

Научная статья
УДК 621.7.011
doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-12-19

Технологическое обеспечение и повышение качества заготовок, получаемых обработкой металла давлением

Виктор Алексеевич Дёмин¹, д.т.н.,
Сергей Николаевич Ларин², д.т.н.

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

² Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

¹ va_demin@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² mpt-tula@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Приведены результаты исследований геометрического качества изделий, получаемых в результате листовой штамповки. В частности показаны результирующие выражения, позволяющие количественно оценить повреждаемость и потерю устойчивости при деформировании металлических заготовок.

Ключевые слова: формоизменение, потеря устойчивости, повреждаемость, холодное деформирование

Благодарности: работа выполнена в рамках гранта РФФИ 20-08-00401.

Для цитирования: Дёмин В.А., Ларин С.Н. Технологическое обеспечение и повышение качества заготовок, получаемых обработкой металла давлением // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №8 (134). – С. 12-19. doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-12-19

Original article

Engineering support and improvement of the quality of workpieces obtained by pressure metal treatment

Viktor A. Demin¹, Dr. Sc. Tech.,
Sergei N. Larin², Dr. Sc. Tech.

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Tula State University, Tula, Russia

¹ va_demin@bk.ru

² mpt-tula@rambler.ru

Abstract. The article presents the analysis of the geometric quality of products obtained by sheet-metal forming. In particular, the resultant expressions are shown, making it possible to assay the damage and bifurcation within metal workpieces deformation.

Keywords: form alteration, bifurcation, damage rate, cold forming

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the RFBR grant 20-08-00401

For citation: Demin V.A., Larin S.N. Engineering support and improvement of the quality of workpieces obtained by pressure metal treatment. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.8 (133), pp. 12-19. doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-12-19

Если рассматривать проблему технологического обеспечения и повышения качества заготовок, получаемых обработкой металла давлением, то можно выделить три группы заготовок.

1. Прокат, который используется для различных отраслей машиностроения.
2. Прокат, который используют в качестве заготовок для последующей штамповки.
3. Отштампованные заготовки, которые используются в качестве заготовок для последующей обработки или являются уже готовыми деталями.

В данной статье основное внимание будет уделено заготовкам или деталям получаемым штамповкой.

Учитывая, что по ГОСТ 15467-79 термин качество продукции определяется как совокупность свойств продукции, обуславливающих её пригодность удовлетворять

определённые потребности в соответствии с её назначением. Рассмотрим отдельные примеры штампованных заготовок.

На ЗИЛе штамповали гайки из горячекатанной стали толщиной $12^{+0,5}_{-0,8}$ мм. После штамповки заготовки направляли на шлифовку и нарезали резьбу.

В процессе прокатки, за счет износа валков прокатного стана толщина листа постоянно увеличивается, поэтому либо необходимо шлифовать больше чем на 0,5 мм, либо не хватает металла на шлифовку, т.к. при смене валов прокатка идет с минимальными разменами по толщине. Это приводит к необходимости постоянно менять номинальную толщину заготовки.

Другим примером влияния толщины проката на качество получаемой детали является деталь, представленная на рис. 1.

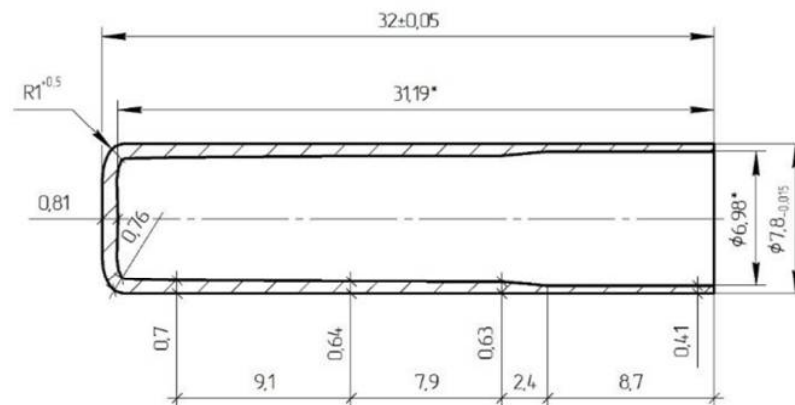


Рис. 1. Колпачок

Конструктором указан допуск на толщину всего 0,001 мм и если эти требования с трудом можно выполнить для стенок, то доньшко при вытяжке не деформируется и выполнить размер 0,81 не представляется возможным. Этот размер нужно получить при прокатке листа, что маловероятно.

