

## ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 26. Выпуск 1.

УДК 621.763:621.77:539.3

DOI 10.22405/2226-8383-2025-26-1-229-242

**Машинное зрение в оценке *in situ* параметров неоднородности анизотропных изделий SLM в ходе растяжения<sup>1</sup>**

А. Н. Чуканов, В. А. Коротков, Е. В. Цой, А. А. Яковенко, М. Ю. Моденов

**Чуканов Александр Николаевич** — доктор технических наук, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

*e-mail: alexchukanov@yandex.ru*

**Коротков Виктор Анатольевич** — кандидат технических наук, Тульский государственный университет (г. Тула).

*e-mail: vak-2003@mail.ru*

**Цой Евгений Владимирович** — старший преподаватель, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

*e-mail: tsojev@tolstovsky.ru*

**Яковенко Александра Александровна** — кандидат технических наук, инженер-технолог, ООО «Металлург-Туламаш» (г. Тула).

*e-mail: dispozicya100@mail.ru*

**Моденов Михаил Юрьевич** — аспирант, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

*e-mail: m.modenov@yandex.ru*

**Аннотация**

Предложена оригинальная методика расчёта *in situ* характеристик неоднородности анизотропных материалов на базе технологии машинного зрения (фотограмметрии). Объектами являлись образцы порошковых сплавов 316L и Inconel 718, изготовленные по технологии селективного лазерного сплавления (SLM) и подвергнутые равномерному одноосному растяжению.

Методика базируется на совместном использовании в расчёте параметров кривых упрочнения, построенных по результатам определения *in situ* интенсивностей истинных напряжений и деформаций в отдельных микрообъёмах образцов. В качестве таких микрообъёмов использовали поперечные сечения делительной сетки, нанесенной на поверхность образцов. Информацию о геометрии ячеек делительной сетки, изменяющуюся в процессе растяжения, получали в измерительном блоке из результатов фотограмметрии — измерений цифровых изображений делительной сетки, полученных в ходе фотофиксации образца при растяжении.

В расчётном блоке с помощью методики получены уравнения зависимостей показателя неоднородности материала по механическим свойствам и характеристики неравномерности его пластической деформации от интенсивностей действующих напряжений и деформаций.

Применение математических алгоритмов оптимизации фотограмметрии и программирование блока расчётов на языке высокого уровня Python позволит автоматизировать процесс расчёта полученных уравнений с входящими в них параметрами и в итоге создавать базы данных характеристик анизотропии и неоднородности свойств изделий, изготовленных методом SLM. Это обеспечит разработку теоретических основ для углублённого

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-29-00433 «Волновая деформация и ее взаимосвязь с ортотропией структуры и физико-механических свойств в изделиях селективного лазерного сплавления» ([https://rscf.ru/project/№ 23-29-00433/](https://rscf.ru/project/№%2023-29-00433/)).

анализа и обоснованного прогнозирования влияния технологической анизотропии и неоднородности свойств изделий SLM на их работоспособность *in situ*.

*Ключевые слова:* 316L, Inconel 718, SLM, фотограмметрия, коэффициент анизотропии, кривые упрочнения, неоднородность механических свойств, неравномерность пластической деформации.

*Библиография:* 16 названий.

#### Для цитирования:

Чуканов, А.Н., Коротков, В.А., Цой, Е.В., Яковенко, А.А., Моденов М.Ю. Машинное зрение в оценке *in situ* параметров неоднородности анизотропных изделий SLM в ходе растяжения // Чебышевский сборник, 2025, т. 26, вып. 1, с. 229–242.

## CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 26. No. 1.

UDC 621.763:621.77:539.3

DOI 10.22405/2226-8383-2025-26-1-229-242

### Machine vision in *in situ* estimation of inhomogeneity parameters of anisotropic SLM products during tensile behaviour

A. N. Chukanov, V. A. Korotkov, E. V. Tsoi, A. A. Yakovenko, M. Yu. Modenov

**Chukanov Alexander Nikolaevich** — doctor of technical sciences, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

*e-mail: alexchukanov@yandex.ru*

**Korotkov Viktor Anatolievich** — candidate of technical sciences, Tula State University (Tula).

*e-mail: vak-2003@mail.ru*

**Tsoi Evgeny Vladimirovich** — senior lecturer, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

*e-mail: tsoyev@tolstovsky.ru*

**Yakovenko Alexandra Aleksandrovna** — candidate of technical sciences, technologist, Metallurg-Tulamash LLC (Tula).

*e-mail: dispozicya100@mail.ru*

**Modenov Mikhail Yurievich** — postgraduate student, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

*e-mail: m.modenov@yandex.ru*

#### Abstract

An original method for calculating *in situ* characteristics of inhomogeneity of anisotropic materials based on machine vision technology (photogrammetry) is proposed. The objects were samples of powder alloys 316L and Inconel 718, manufactured using selective laser fusion (SLM) technology and subjected to static stretching.

The technique is based on the joint use of hardening curves in the calculation of parameters, based on the results of *in situ* determination of the intensities of true stresses and deformations in individual micro-volumes of samples. Cross sections of a dividing grid applied to the surface of the samples were used as such micro-volumes.

Information about the geometry of the cells of the dividing grid, which changed during stretching, was obtained in the measuring unit from the results of photogrammetry - measurements of digital images of the dividing grid obtained during photofixation of the sample during stretching. In the calculation block, the equations of dependence of the material

heterogeneity index on mechanical properties and the characteristics of the unevenness of its plastic deformation on the intensity of acting stresses and deformations are obtained using the technique.

The use of mathematical algorithms for optimizing photogrammetry and programming the calculation block in Python JAVA will automate the process of calculating the obtained equations and their parameters and, as a result, create an extensive database of anisotropy characteristics and heterogeneity of properties of products manufactured by the SLM method. This will ensure the creation of theoretical foundations for in-depth analysis and reasonable forecasting of the impact of technological anisotropy and heterogeneity of the properties of SLM products on their in situ performance.

*Keywords:* Inconel 718, SLM, photogrammetry, anisotropy coefficient, hardening curves, heterogeneity of mechanical properties, unevenness of plastic deformation.

*Bibliography:* 16 titles.

