафиксированное изменение этого параметра обусловлено снятием остаточных напряжений и изменением структурного состояния материала образцов.

Подобные небольшие (<1 %) изменения значений электропроводности не позволяют проводить абсолютные измерения, по которым можно было бы оценить уровень остаточных напряжений или структурное состояние с определенной погрешностью [31]. Однако возможно эффективное применение этого метода для контроля процессов термической и механической обработок, получения данных об однородности свойств контролируемой детали, а также сравнения деталей из одной партии между собой [32, 33].

Основное достоинство вихретокового метода по сравнению с другими методами неразрушающего контроля – возможность раздельной оценки свойств на поверхности и внутри контролируемой детали [32, 33]. Поскольку затухание электромагнитного поля и величина вихревых токов меняются в зависимости от частоты тока возбуждения, то, получая сигнал на нескольких частотах, можно разделить влияние электрической проводимости поверхностных слоев и основания деталей в зоне контроля.

Проанализируем возможность применения данного способа многочастотного контроля к задаче отдельного контроля свойств поверхностного слоя глубиной до 200 мкм и основания пластины из исследуемого TiAl-сплава. Для получения данных о распределении вихревых токов и расчета зависимостей вносимого напряжения от свойств контролируемой пластины разработана конечно-элементная модель вихретокового преобразователя. На рис. 1 представлены распределения модуля плотности вихревых токов в зоне контроля под обмоткой возбуждения преобразователя для различных частот. Модуль плотности вихревых токов характеризует распределение индуцируемых токов.

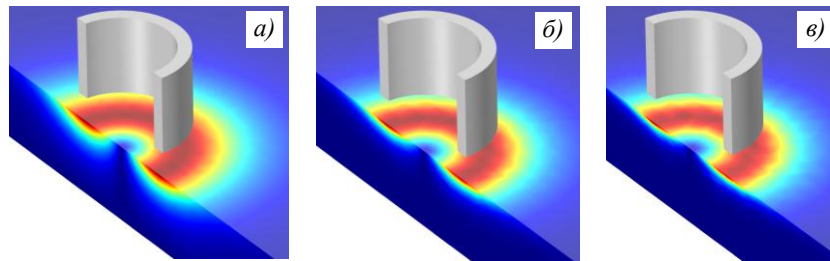


Рис. 1. Распределение модуля плотности вихревых токов в зоне контроля при частоте тока возбуждения 100 (а), 500 (б) и 1000 кГц (в)

Максимум модуля плотности вихревых токов расположен под витками обмотки возбуждения на поверхности металла. При уменьшении частоты тока возбуждения в катушке распределение плотности вихревых токов по глубине становится более равномерным, однако характер зависимости не изменяется. Соответственно, изменение вносимого напряжения по модулю на любой частоте отражает изменение свойств преимущественно на поверхности детали.

Помимо убывания модуля, с глубиной непрерывно меняется фазовый сдвиг вихревых токов относительно тока в обмотке возбуждения. На рис. 2 и 3 представлены зависимости модуля и фазы вихревых токов от расстояния до поверхности. Модуль плотности тока для удобства анализа нормирован по максимальному значению на поверхности. Зависимости построены для различных частот тока возбуждения: 100, 500 и 1000 кГц.

Как видно из представленных на рис. 2 и 3 зависимостей, с увеличением расстояния до поверхности происходит не только уменьшение амплитуды колебаний плотности вихревых токов, но и увеличивается фазовый сдвиг. Изменение частоты тока возбуждения приводит к изменению фазы вихревых токов на конкретной глубине, что, в свою очередь, приводит к изменению фазы соответствующей части вносимого напряжения [33].