С учетом появления деталей (заготовок) с повышенными требованиями к разнотолщинности рассмотрим, как меняется толщина заготовки при вытяжке. Известно, что во фланце толщина может увеличиваться на 20 %, у доньшка уменьшаться тоже на 20 %. Однако в справочной литературе отсутствует информация, по изменению толщины по периметру изделия.

Было проведено исследование вытяжки из заготовок круглой, восьмиугольной, шестиугольной и квадратной формы. Измерение толщины анализировали в опасном и характерном сечении, где опасное сечение –

сечение с максимальной деформацией, в котором происходит разрушение заготовки. Характерное сечение – сечение с максимальной разнотолщинностью.

Моделирование и экспериментальная проверка разнотолщинности осуществлялась на стали 08кп с характеристиками: предел текучести $\sigma_t - 205$ Н/мм²; временное сопротивление $\sigma_b - 340$ Н/мм²; относительное удлинение $\delta - 31\%$; толщина $s - 1$ и 2 мм.

Моделирование проводили в программе AutoForm, внося в нее параметры стали полученные из испытаний на растяжение.

В экспериментальном исследовании детали, полученные из металла толщиной 1 мм и 2 мм были разрезаны вдоль характерного сечения (где наблюдается наибольшая разнотолщинность) и перпендикулярно основанию с целью определения максимального утонения, рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Разрезанные детали для определения разнотолщинности:

а – по характерному сечению;
б – перпендикулярно основанию

Измерение толщины проводили с использованием метода сканирования деталей с последующей обработкой полученных изображений и измерения в программе AutoCAD, рис. 3.

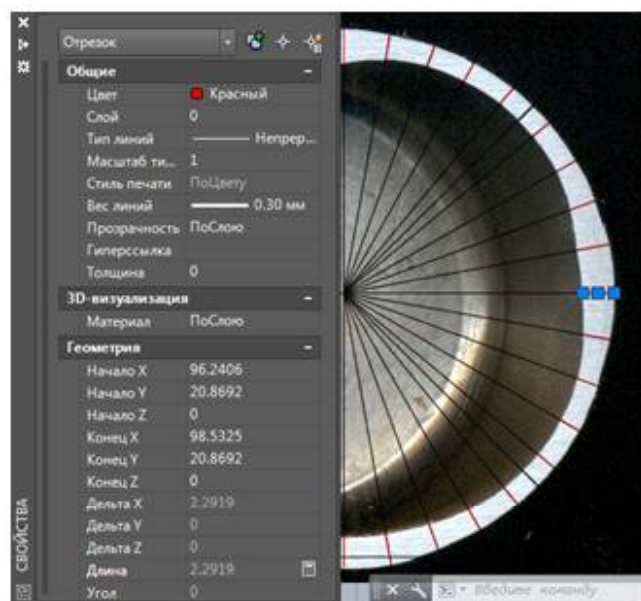


Рис. 3. Измерение детали в AutoCAD

Проверка предложенной методики измерения линейных величин проводилась на координатно-измерительной машине ARES 07.05.05 с точностью 3 мкм. Сравнение результатов показало, что расхождение полученных размеров не превышает 1 %.

Анализ результатов проводили по графикам, иллюстрирующим изменение толщины в характерном сечении для заготовок толщиной 1 и 2 мм, которые показаны на рис. 4 и рис. 5.

