

Оригинальная статья / Original article

УДК 539.21:621.785

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-32-42>

Математические методы наблюдения волновых процессов при деформации изделий 3D-технологии

А. Н. Чуканов¹ ✉, Н. Н. Добровольский¹, Е. В. Цой¹, А. А. Яковенко²

¹ Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого
пр-т Ленина, д. 125, г. Тула 300026, Российская Федерация

² ООО «Металлург-Туламаш»
ул. Мосина, д. 2, г. Тула 300002, Российская Федерация

✉ e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Резюме

Целью настоящей работы является разработка и применение математических методов (Фурье-интерполюрования) для фиксации наличия и оценки механизмов волновых процессов, развивающихся в изделиях из порошковых нержавеющей и жаропрочных сплавов аддитивных технологий (SLM) в ходе их деформации.

Методы. Для фиксации наличия волновых процессов пластической деформации в нагруженных изделиях 3D-технологий использовали образцы порошковой нержавеющей стали 03X18H12M2 (аналог AISI 316L) и порошкового жаропрочного сплава 08XН53БМТЮ (аналог Inconel 718), изготовленные по SLM-технологии на 3D-принтере SLM280 2.0HL. Образцы подвергали одноосному растяжению (ГОСТ 1497-84) с постоянной скоростью захватов на воздухе при комнатной температуре. С использованием цифровой видеозаписи процесса нагружения размеченной поверхности образцов проводили измерения длин размеченных участков. Строили графики зависимостей локальной относительной деформации по длине образца и в выделенные моменты испытаний. Математическое обоснование наличия волнового характера фиксируемых функций как периодических проводили путём разложения их в ряд Фурье с последующей интерполяцией.

Результаты. Экспериментально установлено, что в объёме исследованных образцов порошковых нержавеющей стали типа 316L и жаропрочного сплава типа Inconel 718, полученных по технологии SLM, при их растяжении существует многостадийный характер волновой деформации, отражающий развитие и перемещение локальных микрообъёмов повышенной пластичности (очагов локализованной деформации). Процедура Фурье-интерполяция комплекса экспериментально полученных кусочно-линейных функций размеров разметочной сетки и их локальных деформаций подтвердила их явную периодичность, то есть наличие волнового характера.

Заключение. Разработанная методика фиксации и математической обработки волновых деформационных спектров может применяться для анализа изменяющихся параметров поверхностной разметки (накатной сетки) 3D-изделий как по их длине, так и в фиксированные моменты времени нагружения, а также при построении многомерных зависимостей параметров разметки от геометрии образцов и времени испытаний.

Ключевые слова: порошковые сплавы; SLM-технология; растяжение; локальные деформации; волновой спектр; Фурье-интерполяция.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-29-00433.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Чуканов А. Н., Добровольский Н. Н., Цой Е. В., Яковенко А. А., 2023

Для цитирования: Математические методы наблюдения волновых процессов при деформации изделий 3D-технологии / А. Н. Чуканов, Н. Н. Добровольский, Е. В. Цой, А. А. Яковенко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 4. С. 32–42. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-32-42>.

Поступила в редакцию 14.09.2023

Подписана в печать 27.11.2023

Опубликована 25.12.2023

Mathematical Methods of Observation of Wave Processes During Deformation of 3D Technology Products

Alexander N. Chukanov¹✉, Nikolay N. Dobrovolsky¹, Evgeny V. Tsoi¹,
Alexandra A. Yakovenko²

¹ Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125 Lenin Ave., Tula 300026, Russian Federation

² "Metallurg-Tulamash" LLC
2 Mosina Str., Tula 300002, Russian Federation

✉ e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Abstract

The purpose of this work is to develop and apply mathematical methods (Fourier interpolation) to fix the presence and evaluation of the mechanisms of wave processes developing in products made of powder stainless and heat-resistant alloys of additive technologies (SLM) during their deformation.

Methods. To fix the presence of wave processes of plastic deformation in loaded 3d technology products, samples of powder stainless steel 03X18H12M2 (analog AISI 316L) and powder heat-resistant alloy 08XN53BMTU (analog Inconel 718), manufactured using SLM technology on a 3d printer SLM280 2.0HL, were used. The samples were subjected to uniaxial stretching (GOST 1497-84) with a constant rate of capture in air at room temperature. The lengths of the marked sections were measured using digital video recording of the loading process of the marked surface of the samples. Graphs of the dependences of local relative deformation along the length of the sample and at selected test moments were constructed. The mathematical substantiation of the existence of the wave character of the fixed functions as periodic was carried out by decomposing them into a Fourier series with subsequent interpolation.

