

УДК 621.777.4.073.001.8

Мирошниченко С. В.
Сынков В. Г.**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕВЕРСИВНОЙ ЗАКРЫТОЙ ПРОШИВКИ НА
НАКОПЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗАГОТОВКАХ ТРУБ И ПРУТКОВ**

Развитие науки и техники неразрывно связано с использованием таких элементов конструкций, в которых традиционные материалы оказываются малоэффективными или даже непригодными. В связи с этим возникает потребность в новых материалах, обладающих более высокими прочностными характеристиками в сравнении с традиционными. Эффективным методом достижения таких характеристик является формирование в материале субмикроструктуры с помощью технологий, основанных на методах интенсивной пластической деформации (ИПД).

К настоящему времени разработан ряд технологических решений в области ИПД, обеспечивающих повышение свойств прутков различной формы сечений и широкого спектра материалов [1–6]. Наиболее перспективной технологией получения ИПД упрочненных полых цилиндров, обеспечивающей наперед заданное распределение свойств по объему материала, на наш взгляд, является реверсивная закрытая прошивка (РЗП) [7]. Особенностью данного метода является возможность упрочнения как сплошных, так и полых полуфабрикатов, в т. ч. с переменным сечением по длине.

Для назначения научно обоснованных режимов упрочнения заготовок требуемой формы и размеров с помощью РЗП необходимо исследовать влияние отдельных факторов и их комбинаций на закономерности процесса накопления деформаций в локальных зонах получаемых изделий.

Учитывая актуальность задачи, целью работы является установление закономерностей процесса накопления деформаций в локальных зонах получаемых изделий путем построения математических моделей влияния параметров РЗП, геометрии заготовки и инструмента на характер накопления деформаций.

Для выбора рациональной схемы деформирования при минимальном количестве необходимых опытов с сохранением статистической достоверности результатов проведено планирование эксперимента.

Для исследований в качестве функции цели были выбраны следующие показатели:

- e_{cp} – средняя величина накопленной деформации;
- S/e_{cp} – функция отношения стандартного отклонения накопленных деформаций

в разных областях материала полуфабриката к средней величине деформации в материале.

Комплекс факторов, влияющих на эти показатели, зависит от диаметра внутреннего пуансона d , высоты заготовки H и глубины внедрения Δh внутреннего пуансона, поэтому за основные факторы приняты:

- H/D – относительная высота заготовки;
- $\Delta h/H$ – относительный ход внедрения пуансона;
- d/D – относительный диаметр заготовки.

В качестве математической модели выбрана функция вида:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j} b_{i,j} x_i x_j,$$

где y – параметр, подлежащий изучению; b_0 – свободный член уравнения; $b_{i,j}$ – регрессионные коэффициенты при полиноме; $x_{i,j}$ – значения факторных признаков.

Изменение факторов проводилось на трех уровнях (табл. 1).

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	H/D	$\Delta h/H$	d/D
Основной уровень	1	0,5	0,5
Интервал варьирования	0,5	0,167	0,2
Верхний уровень	1,5	0,333	0,9
Нижний уровень	0,5	0,667	0,7

Сочетание варьируемых значений исследуемых факторов было определено с использованием метода комбинационных квадратов [8], по которому составлена матрица планирования эксперимента (табл. 2).

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№	H/D	$\Delta h/H$	d/D
1	0,5	1/3	0,5
2	0,5	1/2	0,7
3	0,5	2/3	0,9
4	1,0	1/3	0,7
5	1,0	1/2	0,9
6	1,0	2/3	0,5
7	1,5	1/3	0,9
8	1,5	1/2	0,5
9	1,5	2/3	0,7

Численный эксперимент проводился в среде комплекса DEFORM-2D. Моделирование цикла процесса проводилось в 2 этапа. На первом этапе выполнялся расчет процесса закрытой прошивки от начального положения касания внутреннего пуансона с заготовкой до внедрения в нее на глубину Δh (рис. 1). Стартовое положение внешнего пуансона при моделировании второго этапа – операции реверсирования, определялось высотой «стакана», полученного после прошивки. Расчет останавливался, когда заготовка принимала первоначальную форму. После окончания цикла модель заготовки переворачивалась на 180° и оба этапа моделирования повторялись. Полученные в конце каждого расчета поля параметров напряженно-деформированного состояния использовались как исходные данные для моделирования следующей операции. Таким образом, были смоделированы 4 цикла обработки.