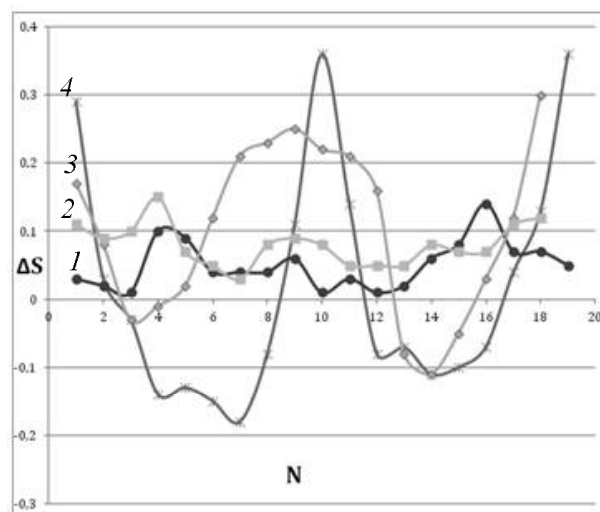


Рис. 4. Изменение толщины в характерном сечении для заготовки 1 мм:

1 – круглая заготовка моделирование;
2 – квадратная заготовка моделирование;
3 – круглая заготовка эксперимент;
4 – квадратная заготовка эксперимент

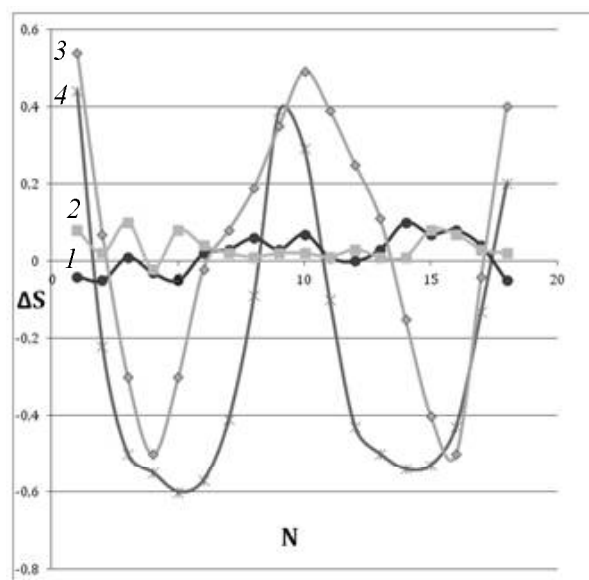


Рис. 5. Изменение толщины в характерном сечении для заготовки 2 мм:

1 – круглая заготовка моделирование;
2 – квадратная заготовка моделирование;
3 – круглая заготовка эксперимент;
4 – квадратная заготовка эксперимент

А также определено процентное отклонение от первоначальной толщины заготовки, результаты измерений показаны в табл. 1.

1. Процентное отклонение от первоначальной толщины заготовки

Заготовка		Моделирование		Эксперимент	
		max, %	min, %	max, %	min, %
S = 2	Круглая	5	1	5	2,5
	Квадратная	27	25	22	30
S = 1	Круглая	15	8	10	0
	Квадратная	25	11	36	18

Из рисунков видно, что изменения толщины, полученные теоретически и экспериментально различаются незначительно. Так для толщины в 1 мм в эксперименте получена разнотолщинность 0,5 мм, а теоретически – 0,35 мм. Для толщины в 2 мм в эксперименте получена разнотолщинность 1,0 мм, а теоретически – 0,9 мм.

Максимально возможная точность при вытяжке из круглой заготовки не превышает $1/10$, а при штамповке из квадратной заготовки размеры выходят за допуски ($1/14$, $1/15$) принятые для деталей, получаемых из листа.

Технологические процессы производства деталей и узлов техники ответственного назначения имеют основную задачу – обеспечение проектных тактико-технических характеристик изделий при оптимальных сроках освоения серийного производства.

Основной объем по металлоемкости в изделиях занимают корпусные изделия. В основном это оболочки различной геометрической формы (плоские; цилиндрические; сферические; ячеистые и т.д.), несущие нагрузку в процессе эксплуатации. Они должны иметь высокую удельную прочность, так как несут большую критическую нагрузку, и надежно работать на продольный изгиб и поперечное сжатие. Реализация эффективной технологии может быть обеспечена внедрением технологических методов обработки, построенных на совмещенных процессах деформирования на одной позиции.

В связи с этим важной является задача обеспечения качества получаемых деталей. Существуют различные виды потери устойчивости изделий при деформировании листовых заготовок. На рис. 6 представлены эскизы оболочек с потерей устойчивости.



