

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В ШЕЙКЕ ПЛОСКОГО ОБРАЗЦА ТИТАНА VT1-00 ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Реков А.М.¹, Вичужанин Д.И.²

¹ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

²ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Методом корреляции цифровых изображений определены компоненты линейных и сдвиговых упругопластических деформаций в области симметричной шейки плоского образца при одноосном растяжении. Материал образца – титан марки VT1-00 с гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой (α – фаза). Образцы вырезали из листового проката, прошедшего рекристаллизационный отжиг в вакууме. Структуру поверхностного слоя определяли стандартным методом. Для данного материала особенностью мезоструктуры первого уровня (зерно поликристалла) является наличие большого количества двойников отжига. Доля зерен, в которых обнаружены двойники, составляет примерно двадцать – тридцать процентов для всего массива зерен. В экспериментах использовали современное высокоточное оборудование: испытательную машину Instron 8801 и цифровую оптическую систему Strain Master. Определены поля векторов смещений участков поверхности образца в области шейки. В качестве опорных точек принимали неровности рельефа, возникающие на поверхности образца при растяжении. В каждый момент времени по полю компонент векторов смещений определяли линейные локальные мезодеформации первого рода и величину дисторсии (на уровне зерна поликристаллического образца). Деформации рассчитывали на виртуальных линиях, параллельных оси образца. Расстояние между линиями принимали равным половине миллиметра. Приближенную оценку величины деформации в направлении, перпендикулярном плоскости образца находили из условия несжимаемости. Определена кинетика продольных и поперечных (относительно оси растяжения образца) деформаций. Вычислены коэффициенты взаимной корреляции между параметрами деформированного состояния. Определены плотности распределения компонент линейных деформаций и дисторсии поля перемещений. Плотности распределения использовали для определения вероятности появления больших величин деформаций в зоне шейки. Данные вероятности численно равны отношению числа зерен поликристалла с деформацией, большей некоторой фиксированной величины, к общему числу зерен в зоне шейки. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИМАШ УрО РАН. Испытания проведены с использованием ЦКП «Пластометрия».

Ключевые слова: корреляционно-оптический метод; плотность распределения; тензор пластических деформаций; напряженно-деформированное состояние; зерно поликристалла; статистический анализ

STRAIN DISTRIBUTION IN THE NECK OF A FLAT SAMPLE OF TITANIUM VT1-00 UNDER UNIAXIAL TENSION

Rekov A.M.¹, Vichuzhanin D.I.²

¹B.N. Yeltsin Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

²*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*

ABSTRACT

The components of linear and shear elastic-plastic deformations in the symmetric neck of a flat sample under uniaxial tension are determined by the digital image correlation method. The material of the specimen is the titanium grade VT1-00 with hexagonal tightly Packed crystal lattice (α – phase). The specimens were extracted from sheet metal that had undergone recrystallization annealing in vacuum. The structure of the surface layer was determined by the standard method. For this material, the main feature of the mesostructure of the first level (polycrystal grain) is the presence of a large number of annealing twins. The proportion of grains with is approximately twenty to thirty percent for the entire grain array. Modern high-precision equipment, such as Instron 8801 testing machine and Strain Master digital optic system are used in experiments. The fields of displacement vectors of the sample surface areas in the neck region are determined. Irregularities of relief arising on the surface of the sample during the tension testing were taken as reference targets. In each moment of time, the linear local mesodeformations of the first kind and the value of distortion (at the level of the grain of polycrystalline specimen) was determined by using the field of the components of the displacement vectors. The deformations is calculated on virtual lines parallel to the specimen axis. The distance between the lines is taken to be half a millimeter. An approximate evaluation of the deformation value in the direction perpendicular to the specimen plane is performed by means of the incompressibility condition. The kinetics of longitudinal and transverse deformations is determined along with the tensile axis of the sample. The coefficients of mutual correlation between the parameters of the strain state are calculated. The distribution densities of linear strain and distortion tensor components are determined. The density distribution is used to determine the probability of occurrence of large values of deformations in the neck area. These probabilities are equal to the ratio of the number of grains of a polycrystal with a deformation greater than some fixed value to the total number of grains in the neck area. The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Institute of Mechanical Engineering of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences.

