

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.763:621.77:539.3

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-19-29>

Влияние анизотропии на характер упрочнения в аддитивных сплавах высокой прочности

А. Н. Чуканов¹✉, В. А. Коротков², А. А. Яковенко³, Е. В. Цой¹, А. А. Фролов¹

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

² Тульский государственный университет
пр-т Ленина, д. 92, г. Тула 300012, Российская Федерация

³ Metallurg-Tulamash
ул. Мосина, д. 2, г. Тула 300002, Российская Федерация

✉ e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Резюме

Целью настоящей работы является установление зависимости коэффициентов плоскостной анизотропии от интенсивности локализованных деформаций в различных диапазонах нагружения поперечных и продольных сечений образцов жаропрочного порошкового сплава Inconel 718, изготовленных по технологии SLM. Оценена роль технологической анизотропии образцов, характерной для технологии SLM, и её влияние на характер упрочнения изделий из сплава Inconel 718.

Методы. Для достижения цели анализировали диаграммы деформации образцов порошкового сплава Inconel 718, изготовленных по технологии SLM, измеренные в ходе их растяжения по ГОСТ 11701-84. Нагрузению подвергали плоские образцы с нанесённой на их поверхность делительной сеткой. В ходе испытаний локализованную деформацию образцов в различных сечениях определяли путём измерения геометрии изображений делительной сетки. Для фиксации указанных изображений использовали специально разработанную технологию фото- и видеофиксации.

Результаты. Проведённый статистический анализ вида и параметров диаграмм деформации позволил определить характер изменения интенсивности напряжений и деформаций образцов исследованного материала. Установили линейный характер его упрочнения при растяжении в области малых значений интенсивности деформаций и степенной характер упрочнения в диапазоне интенсивности деформации от 0,03 до 0,17.

Заключение. Показано значимое влияние технологической анизотропии образцов жаропрочного порошкового сплава Inconel 718, полученных по технологии SLM, от величины интенсивности деформаций. Выявлена необходимость учёта данного факта при разработке технологических процессов производства изделий ответственного назначения из исследованного материала.

Ключевые слова: коэффициент анизотропии; интенсивность напряжений; деформации; характер упрочнения.

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

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-29-00433 (<https://rscf.ru/project/№ 23-29-00433/>).

Для цитирования: Влияние анизотропии на характер упрочнения в аддитивных сплавах высокой прочности / А. Н. Чуканов, В. А. Коротков, А. А. Яковенко, Е. В. Цой, А. А. Фролов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 3. С. 19–29. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-19-29>

Поступила в редакцию 22.06.2024

Подписана в печать 31.07.2024

Опубликована 24.09.2024

© Чуканов А. Н., Коротков В. А., Яковенко А. А., Цой Е. В., Фролов А. А., 2024

The influence of anisotropy on the character of hardening in additive high-strength alloys

Alexander N. Chukanov^{1✉}, Viktor A. Korotkov², Alexandra A. Yakovenko³, Evgeny V. Tsoi¹, Artyom A. Frolov¹

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

² Tula State University
92 Lenin Ave., Tula 300012, Russian Federation

³ Metallurg-Tulamash
2 Mosina Str., Tula 300002, Russian Federation

✉ e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Abstract

The purpose of this work is to establish the dependence of the coefficients of planar anisotropy on the intensity of localized deformations in various loading ranges of transverse and longitudinal sections of samples of heat-resistant powder alloy Inconel 718 manufactured using SLM technology. The role of technological anisotropy of samples characteristic of SLM technology and its effect on the hardening of Inconel 718 alloy products is evaluated.

Methods. To achieve this goal, the deformation diagrams of Inconel 718 powder alloy samples manufactured using SLM technology, measured during their stretching according to GOST 11701-84, were analyzed. Flat samples with a dividing grid applied to their surface were subjected to loading. During the tests, localized deformation of the samples in different sections was determined by measuring the geometry of the images of the dividing grid. A specially developed photo and video recording technology was used to capture these images.

Results. The statistical analysis of the type and parameters of the deformation diagrams made it possible to determine the nature of changes in the intensity of stresses and deformations of the samples of the studied material. The linear character of its tensile hardening in the region of small values of strain intensity and the power-law character of hardening in the range of strain intensity ε_1 from 0.03 to 0.17 were established.