#### **For citation:**

Chukanov, A.N., Korotkov, V.A., Tsoi, E.V., Yakovenko, A.A., Modenov M.Yu. 2025, "Machine vision in in situ estimation of inhomogeneity parameters of anisotropic SLM products during tensile behaviour", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 26, no. 1, pp. 229–242.

## **1. Введение**

Характеристики, описывающие развитие анизотропии механических свойств текстурированных металлических полуфабрикатов и готовых изделий (листового и калиброванного проката, изделий аддитивных технологии (*SLM*)) крайне важны для оптимизации режимов их обработки и эксплуатации [1-4]. В соответствии с ГОСТ 11701-84 («Металлы. Методы испытаний тонких листов на растяжение») к таким характеристикам относят коэффициент пластической анизотропии  $R$  (параметр Ланкфорда) и неравномерность пластической деформации  $A$ . При испытаниях на растяжение указанные характеристики рассчитывают на основе однократных измерений геометрии рабочей части испытуемых образцов (выполненных штангенциркулем и микрометром) в начале и по окончании (разрушении) стандартных испытаний и данных графиков «нагрузка-удлинение».

Авторами разработана оригинальная методика определения характеристик анизотропии in situ, непосредственно в ходе испытаний. В предлагаемой методике однократные приборные измерения (до и после испытаний) заменены серией измерений. Они выполняются с помощью разновидности технологии машинного зрения [5] (*DIC*-технологии) фотограмметрии - измерений геометрии ячеек делительной сетки, нанесённой на поверхность образца, выполненных на цифровых фотоизображениях указанной сетки [6,7].

Преимуществом такого подхода является более детальное определение параметров анизотропии и неоднородности механических свойств в режиме in situ. Оно достигается за счёт использования в расчётах  $R$  и  $A$ , вместо единичных значений истинных напряжений и деформаций, массивов значений интенсивностей истинных напряжений и деформаций, полученных из анализа цифровых изображений, сделанных с заданным шагом в режиме in situ, непосредственно в ходе испытания [8].

Анализ in situ динамики  $R$  при помощи фотограмметрии локальных деформаций [8-10] позволяет изучать характер и скорость упрочнения, как во всём изделии, так и в его отдельных микрообъёмах [11]. Помимо этого, описанная методика даёт возможность оценить влияние анизотропии на характер формирования неоднородности механических свойств анизотропного материала и пластическую деформацию в макро- и микрообъёмах изделия [10,11].

**Цель работы** – экспериментальное подтверждение эффективности разработанной методики расчёта in situ характеристик анизотропии, неоднородности материала и неравномерно-

сти пластической деформации анизотропных материалов при растяжении, а также выявление возможных направлений её совершенствования.

**Материал и методика испытаний.** Объекты исследования - образцы (расчётной длиной 100x10x2мм) порошковых сплавов 316L и *Inconel* 718, изготовленные по технологии *SLM* в различной ориентации относительно платформы 3d-принтера *SLM* 280HL.

Характеристики анизотропии и неоднородности механических свойств образцов, созданных *SLM*, оценивали *in situ* в ходе нагружения. Образцы подвергали статическому одноосному растяжению в испытательной машине Р5-ПК (ГОСТ 11701-84) с максимальным номинальным усилием 50 кН на воздухе при комнатной температуре со скоростью перемещения захватов 5 мм/мин и с записью кривой «нагрузка-перемещение».

Предварительно на расчетной длине образцов наносили делительную сетку [12] с ячейками 1x1 мм (рис.1).

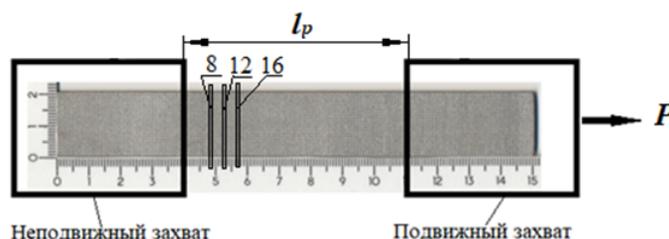


Рис. 1: Расчетная длина  $l_p$  образца с делительной сеткой и микрообъёмами различных поперечных сечений между захватами машины

Каждый ряд ячеек рассматривали как поперечное сечение, начальная площадь и размеры которого известна. Номер поперечного сечения (№ № 8,12,16) соответствовал расстоянию этого сечения от неподвижного захвата испытательной машины в миллиметрах (рис.1). Исследовали локальный участок образца объёмом, равным начальной площади поперечного сечения, умноженной на размер ячеек ряда в продольном направлении. Каждое поперечное сечение образца имело 10 ячеек по ширине и одну по длине.

Процесс нагружения образцов до разрушения фиксировали с помощью специализированного комплекса: цифровой камеры *Canon EOS 5D Mark IV* с 35-миллиметровой полнокадровой матрицей, с фокусным расстоянием 24-105 мм разрешением 20.1 Мпикс и объектива *Ef 24-105 f/4*. Данная система обеспечила получение цифровых изображений с плотностью пикселей 900 пикс/мм<sup>2</sup>. Съёмку проводили в программном режиме с интервалом в 5 и 10 сек. Фотофиксацию синхронизировали с записью машинной кривой растяжения. В графическом редакторе *Adobe Photoshop* определяли размеры по длине и ширине отдельных ячеек делительной сетки в пикселях и методом аналогово-цифрового преобразования (АЦП) устанавливали их размеры в единицах длины [6,8].

В данной работе описанные преобразования выполнялись оператором. Для их автоматизации далее планируется использовать классические алгоритмы распознавания линий (*LSD*) такие как преобразование Радона [13]. Оно позволяет по интегралам вдоль прямых линий сетки восстанавливать значение функции. При этом используют обратное преобразование Фурье. Однако при работе с реальными растровыми изображениями эта задача является некорректной поскольку изображение является двумерной проекцией трёхмерного объекта. Возникает искажение перспективы и зашумленность изображения. Для решения этих проблем требуются новые подходы.