Реология материала (алюминий АД1) заготовки задавалась с использованием физико-феноменологической модели пластичности (1) [9]. Данная модель разработана для циклических процессов деформирования металлов, характеризующихся большими интенсивностями пластической деформации в полуцикле ($\varepsilon > 0,1 \div 0,2$) и накопленными деформациями [$d\varepsilon > 1 \div 2$]. Здесь определяющие соотношения записаны в форме изотропной зависимости теории течения:

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{d\varepsilon}{\Phi_o(\varepsilon)} S_{ij},$$

где $\Phi_o(\varepsilon)$ – функция напряжений:

$$\Phi_o(\varepsilon) = \beta m G b \left\{ \frac{(\lambda_c b)^{-1} [\exp(\varepsilon) - 1] + \rho_{so} + A\varepsilon}{\exp(\varepsilon)} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $\beta = 0,4$ – эмпирический коэффициент;

$m = 3,1$ – фактор Тейлора для поликристаллов;

$G = 26\,000$ МПа – модуль сдвига;

$b = 3 \cdot 10^{-8}$ см⁻¹ – модуль вектора Бюргера;

ρ_{so} – исходная скалярная плотность дислокаций в материале;

A – коэффициент, определяемый экспериментально;

λ_c – средняя длина свободного пробега дислокаций после смены знака деформации.

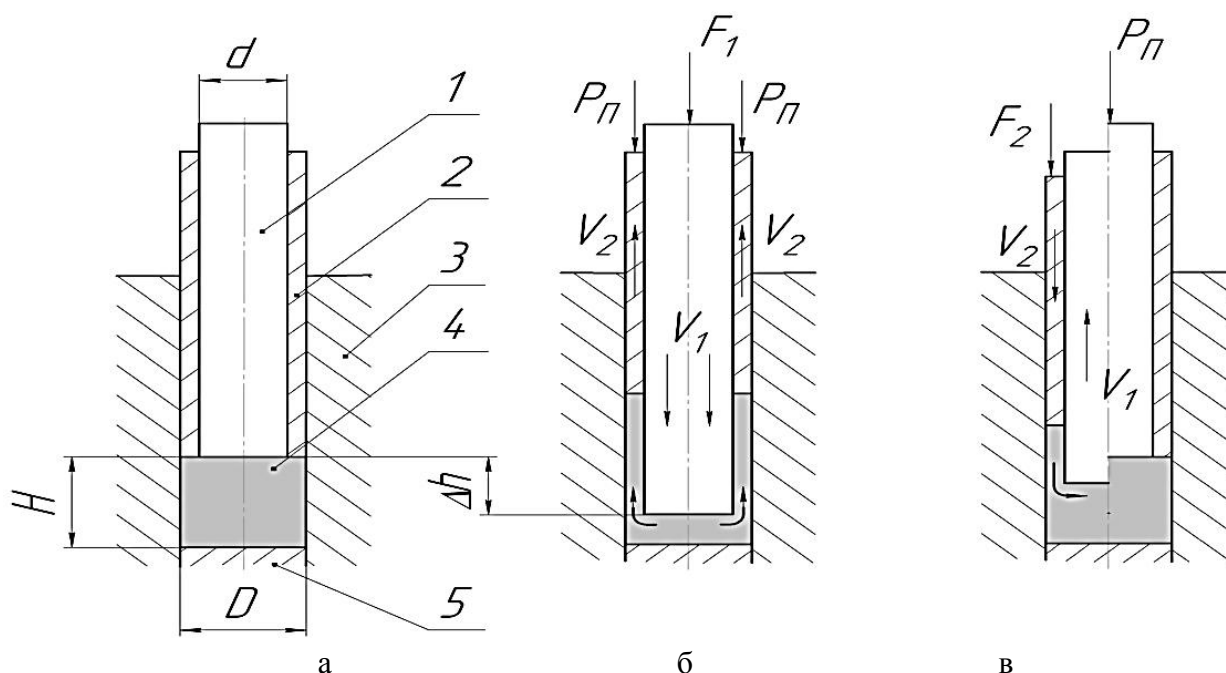


Рис. 1. Схема обработки заготовки реверсивной закрытой прошивкой с противодавлением (1 – внутренний пуансон; 2 – внешний пуансон; 3 – штамп; 4 – заготовка; 5 – опора):