Conclusion. A significant effect of the technological anisotropy of Inconel 718 heat-resistant powder alloy samples obtained using SLM technology on the intensity of deformations is shown. The necessity of taking this fact into account in the development of technological processes for the production of responsible products from the studied material has been revealed.

Keywords: anisotropy coefficient; stress; strain intensity; strain; hardening character.

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

Financing: The work was carried out with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation project No. 23-29-00433 (<https://rscf.ru/project/№23-29-00433/>).

For citation: Chukanov A.N., Korotkov V.A., Yakovenko A. A., Tsoi E.V., Frolov A.A. The influence of anisotropy on the character of hardening in additive high-strength alloys. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2024;14(3):19–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-3-19-29>

Received 22.06.2024

Accepted 31.07.2024

Published 24.09.2024

Введение

Порошковую жаропрочную сталь Inconel 718 [1] широко используют для производства ответственных изделий повышенной и усталостной прочности [2], работающих в области высоких температур

[3]. Анизотропия (А) её структуры и физико-механических свойств, формирующаяся в ходе аддитивной технологии изготовления (селективного лазерного сплавления (SLM)) [4], аналогично анизотропии листовых материалов слиткового производства (проката сталей и сплавов) [5],

оказывает влияние на эксплуатационные характеристики изделий [6]. В отличие от анизотропии листового проката [7] образование текстуры (предпочтительной ориентировки кристаллографических осей в микрообъемах выращиваемого материала, характера распределения [7], ориентировки фаз и дефектов [8], а также остаточных напряжений [9]) связано с послойным лазерным расплавлением порошка в ходе SLM [10]. В ходе остывания микрообъемы ванн расплава приобретают преимущественную ориентировку, параллельную направлению выращивания [11].

Направленность кристаллографической текстуры вдоль оси выращивания образцов, имеющих простую геометрию (параллелепипедов, цилиндров) отмечена для многих материалов, соответствующих стандартам ASTM F2924, ASTM F3055 сплавов типа Inconel 718, Inconel 738LC, NiCr, NiTi и др. Строчечная структура сохраняется даже после дополнительного отжига, определяя различие свойств вдоль и поперек готового изделия [12].

Изучение кинетики развития анизотропии в образцах, изготовленных из порошкового сплава Inconel 718 методом SLM [4], показывает, что для них, как и для листовых материалов, влияние ани-

тропии можно контролировать на базе коэффициента анизотропии (показателя Ланкфорда R) [13]. Изменение R отражает характер и скорость упрочнения [11] как во всем изделии, так и в его локальных микрообъемах [14]. Анализ динамики R позволяет изучать механизм влияния анизотропии, а также контролировать и прогнозировать на основе полученных результатов надежность готовых изделий [15].

Цель работы – определение характера упрочнения в различных диапазонах интенсивности локализованных деформаций (ЛД) в поперечных и продольных сечениях нагруженных образцов сплава Inconel 718, изготовленных по аддитивной технологии SLM путём анализа коэффициентов их анизотропии.

Материалы и методы

Объекты исследования – плоские образцы (100x10x2мм) порошкового жаропрочного сплава 08XH53БМТЮ (аналог AISI Inconel 718), изготовленные по SLM-технологии в вертикальном направлении относительно платформы 3d-принтера SLM280 2.0HL.

В зоне расчетной длины образцов лазером наносили делительную сетку с ячейками размером 1x1 мм (рис. 1).

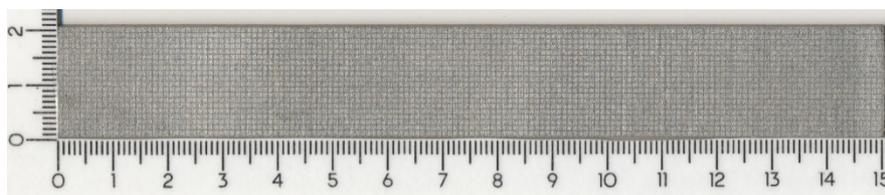


Рис. 1. Изображение делительной сетки на поверхности образца

Fig. 1. The image of the dividing grid on the surface of the sample

Образцы подвергали одноосному растяжению на испытательной машине Р5-ПК (ГОСТ 11701-84) на воздухе при комнатной температуре с постоянной скоростью перемещения захватов 5 мм/мин [4]

с записью графика «нагрузка – перемещение» [14]. На основе анализа изображений цифровой фото- и видеозаписи деформируемой поверхности образцов проводили измерения геометрии ячеек делительной

сетки [13] в выделенных поперечных и продольных сечениях образцов [14].

