

# Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением

УДК 621.72.014

DOI: 10.14529/met190307

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МАЛООТХОДНОЙ БЕЗУКЛОННОЙ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОЙ СХЕМЫ ДЕФОРМАЦИИ «РАЗДАЧА-ВЫДАВЛИВАНИЕ»

**В.А. Иванов<sup>1</sup>, С.С. Стругов<sup>1</sup>, А.А. Авраменко<sup>2</sup>, М.Д. Таркаленко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

В данной работе представлено продолжение темы по разработке технологии малоотходной безуклонной горячей объемной штамповки осесимметричных деталей, в частности воротниковых фланцев, на основе схемы деформации «раздача-выдавливание». В настоящей статье приведен вывод общего вида функции энергосиловых параметров процесса на основе предыдущих работ, заключающихся в определении граничных условий и определения кинематических характеристик операции. Исходя из условий и схемы процесса деформации, принимаем торцовую систему координат. Вывод общего вида функции осуществлен по методике А.Л. Воронцова. Так как процесс осесимметричный, то рассматриваем плоское напряженное состояние очага деформации. Приведенная математическая модель разработана с целью верхней оценки усилия деформации, что связано с необходимостью проведения технологических расчетов на производстве. Также в данной работе представлено моделирование по новой схеме деформирования с целью качественной оценки пластического течения материала. По результатам моделирования подтверждена практическая применимость метода на практике, что подтверждает предыдущие предположения. Также рассмотрен график зависимости усилия штамповки от перемещения. В данном конкретном случае график имеет куполообразную форму, что обусловлено изменением площади контакта рабочего инструмента с заготовкой. С целью получения более достоверной картины процесса деформации проведен лабораторный эксперимент на базе лаборатории кафедры ПиМОМД на гидравлической установке ВЖМ-2М, материал – свинец марки С2С ГОСТ 3778–98. Гидравлическая установка ВЖМ-2М отличается удобством применения и приемлемым усилием. Данный эксперимент дал положительные результаты, подтвердив тем самым моделирование при помощи метода конечных элементов. Для полноценной проверки корректности математической модели планируется проведение неполнофакторного эксперимента. Разработан пакет конструкторской и технологической документации, на данном этапе проекта оснастка находится на изготовлении в НОЦ «Машиностроение». Также планируется освоение опытной партии фланцев на ООО «ЧТЗ-УралТрак» на типоразмере с диаметром условного прохода D50.

*Ключевые слова:* энергосиловые параметры, математическое моделирование, раздача-выдавливание, воротниковые фланцы.

### Введение

В связи с тенденциями развития экономики Российской Федерации, основанной на добыче полезных ископаемых и их частичной переработке, необходимо строительство трубопроводов и инженерных сетей. Одним из ключевых составляющих трубопровода, обеспечивающих прочное и герметичное соединение, является фланец [1].

К фланцам предъявляются повышенные требования прочности и надежности, осно-

ванные на режимах работы в условиях высоких давлений и температур [2]. Наиболее производительным методом получения заготовок для дальнейшей обработки фланцев является горячая объемная штамповка (далее ГОШ) [3–5]. ГОШ обеспечивает равномерную внутреннюю структуру, направление волокна и требуемую прочность. Наиболее распространена штамповка воротниковых фланцев на пневматических молотах из-за их доступности и достаточно простого изготовления

оснастки, которая формирует стоимость поковки. Однако при применении штамповки на молотах при проектировке поковки необходимо назначать уклоны (напуски) величиной  $7^\circ$  на внешние поверхности и  $10^\circ$  – на внутренние [6]. Это приводит к увеличению массы поковки, а следовательно, и к увеличению стоимости.

Известен способ безуклонной штамповки воротниковых фланцев, заключающийся в раздаче и частичном выдавливании стенок воротника в обрезном штампе [7]. В свою очередь в молотовом штампе фланец штампуются с уклонами в тело заготовки. Однако данный способ имеет ряд недостатков, связанный с нарушением геометрии поковки в связи с достаточно высоким усилием выдавливания и раздачи, что приводит к необходимости дальнейшей правки. В данной статье предлагается изменить последовательность операций, а именно: проводить обрезку облоя последним этапом и увеличить степень выдавливания.

Одной из самых главных задач при исследовании процесса является составление рекомендаций по его промышленному применению. Однако для этого необходимо определить кинематические и энергосиловые параметры процесса в очаге пластической деформации [8]. В рамках продолжения исследования по малоотходной безуклонной горячей объемной штамповке предлагается определить вид функции для определения энергосиловых и кинематических параметров процесса в очаге деформации.