В последние годы были разработаны ряд алгоритмов, ориентированных на работу с реальными изображениями. Например, *SCAD* (*Sum of Gradient Angle Differences*) [14]. Высокпроизводительный статистический алгоритм отсекающий нормально распределённый шум,

базируясь на простейших линейных преобразованиях. *LCNN* [15]. Нейронная сеть для поиска прямых линий на изображении. *MCMLSD (Markov Chain Marginal Line Segment Detector)* [16]. Использование подобных алгоритмов позволит полностью автоматизировать предложенную методику, и создаст предпосылки для её объединения с универсальными *CAE*-системами комплексного моделирования и инженерного прочностного анализа материалов и конструкций *Ansys, Logos, Fidesys* [17].

В течение интервала фотосъёмки испытаний (~130 сек) фиксировали изменение размеров ячеек поперечных сечений образца шириной  $b$ , толщиной  $S$  и длиной  $l$  (рис. 2).

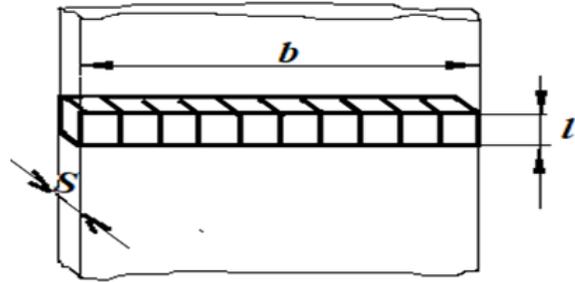


Рис. 2: Размеры локального участка образца с поперечным сечением объёмом  $V = bsl$

При синхронизации моментов фотофиксации размеров ячеек с графиком «нагрузка-перемещение» учитывали особенности деформирования различных поперечных сечений, расположенных на разных участках расчётной длины образца. Для поперечных сечений, расположенных вне области образования локального утонения («шейки») в месте разрушения считали, что деформации прекращаются одновременно с началом формирования «шейки». В области образования самой «шейки» пластическое течение образца считали продолжавшимся до его разрушения. Учитывая эту особенность пластического деформирования, на графике «нагрузка-удлинение» (рис. 3) откладывали отрезок перемещения подвижного захвата, зафиксированный от начала пластической деформации до момента образования шейки, и делили его на интервалы перемещения подвижного захвата через каждые 10 сек.

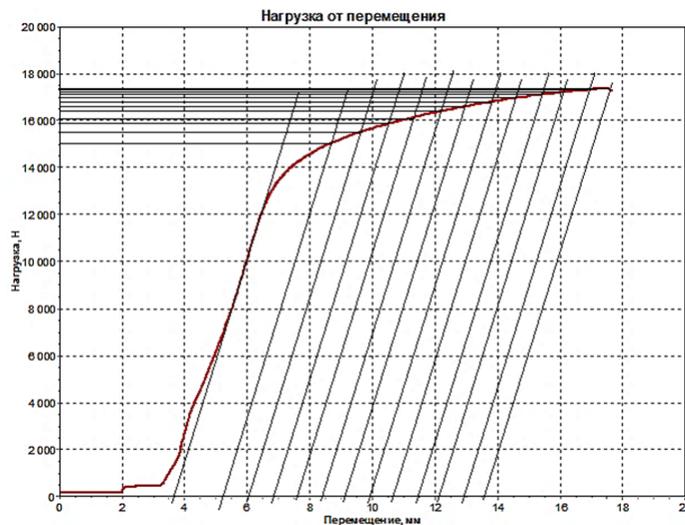


Рис. 3: График «нагрузка-перемещение» растяжения образца *Inconel 718*

По оси нагрузки (рис. 3) определяли её величину  $P_i$  для каждого интервала времени растяжения. Длительность пластического растяжения определяли, сопоставляя скорость машины

(5 мм/мин) с величиной перемещения подвижного захвата испытательной машины в диапазоне пластического деформирования образца (9,85 мм). Она, в соответствии с рис.3, составила 1,97 мин или 118 сек. Деление этого интервала с шагом в 10 сек позволяло определять текущую нагрузку.

Развитие анизотропии *in situ* в процессе деформирования оценивали расчётом коэффициента анизотропии (параметра Ланкфорда  $R$ ). Его определяли на основе начальных (до растяжения) по ширине  $b_o$  и длине  $l_o$  и конечных  $b_k$  и  $l_k$  размеров ячеек индивидуальных сечений с интервалом 10 сек [17,18]. С их учётом рассчитывали истинные деформации в поперечных сечениях  $\varepsilon_{bi} = \ln \frac{b_o}{b_i}$ ,  $\varepsilon_{li} = \ln \frac{l_o}{l_i}$  и, в соответствии с условием неразрывности деформаций Сен-Венана [9], определяли деформации по толщине  $\varepsilon_{si} = -\varepsilon_{li} - \varepsilon_{bi}$  [18]. По полученным значениям  $\varepsilon_{si}$  находили текущие толщину  $s_i$  и площадь  $F_i$  исследованных поперечных сечений в зависимости от времени растяжения.

Коэффициенты анизотропии  $R$  в заданных сечениях рассчитывали по формуле (1) [19]

$$R = \frac{\varepsilon_{bi}}{(\varepsilon_{li} - \varepsilon_{bj})} \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{bi} = \ln \frac{b_o}{b_i}$ , и  $\varepsilon_{li} = \ln \frac{l_o}{l_i}$  истинные деформации сечений в продольном и поперечном направлениях, соответственно.

В процессе растяжения образца происходит упрочнение его материала. Характер деформационного упрочнения исследовали на основе анализа кривых упрочнения, построенных в координатах: интенсивность напряжения  $\sigma_i^*$  и интенсивность деформации  $\varepsilon_i^*$ , которые рассчитывали в соответствии с [19] по зависимостям (2,3):

$$\sigma_i^* = \sqrt{\frac{3}{2} \left( \frac{1+R}{2+R} \right)} \sigma_i \quad (2)$$

$$\varepsilon_i^* = \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{2+R}{1+R} \right)} \varepsilon_i, \quad (3)$$

где  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i$  истинные напряжение и деформации, соответственно, определяемые как отношения нагрузки, измеренной по графику «нагрузка-перемещение», к площади поперечного сечения образца  $F_i$  в процессе растяжения, а деформация - по зависимости  $\varepsilon_i = \ln \frac{F_o}{F_i}$ .

