

## РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ

<sup>1</sup>Г.В. Кожевникова, <sup>2</sup>В.Я. Щукин, <sup>3,4</sup>Zhu Ying, <sup>3,4</sup>Shu Xuedao, <sup>3,4</sup>Peng Wenfei

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси

<sup>2</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

г. Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>College of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University

<sup>4</sup>Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology  
Ningbo, China

*Новизна предлагаемой теории заключается в установлении зависимости критической величины деформации от двух независимых параметров напряженного состояния: среднего напряжения и параметра третьего инварианта девиатора напряжений. Новизна также заключается в установлении зависимости критической величины деформации от изменения при пластическом течении направления сдвига по отношению к материальным волокнам металла. Повреждаемость металла на различных этапах деформации суммируется линейно, в то время как сама повреждаемость, как правило, нелинейно связана с накопленными деформациями. Показано различие величин относительных деформаций на равноценном этапе накопления повреждаемости для однонаправленного и разнонаправленного характера деформации.*

**Ключевые слова:** пластическое деформирование, поперечно-клиновое прокатка, пластичность

## METAL FAILURE AT PLASTIC STRAINING

<sup>2</sup>G. Kozhevnikova, <sup>1</sup>V. Shchukin, <sup>3,4</sup>Zhu Ying, <sup>3,4</sup>Shu Xuedao, <sup>3,4</sup>Peng Wenfei

<sup>1</sup>Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

<sup>2</sup>Science and Technology Park BNTU «Polytechnic»

Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>College of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University

<sup>4</sup>Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology  
Ningbo, China

*The novelty of the suggested theory is in determining a dependence of the deformation critical value on two independent parameters of the stressed state: the mean stress and the parameter of the third invariant of the stress deviator. The novelty also consists in discovering a dependence of the deformation critical value on changes in the shear direction towards material fibers of metal. Damageability of metals is summarized linearly at various stages of straining, while damageability itself, as a rule, is in a nonlinear relationship with accumulated strains. It has been shown that there is a difference in values of relative strains at an equivalent stage of accumulation of damageability under unidirectional and multidirectional straining.*

**Keywords:** plastic deforming, cross-wedge rolling, plasticity

**E-mail:** fti@tut.by

Основы деформационной теории в большей степени заложены российским ученым В.Л. Колмогоровым. Согласно его работ [1] при пластической деформации в металле одновременно протекают два процесса: разрушения и сварки. Преобладание одного или другого процесса зависит от температуры, скорости деформации, напряженного состояния, свойств металла. При преобладании процесса разрушения макроразрушение наступает после достижения деформацией своей критической величины. До этого события в металле последовательно протекают следующие процессы: накопление дислокаций, образование микропор и микротрещин, слияние их в макротрещины и окончательное макроразрушение образца. Эти события могут фиксироваться на электронном микроскопе, точным измерением плотности металла и на последних стадиях разрушения измерением микротвердости.

Зависимость пластичности металла от напряженного состояния ранее определялась диаграммой пластичности (рис. 1).

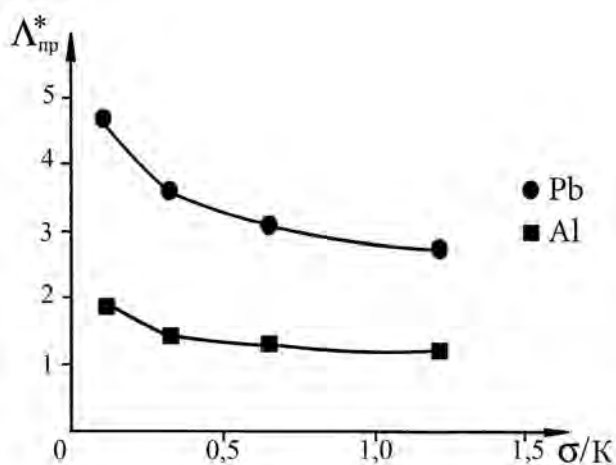


Рис. 1. Диаграммы пластичности свинца С0 (●) и алюминия АД-1(■), полученные методом поперечной прокатки при температуре 290 К

В качестве накопленных деформаций принята безразмерная величина – степень деформации сдвига [2]:

$$\Lambda = \int_0^t H dt, \quad (1)$$

где  $H = \sqrt{\frac{2}{3}[(\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2] + \eta_{xy}^2 + \eta_{yz}^2 + \eta_{zx}^2}$  – интенсивность скоростей деформации сдвига,  $c^{-1}$ ;  $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \eta_{xy}, \eta_{yz}, \eta_{zx}$  – компоненты тензора скорости деформации  $c^{-1}$ ;  $t$  – время, с.