Keywords: correlation-optical method; density of distribution; tenor of plastic strains; stress-strain state; polycrystalline grain; statistical analysis

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Поликристаллическое строение реальных материалов предопределяет неравномерность полей пластических деформаций в поверхностных слоях при формоизменении любых металлических образцов. При испытании образцов из пластичных материалов на растяжение, как правило, наблюдается процесс локализации деформаций. На образце образуется шейка. Теоретические и экспериментальные основы для исследования данного явления приведены в классических работах [1-4]. Ранее одним из основных методов экспериментального определения локализации деформаций являлся метод делительных сеток с размерами ячеек, соизмеримыми со средним размером зерна материала образца. Метод делительных сеток позволяет получать полные статистические характеристики поля мезодеформаций. Численные значения статистических характеристик, обусловленные материалом и предшествующей термообработкой образца, позволяют определять локальные перегрузки мезоструктуры по деформации. Вероятности локальных перегрузок по деформации численно равны относительному числу зерен поликристалла,

в которых деформация выше некоторой предельной величины [5]. В последние годы, благодаря совершенствованию ЭВМ и появлению цифровых видеокамер с высоким разрешением оптики, широкое распространение получил метод корреляции цифровых изображений (digital image correlation). Оптический метод является бесконтактным, имеет хорошее пространственное и временное разрешение, позволяет определять величину полной упругоэластической деформации участков поверхностного слоя образца. Процесс расчета деформаций автоматизирован. Метод широко используется для экспериментального исследования процессов локализации деформаций [6-12]. Наряду с экспериментальными методами, для определения деформированного состояния в области шейки, широко применяются теоретические методы. Ряд таких исследований представлен в работах [13-15].

В настоящей работе количественная диагностика деформированного состояния проводилась с помощью цифровой оптической системой Strain Master с соответствующим программным обеспечением. Неровности рельефа, который был образован в процессе предшествующей прокатки листа, использовали в качестве опорных точек при определении смещений участков поверхности при растяжении образца. Одноосное растяжение образца проводили на испытательной машине Instron 8801. Испытания проведены с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия» Института машиноведения УрО РАН. Материал образца – титан марки BT1-00 с гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой (α -фаза). Образец изготовлен из листа титана в состоянии поставки (после вакуумного рекристаллизационного отжига). Металлографический анализ материала образца показал, что зерна являются равноосными, со средним размером, равным 0,040 мм. Особенность структуры поверхностного слоя образца является содержание двойников отжига, доля которых занимает от 20 до 30% площади шлифа. Эта особенность строения материала существенно влияет на неоднородность поля мезодеформаций в процессе растяжения образца [11].

Целью данной работы является экспериментальное определение кинетики продольных, поперечных логарифмических упругоэластических деформаций и дисторсии в зоне шейки. Построение плотностей вероятностей указанных параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При испытаниях шейка образовалась практически в центре образца – отклонение от оси симметрии образца (начало прямоугольной системы координат X и Y) составило 0,7 мм. Определены поля векторов необратимых смещений, компоненты тензора упругоэластических деформаций в ортогональных направлениях относительно оси образца и дисторсия деформаций в плоскости образца. Третью компоненту линейных деформаций, в направлении перпендикулярном плоскости образца находили из условия несжимаемости материала. Смещения точек поверхности образца при деформировании определяли на линиях, параллельных оси образца (рис.1) База измерения деформаций равна 1,10 мм.