Results. It has been experimentally established that in the volume of the studied samples of powder stainless steel type 316L and heat-resistant alloy type Inconel 718, obtained by SLM technology, when they are stretched, there is a multistage character of wave deformation reflecting the development and movement of local micro-volumes of increased plasticity (foci of localized deformation). The Fourier interpolation procedure of a complex of experimentally obtained piecewise linear functions of the dimensions of the marking grid and their local deformations confirmed their apparent periodicity, i.e. the presence of a wave character.

Conclusion. The developed technique of fixing and mathematical processing of wave deformation spectra can be used to analyze the changing parameters of the surface marking (rolling grid) of 3d products both along their length and at fixed loading times, as well as when constructing multidimensional dependencies of the marking parameters on the geometry of samples and test time.

Keywords: powder alloys; SLM technology; stretching; local deformations; wave spectrum; Fourier interpolation.

Funding: The work was carried out with the financial support of the grant of the Russian Science Foundation, project No. 23-29-00433.

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Chukanov A. N., Dobrovolsky N. N., Tsoi E. V., Yakovenko A. A. Mathematical Methods of Observation of Wave Processes During Deformation of 3D Technology Products. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(4): 32–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-4-32-42>

Received 14.09.2023

Accepted 27.11.2023

Published 25.12.2023

Введение

Пластическая деформация (ПД) – одна из основных технологий создания полуфабрикатов и готовых изделий путём пластического формоизменения. В ходе изучения механизма ПД монокристаллов, чистых металлов и сплавов было зафиксировано развитие волновых процессов, эволюционирующих с ростом внешней нагрузки [1–5]. Установили, что ПД нельзя рассматривать как процесс равномерного изменения линейных размеров объектов (изделий). В ходе нагружения в их объёме формируются и перемещаются микрообъёмы, в которых сдвиговые процессы, в силу атомного расположения и кристаллографических особенностей, зарождаются, создавая очаги локализованной ПД. С увеличением внешней нагрузки эти очаги перемещаются в объёме изделия с некоторой скоростью. В дальнейшем количество и размеры очагов локальной деформации растёт, а их перемещение в направлении нагружения формирует волновой спектр [6; 7].

Вид волновых спектров в исследованных сплавах претерпевал несколько этапов развития в зависимости от величины и длительности действия внешнего напряжения.

Итогом являлось формирование в объёме нагруженного изделия локально деформированных областей, разделённых границами особого строения. Подобная фрагментация изделия может приводить к зарождению и ускоренному разрушению по границам фрагментов [6].

Анализ перечисленных результатов показал перспективность продолжения исследований механизма волновых процессов в ходе деформации (волновых деформационных процессов – ВДП), особенно для ответственных тяжёлонагруженных изделий.

В современных условиях для изготовления таких изделий в авиации, ракетной технике, двигателестроении используют

изделия, получаемые из порошковых сталей и сплавов с помощью аддитивных технологий. Такие изделия из коррозионно-стойких и жаропрочных сплавов, несомненно, перспективны в силу своих высоких эксплуатационных характеристик. Однако вопрос вызывает стабильность этих свойств при длительной эксплуатации в условиях жёсткого температурно-силового воздействия. Именно такие условия могут стимулировать механизмы формирования фрагментации изделий посредством волнового характера ПД.

Механизмы ВДП в изделиях 3D-технологий до конца не исследованы. Подвергается сомнению факт развития волнового характера пластической деформации в этих изделиях при напряжениях ниже предела прочности.

Целью настоящей работы являлась разработка и применение математических методов (Фурье-интерполирования) для фиксации наличия и оценки механизмов волновых процессов, развивающихся в изделиях из порошковых нержавеющей и жаропрочных сплавов аддитивных технологий (SLM) в ходе их деформации. На основе разработанной процедуры математического анализа в нагруженных изделиях 3D-технологий предполагалось подтвердить наличие волновых спектров деформации.