Регрессионный анализ кривых упрочнения позволил получить уравнения их аппроксимации. Их коэффициенты использовали в расчёте характеристик анизотропии и неоднородности свойств при заданных интенсивностях деформаций.

Материал образцов считали однородным (свойства одинаковые в различных частях образца), если при заданных значениях  $\varepsilon_i^*$  значения  $\sigma_i^* = \text{const}$ . В противном случае материал считали неоднородным.

Известно, что неоднородность механических свойств материала приводит к неравномерности его пластической деформации [18,19]. То есть, в микрообъёме образца с меньшими значениями  $\sigma_i^*$  пластическая деформация протекает с большей скоростью, чем в микрообъёме с большими  $\sigma_i^*$ . С учётом этого, характеристики неоднородности материала вместо одного параметра  $A$  оценивали двумя предложенными авторами показателями: 1 - показателем неоднородности материала по механическим свойствам  $H_{\varepsilon_i}^{\sigma}$ , который определяли по формуле (4) с учётом дисперсии значений интенсивности напряжения  $\sigma_{imax}^* - \sigma_{imin}^*$  при фиксированной (заданной) деформации, и 2 - показателем неравномерности пластической деформации материала  $H_{\sigma_i}^{\varepsilon}$ , который определяли по формуле (5) с учётом дисперсии значений интенсивности деформации  $\varepsilon_{imax}^* - \varepsilon_{imin}^*$  при фиксированных значениях интенсивности напряжений [20]. В работе указанные характеристики рассчитывали по зависимостям (4,5):

$$H_{\varepsilon i}^{\sigma} = \left| \frac{\sigma_{imax}^* - \sigma_{imin}^*}{\sigma_{icp}^*} \right| \times 100\%, \quad (4)$$

$$H_{\sigma i}^{\varepsilon} = \left| \frac{\varepsilon_{imaxi}^* - \varepsilon_{imin}^*}{\varepsilon_{i\,cp}^*} \right| \times 100\%, \quad (5)$$

Неравномерность пластической деформации при растяжении на микроуровне дополнительно оценивали распределением по длине образца и времени испытаний локальных относительных удлинений ( $\delta$ ) [10,11], а также суммарными истинными деформациями ячеек  $\varepsilon_i$  в заданных поперечных сечениях [21]. Строили зависимости распределения  $\delta$  по длине ( $l_i$ ) образца ( $\delta = f(l_i)$ ) и в течении времени ( $t$ ) испытаний ( $\delta = f(t)$ ).

**Результаты экспериментов.** После измерения ячеек делительной сетки в микрообъёмах исследованных поперечных сечений № № 8,12,16 (рис.1) были рассчитаны общие размеры этих микрообъёмов (рис.2) в поперечном и продольном направлении. Установили, что размеры каждого из сечений индивидуальны и монотонно уменьшаются по ширине и возрастают по длине в процессе растяжения (рис.4).

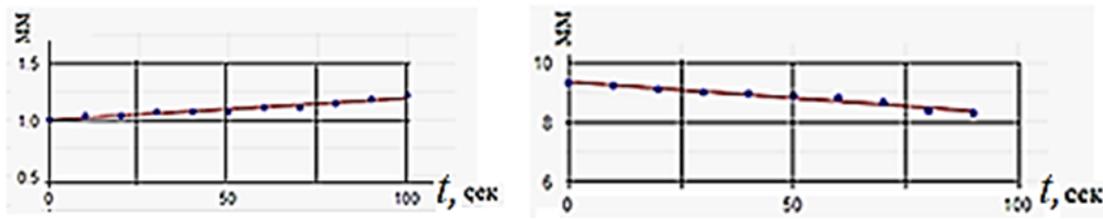


Рис. 4: Изменение размеров поперечного сечения № 8: в продольном (слева) и поперечном (справа) направлениях от времени растяжения

Проведённая с использованием метода наименьших квадратов статистическая обработка результатов измерений позволила определить уравнения изменения размеров каждого поперечного сечения.

**Анализ результатов экспериментов.** Из рис. 4 видно, что в процессе растяжения длина ячеек  $l_i$  монотонно и равномерно увеличивается, а в поперечном направлении ширина поперечного сечения  $b_i$  уменьшается. Зафиксированные на рис. 4 зависимости с аппроксимировали линейными уравнениями (6-11) со средней погрешностью  $\sim 1\%$ .

$$\text{Для сечения № 8} \quad l_i = 0,0019t + 1 \quad (6)$$

$$b_i = 9,3446 - 0,0109t \quad (7)$$

$$\text{Для сечения № 12} \quad l_i = 0,0017t + 1,0016. \quad (8)$$

$$b_i = 9,3486 - 0,0101t \quad (9)$$

$$\text{Для сечения № 16} \quad l_i = 0,0018t + 1,0032. \quad (10)$$

$$b_i = 9,3284 - 0,0112t \quad (11)$$

Полученные уравнения позволяют с использованием фотограмметрии определять истинные деформации сечениях № 8,12,16 в любой момент растяжения в продольном направлении  $\varepsilon_{li}$  с использованием уравнений (12-14):

$$\text{в сечении № 8} \quad \varepsilon_{l8} = \ln \frac{l_i}{1} = \ln \frac{0,0019t + 1}{1}, \quad (12)$$

$$\text{в сечении № 12} \quad \varepsilon_{l12} = \ln \frac{l_i}{1,0016} = \ln \frac{0,0017t + 1,0016}{1,0016}, \quad (13)$$

$$\text{в сечении № 16} \quad \varepsilon_{l16} = \ln \frac{l_i}{1,0032} = \ln \frac{0,0018t + 1,0032}{1,0032}. \quad (14)$$

и поперечном направлении  $\varepsilon_{bi}$  с использованием уравнений (15-17):

$$\text{в сечении № 8} \quad \varepsilon_{b8} = \ln \frac{b_o}{b_i} = \frac{9,3446}{9,3446 - 0,0109t}, \quad (15)$$

$$\text{в сечении № 12} \quad \varepsilon_{b12} = \ln \frac{b_o}{b_i} = \frac{9,3486}{9,3486 - 0,0101t}, \quad (16)$$

$$\text{в сечении № 16} \quad \varepsilon_{b16} = \ln \frac{b_o}{b_i} = \frac{9,3284}{9,3284 - 0,0112t}. \quad (17)$$

На основе результатов расчёта коэффициентов анизотропии в соответствии с (1) в поперечных сечениях в моменты растяжения с интервалом времени 10 сек строили зависимости  $R_i$  от истинной деформации  $\varepsilon_i$  в микрообъёмах заданных поперечных сечений. Статистической обработкой этих графиков получали уравнения их аппроксимации (рис. 5).