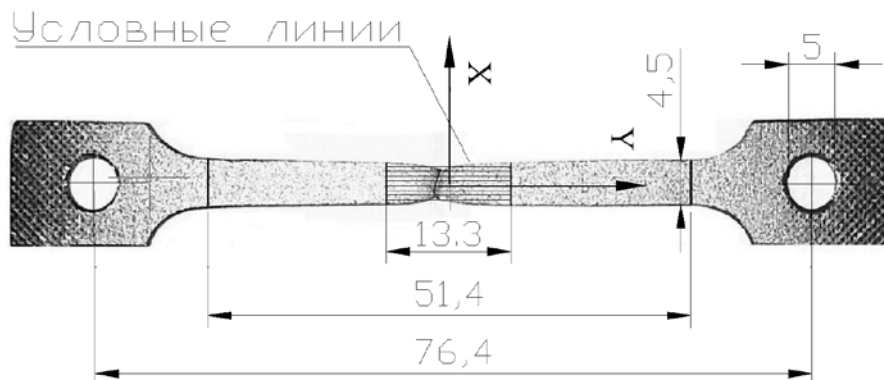


Рис.1. Вид образца с шейкой после испытаний.

Поле векторов смещений определяли по соотношениям [7]

$$\vec{u}(x, y) = u_x(x, y)\vec{e}_x + u_y(x, y)\vec{e}_y. \quad (1)$$

Здесь u_x , u_y – проекции вектора смещения, \vec{e}_x , \vec{e}_y – единичные орты.

Рассчитывали линейные деформации

$$\varepsilon_{xx} = \partial u_x / \partial x, \quad \varepsilon_{yy} = \partial u_y / \partial y, \quad (2)$$

и дисторсии поля перемещений

$$\varepsilon_{yx} = \partial u_y / \partial x, \quad \varepsilon_{xy} = \partial u_x / \partial y. \quad (3)$$

Компоненты тензора дисторсии (2) и (3) использовали, по методике работы [5], для расчета главных деформаций ε_1 и ε_2

$$\varepsilon_{1,2} = \left(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xx} \pm \sqrt{(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx})^2 + \gamma^2} \right) / 2, \quad (4)$$

где $\gamma_{xy} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{yx} + \varepsilon_{xy})$ – сдвиговая деформация.

Логарифмические деформации определяли по зависимостям

$$e_1 = \ln(1 + \varepsilon_1) \quad \text{и} \quad e_2 = \ln(1 + \varepsilon_2). \quad (5)$$

Составляющую e_{zz} находили из условия постоянства объема $e_3 = -(e_1 + e_2)$.

Графики линейных деформаций (1-3) и величины деформации сдвига в зоне шейки образца, в качестве примера, (кадр 315) приведены на рис.2. Пределы изменения вертикальной координаты Y составляют значения от -7.0 до $+7.0$ мм. За ноль принята точка, соответствующая центру образца. Координата X линии, на которой определены деформации, составляет 2 мм, что практически совпадает с осью образца (координата осевой линии в недеформированном образце равна 2,25 мм) (рис.1). В процессе растяжения образца ординаты всех трех графиков в зоне шейки возрастают, а для остальной части образца остаются постоянными (достигнута степень равномерной деформации образца) (рис.2). В эксперименте степень равномерной деформации образца ε_{yy} составила 21%. Аналогичные графики получены и для других значений координаты X , в пределах ширины шейки от 0,5 до 4,5 мм. Компонента e_3 существенно выше, чем другие составляющие деформаций, что свидетельствует о большей степени утонения по толщине образца в зоне шейки (рис.2).

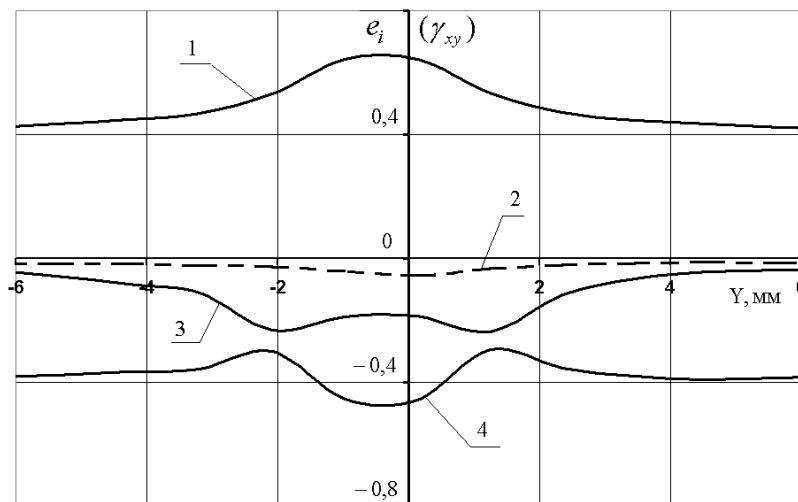


Рис.2. Графики компонент тензора деформаций и дисторсии в направлении оси Y образца.