Данный вид параметров является важнейшим показателем операции для выбора вида и типа оборудования. На данном уровне развития теории пластичности существует значительное количество теорий и методик построения математических моделей для определения параметров процесса. Однако большинство этих подходов имеют адекватные оценки в частных случаях и при переходе к более общим видам задач имеют значительное отклонение в результатах [9–12]. Наиболее универсальный и точный метод для осесимметричных задач, предложенный за последнее время, составлен А.Л. Воронцовым [13]. Рассмотрим схему процесса малоотходной безуклонной горячей объемной штамповки на основе комбинированной схемы нагружения «раздача-выдавливание» на рис. 1, где 1 – матрица, 2 – нож, 3 – пуансон, 4 – поковка, 5 – облой.

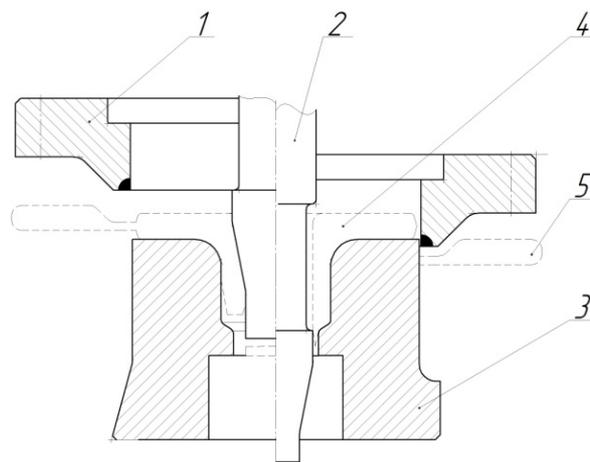


Рис. 1. Схема процесса «Раздача-выдавливание»

Применим данный метод для рассмотрения напряженно деформируемого состояния в очаге пластической деформации, а именно в месте контакта ножа и поковки, а так же поковки и пуансон-матрицы.

### Методы и результаты исследований

В настоящей статье использовалась методика А.Л. Воронцова для определения энергосиловых и кинематических параметров процесса. Суть данного метода заключается в определении вида искомой функции по граничным условиям задачи.

Продолжим расчет напряженно-деформируемого напряжения процесса штамповки, пользуясь данными статьи [8].

В соответствии с тем, что  $\xi_\theta = 0$ , принимаем данное напряженно-деформируемое состояние плоским и переходим к полярным координатам  $\rho$  и  $\varphi$  с центром в точке  $O$ . Следовательно, система уравнений равновесия будет выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\sigma_\rho + \sigma_\varphi}{\rho} = 0; \right. \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \varphi} + 2\tau_{\rho\varphi} = 0. \right. \quad (2)$$

Подставив выражение (20) из работы [8] в равенство (2), получим выражение следующего вида

$$\frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} + 2f_2(\varphi) = 0.$$

Тем самым получим:

$$\begin{aligned} \partial \sigma_\varphi &= -2f_2(\varphi) \partial \varphi; \\ \sigma_\varphi &= -2f_2(\varphi) \partial \varphi + f(\rho). \end{aligned} \quad (3)$$

Для получения верхней оценки используем упрощенное условие пластичности:

$$\sigma_p - \sigma_\phi = \beta\sigma_s; \quad (4)$$

$$\sigma_p = \beta\sigma_s + \sigma_\phi. \quad (5)$$

Преобразуем уравнение (2) с учетом преобразования (3), получим

$$\frac{\rho \partial f(\rho)}{\partial \rho} + \beta\sigma_s = -\frac{2f_2(\phi)}{\partial \phi}. \quad (6)$$

Так как левая часть зависима от  $\rho$ , а правая от  $\phi$ , то, приравняв их к некоторой величине  $C$ , получим неравенства:

$$\frac{\rho \partial f(\rho)}{\partial \rho} + \beta\sigma_s = C; \quad (7)$$

$$-\frac{\partial f_2(\phi)}{\partial \phi} = C. \quad (8)$$

Проинтегрируем:

$$f(\rho) = (C - \beta\sigma_s) \ln \rho + C_1; \quad (9)$$

$$f_2(\phi) = -C_\phi + C_2. \quad (10)$$

Из равенства (10) получим, что

$$\tau_{\rho\phi} = -C_\phi + C_2.$$

Произвольные переменные  $C$  и  $C_2$  находим из граничных условий  $\tau_{\rho\phi} = \beta\mu\sigma_s$  при  $\phi = \alpha$ , где  $\mu$  – коэффициент трения по ножу,  $\alpha$  – угол наклона ножа.

