

УДК 539.374; 621.983

DOI: 10.30987/article_5d6518cd53cfc8.73541778

С.Н. Ларин, д.т.н.
(Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92),
В.А. Булычев, к.т.н.
(АО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения»
300034, Россия, г. Тула, ул. Демонстрации, 36)
E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Научно обоснованная технология обратного выдавливания изделий из анизотропных трубных заготовок*

Представлены результаты теоретического исследования операции обратного выдавливания толстостенной трубной заготовки, изготовленной из ортотропного материала, имеющего цилиндрическую анизотропию механических свойств. Проведена оценка силовых режимов и предельных возможностей операции обратного выдавливания анизотропных трубных заготовок.

Ключевые слова: обратное выдавливание; трубные заготовки; сила; напряжение; формоизменение.

S.N. Larin, Dr. Sc. Tech.
(Tula State University, 92, Lenin Avenue, Tula, 300012)
V.A. Bulychyov, Can. Sc. Tech.
(PC "Central Design Office of Device Manufacturing", 36, Demonstration Str., Tula, Russia, 300034)

Scientifically substantiated technology for reverse extrusion of products made of anisotropic tubular billets

The theoretical research results of the reverse extrusion of a heavy-walled tubular billet made of orthotropic material having a cylindrical anisotropy of stress-strain properties are presented. The assessment of force modes and limiting potentialities of the reverse extrusion of anisotropic tubular billets is carried out.

Keywords: reverse extrusion; tubular billets; force; stress; forming.

В различных конструкциях машин и механизмов широко используются детали, имеющие форму цилиндра с внутренней полостью. Изделия такой формы могут быть изготовлены операцией обратного выдавливания с использованием трубных заготовок [1–4]. Исходные полуфабрикаты обычно имеют анизотропию механических свойств, которая обусловлена режимами их изготовления. Анизотропия механических свойств может оказывать существенное влияние на протекание процессов обработки металлов давлением [4 – 8].

*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-48-710002 р_а и гранта администрации Тульской области ДС.

Моделирование процесса обратного выдавливания трубных цилиндрических заготовок [9 – 12] осуществляется для установившегося течения анизотропного упрочняющегося материала с использованием конического пуансона, имеющего угол конусности α , при степенях деформации $\epsilon = 1 - F_1 / F_0$, где F_0 и F_1 – площади поперечных сечений полой цилиндрической заготовки и полуфабриката соответственно (рис. 1).

Принимая, что исходная трубная заготовка имеет цилиндрическую анизотропию механических свойств (жесткопластическая), ее поведение поддается описанию условием пла-

$$F_{\theta}(\rho, z) = \frac{R_{\theta}(R_z + 2)\xi_{z_z} + (R_z + 2R_{\theta})\xi_{\rho\rho}}{3R_z};$$

$$F_{\rho}(\rho, z) = \frac{R_{\theta}(2R_z + 1)\xi_{s_0} + R_z(2R_{\theta} + 1)\xi_{z_z}}{3R_z};$$

$$F_{\rho z}(\rho, z) = \xi_{\rho z}.$$

Подстановкой соотношения (9) в уравнение равновесия (8), получаем

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \rho} - 2A \frac{\partial(\mu_i F_{\rho}(\rho, z))}{\partial \rho} + 2A_{\rho z} \frac{\partial(\mu_i F_{\rho z}(\rho, z))}{\partial z} + 2A\mu_i \frac{F_{\theta}(\rho, z) - F_{\rho}(\rho, z)}{\rho} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} - 2A \frac{\partial(\mu_i F_z(\rho, z))}{\partial z} + 2A_{\rho z} \frac{\partial(\mu_i F_{\rho z}(\rho, z))}{\partial \rho} + 2A_{\rho z} \frac{\mu_i F_{\rho z}(\rho, z)}{\rho} = 0. \quad (10)$$

Представив, полученные выше, зависимости в виде конечно-разностных соотношений и решив каждое из уравнений системы (10) относительно величины среднего напряжения, получим зависимости для нахождения уровня среднего напряжения σ_{mn} . Величины компонент напряжений σ_{ρ} , σ_{θ} , и $\tau_{\rho z}$ находятся из уравнений (9).