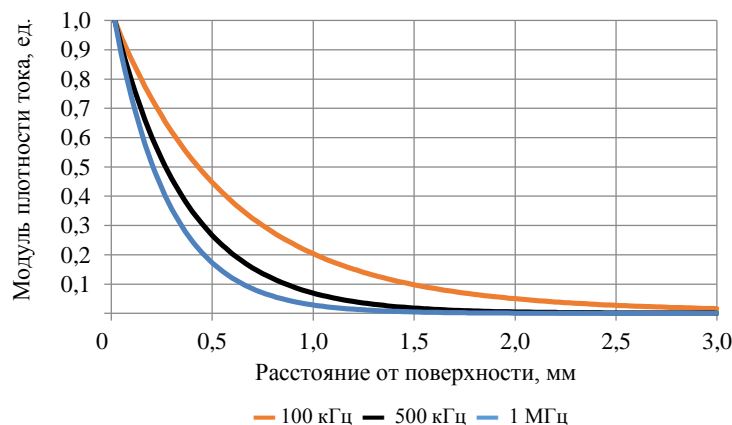


Рис. 2. Зависимость модуля плотности вихревых токов от расстояния до поверхности

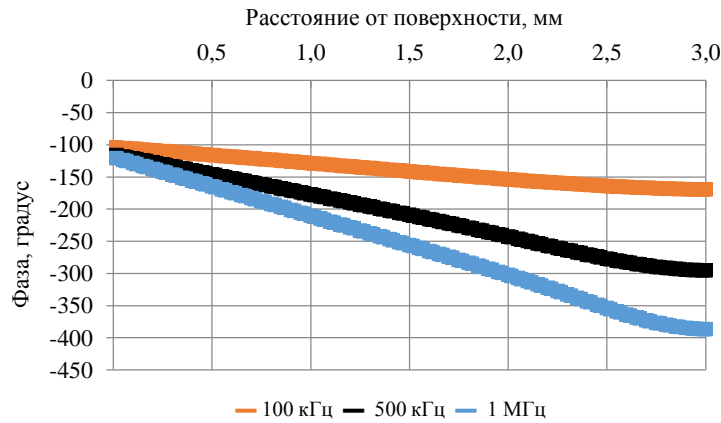


Рис. 3. Зависимость фазы плотности вихревых токов от расстояния до поверхности

Распространенным способом решения задачи отдельного контроля удельной электрической проводимости двухслойного объекта является применение двухчастотного возбуждения. Одна из частот выбирается таким образом, чтобы соответствующее ей поле вихревых токов было локализовано в поверхностном слое, свойства которого тогда будут определять значение вносимого напряжения на этой частоте. Вторая частота выбирается значительно ниже – так, чтобы чувствительность к изменению свойств основного металла и приповерхностного слоя была сопоставима. Совместив результат измерений на высокой и низкой частотах, можно сделать отдельную оценку электропроводности вблизи поверхности и основного металла.

Проверим возможность применения данного способа к контролю деталей из исследуемого TiAl-сплава. Его электропроводность, измеренная на образцах, составляет ~0,7 МСм/м. Глубину проникновения электромагнитного поля можно оценить по формуле [32, 33]:

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

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

Подставив в эту формулу значение электропроводности исследуемого TiAl-сплава, получим, что эффективной глубине проникновения 0,2 мм соответствует частота 18,1 МГц. Частотный диапазон современных вихретоковых дефектоскопов ограничен частотой 20 МГц. При этом на высоких частотах существенно повышается чувствительность к колебаниям положения преобразователя относительно объекта контроля и качеству поверхности. Учитывая, что на частотах, близких к предельным, чувствительность к поверхностным свойствам лишь в несколько раз превышает чувствительность к изменению свойств основания пластины, можно сделать вывод о том, что только лишь повышение частоты не позволяет достоверно выделить поверхностные свойства отдельно от общего изменения электропроводности.

Проанализируем возможность получения информации о свойствах объекта контроля на поверхности и в глубине через решение системы из двух линейных уравнений (2), которые сформированы из данных, полученных на двух частотах тока возбуждения:

$$\begin{cases} U_1 = K_{11} \cdot \Delta\sigma_{пов} + K_{12} \cdot \Delta\sigma_{осн}; \\ U_2 = K_{21} \cdot \Delta\sigma_{пов} + K_{22} \cdot \Delta\sigma_{осн}, \end{cases} \quad (2)$$

где U_1 и U_2 – комплексное вносимое напряжение преобразователя, зарегистрированное на двух частотах; $\Delta\sigma_{пов}$, $\Delta\sigma_{осн}$ – приращение электропроводности в поверхностном слое и основании соответственно; K_{11} , K_{12} , K_{21} , K_{22} – комплексные коэффициенты, связывающие соответствующие приращения электропроводности и напряжения.