Находим произвольные постоянные из граничных условий следующим образом:

$$\tau_{\rho\phi} = \beta\mu\sigma_s \text{ при } \phi = \alpha;$$

$$\tau_{\rho\phi} = -\beta\mu_1\sigma_s \text{ при } \phi = -\gamma,$$

где  $\mu$  – коэффициент трения по ножу;  $\mu_1$  – коэффициент трения по пуансон-матрице.

Следовательно, получим следующие равенства:

$$C = -\beta\sigma_s \frac{\mu + \mu_1}{\alpha + \gamma}; \quad (11)$$

$$C_2 = \beta\sigma_s \frac{\mu\gamma + \mu_1\alpha}{\alpha + \gamma}. \quad (12)$$

С учетом равенств (11) и (12) получим следующий результат:

$$\begin{aligned} \sigma_\phi &= -2 \int (-C_\phi + C_2) d\phi + \ln \rho (\beta\sigma_s - C) + C_1 = \\ &= 2 \int (C_\phi + C_2) d\phi + \ln \rho (\beta\sigma_s - C) + C_1. \end{aligned} \quad (13)$$

Интегрируем:

$$\sigma_\phi = 2(C_\phi - C_2)\phi + \ln \rho (\beta\sigma_s - C) + C_1.$$

Проведем вероятностную оценку величины членов уравнения. В практике, как правило,  $\mu_1 = \mu$ . Однако следует обратить внима-

ние, что  $\alpha \neq \gamma$ . Примем сумму  $\alpha + \gamma = \theta$  (в ряде случаев данная сумма составляет  $16^\circ$ ).

$$C = -\beta\sigma_s \frac{2\mu}{\theta};$$

$$C_2 = \beta\sigma_s \frac{\mu(\gamma - \alpha)}{\theta}.$$

Так как разница  $\gamma - \alpha < 0,035$ , то в рамках целесообразности вычислений пренебрегаем переменной  $C_2$ .

$$-C_\phi + C_2 = -\beta\sigma_s \frac{2\mu}{\theta};$$

$$-C_\alpha + C_2 = -\beta\sigma_s \frac{2\mu}{\theta};$$

$$\theta(C_\alpha + C_2) = \beta\sigma_s 2\mu.$$

При  $\mu \approx 0,3$  выражение в конечном итоге примет вид

$$(C_\alpha + C_2) \leq 2,14\beta\sigma_s.$$

Так как данная величина  $(C_\alpha + C_2)$  составит лишь малую часть величины напряжения, то в целях упрощения вычислений ею можно пренебречь.

В результате упрощения выражение (13) принимает следующий вид

$$\sigma_\phi = \ln \rho (\beta\sigma_s - C) + C_1. \quad (14)$$

Подставим полученное уравнение (14) в равенство (5):

$$\sigma_p = \beta\sigma_s + \ln \rho (\beta\sigma_s - C) + C_1. \quad (15)$$

По исследованиям А.Л. Воронцова величина предельных касательных напряжений равна

$$\tau = 0,5\beta\sigma_s. \quad (16)$$

Проекция силы данных напряжений в зоне пластической деформации равна

$$P_{\text{тнм}} = \int_0^\alpha \tau \sin 2\pi(R_T + \alpha \sin \phi) ad\phi, \quad (17)$$

где  $ad\phi$  – ширина элементарного кольца, на котором рассматриваются касательные напряжения относительно горизонтали на угол  $\phi$ ;

$(R_T + \alpha \sin \phi)$  – радиус экспериментального кольца.