По результатам измерений линейных размеров делительной сетки образцов вычисляли локальные логарифмические деформации по ширине и длине ячеек образца в продольных и поперечных сечениях [15].

Процесс нагружения до разрушения фиксировали с помощью специализированного фото- и видеоборудования (цифровой фотокамеры Canon EOS 5D Mark IV и видеокамеры Sony Alpha 7 III с 35-миллиметровой полнокадровой матрицей), позволявшего получать изображение деформируемых образцов SLM в непрерывном (.mov) и интервальном режимах (1...10 с) в форматах 4k с разрешением 6720x1480 и 3840x2160 пикс соответственно [16]. Полученные изображения обрабатывали в графических редакторах [17]. Определяли изменение длины элементов сетки l_i (мм) и их относительную деформацию $\delta = (l_k - l_n)/l_n$ [18].

На основе массивов данных локальной относительной деформации в выделенных сечениях рассчитывали коэффициенты её плоскостной анизотропии (коэффициенты Ланкфорда) R [19].

В работе коэффициенты анизотропии определяли по индивидуальным размерам ячеек делительной сетки. Использовали данные о начальных (до растяжения) размерах ячеек, расположенных в определённом сечении по ширине b_o и длине l_o и их конечных размерах b_k и l_k в этом сечении после растяжения. С их использованием рассчитывали суммарные логарифмические деформации ячеек в выделенных поперечных $\varepsilon_b = \ln(b_o/b_k)$ и в продольных $\varepsilon_l = \ln(l_o/l_k)$ направлениях. Коэффициенты анизотропии в заданных сечениях определяли по формуле [15]

$$R = \varepsilon_b/(\varepsilon_l - \varepsilon_b). \quad (1)$$

В процессе пластического деформирования происходит упрочнение материала, т. е. изменение напряжения текучести в зависимости от деформации при линейном растяжении. Эта зависимость аппроксимируется, как правило, степенным уравнением

$$\sigma_i = C\varepsilon_i^n. \quad (2)$$

Показатель деформационного упрочнения n уравнения (1) в соответствии с рекомендациями ГОСТ 11701-84 «Металлы. Методы испытания на растяжение тонких листов и лент» определяли по зависимости

$$n = \frac{\lg P_1 - \lg P_{\max} - \lg l_1^{l_k}}{\lg \lg \frac{l_1}{l_o} - \lg \lg \frac{l_k}{l_o}}, \quad (3)$$

где P_1 и l_1 ; P_{\max} и l_k – соответственно нагрузки в начале пластического течения материала образца (с удлинением начальной расчётной длины l_o до l_1) и в конце (с удлинением расчётной длины до l_k) до момента образования шейки (начала локализации деформации). Для нахождения этих значений выполняли поэтапное растяжение образца и определение соответствующих значений нагрузки и удлинения на каждом этапе растяжения.

Использованная в работе технология непрерывной фото- и видеорегистрации геометрии делительной сетки, синхронизированная с фиксацией нагрузки и удлинения, позволяла определять нагрузку и удлинение в любой момент времени [20].

Результаты и их обсуждение

Коэффициенты анизотропии в поперечных и продольных направлениях образцов определяли в процессе растяжения по изменению суммарной ширины и среднеарифметической длины ряда ячеек в заданных сечениях. В качестве базовых расчётов использовали данные размеров ячеек в поперечном сечении, удалённом на 22 мм от неподвижного (верхнего) захвата (далее – сечение 22).

Перед испытанием измеряли начальные размеры сечения 22 и определяли его площадь $F_0 = 18,62 \text{ мм}^2$. Для установления взаимосвязи между нагрузкой и изменением размеров сечения 22 и его ячеек во времени синхронизировали процессы фиксации времени испытания с регистрацией размеров ячеек, расположенных в сечении 22.

