

УДК 621.777.4

Алиева Л. И.
Картамышев Д. А.
Грудкина Н. С.
Чучин О. В.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ СПОСОБОВ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

В промышленности широко применяются полые детали типа стаканов и гильз, которые, как правило, изготавливаются холодным обратным выдавливанием, обеспечивающим высокое качество поверхности и точные размеры. Характерными ограничениями технологий холодного деформирования, снижающими стабильность процесса и стойкость штампового инструмента, являются высокие удельные и полные силы деформирования [1–4]. Для устранения этих ограничений предложены способы деформирования, в которых снижение нагрузок на инструмент происходит за счет обеспечения развитого радиального течения (раздачи металла) и создания разноимённой схемы напряжённо-деформированного состояния [4–6], уменьшения площади контакта активного деформирующего инструмента с заготовкой [2, 3], безматричного свободного выдавливания [2, 7], а также при помощи дополнительных силовых и кинематических воздействий на заготовку [1, 2, 6].

Перспективным методом получения осесимметричных деталей типа гильз и втулок является комбинированное радиально-продольное выдавливание, характеризующееся истечением металла заготовки в поперечном направлении, заполнением радиальной полости разъемной матрицы с последующим разворотом течения в продольном (в прямом или обратном) направлении [1–3].

Такое последовательное комбинирование простых схем радиального и продольного (обратного и прямого) выдавливания может быть осуществлено как с раздачей металла (рис. 1, схемы 1–2), то есть с истечением наружу, так и с обжатием – радиальным течением металла в центр полой заготовки (рис. 1, схемы 3–4) [8, 9]. Реализация способов радиально-продольного выдавливания с раздачей позволяет снизить силы деформирования как за счёт уменьшения площади контакта активного деформирующего инструмента с заготовкой, так и за счёт разноимённой схемы напряжённо-деформированного состояния [4, 7].

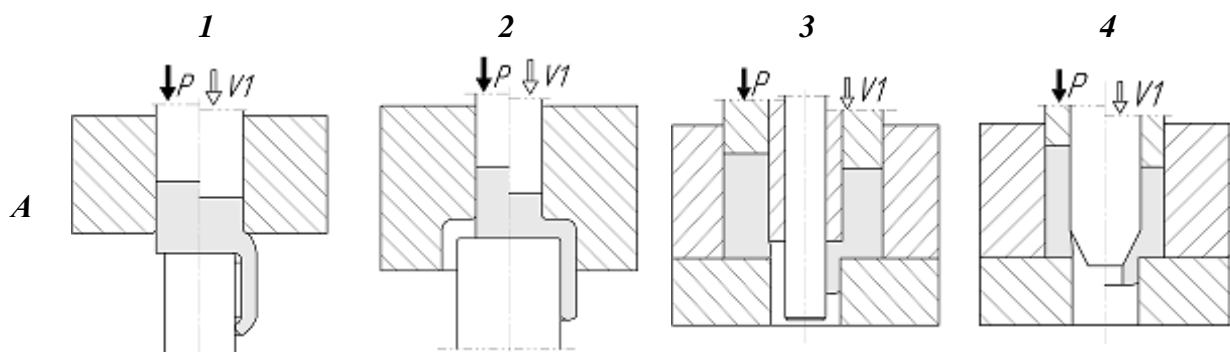


Рис. 1. Способы последовательного радиально-прямого выдавливания

Для анализа силового режима процессов выдавливания часто используется энергетический метод верхней оценки (ЭМВО) (баланса мощностей). Достоинством данного метода является возможность построения расчетных схем, исходя из экспериментально наблюдаемых картин течения металла, и получение результатов анализа в виде инженерных формул.

Повышению оперативности и простоты исследований способствует подход, связанный с применением для анализа комплекта заранее разработанных кинематически возможных полей скоростей (КВПС) в виде единичных областей [10, 11] или кинематических модулей [12, 13]. Применение метода кинематических модулей для энергетических расчетов позволяет описать сложные схемы течения при помощи элементарных модулей. Суммарная оценка величины приведенного давления при этом находится как сумма приведенных давлений модулей, входящих в данную технологическую схему.