В качестве особенностей полученного решения по распределению напряжений в очаге деформации следует отметить, что в решении не учитываются граничные условия в виде напряжений на границах контакта пуансона и матрицы. Это обстоятельство обычно учитывается в рамках действия закона Кулона $\tau_{kM} = \mu_M \sigma_{nM}$ и $\tau_{kП} = \mu_{П} \sigma_{nП}$, где $\mu_{П}$ и μ_M – величины коэффициентов трения по поверхностям контакта с матрицей и пуансоном. Для оценки силовых параметров необходимо вести учет этих условий.

Величина осевой составляющей силы с учетом действия силы трения находится по соотношению:

$$P_z = P_{z0} + P_{z1} + P_{z2},$$

где $P_{z0} = 2\pi \int_{D_3/2-s_0}^{D_3/2} \sigma_z(\rho, \theta) \rho d\rho$; $P_{z1} = \pi D_3 \int_0^l \mu_M \sigma_{nM} dz$;

$$P_{z2} = \pi \int_0^l (2\rho + d\rho) \mu_{П} \sigma_{nП} dz;$$

$$\sigma_{nП} = \sigma_{\rho} \cos^2 \alpha + \sigma_z \sin^2 \alpha + \tau_{\rho z} \sin 2\alpha.$$

Среднее значение осевого напряжения σ_z вычисляется по выражению:

$$\sigma_z = P / [\pi(D_3 - s_0)s_0]. \quad (11)$$

Приведенные выражения можно использовать для определения кинематики течения материала заготовки, напряженного и деформированного состояний, силовых характеристик и предельных возможностей процесса обратного выдавливания полых осесимметричных заготовок из анизотропных материалов.

На рис. 2 показаны графики зависимости относительной величины силы $\bar{P} = P / [\pi(D_3 - s_0)s_0\sigma_{i0}]$ от угла наклона рабочей поверхности пуансона α при реализации процесса обратного выдавливания трубных полуфабрикатов, изготовленных из стали 08кп.

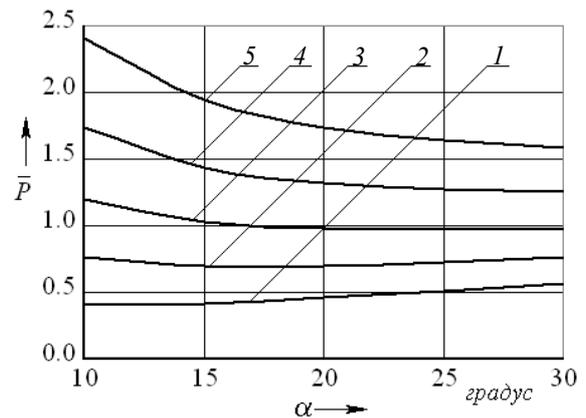


Рис. 2. Зависимость относительной силы P от угла конусности пуансона α (сталь 08кп):
1 – $\epsilon = 0,1$; 2 – $\epsilon = 0,2$; 3 – $\epsilon = 0,3$; 4 – $\epsilon = 0,4$; 5 – $\epsilon = 0,5$

Значения механических характеристик для исследуемых материалов приведены в табл. 1 [3]. Расчеты выполнялись при $s_0 = 20$ мм; $D_3 = 100$ мм; $\mu_{П} = 0,1$; $\mu_M = 0,05$.

При рассмотрении графических зависимостей и результатов моделирования видно, что при увеличении степени деформации ϵ относительное значение силы P также увеличивается. И чем интенсивнее рост, тем в большей степени увеличивается степень деформации ϵ .

Выявлено наличие оптимальных углов конусности пуансона в диапазоне 10... 25°, соответствующих минимальному значению силы операции. Значение оптимального угла конусности пуансона α с ростом степени деформации ϵ стремится в область больших значений.