По схеме, приведенной на рисунке 2, провели обработку полученной машинной кривой растяжения (графика «нагрузка – перемещение»). Это позволило определить нагрузку, соответствующую размерам как отдельных ячеек, так и всего сечения 22, в продольном и поперечном направлениях в заданный момент времени.

Синхронизируя в интервале времени 30 с результаты обработки изображений делительной сетки и изменение нагрузки, определили нагрузку $P_1 = 15580 \text{ Н}$ и длину ячеек в сечении 22: $l_0 = 0,933 \text{ мм}$ и $l_1 = 0,97 \text{ мм}$. Аналогично этому определили нагрузку $P_{\max} = 17388 \text{ Н}$, а также размеры сечения 22 и длину ячеек $l_k = 1,10 \text{ мм}$ в интервале времени 120 с. В этот момент растяжение образца прекращалось без образования шейки. Рассчитали конечную площадь сечения 22 $F_k = 15,79 \text{ мм}^2$, напряжение $\sigma_i = 1101 \text{ МПа}$ и деформацию в нём $\varepsilon_i = \ln \frac{F_0}{F_k} = 0,1649$.

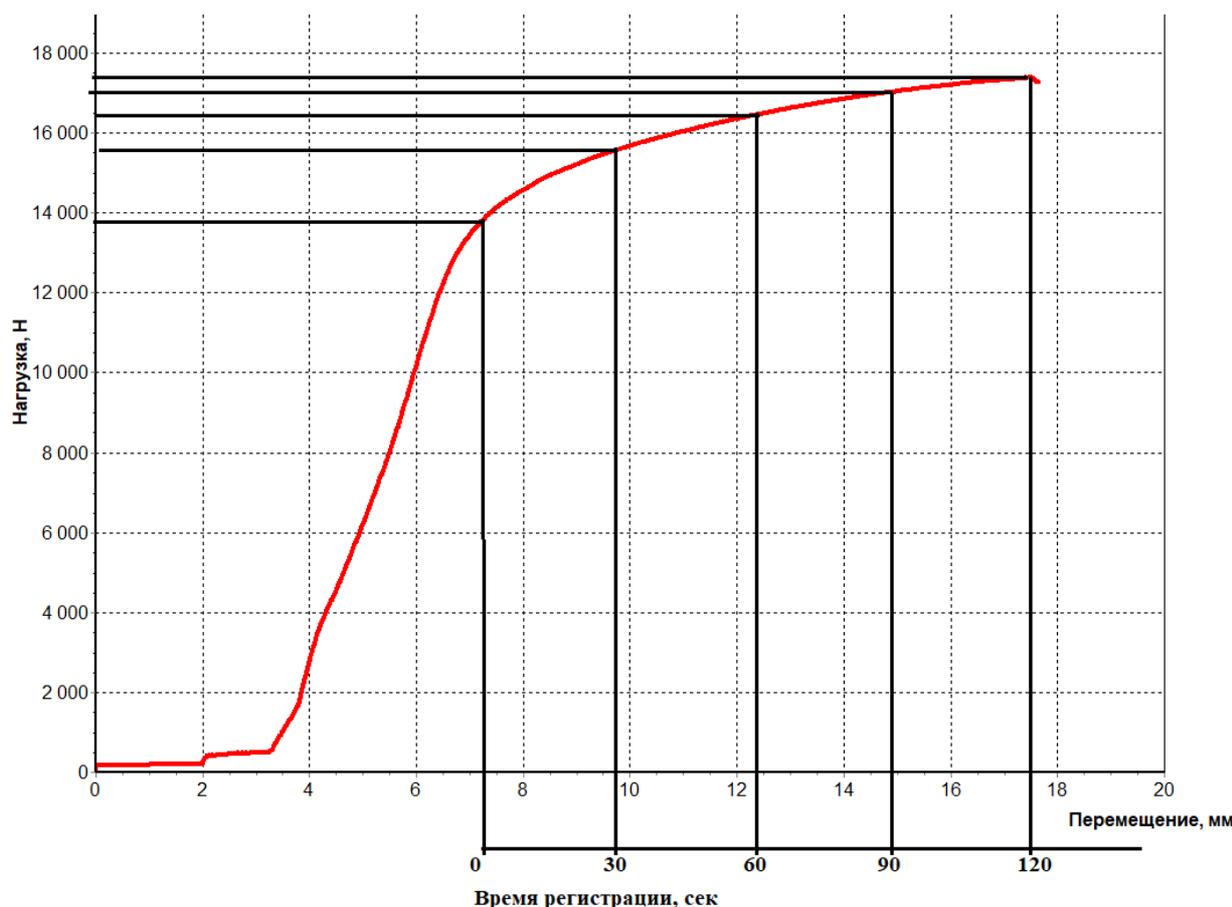


Рис. 2. Схема синхронизации машинной кривой растяжения с длительностью испытаний (шкалой времени испытаний)

Fig. 2. Scheme of synchronization of the machine stretching curve with the test duration (test time scale)

Выполненные в соответствии с уравнением (2) расчёты позволили определить величину показателя деформационного упрочнения исследуемого материала $n = 0,163$. По полученным значениям напряжения $\sigma_i = 1101$ МПа, деформации $\varepsilon_i = 0,1649$ и показателя деформационного упрочнения $n = 0,163$ определили коэффициент $C = 1477$ уравнения (2).