Материалы и методы

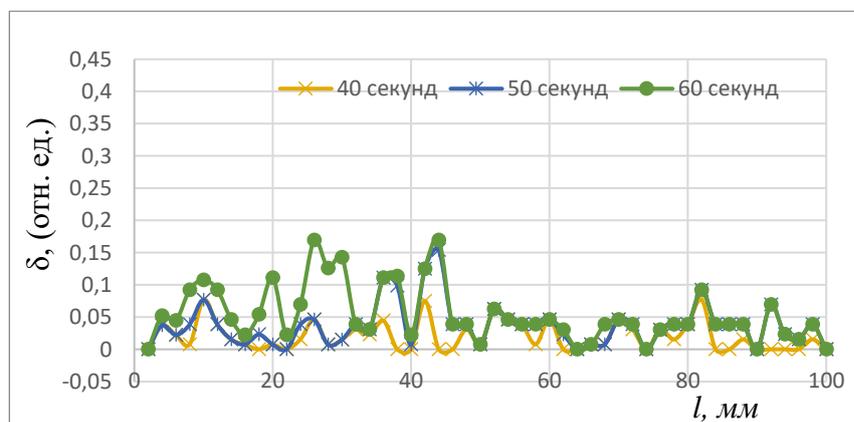
В качестве объектов исследования использовали образцы порошковой нержавеющей стали 03X18H12M2 (аналог *AISI 316L*) и порошкового жаропрочного сплава 08XH53БМТЮ (аналог *Inconel 718*), изготовленные по SLM-технологии на 3D-принтере SLM280 2.0HL. Образцы подвергали одноосному растяжению (ГОСТ 1497-84) с постоянной скоростью захватов на воздухе при комнатной температуре [8–11]. С использованием цифровой видеозаписи процесса нагружения

размеченной поверхности образцов проводили измерения длин размеченных участков [12]. Строили графики зависимостей локальной относительной деформации (δ) по длине образца (l , мм) в определённое время (t , с) [13–15]. Параллельно проводили металлографический анализ структуры образцов.

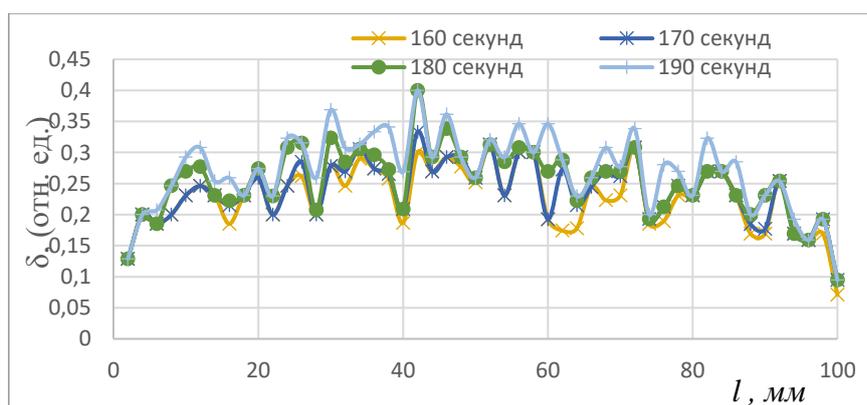
Для математического обоснования наличия волнового характера фиксируемых кусочно-линейных функций $\delta = f(l_i, t_i)$ как функций достоверно периодических вне погрешности их измерений (оценки их сходимости) использовали разложение их в ряд Фурье с последующей интерполяцией [16–19].

Результаты и их обсуждение

В течение нагружения образцов растяжением выявили сложный волновой характер процесса их пластической деформации. В развивающейся в течение испытания структуре волнового спектра фиксировали периодическое увеличение и снижение высот максимумов локальной деформации δ по длине образца (l_i , мм) (рис. 1). Для наиболее характерных участков с максимальным изменением локальной деформации строили её зависимости от длительности испытания t (рис. 2). Отметим многостадийный периодический характер увеличения высоты максимумов в течение длительности нагружения образца.