1. Механические характеристики исследуемых материалов

Материал	σ_{e0} , МПа	A , МПа	n	R_x	R_y	R_{zx}	Ω	U	a_0	a_1	a_2
Сталь 10	268,66	1,226	0,478	0,817	0,783	2,999	1,791	-0,946	0,471	0,169	0,143
Латунь Л63	214,94	5,199	0,575	0,666	0,750	2,479	4,64	-0,769	0,793	-0,279	-0,246
Алюминиевый сплав АМг6М	29,20	2,368	0,440	0,67	0,540	2,805	2,148	-1,230	0,417	0,217	0,338

На рис. 3 приведены графики построения относительного значения силы операции \bar{P} в зависимости от коэффициента трения на пуансоне ($\mu_{П}/\mu_{М}$) при заданном коэффициенте трения на матрице ($\mu_{М} = 0,05$) и угле конусности на пуансоне $\alpha = 20$.

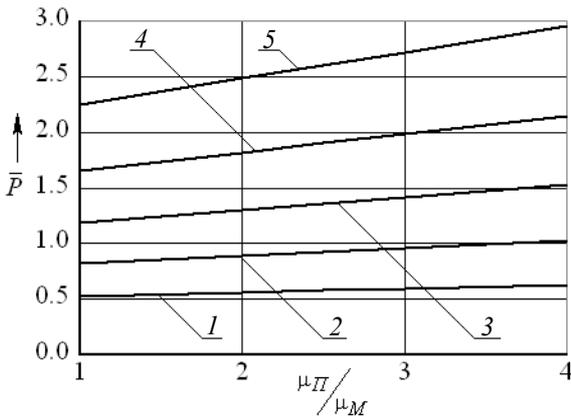


Рис. 3. Зависимости изменения \bar{P} от $\mu_{П}/\mu_{М}$ (латунь Л63):
 1 – $\epsilon = 0,1$; 2 – $\epsilon = 0,2$; 3 – $\epsilon = 0,3$; 4 – $\epsilon = 0,4$; 5 – $\epsilon = 0,5$

Оценка результатов исследования показывает, что условия трения в контактной зоне пуансона существенно влияют на относительное значение силы процесса \bar{P} . При увеличении коэффициента трения на пуансоне $\mu_{П}$ (при $\mu_{М} = 0,05$) числовые значения относительной силы \bar{P} возрастают. Это явление проявляется значительно сильнее при меньших углах конусности на пуансоне α и ростом значений степени деформации ϵ . При значении угла конусности на пуансоне $\alpha = 10^\circ$ ($\epsilon = 0,3$) рост коэффициента трения на пуансоне в 4 раза, по сравнению с уровнем коэффициента трения на матрице, ведет к скачку относительного значения силы операции \bar{P} более чем 2 раза. При угле конусности на пуансоне $\alpha = 30^\circ$, рост коэффициента трения на контактной границе пуансона – к минимальному (около 10 %) изменению относительного значения силы \bar{P} .

Показано, что при уменьшении отношения D/s от 20 до 5 происходит рост относительного значения силы \bar{P} на 35 % при неиз-

менных остальных параметрах операции.

Приведенные результаты исследований качественно подтверждаются экспериментальными результатами [3].

Оценка предельных возможностей формоизменения происходила из условий, что максимальные значения осевого напряжения $|\sigma_z|$, передающихся на стенку полуфабриката, не должны превышать предельного значения напряжения σ_{znp} [3]:

$$|\sigma_z| \leq \sigma_{znp}; \quad \sigma_{znp} = \sigma_{sz} f(\alpha);$$

$$f(\alpha) = 1,47 - 0,131\alpha, \quad (12)$$

допустимая степень использования ресурса пластичности [5 – 7]

$$\omega_i = \int_0^{\epsilon_i} \frac{d\epsilon_i}{\epsilon_{inp}} \leq \chi, \quad (13)$$