Для оценки характера упрочнения испытываемого образца в процессе растяжения по результатам обработки графика «нагрузка – перемещение» были определены напряжения и деформации, а также

методом наименьших квадратов проведена аппроксимация зависимости интенсивности напряжения σ_i от интенсивности деформаций ε_i . В таблице 1 приведены значения интенсивности напряжения и деформации в различное время испытания.

С использованием линейной аппроксимации было получено уравнение линейной регрессии (4) и график (рис. 3).

$$\sigma_i = 814,3 + 1778,8\varepsilon_i. \quad (4)$$

Ошибка аппроксимации $A = 1,05\%$.

Таблица 1. Интенсивность напряжения и деформации при растяжении

Table 1. Intensity of stress and strain during stretching

Показатели Indicators	Время испытания, сек Test time, s			
	30	60	90	120
Интенсивность напряжения, МПа Stress intensity, MPa	870	954	1045	1101
Интенсивность деформации, отн. ед. Strain intensity, rel. units	0,0389	0,0694	0,1276	0,1649

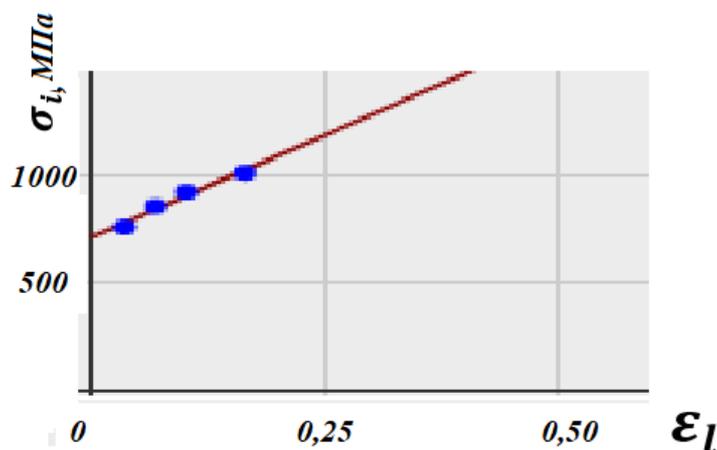


Рис. 3. Линейная аппроксимация зависимости интенсивности напряжения σ_i от интенсивности деформации ε_i МНК

Fig. 3. Linear approximation of the dependence of the stress intensity σ_i on the strain intensity ε_i of the LSM

С целью уточнения полученной зависимости (см. рис. 3) дополнительно выполнили её степенную аппроксимацию. Результаты степенной регрессии

представлены на рисунке 4 и в зависимости (5).

Ошибка аппроксимации $A = 0,31\%$.