Интегрируем выражение (17) с учетом выражения (16):

$$\begin{aligned} P_{\text{тн}} &= \int_0^\alpha 0,5\beta\sigma_s \sin 2\pi(R_T + \alpha \sin \phi) ad\phi = \\ &= \int_0^\alpha \beta\sigma_s \sin \alpha\pi(R_T + \alpha \sin \phi) ad\phi. \end{aligned} \quad (18)$$

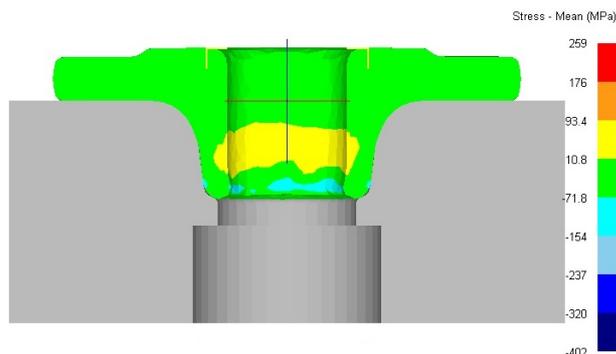


Рис. 2. Результаты моделирования на базе DEFORM 3D

Также в рамках данной работы проведено моделирование на базе программного комплекса DEFORM 3D в лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ для качественной оценки пластической деформации и получения значения усилия штамповки. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

График зависимости перемещения от усилия по результатам моделирования представлен на рис. 3.

В рамках исследования также проведен эксперимент для визуальной оценки пластического формоизменения для снижения риска при внедрении технологии для промышленного использования. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 4.



Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований

Эксперимент проводился на базе лаборатории кафедры ПиМОМД на гидравлической установке ВЖМ-2М, материал – свинец марки С2С ГОСТ 3778–98 [14, 15]. Для полноценной проверки корректности математической модели планируется проведение неполнофак-

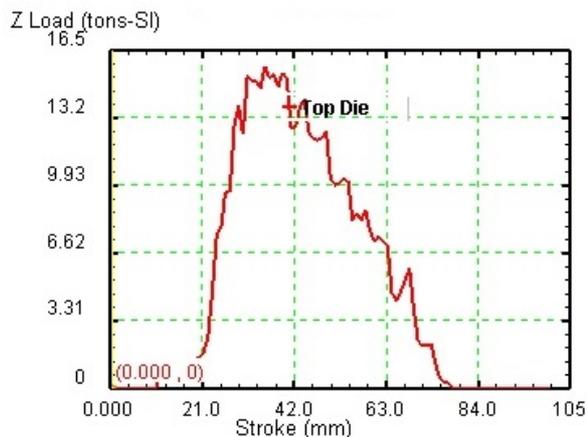


Рис. 3. График зависимости усилия от перемещения ножа

торного эксперимента. Оснастка находится на стадии изготовления.

### Обсуждение

По результатам моделирования процесса безуклонной штамповки методом «раздача-выдавливание» (см. рис. 2) можно сделать выводы о применимости процесса на практике. При пластическом течении материала не наблюдается возможности образования пережима, течение материала равномерное, оформление радиусов поковки в полости пуансон-матрицы приемлемое.

График, приведенный на рис. 3, имеет куполообразную форму, это объясняется непостоянством контактной площади фланца и ножа. Однако максимальное усилие вытяжки-раздачи составляет порядка 15 тс, что незначительно, так как процессы вырубki, вытяжки-раздачи и обрезки облоя проводятся последовательно. В производственных условиях обычно установка обрезного пресса производится в зависимости от мощности основного оборудования – молота – и составляет примерно 30–40 %. Фланец, рассматриваемый в данной статье, спроектирован для молота с МПЧ (масса падающей части) 2 тонны, стоящего в линии с прессом LKO 185, усилием 185 тс. Этого более чем достаточно для внедрения технологии.

Математическая модель, выполненная по методике А.Л. Воронцова, нуждается в экспериментальной проверке для анализа теоретических данных и возможности применения данной модели в производственной практике. Рекомендации по применению процесса, апробация математической модели по экспери-

ментальным исследованиям будет приведена в следующей статье.

### Выводы

В данной статье рассмотрена возможность повышения качества поковок методом горячей деформации по схеме раздачи-выдавливания. При помощи DEFORM 3D проанализировано пластическое течение материала и уменьшены риски при конструировании инструмента. Рассмотрена зависимость усилия от перемещения. Выражены энергосиловые параметры процесса раздачи-выдавливания по методике А.Л. Воронцова. Сделаны выводы о возможности применения данного метода на практике. На данном этапе необходимо планирование и проведение натурального эксперимента для проверки теоретических данных и дальнейшего составления рекомендаций к промышленному внедрению технологии.