а так же по условиям устойчивости трубных заготовок из анизотропных материалов в виде появления складок [8], полученных на базе статической оценки критерия устойчивости,

$$\sigma_{zкр} \leq |\sigma_z|; \quad \sigma_{zкр} = E_k \left[B_1 \frac{\pi^2 s^2}{3h^2} + B_2 \frac{h^2}{4\pi^2 R_{cp}^2} \right], \quad (14)$$

где σ_{sz} – сопротивление материала пластическому формоизменению при заданном значении изменения исходной толщины стенки полой цилиндрической заготовки; $f(\alpha)$ – функциональная связь, определяемая из экспериментальных исследований и имеющая прямую зависимость от угла конусности на пуансоне α ;

$$\sigma'_{sz} = \sqrt{\frac{2 R_z + R_z R_\theta + R_\theta}{3 R_\theta (R_z + 1)}} \sigma_i;$$

$\epsilon_{i np}$ – предельная интенсивность деформации; R_{cp} – радиус срединной поверхности исходного полуфабриката; E_k – модуль упрочнения

касательный; $E_k = \frac{d\sigma_i}{d\epsilon_i} = Bn C^{n-1} \epsilon_z^{n-1}$;

h_0, h – начальное и текущее значения высоты полого цилиндрического полуфабриката;

s_0, s – начальная и текущая толщина полого цилиндрического полуфабриката; $\epsilon_z = \ln(h_0/h)$;

$h = h_0 / e^{\epsilon_z}$; $s = s_0 (h_0 / h)$; константы материала:

$$B_1 = \frac{2}{3} \frac{(R_z + R_z R_0 + R_0)}{R_0} \frac{(1 + R_0)}{R_0 R_z + 1 + R_0};$$

$$B_2 = \frac{2}{3} \frac{(R_z + R_z R_0 + R_0)(1 + R_0)}{R_0(R_0 R_x + 1 + R_0)} \frac{(2R_z + 1)R_0}{(2R_0 + 1)R_z};$$

$$C = \sqrt{\frac{2(R_z + R_0 + R_z R_0)}{3}} \frac{1}{R_0^{1/2}} \frac{(R_z R_0 + R_0^2 + 2R_0 + 1 + R_z^3)^{1/2}}{1 + R_0 + R_z}.$$

До начала деформации повреждаемость $\omega_i = 0$, а к моменту разрушения ($t = t_p$) уровень повреждаемости достигает $\omega_i = \chi = 1$.

Значение предельной интенсивности деформации определяется из выражения

$$\varepsilon_{inp} = \Omega \exp\left(U \frac{\sigma}{\sigma_i}\right) (a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos \beta + a_3 \cos \gamma), \quad (15)$$

где Ω , U , a_0 , a_1 , a_2 и a_3 – константы для материалов, которые определяются в зависимости от рода материала в соответствии с работами В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова и рассчитываются из экспериментальных данных по растяжению образцов в условиях плоского напряженного состояния в зависимости от исходной анизотропии механических свойств ортотропного тела; α , β , γ – углы между первыми главными осями напряжений и главными осями анизотропии; σ – среднее напряжение; $\sigma = (\sigma_z + \sigma_\theta + \sigma_r)/3$.

В зависимости от необходимых эксплуатационных характеристик или последующей обработки получаемой детали величина повреждаемости не должна превышать значения χ . При назначении величины степени деформации в процессе проведения операции методами пластического формоизменения необходимо обращать внимание на рекомендации по степеням использования запаса пластичности В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова, согласно которым для наиболее ответственных изделий, функционирующих и подвергающихся после формоизменения термообработке (отжигу или закалке), допустимым значением величины степени использования ресурса пластичности необходимо назначать $\chi = 0,25$, а для неответственных изделий допустимой степенью использования ресурса пластичности можно принять $\chi = 0,65$ [5 – 7].

Для приведенных неравенств (12), (13) и (14) нет возможности их решения в явном виде относительно предельной степени деформации $\varepsilon_{пр}$. В связи с этим зависимость предельной степени деформации от различных

технологических параметров операции обратного выдавливания толстостенных полых цилиндрических заготовок из анизотропных материалов устанавливается путем численных расчетов.