Средние значения главных логарифмических деформаций $\langle e_1 \rangle$ от кадра к кадру изменяются незначительно, но возрастает неоднородность деформаций – стандартное отклонение s и коэффициент вариации J увеличиваются (табл.1). Максимальная степень продольной деформации $e_1 = 0,7$. Поперечные деформации e_2 являются отрицательными по величине (сжатие). Модуль среднего значения поперечной деформации $\langle e_2 \rangle$ от кадра к кадру возрастает пропорционально величинам продольных деформаций. Величины деформаций сдвига γ_{xy} на порядок меньше линейных деформаций, что свидетельствует о малых углах разориентировки участков поверхности образца в зоне шейки.

Таблица 1.

Статистические параметры законов распределения.

Кадр	Главные деформации e_1			Главные деформации e_2			Главные деформации e_3		
	$\langle e_{yy} \rangle$	s	$J, \%$	$\langle e_{yy} \rangle$	s	$J, \%$	$\langle e_{xy} \rangle$	s	$J, \%$
310	0,485	0,060	12	-0,149	0,045	30	-0,336	0,048	14
315	0,490	0,070	14	-0,145	0,058	39	-0,346	0,062	18
320	0,495	0,078	16	-0,139	0,074	53	-0,356	0,079	22

Плотности вероятностей продольных и поперечных деформаций являются трех-модальными. Данное обстоятельство свидетельствует о различии деформаций, в центре образца и краях шейки (рис.3). Это явление также обусловлено особенностями микроструктуры материала образца, и, в частности, наличием большого числа двойников отжига.

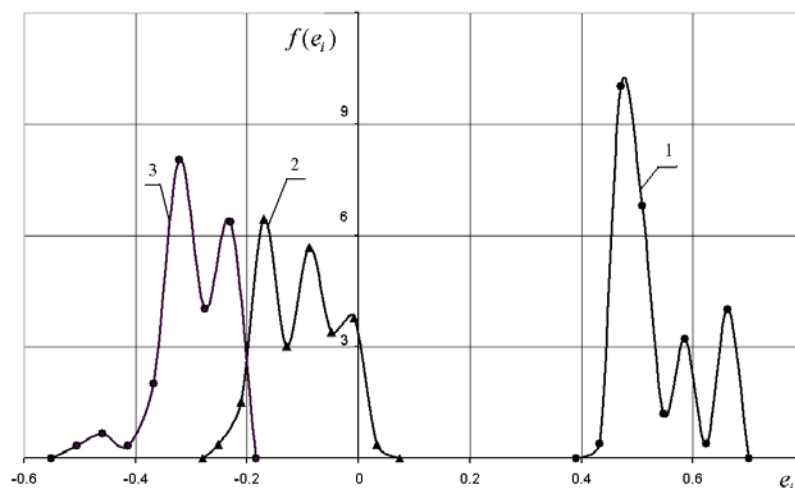


Рис.3. Плотности вероятностей: 1 – e_1 , 2 – e_2 и 3 – e_3 главных деформаций; кадр 315.

Величины главных логарифмических деформаций связаны между собой зависимостями, близкими к функциональным. Об этом свидетельствуют величины коэффициентов парной корреляции между этими параметрами деформации. Значения коэффициентов корреляции возрастают с увеличением степени деформации. Ошибки коэффициентов парной корреляции, обусловленные ограниченным объемом выборки, вычислены при уровне доверительной вероятности 95% при объеме выборки, составляющем 65 значений (табл.2).

Таблица 2.

Коэффициенты парной корреляции между компонентами деформаций.