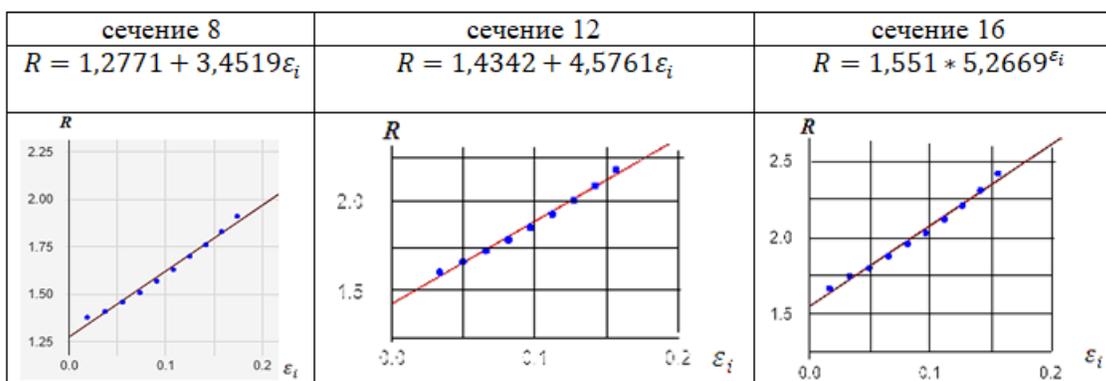


Рис. 5: Изменение коэффициента анизотропии  $R$  в поперечных сечениях в зависимости от деформации

Из графика «нагрузка-перемещение» (рис. 3) определяли величины нагрузок, соответствующих моментам фоторегистрации процесса растяжения. По полученным размерам ячеек поперечных сечений (толщины  $s_i$ , ширины  $b_i$  и площади  $F_i$ ) рассчитывали величины истинных напряжений, формировавшихся в каждом микрообъёме поперечных сечений в определённый момент процесса растяжения.

Для построения и анализа кривых упрочнения помимо истинных напряжений и деформаций по уравнениям (2) и (3) определяли интенсивности напряжений и деформаций  $\sigma_i^*$  и  $\varepsilon_i^*$ . На их основе строили кривые упрочнения. Их анализ позволил оценить характер упрочнения материала в отдельных микрообъёмах поперечных сечений № 8,12,16 образца (рис. 6).

Кривых упрочнения (с погрешностью  $\tilde{1}\%$ ) аппроксимировали линейными уравнениями (рис.6). Их коэффициенты были индивидуальны для каждого поперечного сечения и зависели от расстояния сечения до места разрыва образца («шейки»).

Для определения показателя неоднородности материала по механическим свойствам  $H_{\varepsilon_i}^{\sigma}$  на основе уравнений аппроксимации кривых упрочнения (рис.5) определяли значения интенсивностей напряжений  $\sigma_i^*$  при заданных интенсивностях деформаций  $\varepsilon_i^*$ .

Из анализа полученных значений следует, что при заданных величинах интенсивностей деформации  $\varepsilon_i^*$  значения интенсивностей напряжений  $\sigma_i^*$  в разных микрообъёмах поперечных

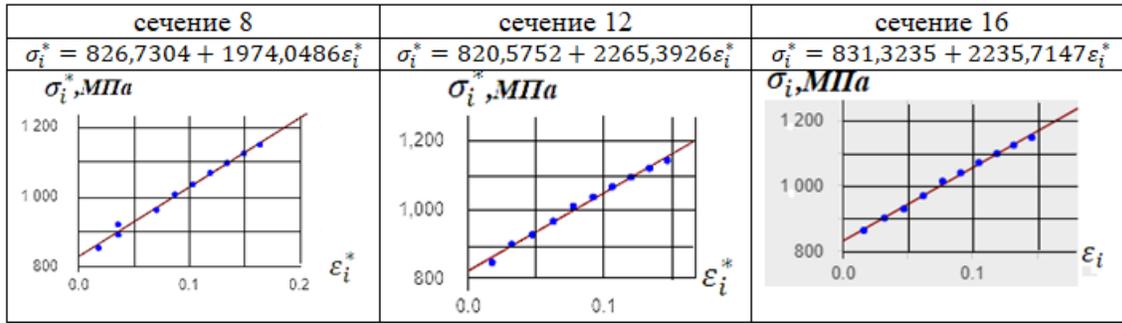


Рис. 6: Кривые упрочнения материала в поперечных сечениях

сечений различны. Следовательно, материал образца имеет неоднородность по механическим свойствам, которую оценивали по уравнению (4) показателем неоднородности  $H_{\varepsilon_i}^\sigma$  [21]. Определили значения показателя неоднородности материала в макрообъёме между поперечными сечениями № 8 и № 16. Установили, что с приращением интенсивности деформации  $\Delta\varepsilon_i^* = 0,05$  приращение напряжений  $\Delta\sigma_i^*$  постоянно в каждом поперечном сечении, но индивидуально по величине. Так, в поперечном сечении № 8  $\Delta\sigma_i^* = 98,7$  МПа, а в поперечном сечении № 16  $\Delta\sigma_i^* = 111,8$  МПа, что на 13,3% больше. При этом показатель неоднородности механических свойств растёт.

На рис. 7 показан характер изменения показателя неоднородности в зависимости от интенсивности деформации.