В качестве напряженного состояния принята безразмерная величина – среднее напряжение  $\sigma/K$  [2].

$$\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – среднее нормальное напряжение, Па,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальные компоненты тензора напряжений, Па;  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  – главные нормальные напряжения тензора напряжений, Па.

$$K = +\sqrt{|J_2(D_\sigma)|} = +\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2}, \quad (3)$$

где  $K$  – пластическая постоянная материала, Па;  $J_2(D_\sigma)$  – второй инвариант девиатора напряжений, Па<sup>2</sup>;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – компоненты тензора напряжений, Па.

Деформационный критерий разрушения в этом случае запишется:

$$\Lambda \geq \Lambda_{\text{пр}}, \quad (4)$$

где  $\Lambda_{\text{пр}}$  – предельная степень деформации сдвига.

Наиболее часто зависимость предельной степени деформации сдвига на диаграммах пластичности от среднего напряжения достаточно точно аппроксимируется выражением [3]:

$$\Lambda_{\text{пр}} = \frac{A}{B + \sigma/K}, \quad (5)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные металла при конкретной температуре и скорости деформации.

Важная закономерность выражения (5) заключается в том, что при условии  $B = -\sigma/K = (\sigma/K)_\infty$  предельная степень деформации сдвига равна бесконечности ( $B + \sigma/K = 0$ ), то есть разрушение невозможно получить при сколь угодно больших деформациях. Мы назвали это свойство всех без исключения металлов «неограниченная пластичность», которую не следует отождествлять с эффектом сверхпластичности у некоторых металлов, когда изменяется сам механизм деформации и за счет этого возможно достигать больших (но ограниченных) деформаций. Вторым достоинством выражения (5) является то, что ее нахождения достаточно проведение только двух экспериментов.

Достижение неограниченной пластичности нами экспериментально [2] подтверждено при осадке свинца С0 ( $(\sigma/K)_\infty = -0,577$ ;  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K = -0,727$ ) и при деформировании его методом ЕСАР ( $(\sigma/K)_\infty = -0,500$ ;  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K = 0$ ), а так же при осадке алюминия АД-1 ( $(\sigma/K)_\infty = -0,577$ ;  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K = -0,727$ ). Ранее аналогичный результат получил Бриджмен, который осуществил прямое выдавливание без разрушения мрамора в условиях высокого всестороннего сжатия.

Напряженное состояние (тензор и девиатор) минимально описывается тремя параметрами, например,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , два из которых независимы, а третье связано с ними условием пластичности Мизеса. Поэтому мы предложили вместо диаграммы пластичности использовать поверхность пластичности (рис. 2). Третьей координатой здесь принята безразмерная величина – параметр третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  [2].

$$\begin{aligned} J_3(D_\sigma) &= \frac{1}{27} [2(\sigma_x^3 + \sigma_y^3 + \sigma_z^3) - 3(\sigma_x^2 \sigma_y + \sigma_y^2 \sigma_z + \sigma_z^2 \sigma_x + \\ &+ \sigma_x \sigma_y^2 + \sigma_y \sigma_z^2 + \sigma_z \sigma_x^2) + 12 \sigma_x \sigma_y \sigma_z + \\ &+ 9 \sigma_x (\tau_{xy}^2 - 2 \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) + 9 \sigma_y (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 - 2 \tau_{zx}^2) + \\ &+ 9 \sigma_z (-2 \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) + 54 \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}] = \\ &= (\sigma_1 - \sigma)(\sigma_2 - \sigma)(\sigma_3 - \sigma). \end{aligned} \quad (6)$$

где  $J_3(D_\sigma)$  – третий инвариант девиатора напряжений, Па<sup>3</sup>.