а – начало цикла закрытой прошивки; б – конец цикла закрытой прошивки; в – конец цикла реверсирования

Значения параметров материалов $\rho_{so} = 8,35 \cdot 10^9$ см⁻², $A = 2,27 \cdot 10^{10}$ см⁻², $\lambda_c = 1,81 \cdot 10^{-3}$ см определены экспериментально [9].

Деформации инструмента по сравнению с деформациями заготовки пренебрежимо малы, поэтому они задавались как жёсткие тела, их материал и механические свойства игнорировались. Взаимодействие между жестким инструментом и деформируемым материалом заготовки моделировалось с помощью контактных поверхностей. Контакт между инструментом и заготовкой смоделирован трением по Зибелю с показателем трения, равным 0,4. Скорость движения пуансонов $V_{1,2} = 1$ мм/с. Заданное значение противодействия соответствовало $P_{II} = 200$ МПа. Температурный режим обработки – 20°C.

Согласно плану эксперимента (табл. 2) были проведены девять расчетов, в результате которых получены значения накопленных после четырех полных циклов обработки РЗП деформаций в точках продольных сечений полых и сплошных заготовок (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что максимальные эквивалентные деформации сосредоточены в центральной части получаемых полуфабрикатов и их интенсивность снижается к периферии и торцам.