Результаты и обсуждение

Для того чтобы система (2) имела решение необходимо выполнение двух условий: уравнения линейно независимы и изменения электропроводности $\Delta\sigma_{\text{пов}}$ и $\Delta\sigma_{\text{осн}}$ малы настолько, что взаимной корреляцией изменений электропроводности можно пренебречь. Линейная независимость уравнений достигается выбором частот, на которых происходит измерение напряжения. Увеличение частоты приводит не только к снижению чувствительности сигнала к изменению электропроводности основания, но и к повороту фазы составляющих вносимого напряжения.

Для оценки влияния взаимной корреляции с помощью метода конечных элементов проведен расчет изменения сигнала для трех случаев: при изменении электропроводности только на поверхности объекта контроля глубиной до 200 мкм ($\Delta\sigma_{\text{пов}}$), только основания ($\Delta\sigma_{\text{осн}}$) и при совместном изменении ($\Delta\sigma_{\text{общ}}$). Изменение электропроводности во всех случаях составляло +10 %. Результаты расчета представлены на рис. 4. Приращение напряжения нормировано значением вносимого напряжения при номинальных параметрах объекта (электропроводность 0,7 МСм/м).

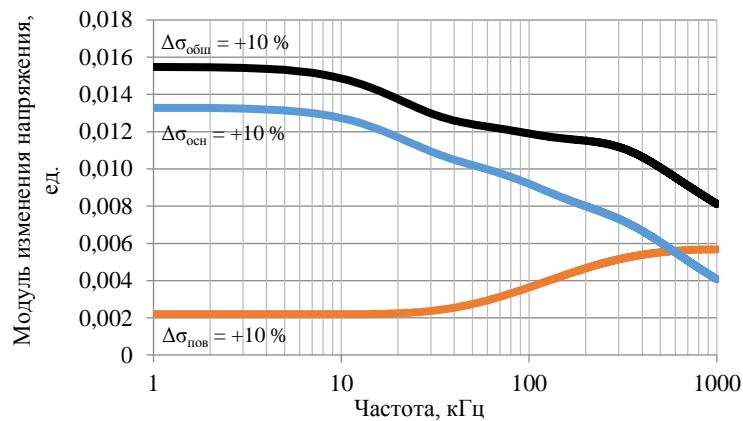


Рис. 4. Приращение напряжения при увеличении электропроводности на 10 %

Поскольку толщина контролируемой пластины в модели велика, то для частот до 600 кГц чувствительность к изменению электропроводности основания пластины превышает чувствительность к изменению электропроводности тонкого поверхностного слоя. Эта зависимость чувствительности от частоты позволяет подобрать частоты для формирования системы (2) таким образом, чтобы уравнения были линейно независимы. Анализируя зависимости на рис. 4, можно сделать вывод, что выбор верхней частоты >600 кГц и нижней <300 кГц позволит достичь приемлемой устойчивости решения сформированной системы уравнений относительно входных данных.

Помимо линейной независимости, уравнения системы (2) должны достоверно описывать вносимое напряжение при комбинированном изменении электропроводности основания и на поверхности. Система уравнений (2) не учитывает взаимную корреляцию между электропроводностью поверхностного слоя и чувствительностью к изменению электропроводности основания. При этом очевидно, что при достаточно большой электропроводности поверхностного слоя поле вихревых токов будет целиком сосредоточено в этом слое и чувствительность к электропроводности основания будет стремиться к нулю.