Рис. 6. Потеря устойчивости при формоизменяющих операциях

На кафедре «Механика пластического формоизменения» Тульского государственного университета выполнялся ряд исследований по оценке предельных возможностей при деформировании металлических заготовок [1 – 5].

Предельные возможности формоизменения при холодной штамповке обычно определяются по величине максимального растягивающего напряжения, а также по

допустимой величине накопленных микрорезреждений. Для деталей ответственного назначения предельные возможности формоизменения могут быть ограничены различными видами потерей устойчивости заготовки. Предложены критерии шейкообразования анизотропного упрочняющегося материала при плоском напряженном состоянии из условия положительности добавочных нагрузок:

$$\frac{1}{z} = \frac{d\sigma_i}{\sigma_i d\varepsilon_i} > \frac{1}{2} \frac{\frac{dA_x}{A_x} - 2 \frac{dA_{xy}}{A_{xy}} + \frac{dA_y}{A_y}}{A_x - 2A_{xy} + A_y} + \frac{A_x - A_{xy}}{\sqrt{A_x - 2A_{xy} + A_y}};$$

$$A_x = a_x; \quad A_{xy} = a_{xy} \frac{R_y}{R_y + 1}; \quad A_y = a_y \left(\frac{R_y}{R_y + 1} \right)^2,$$

где σ_i – интенсивность напряжений; ε_i – интенсивность деформаций; R_y – коэффициент анизотропии; $A_y, A_{xy}, A_x, a_x, a_y$ – параметры, зависящие от характеристик материала.

Предложен критерий потери устойчивости трубной заготовки в виде образования складок на основе статического критерия устойчивости (рис. 7).

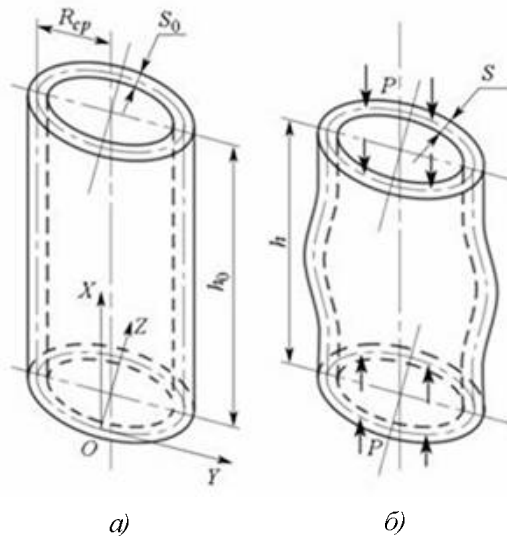


Рис. 7. Схема образования складок:

а – до деформирования; б – после потери устойчивости

$$\frac{h_0}{s_0} = \frac{2\pi^2 e^{3\varepsilon_x} R_{cp}}{\sqrt{3}} \sqrt{BE_k B_1} / \sqrt{[\sigma_{i0} + AC^n \varepsilon_x^n] 4\pi^2 R_{cp}^2 e^{2\varepsilon_x} - BE_k B_2 h_0^2}.$$

$$B_1 = \frac{2}{3} \frac{(R_x + R_x R_y + R_y)}{R_y} \frac{(1 + R_y)}{R_y R_x + 1 + R_y}; \quad B_2 = \frac{2}{3} \frac{(R_x + R_x R_y + R_y)(1 + R_y)}{R_y (R_y R_x + 1 + R_y)} \frac{(2R_x + 1)R_y}{(2R_y + 1)R_x},$$

$$\varepsilon_x = \ln \frac{h_0}{h}; \quad h = h_0 / e^{\varepsilon_x}; \quad s = s_0 \frac{h_0}{h}.$$

$$B = \sqrt{\frac{3}{2(R_x + R_y + R_x R_y)}} \left[\frac{R_x R_y^2 + R_y + 2R_y^2 + R_y^3 + R_x R_y}{(1 + R_y)^2} \right]^{1/2};$$

$$C = \sqrt{\frac{2(R_x + R_y + R_x R_y)}{3} \frac{(R_x R_y + R_y^2 + 2R_y + 1 + R_x^3)^{1/2}}{R_y^{1/2}(1 + R_y + R_x)}}$$

где R_{cp} , R_x , R_y – коэффициенты анизотропии; B_1 , B_2 – константы материала, определяемые в зависимости от рода материала; ε_x – логарифмическая деформация; h_0 , h – начальная и конечная высота заготовки; s_0 , s – начальная

и конечная толщина стенки заготовки; E_k – касательный модуль упрочнения.