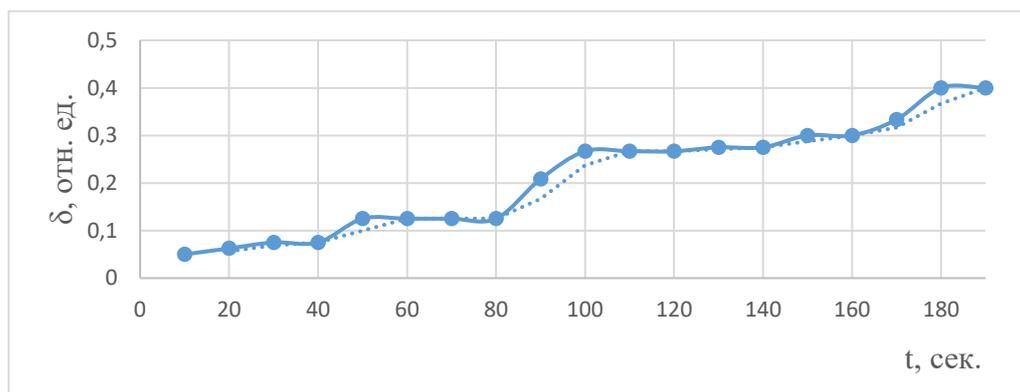
а



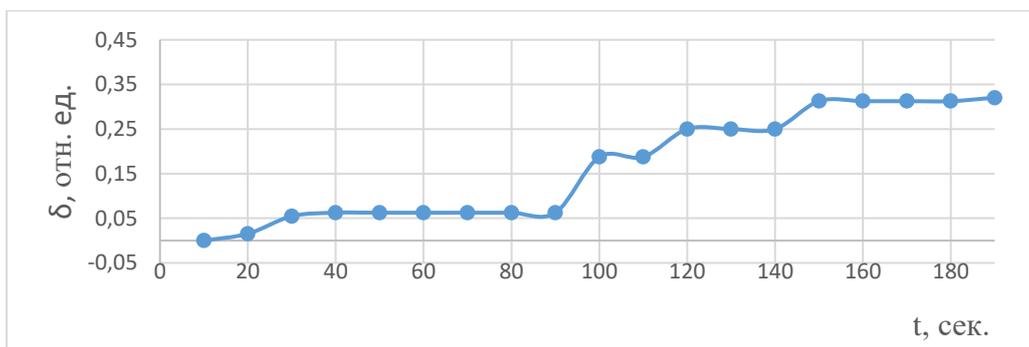
б

Рис. 1. Зависимости локальной относительной деформации δ от длины (l) образца в периоды испытания 40...60 (а) и 160...190 (б) с

Fig. 1. Dependences of the local relative deformation δ on the length (l) of the sample during the test periods 40...60 (a) and 160...190 (b) s



а



б

Рис. 2. Зависимости локальной относительной деформации δ на участках образца $l_{\text{уч}} = 42$ мм (а) и $l_{\text{уч}} = 52$ мм (б) за период испытания t

Fig. 2. Dependences of local relative deformation δ on the sample sections $l_{\text{uch}} = 42$ mm (а) and $l_{\text{uch}} = 52$ mm (б) during the test period t

Для разложения функции в ряд Фурье с последующей интерполяцией [13] использовали следующий алгоритм действий.

1. Из массива экспериментально зафиксированных изменений длин расчётных участков поверхности нагружаемого образца (l_i) составили матрицу значений координат (x_i) линий разметки за всё время (t_i) испытания с шагом 10 с. Матрицу рассматривали как массив значений периодических по x и y функций $f(x, y)$ на квадрате $[0, 1] \times [0, 1]$ в узлах равномерной сетки M .

2. Решали задачу Фурье-интерполяции по равномерной сетке. Провели интерполяцию для двух случаев: а) с количеством точек расчёта в 2 раза меньше, чем

зафиксировали в эксперименте (~ 500) и б) с количеством точек расчёта в 2 раза больше, чем зафиксировали в эксперименте (~ 1000). Вычислили коэффициенты Фурье, являющиеся интегралами в узлах расчётной сетки, а также гармоники полученной функции.

Получили конечный ряд Фурье $F(x, y)$, интерполирующий функцию $f(x, y)$ в узлах равномерной сетки.

$$F(x, y) = \sum \sum C(m_1, m_2) e^{2m(m_1x + m_2y)}$$

При вычислениях использовали действительную часть $\text{Re}(F(x, y))$, т. к. из-за вычислительной ошибки приближенных вычислений мнимая часть суммируется не в 0, а в значение, близкое к 0. После за-

мены переменных $F(t/380, (x-2)/196)$ получили визуализацию процесса (см. рис. 3). Описанные выше процедуры реализовали также для функции локальных деформаций (δ_i) (рис. 4).

Предварительный анализ функции локальных деформаций после Фурье-интерполирования в *MathCad Prime* (рис. 3) показал наличие существенной периодической зависимости.