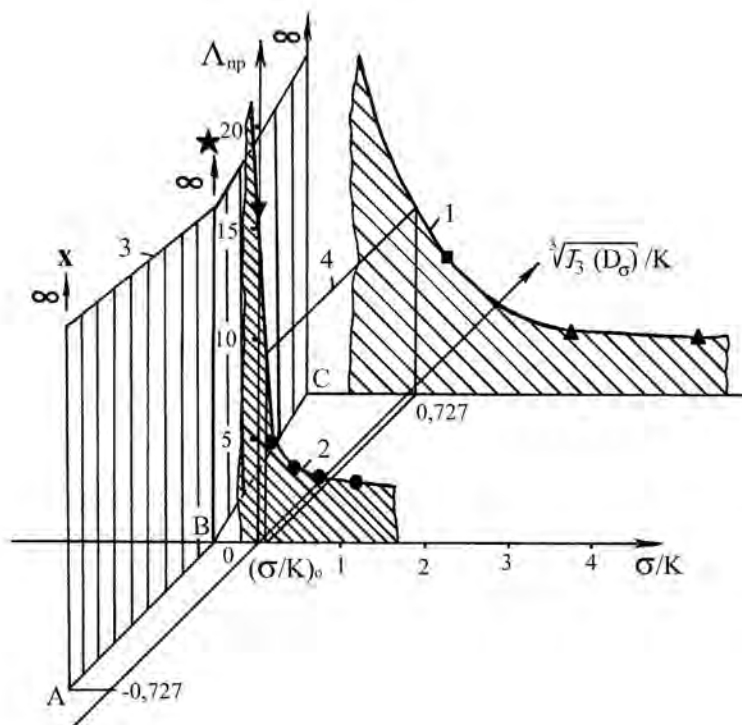


Рис. 2. Поверхность пластичности свинца С0 при температуре 290 К:

- – растяжение цилиндрического образца; ▲ – растяжение цилиндрического образца с концентратором; ● – поперечная прокатка;
- ★ – ЕСАР; x – осадка цилиндрического образца; ▼ – кручение трубы

Правомерность представления пластичности металла в зависимости от двух параметров напряженного состояния, то есть в виде непрерывной поверхности подтверждено нами [4] экспериментально на свинце, алюминии, меди. Одним методом испытания построить поверхность пластичности невозможно. Поэтому нами при различных

$\sigma/K$  и  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  проводились эксперименты методами растяжения цилиндрического образца, растяжением цилиндрического образца с концентратором, кручения трубного образца, осадки цилиндрического образца, поперечной прокаткой цилиндрического образца с отношением длины к диаметру более 2 (когда в среднем сечении реализуется плоско-деформированное состояние), методом ЕСАР с углом  $90^\circ$ . В итоге было доказано [4], что зависимость пластичности от обоих параметров напряженного состояния  $\sigma/K$  и  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  однозначна.

Как правило, в условиях реальных технологий вдоль линии тока в проблемных областях напряженное состояние, температура и скорость деформации изменяются. Поэтому возникает необходимость нахождения аппарата суммирования повреждаемости металла на разных этапах деформирования. В этой связи введен безразмерный параметр – повреждаемость  $\Pi$ . В исходном состоянии он равен 0, при разрушении он равен 1. Принято, что на этапах деформации повреждаемость суммируется линейно. Установлено, что по отношению к накопленным деформациям зависимость, как правило, нелинейна:

$$\Pi = \Lambda^p, \quad (7)$$

где  $p$  – показатель нелинейности накопления повреждаемости.

Оказалось, что экспериментальное нахождение относительного показателя не-

линейности между двумя процессами с разными условиями деформации просто. Найти же сам абсолютный показатель нелинейности  $\rho^*$  достаточно сложно. Нами разработан специальный метод [2], позволяющий это сделать.