Предельная степень деформации $\varepsilon_{пр}$ рассчитывалась в зависимости от угла конусности пуансона α , коэффициента трения на пуансоне $\mu_{п} = (1...4)\mu_{м}$ при фиксированном коэффициенте трения на матрице $\mu_{м} = 0,05$ для отдельных материалов, механические характеристики которых показаны в табл. 1 [3].

Полученные графики изменения предельной степени деформации $\varepsilon_{пр}$, рассчитанные по формулам (12), (13) и (14), при варьировании угла конусности на пуансоне α для стали 08кп и латуни Л63 приведены на рис. 4.

На графике (см. рис. 4) кривая линия 1 соответствует величине $\varepsilon_{пр}$, рассчитанной по максимальному значению осевого напряжения σ_z , реализующегося в стенке полый цилиндрической заготовки (12); кривые 2 и 3 соответствуют значениям $\varepsilon_{пр}$, рассчитанным по степени использования запаса пластичности (13) при $\chi = 0,25$ и $\chi = 0,65$ соответственно; по кривой 4 формоизменение ограничивается потерей устойчивости трубной заготовки из анизотропных материалов в виде складкообразования (14) при $\varepsilon_z = 0,02$, $h = 200$ мм. Расчеты выполнялись при следующих фиксированных значениях: $\mu_{п} = 0,1$; $\mu_{м} = 0,05$; $s_0 = 20$ мм; $D_s = 100$ мм.

При рассмотрении графических зависимостей и результатов расчета видно, что с увеличением угла конусности на пуансоне α величина предельной степени деформации $\varepsilon_{пр}$, рассчитанная по максимальному значению осевого напряжения σ_z , действующего в стенке полый цилиндрической заготовки (12), существенно увеличивается. Показано, что рекомендуемые степени деформации $\varepsilon_{пр}$, определенные по степени использования запаса пластичности, при уменьшении угла конусности на пуансоне α увеличиваются.

Из рис. 4 видно, что предельные возможности формоизменения при реализации процесса

обратного выдавливания заготовки из анизотропного материала могут быть ограничены как максимальным значением осевого напряжения σ_z , действующего в стенке, так и допустимым уровнем накопленных микроповреждений (см. рис. 4, б). Это обстоятельство зависит от таких технологических параметров как угол конусности на пуансоне, коэффициент трения на контактных поверхностях матрицы и пуансона. Полученные теоретические результаты, качественно согласуются с экспериментальными данными, представленными в работе [3].

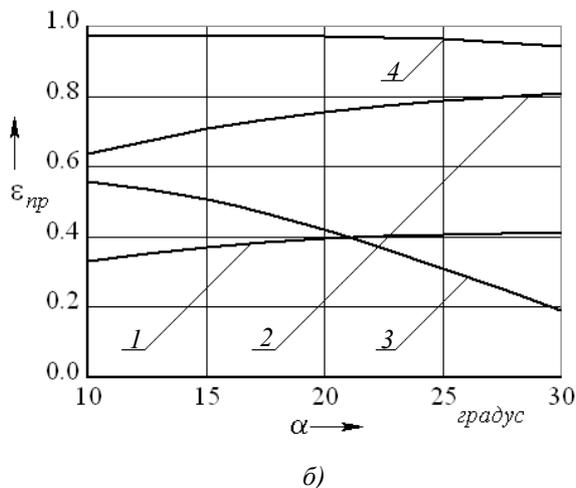
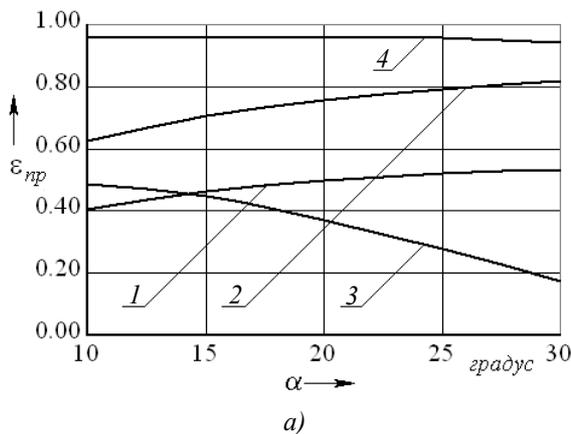