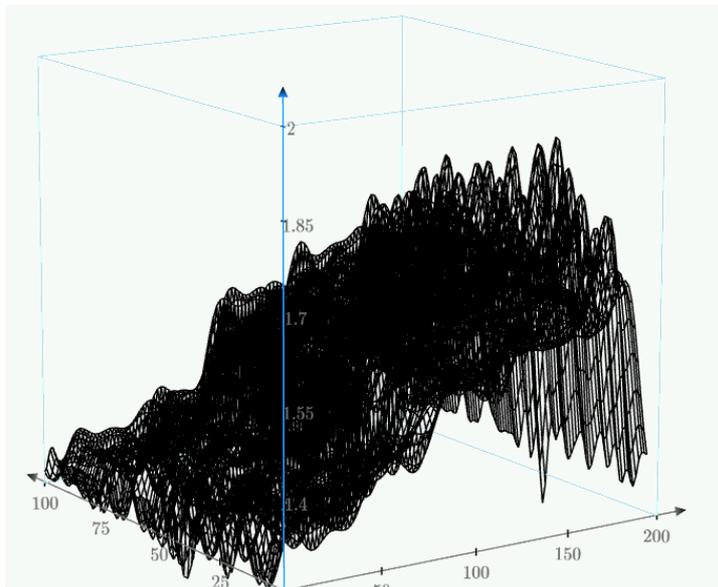


Рис. 3. Моделирование функции локальных деформаций после Фурье-интерполяции (MathCad Prime)

Fig. 3. Modeling of the local deformation function after Fourier interpolation (MathCad Prime)

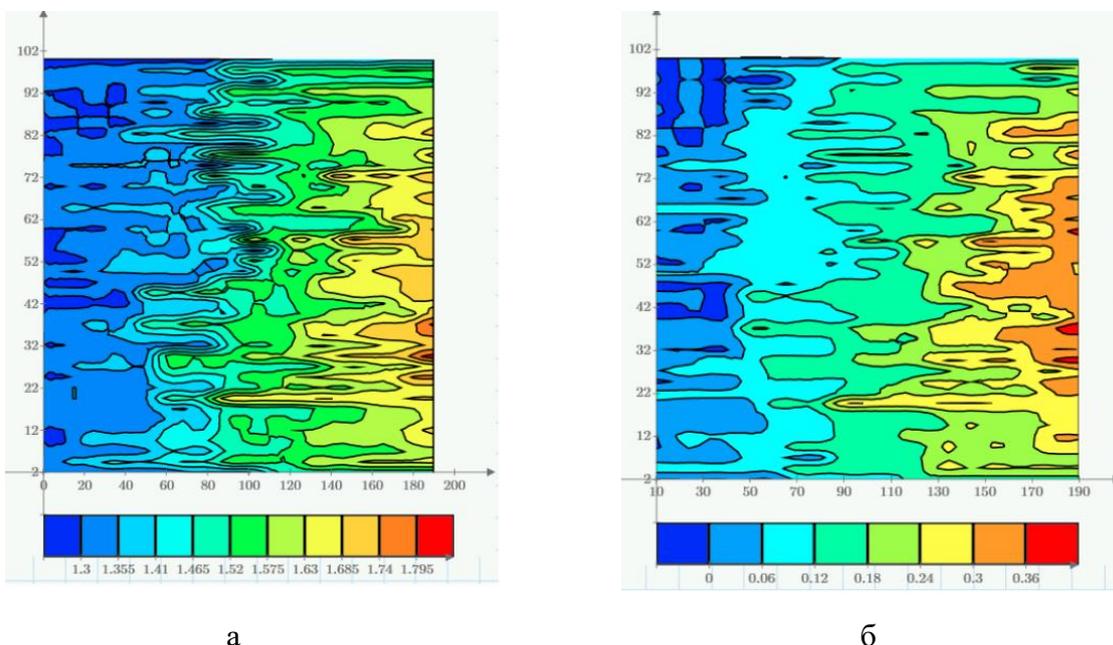


Рис. 4. Контурные графики перемещений $\Delta l_i = F(t/380, (x-2)/196)$ (а) и локальных деформаций δ_i (б) от времени эксперимента t (ордината) и длины образца x (абсцисса)

Fig. 4. Contour graphs of displacements $\Delta l_i = F(t/380, (x-2)/196)$ (a) and local deformations δ_i (b) from the experiment time t (ordinate) and the length of the sample x (abscissa)

Выводы

1. В объёме исследованных образцов порошковых нержавеющей стали типа 316L и жаропрочного сплава типа Inconel 718, полученных по технологии SLM, при их растяжении выявлен многостадийный характер волновой деформации, отражающий развитие и перемещение локальных микрообъёмов повышенной пластичности (очагов локализованной деформации).