В итоге установлено две закономерности:

1. Существует пороговое значение среднего напряжения  $\sigma/K$ , ниже которого зависимость повреждаемости от накопленных деформаций становится линейной, то есть  $\rho^* = 1$ .

2. Установлены зависимости абсолютного показателя нелинейности  $\rho^*$  от обоих параметров напряженного состояния  $\sigma/K$  и  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  (рис. 3).

Нами также установлена закономерность изменения предельной степени деформации сдвига  $\Lambda_{\text{пр}}$  от характера деформации: проходит ли деформация в одном неизменном направлении по отношению к материальным частицам металла или это направление изменяется, или осуществляется знакопеременное деформирование. Вполне логичным следует предположить, что сдвиг в металле по различным направлениям (плоскостям) позволяет накапливать больше дефектов в виде дислокаций и микротрещин, поэтому и накопленные до разрушения деформации могут быть большими.

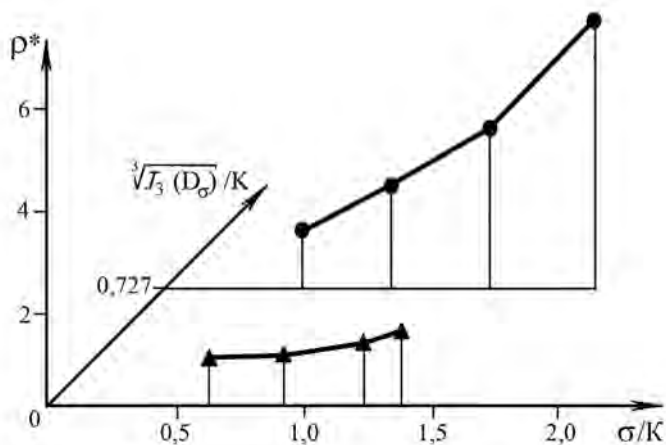


Рис. 3. Зависимость абсолютного показателя нелинейности накопления повреждаемости  $\rho^*$  при поперечной прокатке и растяжении стали 45 при температуре 290 К:  
 ▲ – поперечная прокатка; ● – растяжение цилиндрического образца

При знакопеременных деформациях известно, что согласно критерию Менсона-Коффина эти накопленные деформации значительно превосходят однонаправленные. Для экспериментального подтверждения указанной закономерности нами был изготовлен специальный образец (рис. 4, а), который позволял производить сдвиг в одной плоскости В–В, но в двух перпендикулярных направлениях при осадке или при кручении. Эксперимент выполнялся на стали и меди. В итоге сдвиг в двух направлениях обеспечивал существенное увеличение (на 53 %) предельной степени деформации сдвига  $\Lambda_{\text{пр}}^*$  (кривая 2, рис. 4, б) по сравнению со сдвигом в одном направлении.

Зависимость между предельной степенью деформации сдвига  $\Lambda_{\text{пр}}$  без изменения направления сдвига к материальным частицам металла и с изменением  $\Lambda_{\text{пр}}^*$  нами принято описывать выражением:

$$\Lambda_{\text{пр}}^* = (\Lambda_{\text{пр}})^\Omega, \quad (8)$$

где  $\Omega \geq 1$  – показатель увеличения пластичности при разнонаправленном деформировании.