Эффект экранирования материала основания поверхностными слоями можно оценить, сравнив приращение напряжения от изменения свойств пластины целиком и сумму вкладов отдельных слоев. Чем ближе будут рассчитанные значения, тем меньше неучтенная взаимная корреляция.

На рис. 5 изображены зависимости модуля вносимого напряжения от частоты, полученные в модели двумя способами: изменением свойств всей пластины целиком и поочередным изменением свойств на поверхности и свойств основания с последующим суммированием приращений напряжения.

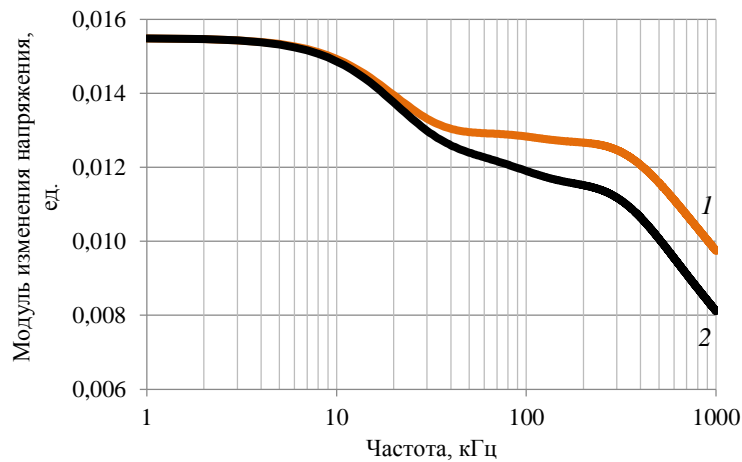


Рис. 5. Приращение напряжения при изменении электропроводности, полученное суммированием вносимых напряжений отдельных слоев при изменении электропроводности поверхности и основания (1) и модели пластины целиком (2)

Видно, что с увеличением частоты увеличивается расхождение между суммой вносимых напряжений и напряжением, полученным от общего изменения, т. е. ухудшается точность описания математическим представлением, которое выражено системой уравнений (2), зависимости напряжения преобразователя от электропроводности объекта. Это объясняется увеличением взаимной корреляции электропроводности поверхностного слоя и чувствительности к свойствам основания. Чем больше электропроводность поверхностных слоев, тем бóльшая часть вихревых токов сосредоточена в этих слоях и тем меньше чувствительность вносимого напряжения к изменению электропроводности основания. В диапазоне частот до 1 МГц максимальное расхождение не превышает 20 % вносимого напряжения при увеличении электропроводности на 10 %. При решении практических задач контроля изменение электропроводности, вызванное наличием остаточных напряжений или структуры, не превышает 1–2 % электропроводности материала. Чем меньше изменение электропроводности, тем меньше методическая погрешность, обусловленная неучтенной взаимной корреляцией электропроводности различных слоев объекта контроля.

Заключения

Измерена удельная электропроводность нового жаропрочного интерметаллидного β -затвердевающего TiAl-сплава. Дана оценка изменения электропроводности этого сплава в зависимости от структуры и механических напряжений. Показано, что применение двухчастотного возбуждения позволяет проконтролировать структурное состояние деталей из исследуемого TiAl-сплава, полученных с помощью аддитивных технологий.

Описан подход к выбору режимов для осуществления отдельного контроля поверхностных свойств и свойств основания с помощью вихретокового метода. Рассчитаны зависимости вносимого напряжения от частоты при изменении свойств контролируемого объекта.

Предложенный способ отдельного контроля свойств на поверхности детали и основного металла на практике может иметь различные реализации для отстройки от влияния таких мешающих факторов, как изменение зазора между преобразователем и объектом контроля. Например, система уравнений может быть записана относительно проекций вектора вносимого напряжения (для реализации метода проекций) или относительно фаз (фазовый метод).