2. Программное моделирование результатов Фурье-интерполирования данных статического нагружения 3D-образцов порошковых сплавов и их визуализация (контурные графики) достоверно подтвердили наличие в диапазоне $l_i \sim 60\text{--}62$ мм на длине образца ($l_{\text{общ}} = 190$ мм) зарождение больших локальных деформаций. На рисунке 4 область голубого цвета располагается значительно выше значения возможной погрешности анализа (неустраняемой + вычислительной).

3. Процедура Фурье-интерполяции комплекса экспериментально полученных

кусочно-линейных функций размеров разметочной сетки и их локальных деформаций подтвердила их явную периодичность, т. е. наличие волнового характера.

4. Для дальнейшего повышения достоверности этого вывода решено повысить частоту дискретизации (увеличить число разрядов квантования) и продолжить совместный математический анализ полученных функций (повысить их сходимость) с применением процедуры периодизации.

5. Разработанная методика фиксации и математической обработки волновых деформационных спектров с успехом может применяться для анализа изменяющихся параметров поверхностной разметки (накатной сетки) 3D-изделий как по их длине, так и в фиксированные моменты времени нагружения, а также при построении многомерных зависимостей параметров разметки от геометрии образцов и времени испытаний.

Список литературы

1. Шестопапов Л. М. Деформирование металлов и волны пластичности в них. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. 268 с.

2. Инденбом В. Л., Орлов А. Н., Эстрин Ю. З. Элементарные процессы пластической деформации кристаллов. Киев: Наукова думка, 1978. С. 93–112.

3. Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.

4. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации / В. А. Лихачев, В. Е. Панин, Е. Э. Засимчук [и др.]. Киев: Наукова думка, 1989. 320 с.

5. Кольский Г., Рейдер Д. Волны напряжений и разрушение // Разрушение. М.: Мир, 1973. Т. 1. С. 570–608.

6. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В. Е. Панин, Ю. В. Гриняев, В. И. Данилов [и др.]. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. 255 с.

7. Зуев Л. Б., Данилов В. И. Медленные автоволновые процессы при деформации твёрдых тел // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6, № 1. С. 75–94.

8. Чуканов А. Н. Влияние ориентации изделий аддитивных технологий на их анизотропию деформации // Механические свойства современных конструкционных материалов: сборник материалов научных чтений им. чл.-корр. РАН Ивана Августовича Одингга. М.: ИМЕТ РАН, 2020. С. 79–80.

9. Чуканов А. Н. Анизотропия деформации при послойном лазерном синтезе изделий // Перспективные технологии и материалы: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Севастополь: СевГУ, 2020. С. 169–174.

10. Чуканов А. Н. Анизотропия физико-механических свойств при послойном лазерном синтезе // Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов: сборник научных статей Международной научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика А. А. Байкова. Курск: Университетская книга, 2020. С. 244–247.

11. Чуканов А. Н., Терёшин В. А., Цой Е. В. Свойства изделий, полученных селективным лазерным синтезом. 1. «Сплошные» изделия // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2021): сборник статей XIII Международной научно-технической конференции. Курск: Университетская книга, 2021. С. 341–346.

12. Машинное зрение в анализе волновых спектров деформации аддитивных изделий SLM-технологии / А. Н. Чуканов, В. А. Терёшин, Е. В. Цой, А. В. Матвеева // Перспективные материалы науки, технологий и производства: сборник научных статей Международной научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2022. С. 325–329.

13. Волновой характер деформации при растяжении изделий послойного лазерного синтеза / А. Н. Чуканов, В. А. Терёшин, Е. В. Цой, А. В. Матвеева // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (МТО-62): сборник научных статей 7-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Курск: Университетская книга, 2022. С. 206–210.

14. Машинное зрение в анализе волновой деформации в анизотропных металлах / А. Н. Чуканов, В. А. Терёшин, Е. В. Цой, А. В. Матвеева // Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства: сборник научных статей 2-й Международной научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2022. С. 397–404.

15. Структура волнового спектра пластической деформации изделий SLM-технологии / А. Н. Чуканов, В. А. Терёшин, Е. В. Цой, А. В. Матвеева // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции. Курск: Университетская книга, 2022. С. 369–372.

16. Чуканов А. Н., Яковенко А. А., Цой Е. В. Математический анализ волновых деформационных спектров в аддитивных сплавах // Современные материалы, техника и технологии. 2023. № 3(48). С. 30–34.

17. Математический анализ в изучении волновой деформации в металлах / А. Н. Чуканов, Н. Н. Добровольский, Е. В. Цой, С. С. Гончаров // Прогрессивные технологии и процессы» (МТО-66): сборник научных статей 9-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Курск: Университетская книга, 2022. С. 151–156.