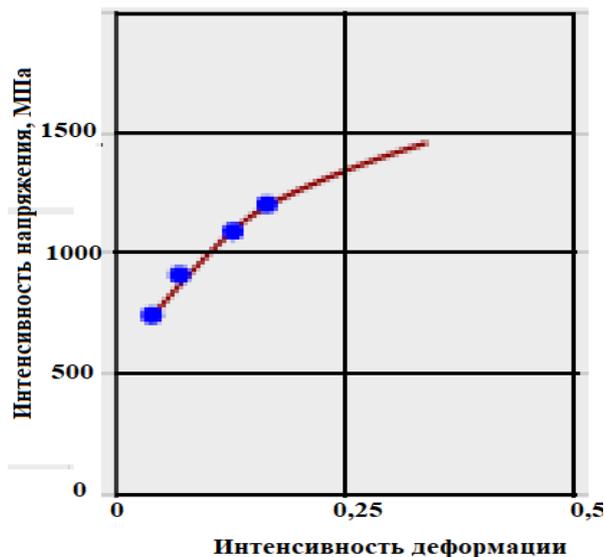


Рис. 4. Степенная регрессия зависимости интенсивности напряжения σ_i от интенсивности деформации ϵ_i МНК

Fig. 4. Power-law regression of the dependence of the stress intensity σ_i on the strain intensity ϵ_i of the LSM

Сравнение уравнений линейной и степенной регрессии зависимости интенсивности напряжения от интенсивности деформации показал следующее. В случае линейной аппроксимации можно принять, что в рассматриваемом диапазоне изменение интенсивности деформаций ϵ_i от 0 до 0,17 имеет линейный характер упрочнения исследуемого материала при ошибке аппроксимации $A = 1,05\%$ с определением условного предела текучести при $\epsilon_i = 0,002$.

$$\sigma_i = C\epsilon_i^n = 1462,4\epsilon_i^{0,160}. \quad (5)$$

При допущении же реализации изменения интенсивности напряжения от интенсивности деформации в соответствии с уравнением степенной регрессии определить условный предел текучести нельзя. Однако в диапазоне интенсивностей деформации ϵ_i от 0,03 до 0,17 интенсивность напряжения определяется более точно (ошибка аппроксимации $A = 0,31\%$).

Сравнивая уравнения (1) и (5), отметим, что методика регистрации изменения размеров ячеек делительной сетки с помощью фото- и видеофиксации и методика

определения показателя деформационного упрочнения по ГОСТ 11701-84 позволяют получить практически одинаковые результаты.

Таким образом, для диапазона изменения интенсивностей деформации ϵ_i от 0,03 до 0,17 целесообразно учитывать степенной характер упрочнения, тогда как при малых значениях интенсивности деформаций можно принять линейный характер упрочнения.

Выводы

1. В результате испытаний на растяжение образцов порошкового жаропрочного сплава Inconel 718, изготовленных по аддитивной технологии SLM, установили зависимости коэффициентов плоскостной анизотропии от интенсивности деформаций.

2. Результаты измерений и расчетов показали неравномерность развития интенсивности деформации в различных сечениях образцов.

3. Получены зависимости характера изменения коэффициентов анизотропии и

степени анизотропии исследуемого материала от интенсивности деформаций.

4. Установлен линейный характер упрочнения исследуемого материала при малых значениях интенсивности деформаций и степенной характер при интенсивности деформации от ε_i от 0,03 до 0,17.

5. Выявленный характер зависимостей степени анизотропии стали Inconel 718 от величины интенсивности деформации и напряжения необходимо учитывать

при разработке технологических процессов производства изделий из порошкового сплава Inconel 718, полученного по технологии SLM.

6. Методика определения показателя деформационного упрочнения n , основанная на видеофиксации изменения размеров ячеек делительной сетки, позволяет для исследованного сплава получить результаты, практически одинаковые с результатами методики определения n по ГОСТ 11701-84.