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

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 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 // *Электротехнология*. 2022. № 2. С. 2–12.
2. 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). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.
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. 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). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-3-16.
6. 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.
7. 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.
8. Панин П.В., Лукина Е.А., Наприенко С.А., Алексеев Е.Б. Влияние термической обработки на структуру и свойства TiAl-сплава системы Ti–Al–V–Nb–Cr–Gd, синтезированного методом селективного электронно-лучевого сплавления // *Физическая мезомеханика*. 2023. Т. 26. № 6. С. 61–74. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_6_61.
9. Hrabe N., Gnäupel-Herold T., Quinn T. Fatigue properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 94. P. 202–210.
10. Segovia R., García F., Papaelias M. Review on additive manufacturing and non-destructive testing // *Journal of Manufacturing Systems*. 2023. Vol. 66. P. 260–286.
11. Bartlett J.L., Li X. An overview of residual stresses in metal powder bed fusion // *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 27. P. 131–149.
12. 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/M14071480.
13. Zeng K., Pal D., Stucker B. A review of thermal analysis methods in laser sintering and selective laser melting // *Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, 2012. P. 796–814.

14. Huang X., Li Z., Xie H. Recent progress in residual stress measurement techniques // *Acta Mechanica Sinica Sinica*. 2013. Vol. 26. P. 570–583.
15. Kim S.H., Kim J.B., Lee W.J. Numerical prediction and neutron diffraction measurement of the residual stresses for a modified 9Cr–1Mo steel weld // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. P. 3905–3913.
16. 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.
17. Madireddy G., Li C., Liu J., Sealy M.P. Modeling thermal and mechanical cancellation of residual stress from hybrid additive manufacturing by laser peening // *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2019. Vol. 2. Is. 2. P. 49–60.
18. Ganeriwala R., Strantz M., King W. et al. Evaluation of a thermo-mechanical model for prediction of residual stress during laser powder bed fusion of Ti–6Al–4V // *Additive Manufacturing*. 2019. Is. 27. P. 1–32.
19. Mukherjee T., Zhang W., Debroy T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing // *Computational Materials Science*. 2017. Vol. 126. P. 360–372.
20. Мараховский П.С., Баринов 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). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
21. Stathatos E., Vosniakos G.C. A computationally efficient universal platform for thermal numerical modeling of laser-based additive manufacturing // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2017. Vol. 232. P. 2317–2333. DOI: 10.1177/0954406217720230.
22. 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: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-122-132.
23. Yang Y., Zhou X. A Volumetric Heat Source Model for Thermal Modeling of Additive Manufacturing of Metals // *Metals*. 2020. Vol. 10. P. 1–17.
24. Monu M., Chekotu J., Brabazon D. Eddy current testing and monitoring in metal additive manufacturing: A review // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 134. P. 558–588.
25. Bowler N. Eddy-current nondestructive evaluation. New York: Springer, 2019. 217 p.
26. Lu M., Xie Y., Zhu W. et al. Determination of the magnetic permeability, electrical conductivity, and thickness of ferrite metallic plates using a multifrequency electromagnetic sensing system // *IEEE transactions on industrial informatics*. 2019. Vol. 15. P. 4111–4119.
27. Шитиков В.С., Пичугин С.С. Оценка распределения электрических свойств при упругой деформации объекта контроля вихретоковым методом // *Труды ВИАМ*. 2024. № 11 (141). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-89-99.
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., 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.
31. Кекало И.Б. Физические свойства металлов. Раздел «Электрические свойства»: лабораторный практикум. М., 1998. 139 с.
32. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля / под ред. В.Е. Шатерникова. М.: Спектр, 2010. 256 с.
33. Неразрушающий контроль / под ред. В.В. Сухорукова: практ. пособие в 5 кн. М.: Высшая школа, 1992. Кн. 3: Электромагнитный контроль. 312 с.