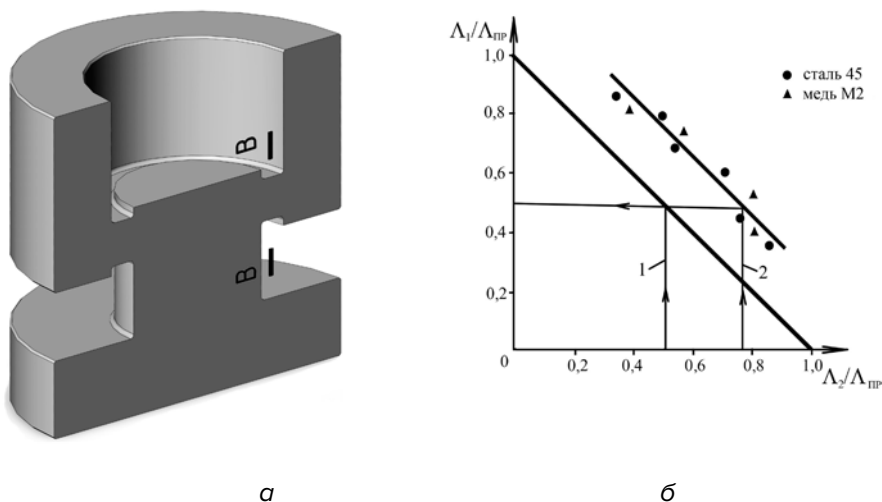


Рис. 4. Образец (а) для оценки сдвига в одной плоскости В–В и в двух перпендикулярных направлениях и относительные деформации  $\Delta/\Delta_{пр}$  до разрушения (б) при однонаправленном сдвиге (кривая 1) и двунаправленном сдвиге (кривая 2)

Зависимость показателя увеличения пластичности при разнонаправленном деформировании стали от среднего напряжения и температуры поперечной прокатки образца показана на рис. 5.

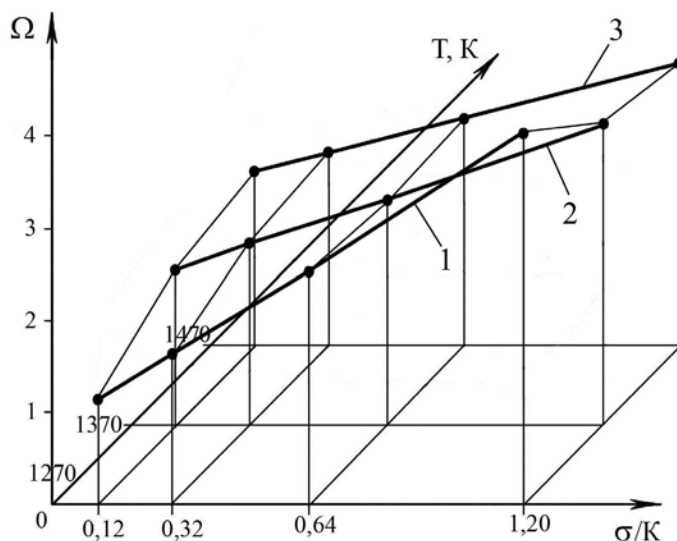


Рис. 5. Зависимость показателя увеличения пластичности  $\Omega$  от среднего напряжения  $\sigma/К$  при горячей поперечной прокатке стали 40Х:  
1 –  $T = 1270$  К; 2 –  $T = 1370$  К; 3 –  $T = 1470$  К

Анализ указанных зависимостей свидетельствует, что показатель  $\Omega$  уменьшается с уменьшением среднего напряжения  $\sigma/К$ , что позволяет предположить наличие среднего напряжения  $\sigma/К$ , при котором закономерность (8) становится линейной:  $\Omega = 1$ .

Для реальных процессов обработки металлов давлением важным является определение ресурса пластичности металла  $\lambda$ , то есть какой запас пластических свойств остался до разрушения [5]:

$$\lambda = 1 - \Pi_i = 1 - (\Delta/\Delta_{пр})^p. \quad (9)$$

По характеру деформации могут быть разделены по мере возрастания пластичности на:

– однонаправленную монотонную деформация, и к ним могут быть отнесены чистый сдвиг, однонаправленное кручение трубы, гибка листа, ЕСАР в одном направлении, кручение трубы с растяжением;

– разнонаправленная монотонная деформация, и к ним могут быть отнесены осадка, растяжение цилиндрического образца, растяжение листа, сдвиг в одной плоскости, но в двух направлениях;

– разнонаправленная немонотонная деформация, и к ним могут быть отнесены растяжение с концентратором, знакопеременные кручения и знакопеременная ЕСАР, поперечная прокатка и большинство производственных процессов обработки металлов давлением.