Условие потери устойчивости кольцевой заготовки по критерию минимума полной потенциальной энергии (рис. 8).

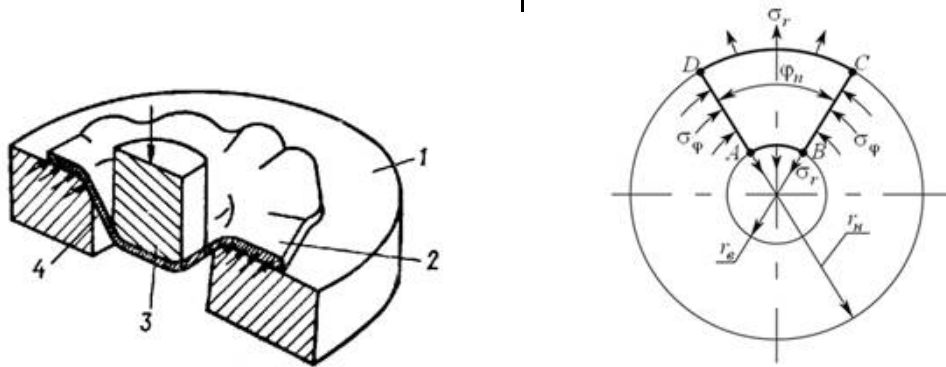


Рис. 8. Схема образования волнистости при вытяжке и элемент кольцевой пластины

$$\Delta \bar{I} = \frac{1}{2} E_p J \iint \left[\frac{1}{\mu g} (c_{22} \chi_r^2 - 2c_{12} \chi_r \chi_\varphi + c_{11} \chi_\varphi^2) + \frac{4}{\mu c_{33}} \chi_{r\varphi}^2 - (1-n) \frac{\chi_r^2}{\sigma_i^2} \right] r dr d\varphi +$$

$$+ \frac{1}{2} \iint \left[N_r \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + N_\varphi \left(\frac{\partial w}{r \partial \varphi} \right)^2 + 2T_{r\varphi} \frac{\partial w}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right] r dr d\varphi.$$

$$\chi_r = -\frac{\partial^2 w}{2}; \chi_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{r^2}; \chi_{r\varphi} = -\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \varphi}.$$

где N_r , N_φ , $T_{r\varphi}$ – нормальные и сдвигающие силы; χ_r , χ_φ , $\chi_{r\varphi}$ – приращения кривизны и кручения, соответственно.

Условие потери устойчивости конической оболочки в виде образования гофров на основе энергетического метода (рис. 9).

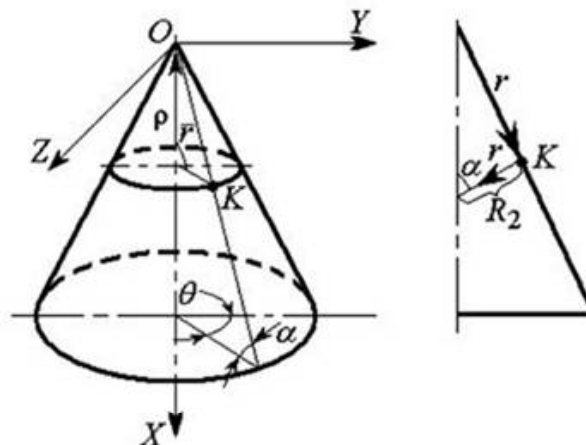


Рис. 9. Схема конической оболочки

$$\frac{1}{2} E_p J \iint \left[\frac{1}{\beta g} (C_{22} \chi_1^2 - 2C_{12} \chi_1 \chi_2 + C_{11} \chi_2^2) + \frac{4}{\beta C_{33}} \chi_3^2 - (1-n) \frac{\chi_2^2}{\sigma_i^2} \right] \times \cos \alpha \rho d\rho d\theta +$$