References

1. 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 2. Compensation and control of deviations, GIP and heat treatment. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 2, pp. 2–12.
2. 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), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.
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. 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), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2025). DOI: DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-3-16.
6. 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.
7. Yamomoto 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.
8. Panin P.V., Lukina E.A., Naprienko S.A., Alekseev E.B. Effect of heat treatment on the structure and properties of TiAl alloy of the Ti–Al–V–Nb–Cr–Gd system synthesized by selective electron beam melting. *Fizicheskaya mezhmekhanika*, 2023, vol. 26, no. 6, pp. 61–74. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_6_61.
9. Hrabe N., Gnäupel-Herold T., Quinn T. Fatigue properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 94, pp. 202–210.
10. Segovia R., García F., Papaelias M. Review on additive manufacturing and non-destructive testing. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, vol. 66, pp. 260–286.
11. Bartlet J.L., Li X. An overview of residual stresses in metal powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 27, pp. 131–149.
12. 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/MI14071480.
13. Zeng K., Pal D., Stucker B. A review of thermal analysis methods in laser sintering and selective laser melting. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, 2012, pp. 796–814.
14. Huang X., Li Z., Xie H. Recent progress in residual stress measurement techniques. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, vol. 26, pp. 570–583.
15. Kim S.H., Kim J.B., Lee W.J. Numerical prediction and neutron diffraction measurement of the residual stresses for a modified 9Cr–1Mo steel weld. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, pp. 3905–3913.
16. 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.
17. Madireddy G., Li C., Liu J., Sealy M.P. Modeling thermal and mechanical cancellation of residual stress from hybrid additive manufacturing by laser peening. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2019, vol. 2, is. 2, pp. 49–60.
18. Ganeriwala R., Strantza M., King W. et al. Evaluation of a thermo-mechanical model for prediction of residual stress during laser powder bed fusion of Ti–6Al–4V. *Additive Manufacturing*, 2019, is. 27, pp. 1–32.

19. Mukherjee T., Zhang W., Debroy T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing. *Computational Materials Science*, 2017, vol. 126, pp. 360–372.
20. 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), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
21. Stathatos E., Vosniakos G.C. A computationally efficient universal platform for thermal numerical modeling of laser-based additive manufacturing. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, vol. 232, pp. 2317–2333. DOI: 10.1177/0954406217720230.
22. 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: May 17, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-122-132.
23. Yang Y., Zhou X. A Volumetric Heat Source Model for Thermal Modeling of Additive Manufacturing of Metals. *Metals*, 2020, vol. 10, pp. 1–17.
24. Monu M., Chekotu J., Brabazon D. Eddy current testing and monitoring in metal additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 134, pp. 558–588.
25. Bowler N. *Eddy-current nondestructive evaluation*. New York: Springer, 2019, 217 p.
26. Lu M., Xie Y., Zhu W. et al. Determination of the magnetic permeability, electrical conductivity, and thickness of ferrite metallic plates using a multifrequency electromagnetic sensing system. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2019, vol. 15, pp. 4111–4119.
27. 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), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-89-99.
28. *Titanium intermetallic alloy and a product 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. Intermetallic alloys based on titanium and nickel. Ed. E.N. Kablov. 2nd ed., with amend. and add. Moscow: VIAM, 2019, 316 p.
30. Panin P.V., Lukina E.A., Bogachev I.A., Naprienko S.A. Influence of the process parameters of selective electron beam melting on the chemical composition, microstructure and porosity of the TiAl alloy of the Ti–Al–V–Nb–Cr–Gd system. *Metallurg*, 2023, no. 5, pp. 54–66.
31. Kekalo I.B. *Physical properties of metals. Section «Electrical properties»*: laboratory practical course. Moscow, 1998, 139 p.
32. Gerasimov V.G., Klyuev V.V., Shaternikov V.E. *Methods and devices for electromagnetic testing*. Ed. V.E. Shaternikov. Moscow: Spektr, 2010, 256 p.
33. *Non-destructive testing: practical manual in 5 books*. Ed. V.V. Sukhorukov. Moscow: Vysshaya shkola, 1992, book 3: Electromagnetic control, 312 p.

Информация об авторах

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

Пичугин Сергей Сергеевич, инженер, 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

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

Sergey S. Pichugin, Engineer, 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 03.10.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.10.2025.

The article was submitted 03.10.2025; approved and accepted for publication after reviewing 14.10.2025