Список литературы

1. Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. 222 с.
2. Sufiiarov V. Sh., Borisov E. V., Polozov I. A. Selective laser melting of the Inconel 718 nickel superalloy // *Appl. Mech. Mater.* 2015. Vol. 698. P. 333–338.
3. Layer thickness influence on the Inconel 718 alloy microstructure and properties under selective laser melting / V. Sh. Sufiiarov, A. A. Popovich, E. V. Borisov, I. A. Polozov // *Tsvetnye Metally.* 2016. No. 1. P. 81–86.
4. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by SLM and subsequent heat treatment / A. A. Popovich, V. Sh. Sufiiarov, E. V. Borisov, I. A. Polozov // *Key Eng. Mater.* 2015. Vol. 651–653. P. 665–670.
5. Ларин С. Н., Платонов В. И., Коротков В. А. Проектирование матрицы для вытяжки материалов, обладающих плоскостной анизотропией механических свойств // *Цветные металлы.* 2018. № 7. С. 83–87. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.07.13>
6. Определение плоскостной анизотропии листового проката с учетом влияния интенсивности деформации / А. Н. Малышев, В. Д. Кухарь, А. В. Черняев, В. А. Коротков // *Чёрные металлы.* 2022. № 2. С. 11–14.
7. Ковка и штамповка: справочник: в 4-х т. Т. 4. Листовая штамповка / под ред. Е. И. Семёнова. М.: Машиностроение, 2010. 439 с.
8. Яковлев С. П., Кухар В. Д. Штамповка анизотропной заготовки. М.: Машиностроение, 1986. 324 с.
9. Wu M.W., Lai P.H., Chen J.K. Anisotropy in the impact toughness of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy // *Mater. Sci. Eng.: A.* 2016. Vol. 650. P. 295–299.
10. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM) / K. Kunze, T. Etter, J. Grässlin, V. Shklover // *Mater. Sci. Eng. A.* 2015. Vol. 620. P. 213–222.
11. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated Nickel superalloy / L. N. Carter, C. Martin, P. J. Withers, M. M. Attallah // *J. Alloys and Compounds.* 2014. Vol. 615. P. 338–347.
12. Fabrication of NiCr alloy parts by selective laser melting: columnar microstructure and anisotropic mechanical behavior / B. Song, S. Dong, P. Coddet, H. Liao, C. Coddet // *Mater. and Design.* 2014. Vol. 53. P. 1–7.
13. Деформация и напряжения при обработке металлов давлением. Применение методов Муар и координатных сеток / П. И. Полухин, В. К. Воронцов, А. Б. Кудрин, И. А. Чиченев. М.: Metallurgy, 1974. 336 с.

14. Ренне И. П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки. Тула: ГПИ, 1970. 135 с.
15. Определение коэффициента анизотропии и скорости локальной деформации в аддитивных сплавах / А. Н. Чуканов, В. А. Коротков, А. А. Яковенко, Е. В. Цой, А. С. Фролов // Известия Тульского государственного университета. Серия: Технические науки. 2024. Вып. 3. С. 224–229.
16. Чуканов А. Н. Анизотропия деформации при послойном лазерном синтезе изделий // Перспективные технологии и материалы: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Севастополь: СевГУ, 2020. С. 169–174.
17. 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-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика А. А. Байкова. Курск: Университетская книга, 2020. С. 244–247.
18. 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>
19. 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.
20. Чуканов А. Н., Цой Е. В., Яковенко А. А. Наблюдение волновых процессов при деформации изделий SLM технологии // Современные материалы, техника и технологии. 2023. №4(49). С. 28–33.

Reference

1. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. Additive technologies in mechanical engineering. St. Petersburg: Izd-vo Politech. un-ta; 2013. 222 p. (In Russ.)
2. Sufiiarov V.Sh., Borisov E.V., Polozov I.A. Selective laser melting of the Inconel 718 nickel superalloy. *Appl. Mech. Mater.* 2015;(698):333–338.
3. Sufiiarov V.Sh., Popovich A.A., Borisov E.V., Polozov I.A. Layer thickness influence on the Inconel 718 alloy microstructure and properties under selective laser melting. *Tsvetnye Metally*. 2016;(1):81–86.
4. Popovich A.A., Sufiiarov V.Sh., Borisov E.V., Polozov I.A. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by SLM and subsequent heat treatment. *Key Eng. Mater.* 2015; 651–653:665–670.
5. Larin S.N., Platonov V.I., Korotkov V.A. Designing a matrix for drawing materials with planar anisotropy of mechanical properties. *Tsvetnye metally = Non-Ferrous Metals*. 2018;(7):83–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.07.13>
6. Malyshev A.N., Kukhar V.D., Chernyaev A.V., Korotkov V.A. Determination of planar anisotropy of sheet metal products taking into account the influence of deformation intensity. *Chernye metally = Ferrous metals*. 2022;(2):11–14. (In Russ.)
7. Semenova E.I. (ed.). Forging and stamping. Vol. 4. Sheet stamping. Moscow: Mashinostroenie; 2010. 439 p. (In Russ.)
8. Yakovlev S.P., Kukhar V.D. Stamping of anisotropic blanks. Moscow: Mashinostroenie; 1986. 324 p. (In Russ.)