### Литература

1. ГОСТ 12820–80. Фланцы стальные плоские приварные на Ру от 0,1 до 2,5 МПа (от 1 до 25 кгс/см<sup>2</sup>). – Введ. 1.10.92. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1993. – 43 с.
2. Бакулина, А.А. Обзор российского рынка трубопроводной арматуры в 2014 году / А.А. Бакулина, И.А. Тихонов, И.Т. Тер-Матеосянц // Арматуростроение. – 2015. – № 4. – С. 40–45.
3. Семенов, Е.И. Ковка и штамповка: в 4 т. / Е.И. Семенов. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 592 с.
4. Технологический справочник по ковке и объемной штамповке / под ред. М.В. Сторожева. – М.: Машиностроение, 1958. – 643 с.
5. Брюханов, А.Н. Ковка и объемная штамповка / А.Н. Брюханов. – М.: Машиностроение, 1975. – 402 с.
6. ГОСТ 7505–89. Поковки стальные

штампованные: допуски, припуски и кузнечные напуски. – М.: Изд-во стандартов. – 37 с.

7. Пат. 2352431 Российская Федерация, МПК В21К 23/04. Способ штамповки поковок фланцев воротниковых: / Б.Г. Каплунов, З.С. Павлович, А.В. Плаксин, В.М. Тяжелников; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 20352421; заявл. 24.02.2010; опубл. 29.08.2011.

8. Стругов, С.С. Кинематическое состояние заготовки в процессе безуклонной горячей объемной штамповки воротниковых фланцев по комбинированной схеме «раздача-выдавливание» / С.С. Стругов, В.А. Иванов, М.Д. Таркаленко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2018. – № 5.

9. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 424 с.

10. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Изд-во Металлургия, 1980. – 456 с.

11. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – Изд-во УГТУ – УПИ, 2001. – 835 с.

12. Стругов, С.С. Сравнение методов оценки напряженно-деформируемого состояния при осадке цилиндрической заготовки / С.С. Стругов, В.А. Иванов, В.Г. Шеркунов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 140–146. DOI: 10.14529/met160416

13. Воронцов, А.Л. Технологические задачи теории пластичности / А.Л. Воронцов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – Т. 3. – 475 с.

14. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие для вузов / А.М. Дальский, В.С. Гаврилюк, Л.Н. Бухаркин и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

15. ГОСТ 3778–98. Свинец. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов. – 11 с.

**Иванов Василий Александрович**, старший преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; ivanovva@susu.ru.

**Стругов Сергей Сергеевич**, магистрант, кафедра процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Strugov\_s174@mail.ru.

**Авраменко Алексей Андреевич**, бакалавр, кафедра обработки металлов давлением, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; avramenko\_aleksei@mail.ru.

**Таркаленко Мария Дмитриевна**, бакалавр, кафедра безопасности жизнедеятельности, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; mariya.tarkalenko@mail.ru.

*Поступила в редакцию 30 июля 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/met190307

## RESEARCH OF POWER PARAMETERS OF THE LOW-WASTE DRAFTLESS HOT DIE FORGING PROCESS ON THE BASIS OF THE COMBINED STRAIN PATTERN OF “EXPANSION-EXTRUSION”

**V.A. Ivanov**<sup>1</sup>, ivanovva@susu.ru,

**S.S. Strugov**<sup>1</sup>, Strugov\_s174@mail.ru,

**A.A. Avramenko**<sup>2</sup>, avramenko\_aleksei@mail.ru,

**M.D. Tarkalenko**<sup>1</sup>, mariya.tarkalenko@mail.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

This paper presents a continuation of the topic on the development of technology for low-waste draftless hot die forging of axisymmetric parts, particularly weld neck flanges, based on the “expansion-extrusion” strain pattern. The present article derives the general function of the process’ power parameters based on previous works, dedicated to determining the boundary conditions and the kinematic characteristics of the operation. Based on the conditions and strain pattern, a torus coordinate system is accepted. The derivation of general function is carried out according to the method of A.L. Vorontsov. Since the process is axisymmetric, the plane stress state of the strain zone is considered. Presented mathematical model is designed to provide an upper estimate of the strain force, which is linked with the necessity of performing technological calculations at production site. This paper also presents a modeling according to a new strain pattern in order to qualitatively evaluate the plastic flow of the material. Based on the modeling results, the practical applicability of the method in practice is proved, which confirms the previous assumptions as well. The graphic of forging force dependence on the motion is also considered. In this particular case, the graphic has a dome shape due to a change in the contact area of the working tool with the work piece. In order to obtain a more accurate picture of the strain process, a laboratory experiment has been carried out on the basis of the laboratory of the Machines and Processes of Pressure Metal Working Department using the hydraulic unit VZHM-2M (ВЖМ-2М), lead material grade S2C GOST 3778-98. The hydraulic unit VZHM-2M is characterized by the convenient implementation and reasonable force. This experiment gave positive results, thereby confirming the modeling with the use of the finite element method. In order to completely verify the correctness of the mathematical model, a non-full factorial experiment is planned. A package of design and technological documentation is developed, at the current project stage the equipment is being manufactured at the “REC Mashinostroyeniye”. Development of an experimental batch of flanges at the LLC “Chelyabinsk Tractor Plant (ChTZ) – UralTruck” on a dimension type with a nominal diameter D50 is also planned.