Рис. 4. Зависимость предельной степени деформации $\epsilon_{пр}$ от угла конусности на пуансоне α : а — сталь 08кп; б — латунь Л63

Проведена оценка неоднородности интенсивности деформации $\delta_\epsilon = (\epsilon_{i \max} - \epsilon_{i \min}) / \epsilon_{i \min}$ и сопротивления материала пластическому формоизменению $\delta_\sigma = (\sigma_{i \max} - \sigma_{i \min}) / \sigma_{i \min}$ в стенке осесимметричного полуфабриката, где $\epsilon_{i \max}$, $\epsilon_{i \min}$ и $\sigma_{i \max}$, $\sigma_{i \min}$ — максимальные и минимальные величины интенсивности пластической деформации и напряжения по толщине в стенке детали соответственно.

Анализ результатов расчетов показал, что

уровень неоднородности интенсивности деформации σ_ϵ и величина неоднородности сопротивления материала пластическому деформированию δ_σ в стенке изделия с уменьшением угла конусности на пуансоне α и ростом степени деформации ϵ снижается. Это указывает на более благоприятные условия формирования механической структуры в стенке получаемой детали. Рост угла конусности матрицы от 6° до 18° способствует увеличению неоднородности интенсивности деформации по толщине изделия: при $\epsilon = 0,5$ — в 3 раза; при $\epsilon = 0,1$ — в 1,5 раза; и росту уровня неоднородности сопротивления материала пластической деформации: при $\epsilon = 0,5$ — в 3 раза; при $\epsilon = 0,1$ — в 2 раза.

С целью определения величины степени деформации и угла конусности на пуансоне, способствующих надежному протеканию процесса, проводились экспериментальные работы по выдавливанию и осадке заготовок длиной $h_0 = 200$ мм, изготовленных из калиброванной холоднокатаной трубы $\varnothing 121$ мм и толщиной стенки 6 мм из стали 10. Заданы необходимые условия для устойчивого протекания процесса обратного выдавливания, реализуемого в рамках исследованных технологических параметров при $\epsilon \leq 0,35$ и углах конусности на пуансоне $\alpha = 10 \dots 30^\circ$. Сопоставление полученных теоретических результатов с экспериментальными данными по силовым режимам операции обратного выдавливания указывает на их удовлетворительное совпадение (расхождение не превышает 10...15 %).

Приведенные соотношения и полученные результаты теоретических исследований предельных возможностей формоизменения могут использоваться для разработки новых технологических процессов обратного выдавливания полых цилиндрических заготовок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яковлев, С.П. Штамповка анизотропных заготовок / С.П. Яковлев, В.Д. Кухарь. — М.: Машиностроение, 1986. — 136 с.
2. Гречников, Ф.В. Деформирование анизотропных материалов. — М.: Машиностроение, 1998. — 446 с.
3. Яковлев, С.П. Обработка давлением анизотропных материалов / С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, В.А. Андрейченко. — Кишинев: Квант, 1997. — 332 с.
4. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки. — М.: Машиностроение, 1968. — 283 с.
5. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением. — Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. — 836 с.
6. Богатов, А.А. Ресурс пластичности металлов при

обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, В.С. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.

7. **Богатов, А.А.** Механические свойства и модели разрушения металлов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.

8. **Чудин, В.Н., Пасынков, А.А.** Выдавливание элементов трубопроводов при вязкопластическом деформировании // Технология машиностроения. – 2018. – №10. – С. 20-24.

9. **Чудин, В.Н., Пасынков, А.А., Нуждин, Г.А.** Изотермическое выдавливание патрубка с фланцем при нестационарном деформировании // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – 2016. Вып. 1. – С. 10-16.