9. Wu M.W., Lai P.H., Chen J.K. Anisotropy in the impact toughness of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Mater. Sci. Eng.: A*. 2016;650:295–299.
10. Kunze K., Etter T., Grässlin J., Shklover V. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM). *Mater. Sci. Eng. A*. 2015;620:213–222.
11. Carter L.N., Martin C., Withers P.J., Attallah M.M. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated Nickel superalloy. *J. Alloys and Compounds*. 2014;615:338–347.
12. Song B., Dong S., Coddet P., Liao H., Coddet C. Fabrication of NiCr alloy parts by selective laser melting: columnar microstructure and anisotropic mechanical behavior. *Mater. and Design*. 2014; (53):1–7.
13. Polukhin P.I., Vorontsov V.K., Kudrin A.B., Chichenev N. A. Deformation and stresses during pressure treatment of metals. Application of Moire methods and coordinate grids. Moscow: Metallurgiya; 1974. 336 p. (In Russ.)
14. Renne I.P. Experimental methods for the study of plastic shaping in metalworking processes by pressure using a dividing grid. Tula: TPI; 1970. 135 p. (In Russ.)
15. Chukanov A.N., Korotkov V.A., Yakovenko A.A., Tsoi E.V., Frolov A.S. Determination of the anisotropy coefficient and the rate of local deformation in additive alloys. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Series: Technical Sciences*. 2024;3:224–229. (In Russ.)
16. Chukanov A.N. Anisotropy of deformation in layered laser synthesis of products. In: *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 studies*. Sevastopol: Sevastopol. gos. un-t; 2020. P. 169–174. (In Russ.)
17. Chukanov A.N. Anisotropy of physico-mechanical properties in layered laser synthesis. In: *Sovremennye problemy i napravleniya razvitiya metallovedeniya i termicheskoi obrabotki metallov i splavov: sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi 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; 2020. P. 244–247. (In Russ.)
18. Chukanov A.N., Dobrovolsky N.N., Tsoi E.V., Yakovenko A.A. Mathematical methods for observing wave processes during deformation of 3d technology products. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 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>
19. Chukanov A.N., Tereshin V.A., Tsoi E.V., Matveeva A.V. Machine vision in the analysis of wave spectra of deformation of additive products of SLM-technology. In: *Perspektivnye materialy nauki, tekhnologii i proizvodstva: sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Promising materials of science, technology and production: collection of scientific articles International Scientific and Practical Conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2022. P. 325–329. (In Russ.)
20. Chukanov A.N., Tsoi E.V., Yakovenko A.A. Observation of wave processes during deformation of SLM technology products. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*. 2023;(4):28–33. (In Russ.)

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

Коротков Виктор Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Тульский государственный университет, г. Тула, Россия,
e-mail: vak-2003@mail.ru

Viktor A. Korotkov, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Tula State University, Tula, Russian Federation,
e-mail: vak_2003@mail.ru

Яковенко Александра Александровна, кандидат технических наук, инженер-технолог, Metallurg-Tulamash, г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: dispozicya100@mail.ru

Alexandra A. Yakovenko, Candidate of Sciences (Engineering), Process Engineer, Metallurg-Tulamash, Tula, Russian Federation,
e-mail: dispozicya100@mail.ru

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

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

Фролов Артём Алексеевич, студент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: froloff2003@yandex.ru

Artiom A. Frolov, Student, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russian Federation,
e-mail: froloff2003@yandex.ru