18. Цифроаналоговое преобразование кусочно-линейных и периодических функций волновой деформации в металлах / А. Н. Чуканов, Н. Н. Добровольский, Е. В. Цой, С. С. Гончаров // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 4(43). С. 44–49.

19. Чуканов А. Н., Яковенко А. А., Цой Е. В. Возможности механической спектроскопии в оценке состояния предразрушения материала // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 5(44). С. 34–41.

20. Многомерная теоретико-числовая Фурье интерполяция / Н. М. Добровольский, А. Р. Есяян, О. В. Андреева, Н. В. Зайцева // Чебышевский сборник. 2004. Т. 5, вып. 1. С. 122–143.

Reference

1. Shestopalov L. M. Deformirovanie metallov i volny plastichnosti v nikh [Deformation of metals and waves of plasticity in them]. Moscow, AN SSSR Publ., 1958. 268 p.
2. Indenbom V. L., Orlov A. N., Estrin Yu. Z. Elementarnye protsessy plasticheskoi deformatsii kristallov [Elementary processes of plastic deformation of crystals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978, pp. 93–112.
3. Alekhin V. P. Fizika prochnosti i plastichnosti poverkhnostnykh sloev materialov [Physics of strength and plasticity of surface layers of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 280 p.
4. Likhachev V. A., Panin V. E., Z asimchuk E. E., eds. Kooperativnye deformatsionnye protsessy i lokalizatsiya deformatsii [Cooperative deformation processes and localization of deformation]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989. 320 p.
5. Kolsky G., Raider D. Volny napryazhenii i razrushenie [Stress waves and destruction]. Razrushenie [Destruction]. Moscow, Mir Publ., 1973, vol. 1, pp. 570–608.
6. Panin V. E., Grinyaev Yu. V., Danilov V. I., eds. Strukturnye urovni plasticheskoi deformatsii i razrusheniya [Structural levels of plastic deformation and destruction]. Novosibirsk, Nauka Publ., Sibirskoe otd-nie, 1990. 255 p.
7. Zuev L. B., Danilov V. I. Medlennye avtovolnovye protsessy pri deformatsii tverdykh tel [Slow autowave processes during deformation of solids]. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical mesomechanics*, 2003, vol. 6, no. 1, pp. 75–94.
8. Chukanov A. N. Vliyanie orientatsii izdelii additivnykh tekhnologii na ikh anizotropiyu deformatsii [Influence of orientation of products of additive technologies on their deformation anisotropy]. *Mekhanicheskie svoystva sovremennykh konstruksionnykh materialov. Sbornik materialov nauchnykh chtenii im. chl.-korr. RAN Ivana Avgustovicha Odinga* [Mechanical properties of modern structural materials. Scientific readings named after chl.-corr. RAS I. A. Odinga]. Moscow, IMET RAS Publ., 2020, pp. 79–80.
9. Chukanov A. N. Anizotropiya deformatsii pri posloinnoy lazernoy sinteze izdelii [Anisotropy of deformation in layered laser synthesis of products]. *Perspektivnye tekhnologii i materialy. Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Promising technologies and materials. Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Sevastopol, SevGU Publ., pp. 169–174.
10. Chukanov A. N. Anizotropiya fiziko-mekhanicheskikh svoystv pri posloinnoy lazernoy sinteze [Anisotropy of physico-mechanical properties in layered laser synthesis]. *Sovremennyye problemy i napravleniya razvitiya metallovedeniya i termicheskoi obrabotki metallov i splavov. Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 150-letiyu so dnya rozhdeniya akademika A. A. Baikova* [Modern problems and directions of development of metallurgy and heat treatment of metals and alloys. Collection of scientific articles of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Academician A. A. Baikov]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2020, pp. 244–247.
11. Chukanov A. N., Tereshin V. A., Tsoi E. V. Svoystva izdelii, poluchennykh selektivnym lazernym sintezom. 1 "Sploshnye" izdeliya [Properties of products obtained by selective laser synthesis. 1. "Solid" products]. *Sovremennyye avtomobil'nye materialy i tekhnologii (SAMIT-2021). Sbornik statei XIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Modern automotive materials and technologies (SAMIT-2021). Collection of articles XIII International Scientific and Technical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2021, pp. 341–346.
12. Chukanov A. N., Tereshin V. A., Tsoi E. V., Matveeva A. V. Mashinnoe zrenie v analize volnovykh spektrov deformatsii additivnykh izdelii SLM-tekhnologii [Machine vision in the analysis of wave spectra of deformation of additive products of SLM-technology]. *Perspektivnye materialy nauki, tekhnologii i proizvodstva. Sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Perspective materials of science, technology and production. Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2022, pp. 325–329.
13. Chukanov A. N., Tereshin V. A., Tsoi E. V., Matveeva A. V. Volnovoi kharakter deformatsii pri rastyazhenii izdelii posloinogo lazernogo sinteza [The wave character of deformation during stretching of