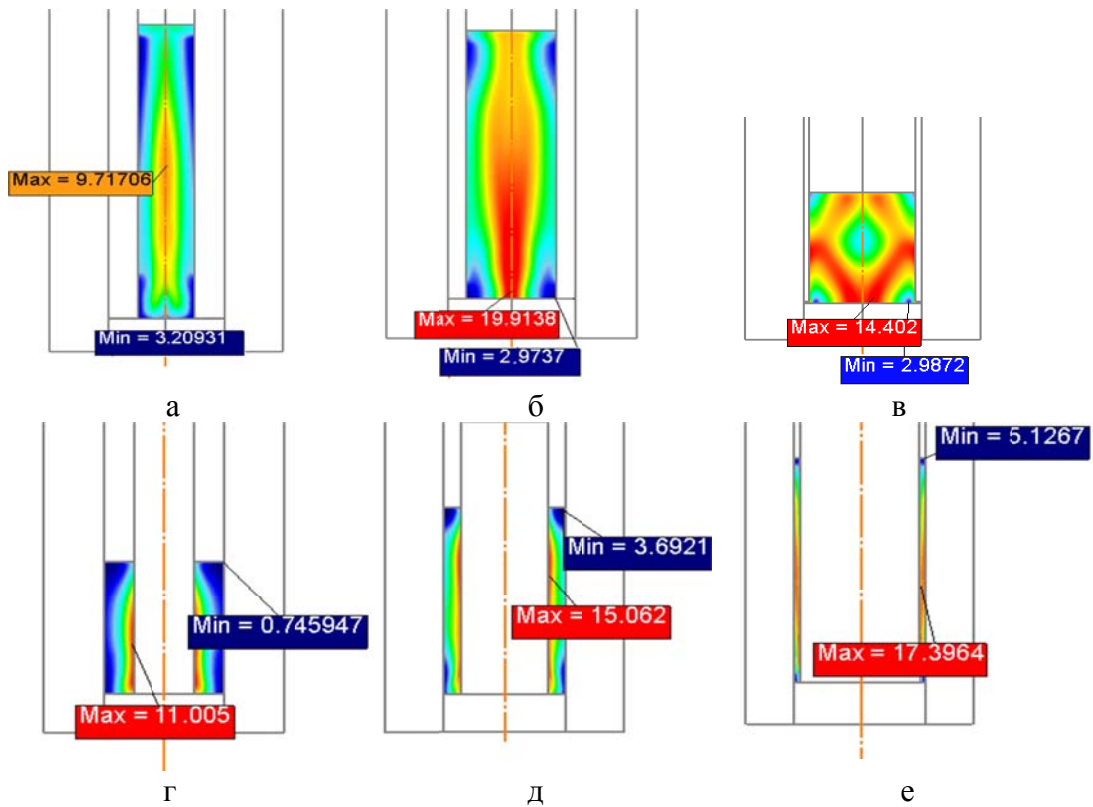


Рис. 2. Поля интенсивности деформации в прутках и трубах с различной толщиной стенки после четырех циклов РЗП со значениями факторов:

а $-H/D = 1,5$, $\Delta h/H = 1/2$, $d/D = 0,5$; б $-H/D = 1,5$, $\Delta h/H = 2/3$, $d/D = 0,7$; в $-H/D = 1$, $\Delta h/H = 1/2$, $d/D = 0,9$; г $-H/D = 1$, $\Delta h/H = 2/3$, $d/D = 0,5$; д $-H/D = 1$, $\Delta h/H = 1/3$, $d/D = 0,7$; е $-H/D = 0,5$, $\Delta h/H = 2/3$, $d/D = 0,9$

По результатам численного эксперимента получены уравнения регрессии - для полого цилиндра

$$e_{cp}^{n.цил.} = -3,2 + 3,53 \cdot H/D - 8,32 \cdot \Delta h/H + 3,72 \cdot d/D - 2,38 \cdot H/D \cdot \Delta h/H + 35,96 \cdot \Delta h/H \cdot d/D - 2,97 \cdot H/D \cdot d/D. \quad (2)$$

$$S/e_{cp}^{п.цил.} = 1,56 + 0,13 \cdot H/D - 2,45 \cdot d/D - 0,7 \cdot H/D \cdot \Delta h/H + 1,25 \cdot \Delta h/H \cdot d/D + 0,52 \cdot H/D \cdot d/D. \quad (3)$$

для прутка круглого сечения

$$e_{cp}^{np.} = 7,28 + 0,53 \cdot H/D - 12,3 \cdot \Delta h/H - 13 \cdot d/D + 1,35 \cdot H/D \cdot \Delta h/H + 43,89 \cdot \Delta h/H \cdot d/D + 0,4 \cdot H/D \cdot d/D. \quad (4)$$

$$S/e_{cp}^{np.} = 1,64 - 0,3 \cdot H/D - 3,24 \cdot d/D - 1,25 \cdot H/D \cdot \Delta h/H + 2,3 \cdot \Delta h/H \cdot d/D + 1,62 \cdot H/D \cdot d/D. \quad (5)$$

По полученным моделям построены поверхности, позволяющие определить влияние исследуемых факторов на интенсивность накопленных деформаций (рис. 3) и равномерность ее распределения (рис. 4) по сечению полученных заготовок.