Целью данной работы является исследование силового режима процесса радиально-прямого выдавливания при изменении геометрических параметров матрицы путем построения математических моделей, основанных на оптимальных полях скоростей пластического течения и результатах экспериментальных исследований.

Обобщенная расчетная схема процесса последовательного радиально-прямого выдавливания с раздачей (рис. 2) включает инструменты, условно обозначенные буквами («М» – матрица, «ПВ» – пуансон верхний, пуансон нижний 9). Пластическая зона заготовки разбита на кинематические модули, соответственно, трапецевидной и прямоугольной, а также треугольной формы, которые позволяют описать поле течения, близкое к экспериментально наблюдаемому.

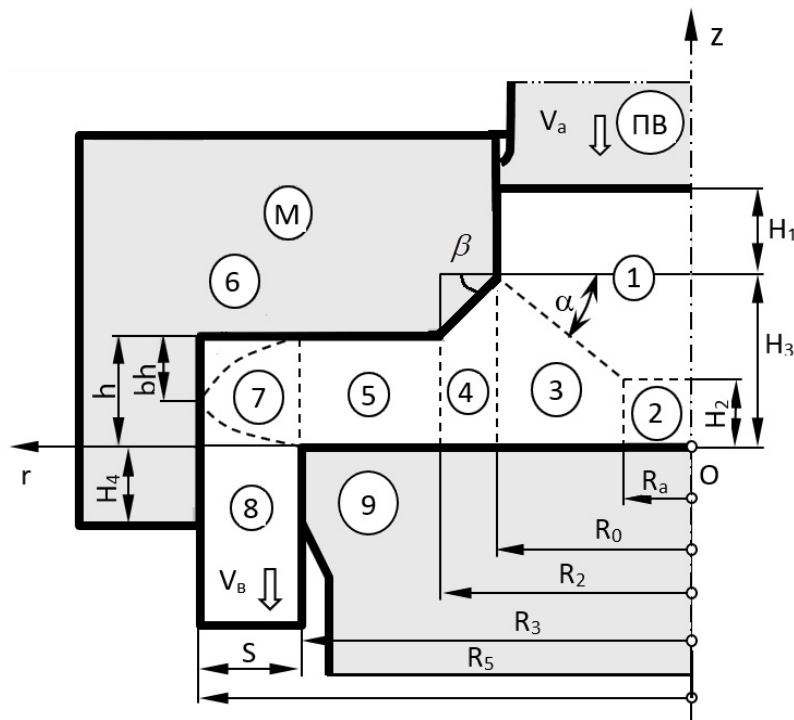


Рис. 2. Расчетная схема процесса радиально-прямого выдавливания

Для решения задач выдавливания энергетическим методом верхней оценки составлялось равенство мощностей внешних N_a и внутренних N_b сил на кинематически возможных скоростях перемещений, рассчитывались мощности сил деформации, мощности сил трения, развивающихся на поверхности контакта с инструментом и мощности сил среза между соседними модулями. Основными упрощающими допущениями данного метода является то, что задача сводится к осесимметричной, а материал рассматривается как изотропный, идеально жестко пластичный, трение пропорционально напряжению текучести [7]. После этого определялось значение приведенного давления $\bar{p} = P/\sigma_s$, включая приведённые давления пластической деформации, трения \bar{p}_t и среза \bar{p}_c .

Геометрические параметры толщины фланца h и толщины стенки стакана s отнесены к радиусу заготовки R_0 , и обозначены, соответственно, с соответствующими индексами \bar{h} , \bar{s} .

Общая формула приведенного давления на активном пуансоне для процесса радиально-прямого выдавливания рассчитывается по формуле:

$$\bar{p} = \bar{p}_1 + \bar{p}_2 + \bar{p}_3 + \bar{p}_c, \quad (1)$$

где \bar{p}_1 , \bar{p}_2 и \bar{p}_3 – приведенные давления, соответственно, в первой (зона 1, модули 2 и 3), второй (модули 4 и 5) и третий (модули «7» и зона 8) областях (см. рис. 2);

\bar{p}_c – приведенное давление сил среза между модулями 3 и 4, 5 и 7 [13].