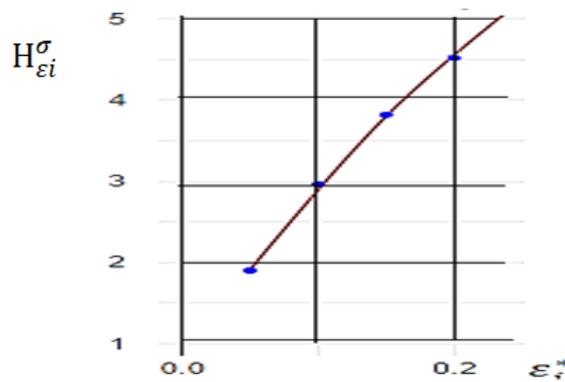


Рис. 7: Изменение показателя неоднородности механических свойств  $H_{\varepsilon_i}^\sigma$  от интенсивности деформации  $\varepsilon_i^*$  [21]

Зависимость, представленная на рис. 7, описывается степенным уравнением (18)

$$H_{\varepsilon_i}^\sigma = 12,493 \varepsilon_i^{*0,63}. \tag{18}$$

Далее исследовали влияние выявленной неоднородности механических свойств на распределение истинных деформаций при пластической деформации. Для этого, используя уравнения аппроксимации кривых упрочнения (рис. 5), решали их относительно интенсивности деформаций  $\varepsilon_i^*$ . Рассчитывали полученные  $\varepsilon_i^*$  при заданных интенсивностях напряжений  $\sigma_i^*$ . Результаты расчётов приведены на рис. 8.

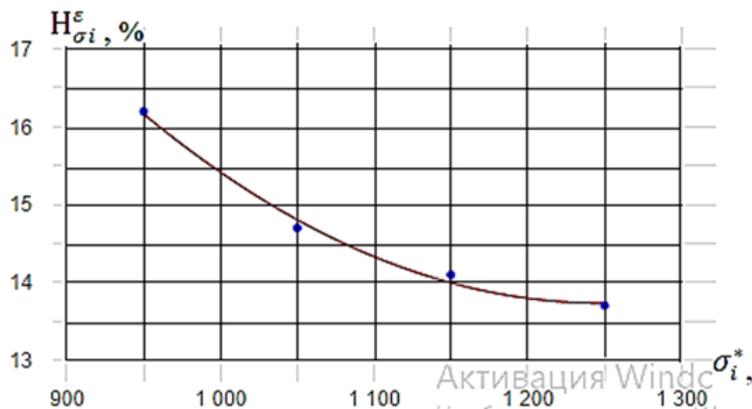


Рис. 8: Зависимость неравномерности пластической деформации от интенсивности напряжения [21]

Установили, что относительная характеристика неравномерности пластической деформации  $H_{\sigma_i}^{\epsilon}$  исследованных сплавов уменьшается с ростом интенсивности напряжений. Статистическая обработка по методу наименьших квадратов показала, что с погрешностью аппроксимации  $\bar{0},5\%$  полученная зависимость (рис. 8) описывается уравнением (19):

$$H_{\sigma_i}^{\epsilon} = 56,52 - 0,0686\sigma_i^* + 0,0000275 \sigma_i^{*2} \quad (19)$$

Таким образом, скорости развития неоднородности материала по свойствам и неравномерность пластической деформации в его отдельных микрообъёмах при растяжении близки и имеют нелинейный характер изменения в области высоких интенсивностей напряжений и деформаций (рис. 7,8).

При анализе рис. 7 и 8 выявили наличие взаимосвязи (примерное равенство) между величинами отношений приращений интенсивностей напряжений и деформаций (20):

$$\frac{\Delta \varepsilon_{imax}^*}{\Delta \varepsilon_{imin}^*} \approx \frac{\Delta \sigma_{imax}^*}{\Delta \sigma_{imin}^*} \approx H_{\sigma_i}^{\epsilon} (13,3 \dots 14,7) \quad (20)$$

Для полной автоматизации всего цикла выполненных расчётов представленной методики и их графической интерпретации авторами разрабатывается программная реализация расчётного блока (определение  $R$ ,  $H_{\varepsilon_i}^{\sigma}$ ,  $H_{\sigma_i}^{\epsilon}$  и их зависимостей).

**Выводы.** В результате проведённых исследований установлено следующее:

1. На примере образцов сплавов 316L и Inconel 718 технологии SLM показана работоспособность разработанной методики в оценке влияния анизотропии текстурированных материалов на показатели неоднородности их механических свойств и неравномерность пластической деформации.
2. Получены аналитические выражения, позволяющие вычислять перечисленные характеристики интерполированием в диапазонах напряжений и деформаций, реализуемых при проведении стандартных испытаний на одноосное растяжений по ГОСТ 1497-84 и 11701-84, и прогнозировать их величины экстраполированием за пределами указанных диапазонов.
3. В исследованных сплавах выявлен нелинейный рост показателя неоднородности механических свойств материала образца  $H_{\varepsilon_i}^{\sigma}$  в зависимости от интенсивности деформации и нелинейное снижение показателя неравномерности пластической деформации  $H_{\sigma_i}^{\epsilon}$  с ростом интенсивности напряжений.