$$+ \frac{s_0}{2} \iint \left[\sigma_\rho \left(\frac{\partial w}{\partial \rho} \right)^2 + \sigma_\theta \left(\frac{1}{\rho \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 + 2\tau_{\rho\theta} \frac{\partial w}{\partial \rho} \frac{1}{\rho \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right] \times \cos \alpha \rho d\rho d\theta = 0.$$

$$C_{11} = 1 + \frac{1}{R_\rho}; \quad C_{12} = -1; \quad C_{22} = 1 + \frac{1}{R_\theta}; \quad C_{33} = \frac{2}{R_{\rho\theta}}; \quad \beta = \frac{3}{2 \left(1 + \frac{1}{R_\rho} + \frac{1}{R_\theta} \right)}.$$

$$\chi = \sigma_\rho \chi_1 + \sigma_\theta \chi_2 + 2\tau_{\rho\theta} \chi_3;$$

$$\chi_1 = -\frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2}; \quad \chi_2 = -\frac{1}{\rho^2 \cos^2 \alpha} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho}; \quad \chi_3 = -\frac{1}{\rho \cos \alpha} \frac{\partial^2 w}{\partial \rho \partial \theta} + \frac{1}{\rho^2 \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta}.$$

где $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \tau_{\rho\theta}$ – радиальное, окружное и касательные напряжения; R_ρ, R_θ – коэффициенты анизотропии, w – функция прогиба; ρ, θ – главные направления напряжений и скоростей деформации.

Аналогичным образом, как и для случая пластического деформирования, предложены условия устойчивости трубной и кольцевой заготовок из анизотропного материала в виде образования складок и гофр при кратковременной ползучести при плоском напряженном состоянии листовой заготовки ($\sigma_z = 0$).

При использовании данных критериев и учете их при разработке технологий формоиз-

менения возможно значительно повысить качество изделий и эффективность их изготовления. С учетом полученных разработок новые технологические процессы могут обеспечить сокращение сроков подготовки производства в 1,1 – 1,2 раза и более; достижение высоких степеней деформации (до 60 %) без промежуточной термической обработки; снижение трудоемкости производства в 1,1 – 1,3 раза.

На рис. 10 представлены фотографии изделий полученных методами глубокой вытяжки технологиями, учитывающими предложенные критерии для оценки качественных характеристик процесса.



Рис. 10. Изделия, полученные методами глубокой вытяжки

Таким образом, разработанное научное обоснование назначения режимов деформирования позволят создать комплексы наукоемких конкурентоспособных технологических процессов изготовления деталей и узлов изделий оборонной и ракетно-космической техники, обеспечивающих повышение эффективности их производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1968. – 283 с.
2. Богатов, А.А., Мижирицкий, О.И., Смирнов, С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
3. Сторожев, М.В., Попов, Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.06.2022; одобрена после рецензирования 13.06.2022; принята к публикации 17.06.2022.

The article was submitted 06.06.2022; approved after reviewing 13.06.2022; assepted for publication 17.06.2022.

4. Нечепуренко, Ю.Г., Яковлев, С.П., Яковлев, С.С. Глубокая вытяжка цилиндрических изделий из анизотропного материала. – Тула: Тул-ГУ, 2000. – 195 с.

5. Теория обработки металлов давлением / под ред. Голенкова В.А. и др. / М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.

REFERENCES

1. Popov E.A. Fundamentals of the theory of sheet stamping. M.: Mechanical Engineering, 1968. 283 p.

2. Bogatov A.A., Mizhiritsky O.I., Smirnov S.V. Resource of plasticity of metals in pressure treatment. M.: Metallurgy, 1984. 144 p.

3. Storozhev M.V., Popov E.A. Theory of metal processing by pressure. M.: Mechanical Engineering, 1977. 423 p.

4. Nечepurenko Yu.G., Yakovlev S.P., Yakovlev S.S. Deep drawing of cylindrical products made of anisotropic material. Tula: TulSU, 2000. 195 p.

5. Theory of metal processing by pressure / ed . Golenkova V.A. et al. / M. Mechanical Engineering, 2009. 442 p.