10. **Marcus Engelhardt, Norbert Grittner, Hermann von Senden genannt Haverkamp, Wilfried Reimche, Dirk Bormann, Friedrich-Wilhelm Bach** Extrusion of hybrid sheet metals // Journal of Materials Processing Technology. Volume 212, Issue 5, May 2012. Pp. 1030–1038.

11. **Wenxiong He, Erde Wang, Lianxi Hu, Yang Yu, Hongfei Sun** Effect of extrusion on microstructure and properties of a submicron crystalline Cu–5 wt.%Cr alloy // Journal of Materials Processing Technology. Volume 208, Issues 1–3, 21 November 2008, Pp. 205–210 .

12. **Nicolas Fiétiera, Yves Krähenbühl, Matthieu Vialardb** New methods for the fast simulations of the extrusion process of hot metals // Journal of Materials Processing Technology. Volume 209, Issue 5, 1 March 2009, Pp. 2244–2259.

13. **Дмитриев, А.М., Коробова, Н.В., Толмачев, Н.С.** Холодное выдавливание конических стаканов с цилиндрической полостью // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 1 (55). – С. 8-14.

REFERENCES

1. Yakovlev, S.P. *Anisotropic Blank Die Forming* / S.P. Yakovlev, V.D. Kukhar. – М.: Mechanical Engineering, 1986. – pp. 136.

2. Grechnikov, F.V. *Anisotropic Material Deformation*. – М.: Mechanical Engineering, 1998. – pp. 446.

3. Yakovlev, S.P. *Anisotropic Material Shaping* / S.P. Yakovlev, S.S. Yakovlev, V.A. Andreichenko. – Kishinyov: Quant, 1997. – pp. 332.

4. Popov, E.A. *Fundamentals of Theory of Stamping*. – М.: Mechanical Engineering, 1968. – pp. 283.

5. Kolmogorov, V.L. *Mechanics of Metal Shaping*. – Yekaterinburg: Urals State Technical University (UPI), 2001. – pp. 836.

6. Bogatov, A.A. *Metal Plasticity Life While Shaping* / A.A. Bogatov, O.I. Mizhiritsky, V.S. Smirnov. – М.: Metallurgy, 1984. – pp. 144.

7. Bogatov, A.A. Stress-Strain Properties and Models of Metal Destruction. – Yekaterinburg: SEI HVE USTU-UPI, 2002. – pp. 329.

8. Chudin, V.N., Pasyнков, A.A. Pipeline element shaping while viscous-plastic deformation // *Engineering Technique*. – 2018. – No.10. – pp. 20-24.

9. Chudin, V.N., Pasyнков, A.A., Nuzhdin, G.A. Isothermal shaping of branch pipe with flange at transient deformation // *TulaSU Proceedings. Engineering Science Series*. – 2016. Issue 1. – pp. 10-16.

10. Marcus Engelhardt, Norbert Grittner, Hermann von Senden genannt Haverkamp, Wilfried Reimche, Dirk Bormann, Friedrich-Wilhelm Bach Extrusion of hybrid sheet metals // Journal of Materials Processing Technology. Volume 212, Issue 5, May 2012. Pp. 1030–1038.

11. Wenxiong He, Erde Wang, Lianxi Hu, Yang Yu, Hongfei Sun Effect of extrusion on microstructure and properties of a submicron crystalline Cu–5 wt.%Cr alloy // Journal of Materials Processing Technology. Volume 208, Issues 1–3, 21 November 2008, Pp. 205–210 .

12. Nicolas Fiétiera, Yves Krähenbühl, Matthieu Vialardb New methods for the fast simulations of the extrusion process of hot metals // Journal of Materials Processing Technology. Volume 209, Issue 5, 1 March 2009, Pp. 2244–2259.

13. Dmitriev, A.M., Korobova, N.V., Tolmachyov, N.S. Cold shaping of conical cups with cylindrical chamber // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.1 (55). – 8-14.

Рецензент д.т.н. В.А. Дёмин