4. Установлена зависимость показателя неоднородности материала от величины дисперсии коэффициентов анизотропии  $\Delta R = R_{max} - R_{min}$  в поперечных сечениях образцов.
5. Показано, что технология фотограмметрии обеспечивает возможность с высокой точностью реализовывать методику определения коэффициента анизотропии, показателя неоднородности механических свойств и неравномерности пластической деформации исследованных сплавов в процессе растяжения.
6. Ведётся программная реализация расчётного блока (определение  $R$ ,  $H_{\varepsilon_i}^{\sigma}$ ,  $H_{\sigma_i}^{\varepsilon}$  и их зависимостей) для полной автоматизации всего цикла расчётов представленной методики и их графической интерпретации.
7. Применение математических алгоритмов оптимизации фотограмметрии (*LSD*, *SCAD*, *LCNN*, *MCMLSD*) и программирование блока расчётов в языке высокого уровня *Python* позволит автоматизировать процесс расчёта полученных уравнений и входящих в них параметров, что обеспечит интеграцию предложенной методики в универсальные *CAE*-системы комплексного моделирования и инженерного прочностного анализа материалов и конструкций *Ansys*, *Logos*, *Fidesys*, *KiSSAM*.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kunze, K., Etter, T., Grдsslin, J., Shklover, V. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM)// Mater. Sci. Eng. A. 2015. Vol. 620. P. 213-222.
2. 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. Vol. 53. P. 1-7.
3. Popovich, A. A., Sufiarov, 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. Vol. 651-653 Pp. 665-670.
4. Чуканов, А.Н. Анизотропия физико-механических свойств при послойном лазерном синтезе // «Современные проблемы и направления развития металлостроения и термической обработки металлов и сплавов», посвящ. 150-ю акад. А.А. Байкова: Сб. научн. статей МНПК. (18.09.2020 г); Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. - 271 с. - С. 244-247.
5. Чуканов, А.Н., Терёшин, В.А., Цой, Е.В., Матвеева, А.В. Машинное зрение в анализе волновых спектров деформации аддитивных изделий SLM-технологии // «Перспективные материалы науки, технологий и производства», Межд. научно-практич. конф. (24 мая 2022 года); Сб. научн. статей Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. - 377 с.- С. 325-329.
6. Чуканов, А.Н., Цой, Е.В., Яковенко, А.А., Малий, Д.В., Гончаров, С.С. Фотограмметрия в фиксации и анализе локализованной деформации 3d образцов//4 МНПК «Современные проблемы и направления развития металлостроения и термической обработки металлов и сплавов», посвященная памяти академика А.А. Байкова (СМП-04).- Сб. научн. тр. (15.09.2023 г.).- Юго-Зап. гос. ун-т, Курск: ЮЗГУ, 2023. - С. 168 – 173.
7. Чуканов, А.Н., Цой, Е.В., Фролов, А.А. Использование фотограмметрии в технологической подготовке обучающихся вузов // Современные материалы, техника и технологии, 2024. - № 2(53). – С. 43-48.

8. Чуканов, А.Н., Цой, Е.В., Фролов, А.А. Разработка технологии регистрации и анализа локализованной деформации материалов // *Современные материалы, техника и технологии*, 2024. - № 2(53). - С. 49-51.
9. Чуканов, А.Н., Яковенко, А.А., Цой, Е.В., Гончаров, С.С. Коэффициент Ланкфорда и скорость деформации в изделиях селективного лазерного сплавления // 2 Всеросс. нац. научно-техн. конф. «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (ТМ-05)» Сб. научн. тр. (11-12.04.2024 г.).- Воронежский гос. техн. ун-т, г. Воронеж: ВГТУ, 2024. 425 с. - С. 382-387.
10. Чуканов, А.Н., Добровольский, Н.Н., Цой, Е.В., Яковенко, А.А. Математические методы наблюдения волновых процессов при деформации изделий 3d технологии» // *Известия Юго-Западного государственного университета. Техника и технологии*. - 2023. - Т.13 (4). - С. 32 - 42.
11. Чуканов, А.Н., Цой, Е.В., Фролов, А.А. Разработка технологии регистрации и анализа локализованной деформации материалов // *Современные материалы, техника и технологии*, 2024. - № 2(53). - С. 49-51.
12. Чуканов, А.Н., Коротков, В.А., Яковенко, А.А., Цой, Е.В., Фролов, А.А. Определение коэффициента анизотропии и скорости локальной деформации в аддитивных сплавах // *Известия ТулГУ. Серия: Технические науки*. -2024. Вып. 3. – С. 224 - 229.
13. Моськин, Г.В., Никитенков, В.Л., Ситкарев, Г.А. Синтез матрицы преобразования перспективы // *Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1. Математика. Механика. Информатика*. 2013. № 17. С.127-134.
14. Suyoung, Seo. Line-Detection Based on the Sum of Gradient // *Angle Differences Applied Sciences*, Vol. 10, Iss. 1, 2019. <https://doi.org/10.3390/app10010254>
15. Yichao Zhou, Haozhi Qi, Yi Ma, End-to-End Wireframe Parsing // *arXiv.org*. 2021. [Текст электронный]: 04.05.2021. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.03246>. (Дата обращения 10.08.2023).
16. James H. Elder, Emilio J. Almazan, Yiming Qian, Ron Tai. MCMLSD: A Probabilistic Algorithm and Evaluation Framework for Line Segment Detection // *arXiv.org*. 2020. [Текст электронный:] URL: <https://arxiv.org/abs/2001.01788> (Дата обращения 10.08.2023).
17. Басалов, Ю.А., Чуканов, А.Н., Цой, Е.В. Анализ видеоизображений в рамках задачи вычисления локальных деформаций при растяжении//*Матер. XXII Межд. конф. «Алгебра, теория чисел, дискретная геометрия и многомасштабное моделирование: современные проблемы, приложения и проблемы истории»*, посвящ. 120-летию со дня рожд. акад. А.Н. Колмогорова и 60-летию со дня открытия школы-интернат № 18 при Московском университете. - Тула, 26-29.09.2023 г.- Тула: Тул. гос. пед. ун-т им. Л.Н. Толстого. - 350 с.-Тула, 2023. С. 370-373.
18. *Механика неоднородных тел: уч. пос./ В.И. Андреев, М.: Изд-во «Юрайт». 2015, 255 с.*
19. *Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х Т./Ред. совет: Е.И. Семёнов и др.– Т.1. Материалы и нагрев. Испытания технологических свойств листовых материалов- А.Д. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1985. 568 с. С. 154-163.*
20. Чуканов, А.Н., Коротков, В.А., Яковенко, А.А., Цой, Е.В., Фролов, А.А. Характер упрочнения аддитивных сплавов высокой прочности // *Известия ТулГУ. Серия: Технические науки*. -2024. Вып. 4. – С. 421 - 426.