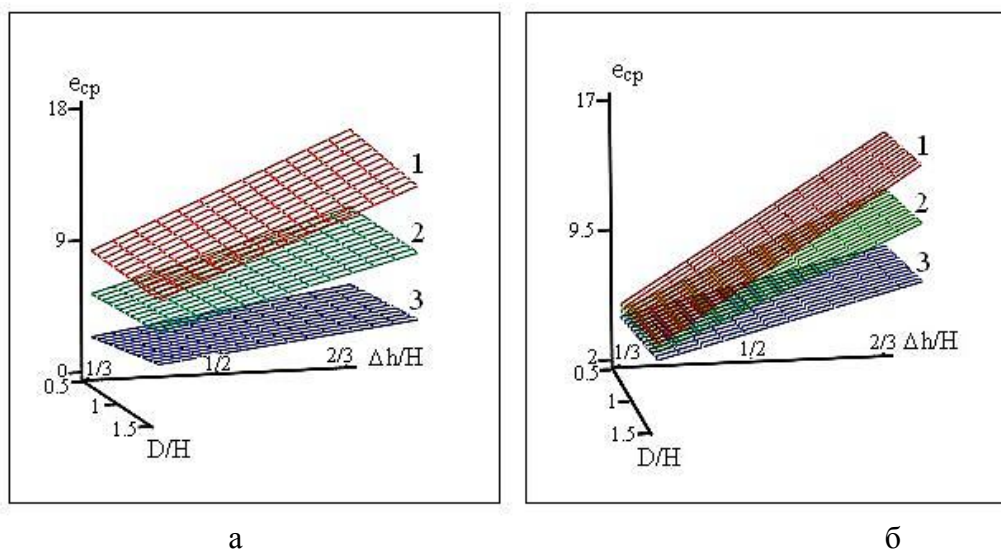


Рис. 3. Зависимость среднего значения интенсивностей накопленной деформации e_{cp} от высоты исходного образца D/H , относительного хода пуансона $\Delta h/H$ и соотношения диаметров пуансонов (1 – $d/D=0,9$; 2 – $d/D=0,7$; 3 – $d/D=0,5$):

а – в полых цилиндрах; б – в прутках круглого сечения

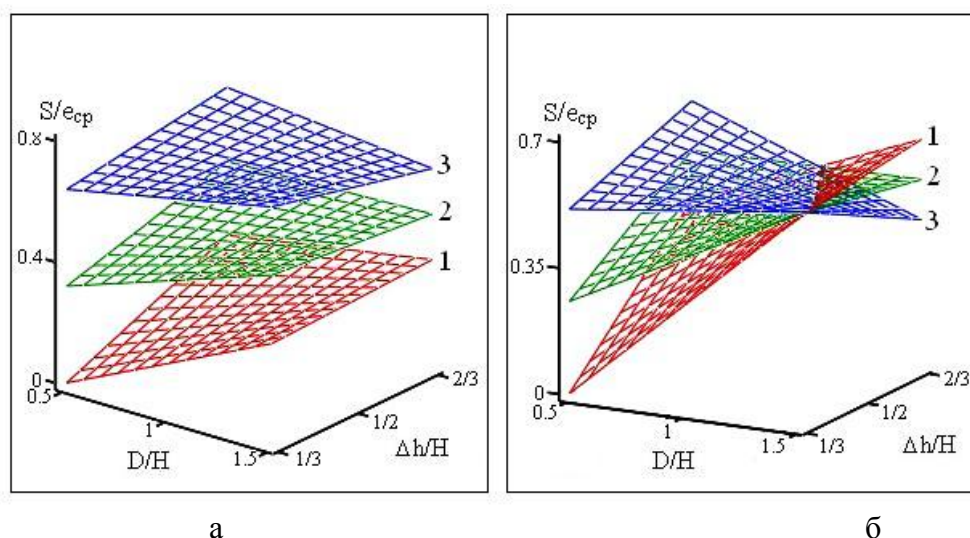


Рис. 4. Зависимость показателя равномерности распределения деформаций от высоты исходного образца D/H , относительного хода пуансона $\Delta h/H$ и соотношения диаметров пуансонов (1 – $d/D=0,9$; 2 – $d/D=0,7$; 3 – $d/D=0,5$):

а – в полых цилиндрах; б – в прутках круглого сечения

Согласно уравнениям (2) и (4) на величину накопленной деформации в получаемых заготовках существенное влияние оказывают факторы, характеризующие глубину выдавливаемой полости ($\Delta h/H$) и соотношение диаметров пуансонов (d/D), а также их взаимодействие. Относительная высота исходной заготовки (H/D) и ее комбинация с другими факторами, в исследуемых интервалах на степень накопленной деформации заметного влияния не оказывают. Таким образом, для накопления наибольших величин деформаций в прутках и трубах высота исходной заготовки по отношению к ее диаметру значения не имеет, но относительный ход пуансона ($\Delta h/H$) должен стремиться к большим значениям.