Коэффициенты корреляции	Кадры		
	310	315	320
$\rho(e_1, e_2)$	$-0,73 \pm 0,11$	$-0,58 \pm 0,16$	$-0,41 \pm 0,20$
$\rho(e_2, e_3)$	$-0,52 \pm 0,18$	$-0,42 \pm 0,20$	$-0,43 \pm 0,20$
$\rho(e_1, e_3)$	$0,21 \pm 0,23$	$0,49 \pm 0,18$	$0,65 \pm 0,14$

ВЫВОДЫ

1. Проведена количественная оценка параметров неоднородности поля упругопластических деформаций в шейке плоского образца титана BT1-00.
2. На основе анализа полей векторов смещений, измерены и рассчитаны линейные поперечные ε_{xx} и продольные ε_{yy} компоненты относительных деформаций, определены дисторсии ε_{xy} и ε_{yx} поля векторов смещений и деформации сдвига γ_{xy} .
3. Выполнен переход от главных относительных деформаций к логарифмическим деформациям.
4. Установлено, что между компонентами логарифмической деформации существует функциональная связь, так как коэффициенты их парной корреляции принимают достаточно высокие значения.

5. Определены параметры плотностей распределения главных логарифмических деформаций.
6. Выполнена оценка величины максимальной деформации растяжения в зоне шейки образца из чистого титана ВТ1-00.
7. Результаты работы доложены и были обсуждены на XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриджмен Н. *Исследование больших пластических деформаций и разрыва*. – М.: Иностранная литература, 1955. – 444 с.
2. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. *Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория*. – 1945. – Т. XI – Вып. 36. – С. 583-593.
3. Малинин Н.Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
4. Колмогоров В.Л. *Напряжения, деформация, разрушение*. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.
5. Вайнштейн А.А., Алехин А.Н. *Основы теории упругости и пластичности с учетом неоднородности материала*. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. – 236 с.
6. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. *Структурные уровни пластической деформации и разрушения*. – Новосибирск: Наука, 1990. – 255 с.
7. Кибиткин В.В., Солодушкин А.И., Плешанов В.С., Лычагин Д.В. *Формирование единого изображения поверхности материала для измерения поля смещений и деформации // Автометрия*. – 2011. – Т. 47. – № 4. – С. 83-90.
8. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. 2009, University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 364 p.
9. Панин В.Е., Деревягина Л.С., Стрелкова И.Л., Мирхайдарова А.И. *Анализ на напряженно-деформированного состояния в шейке плоского образца высокопрочной стали при разрушении // Физическая мезомеханика*. – 2004. – Т. 7. – Ч. 1. – С. 374-377.
10. Панин А.В. и др. *Механизмы формирования деформационного рельефа на поверхности поликристаллических образцов ВТ1-0 при одноосном растяжении // Физическая мезомеханика*. – 2016. – Т. 19. – № 5. – С. 74-83.
11. Реков А.М., Вичужанин Д.И. *Плотность распределения деформаций в плоскости образца ВТ1-00 при растяжении // Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2018. – № 3. – С. 53-60.
12. Реков А.М., Вичужанин Д.И. *Компоненты тензора пластических деформаций в шейке образца титана ВТ1-00 / XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов*. – Уфа, БашГУ, 2019. – С. 280.
13. Дерюгин Е.Ю. *Аналитическое описание распределения пластической деформации в шейке плоского образца при растяжении // Письма о материалах*. – 2011. – Т. 1. – С. 231-237.
14. Остсемин А.А. *К анализу напряженного состояния в эллиптической шейке образца при растяжении // Проблемы прочности*. – 2009. – № 4. – С. 19-28.

15. Воробьев Е.В. Особенности шейкообразования при низкотемпературной прерывистой текучести металлов. Сообщение 1. Осесимметричная деформация // Проблемы прочности. – 2008. – №3. – С.92-99.