Условие равенства ресурса пластичности на каждом из этапов деформирования запишется:

$$1 - (\Lambda/\Lambda_{\text{ГР}})^{p^*} = 1 - (\Lambda^*/\Lambda_{\text{ГР}}^*)^{p^*}. \quad (10)$$

Отсюда нетрудно получить зависимость между деформациями на этапе деформирования с различным характером деформации:

$$\Lambda^* = \Lambda \cdot (\Lambda_{\text{ГР}})^{\Omega-1}. \quad (11)$$

Ряд сплавов, например, на основе титана подвержены значительному уменьшению размера зерна при деформации и, как следствие, росту их пластических свойств. В этом случае при расчете ресурса пластичности данный фактор должен обязательно учитываться [6]. Мы в своей практике сталкивались не с потерей, а с ростом пластичности в процессах деформации титановых сплавов более чем на 50 %.

Пластичность металлов носит вероятностный характер, поэтому наши исследования показали, что разрушение сталей описывается нормальным законом распределения Гаусса.

### Заключение

Энергетические критерии разрушения, которые используют в большей степени программы компьютерного моделирования процессов пластической деформации, уступают деформационным по универсальности и точности и могут использоваться в ограниченном диапазоне технологических параметров. Новизна предлагаемой теории заключается в установлении зависимости критической величины деформации от двух независимых параметров напряженного состояния: среднего напряжения и параметра третьего инварианта девиатора напряжений. Установлена зависимость критической величины деформации от изменения при пластическом течении направления сдвига по отношению к материальным волокнам металла. Повреждаемость металла на различных этапах деформации суммируется линейно, в то время как сама повреждаемость, как правило, нелинейно связана с накопленными деформациями. Показано различие величин относительных деформаций на равноценном этапе накопления повреждаемости для однонаправленного и разнонаправленного характера деформации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пластичность и разрушение / под общ. ред. В.Л. Колмогорова. — М.: Metallurgy, 1977. — 336 с.
2. Kozhevnikova, G. Cross-wedge rolling / G. Kozhevnikova. — Minsk: Belorusskaya nauka, 2012. — 321 с.
3. Красневский, С.М. Разрушение металлов при пластическом деформировании / С.М. Красневский, Е.М. Макушок, В.Я. Щукин. — Минск: Наука и техника, 1983. — 173 с.
4. Теория и технология формирования поперечно-клиновой прокатки / Шу Сюэдао, В.Я. Щукин, Г.В. Кожевникова, Сунь Баошоу, Пен Вэньфэй. — Академическая библиотека университета Нинбо, КНР, 2014. — 314 с.

5. Shchukin, V. New Trends in Development of Cross-Wedge Rolling Technology / V. Shchukin, G. Kozhevnikova // Forge (USA). — Oct 26, 2015. — P. 18–22.
6. Кожевникова, Г.В. Повышение усталостной прочности валов посредством поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович, В.Я. Щукин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. — 2017. — № 12. — С. 19–31.

#### REFERENCES

1. Kolmogorov V.L. Plastichnost' i razrushenie [Plasticity and failure]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 336 p. (in Russian)
2. Kozhevnikova, G. Cross-wedge rolling / Minsk: Belorusskaya nauka, 2012, 321 p.
3. Krasnevskij S.M., Makushok E.M., Shchukin V.Y. 1983 Razrushenie metallov pri plasticheskom deformirovanii [Destruction of Metals at Plastic Deformation] / Minsk: Nauka i Tekhnika, 1983, 173 p. (in Russian)
4. Shu Xuedao, Valery Ya. Shchukin, G. Kozhevnikova, Sun Baoshou, Peng Wenfei Theory and technology of cross-wedge rolling. — Academic library of Ningbo University, 2014, 314 p. (in Chinese)
5. Shchukin V., Kozhevnikova G. New Trends in Development of Cross-Wedge Rolling Technology / Forge (USA), Oct 26, 2015, pp. 18–22.
6. Kozhevnikova G.V., Rudovich A.O., Shchukin V.Y. Povyshenie ustalostnoj prochnosti valov posredstvom poperechno-klinovoj prokatki [Improving of Fatigue Strength by Cross-wedge Rolling] / Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure, 2017, № 12, pp. 19–31. (in Russian)

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 02.05.18*