Результаты, представленные на рис. 4 показывают, что имеются некоторые различия в силе влияния, как отдельных факторов, так и их взаимодействия на показатель равномерности распределения деформаций в сплошных и трубчатых сечениях. Видно, что в полученных прутках роль высоты исходной заготовки и глубины внедрения пуансона с уменьшением относительного диаметра заготовки растет более интенсивно, чем в полых цилиндрах. Кроме того, внедрение пуансона в тело заготовки на небольшую глубину ($\Delta h / H < 1/2$) приводит к существенной неравномерности деформаций в получаемых полуфабрикатах. Поэтому для изготовления прутков с более или менее равномерным распределением свойств в их объеме следует использовать «высокие» заготовки с соотношением $H / D > 1$ при этом относительный ход пуансона должен составлять не менее 50 % от их исходной высоты.

Для определения адекватности полученных зависимостей с достоверностью аппроксимаций R^2 была произведена проверка с помощью критерия Фишера F_p . В нашем случае применительно к уравнениям:

$$(2) - R^2 = 0,98; F_p = 14,2; \Delta = 6,1\%;$$

$$(3) - R^2 = 0,98; F_p = 43,1; \Delta = 5,9\%.$$

$$(4) - R^2 = 0,99; F_p = 47,7; \Delta = 2,7\%;$$

$$(5) - R^2 = 0,97; F_p = 17,5; \Delta = 4,2\%.$$

Здесь значения Δ указывают на среднюю ошибку расчета каждого параметра.

Так как $F_p > F_{табл} = 19,3$, и $\Delta < 13\%$ [8], то можно считать, что уравнения (2) – (5) адекватны и их можно использовать как интерполяционные формулы для определения величин $e_{ср}$ и $S/e_{ср}$.

ВЫВОДЫ

Проведено моделирование процесса РЗП с противодавлением 200 МПа заготовок из вторичного алюминия марки АД1 с использованием конечно-элементного программного комплекса Deform 2D. Получены данные о распределении полей интенсивности деформаций в сплошных и полых полуфабрикатах после 4-х циклов обработки.

Методом планирования эксперимента получены зависимости интенсивности деформаций и равномерности их распределения по сечению полуфабрикатов от геометрических параметров исходной заготовки и соотношения параметров деформирующего инструмента.

Варьированием параметров заготовки, инструмента и глубины вдавливания пуансона, возможно, добиться необходимого характера неоднородности деформаций с сохранением ее высокой интенсивности при получении полуфабрикатов заданной формы (стакана или стержня круглого сечения).

Использование полученных моделей позволит проводить оценку накопленных деформаций при РЗП полых и сплошных цилиндров, а также при выборе параметров обработки на предварительных этапах разработки технологии в зависимости от поставленной задачи. Таким образом, модели позволят рационально планировать и проектировать процесс упрочнения заготовок прутков и труб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Distribution of Mechanical Properties by Volume in Titanium Billets Processed by Twist Extrusion / A. Reshetov, A. Korshunov, A. Smolyakov, Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, Kaganova I. Morozov A. // Materials Science Forum, 2011. – V. 667–669. – P. 851–856.*
2. *Sabirov I. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: new horizons in development / I. Sabirov, M. Murashkin, R. Valiev // Materials Science and Engineering A, 2013. – №. 560. – P. 1–24.*
3. *Механические свойства титанового сплава Ti–6Al–4V ELI после РКУП и комплексной термомеханической обработки // А. И. Коршунов, А. А. Смоляков, Т. Н. Кравченко, И. В. Коротченкова, И. И. Каганова // Физика и техника высоких давлений, 2012. – Т. 22, № 4 – С. 103–110.*
4. *Сверхпрочность наноструктурных металлов и сплавов, полученных интенсивной пластической деформацией / Р. Валиев, М. Мурашкин, А. Ганеев, Н. Еникеев // Физика металлов и материаловедение. – 2012. – Т.113 – № 13.*
5. *Aging behavior and properties of ultrafine-grained aluminum alloys of al-mg-si system / E. Bobruk, M. Murashkin, V. Kazykhanov, R. Valiev // Reviews on Advanced Materials Science, 2012. – Vol. 31. – P. 14–34.*

6. Поляков А. В. Механическое поведение титана GRADE 4, полученного комбинацией РКУП-Conform и волочения [Электронный ресурс] / А. В. Поляков, И. В. Семенова // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 6. – С. 1–7. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/pdf/2012/6/453.pdf>

7. Мирошниченко С. В. Реверсивная закрытая прошивка с противодавлением / С. В. Мирошниченко, В. Г. Сынков, С. Г. Сынков. – *Кузнечно-штамповочное производство*, 2003. – № 6. – С. 38–41.

8. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: *Машиностроение*, 1982. – 184 с.

9. Грешнов В. М. Физико-феноменологическая модель пластичности металлов при сложном и циклическом нагружении с большими деформациями – основа расчета технологии холодной объемной штамповки / В. М. Грешнов, И. В. Пучкова // *Вестник УГАТУ*, 2009 – Т. 13 – № 1. – С. 146–153.

REFERENCES

1. *Distribution of Mechanical Properties by Volume in Titanium Billets Processed by Twist Extrusion* / A. Reshetov, A. Korshunov, A. Smolyakov, Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, Kaganova I. Morozov A. // *Materials Science Forum*, 2011. – V. 667–669. – R. 851–856.

2. Sabirov I. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: new horizons in development / I. Sabirov, M. Murashkin, R. Valiev // *Materials Science and Engineering A*, 2013. – №. 560. – P. 1–24.

3. *Mehanicheskie svojstva titanovogo splava Ti-6Al-4V ELI после RKUP i kompleksnoj termomehanicheskoj obrabotki* // A. I. Korshunov, A. A. Smoljakov, T. N. Kravchenko, I. V. Korotchenkova, I. I. Kaganova // *Fizika i tehnika vysokih davlenij*, 2012. – Т. 22, № 4 – С. 103–110.

4. *Sverhprochnost' nanostrukturnyh metallov i splavov, poluchennyh intensivnoj plasticheskoj de-formaciej* / R. Valiev, M. Murashkin, A. Ganeev, N. Enikeev // *Fizika metallov i materialovedenie*. – 2012. – Т.113 – № 13.

5. *Aging behavior and properties of ultrafine-grained aluminum alloys of al-mg-si system* / E. Bobruk, M. Murashkin, V. Kazykhanov, R. Valiev // *Reviews on Advanced Materials Science*, 2012. – Vol. 31. – P. 14–34.

6. Poljakov A. V. *Mehanicheskoe povedenie titana GRADE 4, poluchennogo kombinaciej RKUP-Sonform i volochenija* [Elektronnyj resurs] / A. V. Poljakov, I. V. Semenova // *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. – 2012. – № 6. – С. 1–7. – Rezhim dostupa : <http://www.science-education.ru/pdf/2012/6/453.pdf>

7. Miroshnichenko S. V. *Reversivnaja zakrytaja proshivka s protivodavleniem* / S. V. Miroshnichenko, V. G. Synkov, S. G. Synkov. – *Kuznechno-shtampovочное производство*, 2003. – № 6. – С. 38–41.

8. Spiridonov A. A. *Planirovanie jeksperimenta pri issledovanii tehnologicheskikh processov* / A. A. Spiridonov. – М.: *Mashinostroenie*, 1982. – 184 с.

9. *Greshnov V. M. Fiziko-fenomenologicheskaja model' plastichnosti metallov pri slozhnom i ciklicheskom nagruzenii s bol'shimi deformacijami – osnova rascheta tehnologii holodnoj ob'emnoj shtampovki* / V. M. Greshnov, I. V. Puchkova // *Vestnik UGATU*, 2009 – Т. 13 – № 1. – С. 146–153.

Сынков В. Г. – д-р техн. наук КИИ ДонНТУ

Мирошниченко С. В. – науч. сотр. ДонФТИ

КИИ ДонНТУ – Красноармейский индустриальный институт ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Красноармейск.

ДонФТИ – Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, г. Донецк.

E-mail: vasyn41@mail.ru, svmiro@mail.ru