REFERENCES

1. Bridzhman P.W. *Studies in large plastic flow and fracture with special emphasis on the effects of hydrostatic pressure* N.Y., McGraw-Hill, 1952, 362 p.
2. Davidenkov N.N., Spiridonova N.I. *Analysis of the state of stress in the neck of a tensile test specimen*. Proc. ASTM, 1946, Vol.46, Pp.1147-1158.
3. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti [Applied theory of plasticity and creep]*. Moskva, Mashinostroenie, 1975, 400 p.
4. Kolmogorov V.L. *Napryazheniya, deformatsiya, razrushenie [Stresses, strains, fracture]* Moskva, Metallurgiya, 1970, 230 p.
5. Vainshtejn A.A., Alekhin A.N. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti s uchetom neodnorodnosti materiala [Fundamentals of elasticity and plasticity theory due to nonhomogeneity of materials]*. Ekaterinburg, Ural'skij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2004, 236 p.
6. Panin V.E., Grinyayev Yu.V., Danilov V.I. *Strukturnye urovni plasticheskoy deformatsii i razrusheniya [Structural levels of plastic deformation and fracture]*. Novosibirsk, Nauka, 1990, 255 p.
7. Kibitkin V.V. et al *Formirovanie edinogo izobrazheniya poverkhnosti materiala dlya izmereniya polya smeshhenij i deformatsii [Formation of a single image of the material surface to measure the displacement and deformation field]*. Avtometriya, 2011, Vol.47, No.4, Pp.83-90.
8. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. 2009, University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 364 p.
9. Panin V.E., Derevyagina L.C., Ctrelkova I.L., Mirxajdarova A.I. *Analiz na napryazhenno- deformirovannogo sostoyaniya v shejke ploskogo obraztsa vysokoprochnoj stali pri razrushenii [Analysis of the stress-strain state in the neck of a flat specimen made of high-strength steel under tensile testing]*. Fizicheskaya mezomekhanika, 2004, Vol.7, No.1, Pp.374-377.
10. Panin A.V. et al. *Mekhanizmy formirovaniya deformatsionnogo rel'efa na poverkhnosti polikristallicheskih obraztsov VT1-0 pri odnoosnom rastyazhenii [Formation mechanisms of the deformation on the surface of polycrystalline VT1-0 titanium specimens under uniaxial tension]*. Fizicheskaya mezomekhanika, 2016, Vol.19, No.5, Pp.74-83.
11. Rekov A.M., Vichuzhanin D.I. *Plotnost' raspredeleniya deformatsij v ploskosti obraztsa VT1-00 pri rastyazhenii [The density of deformation in a plane of VT1-00 sample under uniaxial strain]*. Vestnik PNIPU. Mekhanika, 2018, No.3, Pp.53-60.
12. Rekov A.M., Vichuzhanin D.I. *Komponenty tenzora plasticheskikh deformatsij v shejke obraztsa titana VT1-00 [Components of plastic strain tensor in the neck of a sample made of titanium VT1-00]*. XII Vserossijskij s"ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoy i prikladnoj mekhaniki. Annotatsii dokladov, Ufa, BashGU, 2019, Pp.280.
13. Deryugin E.Yu. *Analiticheskoe opisanie raspredeleniya plasticheskoy deformatsii v shejke ploskogo obraztsa pri rastyazhenii [Analytical description of the*

distribution of plastic strain in the neck of a flat specimen under tensile testing]
Pis'ma o materialakh, 2011, Vol.1, Pp.231-237.

14. Otsemin A.A. *K analizu napryazhennogo sostoyaniya v ehllipticheskoy shejke obraztsa pri rastyazhenii [On the analysis of the stress state in the elliptical neck of the sample under tension]*. Problemy prochnosti, 2009, No.4, Pp.19-28.
15. Vorob'ev E.B. *Osobennosti shejkoobrazovaniya pri nizkotemperaturnoj preryvistoj tekuchesti metallov. Soobshhenie 1. Osesimmetrichnaya deformatsiya [The features of the neck formation under conditions of discontinuous yielding of metals at low-temperature. Message 1. Axisymmetric deformation]*. Problemy prochnosti, 2008, No.3, Pp.92-99.

Поступила в редакцию 9 сентября 2019 года.

Сведения об авторах:

Реков Александр Михайлович – к.т.н., доц., Кафедра металлургических и роторных машин, ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: arekov@yandex.ru
Вичужанин Дмитрий Иванович – к.т.н., с.н.с., ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: mmm@imach.uran.ru