21. Чуканов, А.Н., Коротков, В.А., Яковенко, А.А., Цой, Е.В., Фролов, А.А. Влияние анизотропии на характер упрочнения в аддитивных сплавах высокой прочности // 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>

## REFERENCES

1. Kunze, K., Etter, T., Grdsslin, J., Shklover, V. 2015, “Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM)”, *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 620. pp. 213–222.
2. Song, B., Dong, S., Coddet, P., Liao, H., Coddet, C. 2014, “Fabrication of NiCr alloy parts by selective laser melting: columnar microstructure and anisotropic mechanical behavior”, *Mater. and Design*, Vol. 53, pp. 1–7.
3. Popovich, A. A., Sufiarov, V.Sh., Borisov, E.V., Polozov, I.A. 2015, “Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by SLM and subsequent heat treatment”, *Key Eng. Mater.*, Vol. 651–653, pp. 665–670.
4. Chukanov, A.N. 2020, “Anisotropy of physico-mechanical properties in layered laser synthesis”, “*Modern problems and directions of development of metallology and heat treatment of metals and alloys*”, dedicated to *The 150-th Academy of A.A. Baykov: Collection of scientific articles of the MNPC. (09/18/2020)*; Kursk: Yugo-Zapad. State University, 271 p., pp. 244–247.
5. Chukanov, A.N., Tereshin, V.A., Tsoi, E.V., Matveeva, A.V. 2022, “Machine vision in the analysis of wave spectra of deformation of additive products of SLM-technology”, “*Promising materials of science, technology and production*”, *International Scientific and Practical Conference (May 24, 2022)*; *Collection of scientific. articles of the South-West State University. Kursk: Yugo-Zapad. state University, 2022*, 377 p., pp. 325–329.
6. Chukanov, A.N., Tsoi, E.V., Yakovenko, A.A., Maliy, D.V., Goncharov, S.S. 2023, “Photogrammetry in fixation and analysis of localized deformation of 3d samples”, “*4 MNPK Modern problems and directions of development of metallology and heat treatment of metals and alloys, dedicated to the memory of Academician A.A. Baykov (SMP-04)*”.- *Collection of scientific tr. (09/15/2023)*. Yugo-Zapad. State University, Kursk: Southwestern State University, 2023, pp. 168–173.
7. Chukanov, A.N., Tsoi, E.V., Frolov, A.A. 2024, “The use of photogrammetry in technological training of university students”, *Modern materials, equipment and technologies*, № 2(53), pp. 43–48.
8. Chukanov, A.N., Tsoi, E.V., Frolov, A.A. 2024, “Development of technology for registration and analysis of localized deformation of materials”, *Modern materials, technique and technologies*, № 2(53), pp. 49–51.
9. Chukanov, A.N., Yakovenko, A.A., Tsoi, E.V., Goncharov, S.S. 2024, “The Lankford coefficient and the deformation rate in selective laser fusion products”, *2 All-Russian National Scientific and Technical Conf. “Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering (TM-05)”*, *Collection of scientific tr. (11-12.04.2024)*.- Voronezh State Technical University. Univ., Voronezh: VSTU, 425 p. - pp. 382-387.
10. Chukanov, A.N., Dobrovolskii, N.N., Tsoi, E.V., Yakovenko, A.A. 2023, “Mathematical methods for observing wave processes during deformation of 3d technology products”, *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Engineering and technology*, Vol.13(4), pp. 32–42.

11. Chukanov, A.N., Tsoi, E.V., Frolov, A.A. 2024, “Development of technology for registration and analysis of localized deformation of materials”, *Modern materials, technique and technologies*, № 2(53), pp. 49–51.
12. Chukanov, A.N., Korotkov, V.A., Yakovenko, A.A., Tsoi, E.V., Frolov, A.A. 2024, “Determination of the anisotropy coefficient and the rate of local deformation in additive alloys”, *Izvestiya TulSU. Series: Technical Sciences*, Iss. 3, pp. 224–229.
13. Moskin, G.V., Nikitenkov, V.L., Sitkarev, G.A. 2013, “Synthesis of the perspective transformation matrix”, *Bulletin of Syktyvkar University. Series 1. Mathematics. Mechanics. Computer science*, № 17, pp. 127–134.
14. Suyoung Seo. 2019, “Line-Detection Based on the Sum of Gradient”, *Angle Differences Applied Sciences*, Vol. 10, Iss. 1. <https://doi.org/10.3390/app10010254>
15. Yichao Zhou, Haozhi Qi, Yi Ma. 2021, “End-to-End Wireframe Parsing”. arXiv.org. [Electronic text]: 05/04/2021. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.03246>. (Accessed 08/10/2023).
16. James H. Elder, Emilio J. Almazan, Yiming Qian, Ron Tai. 2020, “MCMLSD: A Probabilistic Algorithm and Evaluation Framework for Line Segment Detection”. arXiv.org. [Electronic text:] URL: <https://arxiv.org/abs/2001.01788> (Accessed 08/10/2023).
17. Basalov, Yu.A., Chukanov, A.N., Tsoi, E.V. 2023, “Analysis of video images in the framework of the problem of calculating local strains under tension” *Mater. XXII International Conference “Algebra, number theory, discrete geometry and multiscale modeling: modern problems, applications and problems of history”, dedicated. The 120-th anniversary of his birth. Academician A.N. Kolmogorov and the 60-th anniversary of the opening of boarding school No. 18 at Moscow University, Tula, 26-29.09.2023-* Tula: Tula State Pedagogical University. L.N. Tolstoy Univ. - 350 p.-Tula, pp. 370–373.
18. Mechanics of inhomogeneous bodies: uch. pos./ V.I. Andreev, M.: Publishing house “Yurayt”. 2015, 255 p. 19.
19. Forging and stamping: A reference book. In 4 Volumes/Ed. Tip: E.I. Semenov et al. – Vol. 1. *Materials and heating. Tests of technological properties of sheet materials* - A.D. Matveev. – M.: Mashinostroenie, 1985. 568 S. S. 154–163.
20. Chukanov, A.N., Korotkov, V.A., Yakovenko, A.A., Tsoi, E.V., Frolov, A.A. 2024, “The nature of hardening of additive alloys of high strength” *News of TulSU. Series: Technical Sciences*, Iss. 4, pp. 421–426.
21. Chukanov, A.N., Korotkov, V.A., Yakovenko, A.A., Tsoi, E.V., Frolov, A.A. “The effect of anisotropy on the character of hardening in high-strength additive alloys”, *Proceedings of the Southwestern State University. Series: Engineering and Technology*, Vol.14, № 3, pp. 19–29. <https://doi.org/10.21869/2223-1528> - 2024-14-3-19-29.

Получено: 14.10.2024

Принято в печать: 10.03.2025