products of layered laser synthesis]. *Perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii (MTO-62). Sbornik nauchnykh statei 7-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering (MTO-62). Collection of scientific articles of the 7th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2022, pp. 206–210.

14. Chukanov A. N., Dobrovolsky N. N., Tsoi E. V., Matveeva A. V. Mashinnoe zrenie v analize volnvoi deformatsii v anizotropnykh metallakh [Machine vision in the analysis of wave deformation in anisotropic metals]. *Aktual'nye voprosy nauki, nanotekhnologii, proizvodstva. Sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Current issues of science, nanotechnology, and manufacturing. Collection of scientific articles of the 2nd International Scientific and Practical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., pp. 397–404.

15. Chukanov A. N., Tereshin V. A., Tsoi E. V., Matveeva A. V. Struktura volnovoogo spektra plasticheskoi deformatsii izdelii SLM-tekhnologii [The structure of the wave spectrum of plastic deformation of SLM-technology products]. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii. Sbornik nauchnykh trudov XVII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern tool systems, information technologies and innovations. Collection of scientific papers XVII International Scientific and Practical Conference]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2022, pp. 369–372.

16. Chukanov A. N., Yakovenko A. A., Tsoi E. V. Matematicheskii analiz volnovykh deformatsionnykh spektrov v additivnykh splavakh [Mathematical analysis of wave deformation spectra in additive alloys]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2023, no. 3(48), pp. 30–34.

17. Chukanov A. N., Dobrovolsky N. N., Tsoi E. V., Goncharov S. S. Matematicheskii analiz v izuchenii volnvoi deformatsii v [Mathematical analysis in the study of wave deformation in metals]. *Progressivnye tekhnologii i protsessy (MTO-66). Sbornik nauchnykh statei 9-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Progressive technologies and processes (MTO-66). Collection of scientific articles of the 9th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation]. Kursk, Universitetskaya knigaPubl., 2022, pp. 151–156.

18. Chukanov A. N., Dobrovolsky N. N., Tsoi E. V., Goncharov S. S. Tsifroanalogovoe preobrazovanie kusochno-lineinykh i periodicheskikh funktsii volnvoi deformatsii v metallakh [Digital-analog transformation of piecewise linear and periodic functions of wave deformation in metals]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2022, no. 4(43), pp. 44–49.

19. Chukanov A. N., Yakovenko A. A., Tsoi E. V. Vozmozhnosti mekhanicheskoi spektroskopii v otsenke sostoyaniya predrazrusheniya materiala [Possibilities of mechanical spectroscopy in assessing the state of pre-destruction of a material]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*, 2022, no. 5(44), pp. 34–41.

20. Dobrovolsky N. M., Yesayan A. R., Andreeva O. V., Zaitseva N. V. Mnogomernaya teoreticheskaya Fur'e interpolyatsiya [Multidimensional number-theoretic Fourier interpolation]. *Chebyshevskii sbornik = Chebyshevsky Collection*, 2004, vol. 5, is. 1, pp. 122–143.

Информация об авторах / Information about the Authors

Чуканов Александр Николаевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация, e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Alexander N. Chukanov, Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russian Federation, e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Добровольский Николай Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: nikola.dobrovolsky@gmail.com

Цой Евгений Владимирович, аспирант, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: tsoyev@tspu.ru

Яковенко Александра Александровна, кандидат технических наук, технолог, ООО «МеталлургТуламаш», г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: dispoziciya100@mail.ru

Nikolay N. Dobrovolsky, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russian Federation,
e-mail: nikola.dobrovolsky@gmail.com

Evgeny V. Tsoi, Post-Graduate Student, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russian Federation,
e-mail: tsoyev@tspu.ru

Alexandra A. Yakovenko, Candidate of Sciences (Engineering), Process Engineer, LLC "Metallurgtulamash", Tula, Russian Federation,
e-mail: dispoziciya100@mail.ru