*Keywords: power parameters, mathematical modeling, expansion-extrusion, weld neck flanges.*

### References

1. GOST 12820–80. *Flantsy stal'nyye ploskiye privarnyye na Py ot 0,1 do 2,5 MPa (ot 1 do 25 kgs/sm<sup>2</sup>)* [State Standard 12820–80. Flat Welded Steel Flanges]. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 1993. 43 p. (in Russ.)
2. Bakulina A.A., Tikhonov I.A., Ter-Mateosyants I.T. [Overview of the Russian Pipeline Valves Market in 2014]. *Armaturostroyeniye*, 2015, no. 4, pp. 40–45. (in Russ.)
3. Semenov E.I. *Kovka i shtampovka* [Forging and Stamping]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1986, vol. 2. 592 p. (in Russ.)
4. Storozhev M.V. (Ed.). *Tekhnologicheskiy spravochnik po kovke i ob'yemnoy shtampovke* [Forging and Die Forging Technology Guide]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1958. 643 p.
5. Bryukhanov A.N. *Kovka i ob'yemnaya shtampovka* [Forging and Die Stamping]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975. 402 p.
6. GOST 7505–89. *Pokovki stal'nyye shtampovannyye: dopuski, pripuski i kuznechnyye napuski* [State Standard 7505–89. Pressed Steel Forgings: Tolerances, Allowances and Blacksmithing]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ. 37 p.
7. Kaplunov B.G., Pavlovich Z.S., Plaksin A.V., Tyazhel'nikov V.M. *Sposob shtampovki pokovok flantsev vorotnikovyykh* [The Method of Stamping Forgings Collar Flanges]. Patent RF, no. 2352431, 2011.
8. Strugov S.S., Ivanov V.A., Tarkalenko M.D. [Kinematic State of the Workpiece in the Process of Undeviating Hot Volumetric Stamping of Collar Flanges According to the Combined “Distribution-Extrusion” Scheme]. *Forging and Stamping Production. Metal Forming*, 2018, no. 5, pp. 33–38 (in Russ.)
9. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of Metal Forming]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1977. 424 p.
10. Gun, G.Ya. *Teoreticheskiye osnovy obrabotki metallov davleniyem* [Theoretical Foundations of Metal Forming]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 456 p.
11. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniyem* [Mechanics of Metal Forming]. USTU–UPI Publ., 2001. 835 p.
12. Strugov S.S., Ivanov V.A., Sherkunov V.G. Comparison of Methods of Stress-Strain State Estimation in the Upset of a Cylindrical Workpiece. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 140–146. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160416
13. Vorontsov A.L. *Tekhnologicheskiye zadachi teorii plastichnosti* [Technological Problems of the Theory of Plasticity]. Moscow, Mashinostroyeniye-1 Publ., 2006, vol. 3. 475 p.
14. Dal'skiy A.M., Gavrilyuk V.S., Bukharkin L.N. et al. *Tekhnologiya konstruksionnykh materialov* [Engineering Materials Technology]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990. 352 p.
15. GOST 3778–98. *Svinets. Tekhnicheskiye usloviya* [State Standard 3778–98. Lead. Technical Conditions]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ. 11 p.

Received 30 July 2019

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Исследование энергосиловых параметров процесса малоотходной безуклонной горячей объемной штамповки на основе комбинированной схемы деформации «раздача-выдавливание» / В.А. Иванов, С.С. Стругов, А.А. Авраменко, М.Д. Таркаленко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 59–65. DOI: 10.14529/met190307

### FOR CITATION

Ivanov V.A., Strugov S.S., Avramenko A.A., Tarkalenko M.D. Research of Power Parameters of the Low-Waste Draftless Hot Die Forging Process on the Basis of the Combined Strain Pattern of “Expansion-Extrusion”. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 59–65. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190307