Анализ полученной математической модели (1) позволил установить зависимость общего приведенного давления \bar{p} на активном пуансоне «ПВ» для процесса радиально-прямого выдавливания от относительных (до радиуса матрицы R_0) геометрических параметров \bar{h} , \bar{s} и условий трения на контактных поверхностях, которые учитываются коэффициентом трения μ .

С увеличением величины \bar{h} происходит смещение кривых в сторону увеличения оптимального значения параметра \bar{s} , а уменьшение \bar{h} приводит к стремительному возрастанию величины приведенного давления \bar{p} (рис. 3).

Влияние геометрического параметра \bar{h} на рост величины давления \bar{p} особенно интенсивно при более высоких значениях коэффициента трения μ .

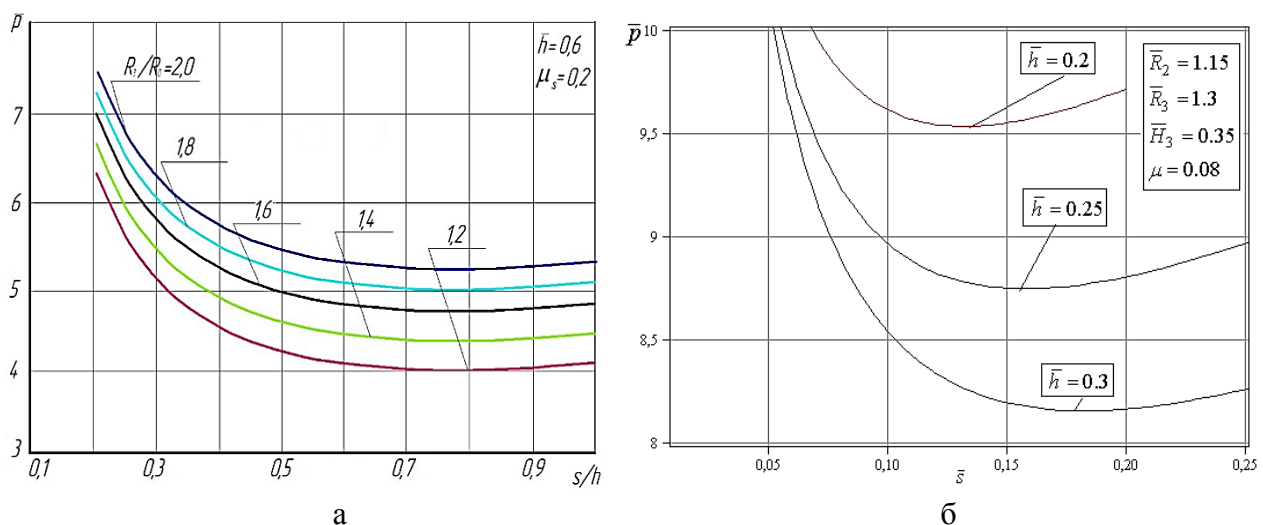


Рис. 3. Графики зависимости приведенного давления \bar{p} радиально-прямого выдавливания от геометрических параметров \bar{s} и \bar{h}

Методом конечных элементов в программе Qform VX определён характер распределения интенсивности напряжений (рис. 4, а). По ходу процесса в периферийных зонах детали наблюдается немонотонное напряженное состояние: передние частицы металла в зоне радиального течения испытывают окружное растяжение, близкое к линейному.

Для подтверждения адекватности математических моделей радиально-прямого выдавливания были проведены эксперименты. Размеры заготовок, деталей и полный рабочий ход пуансона приведены на рис. 4, б.

Значение приведенного давления \bar{p} рассчитывались по формуле (1), давления деформирования p – по формуле $p = \bar{p}\sigma_s$ (кривая упрочнения материала АД31 аппроксимирована показательной функцией $\sigma_s = C \cdot e^n$, $C = 247 \text{ Мпа}$, $n = 0,136$). Средняя интенсивность накопленной деформации приравнена приведенному давлению деформирования ($e_i = \bar{p}$), а силы формоизменения P установлены по формуле $P = pF_a$. Значение коэффициента трения равно $\mu = 0,04$.

В среднем значение силы радиально-прямого выдавливания полой детали из алюминиевого сплава АД31 составило 691 кН, что больше экспериментальной величины на 3 %.

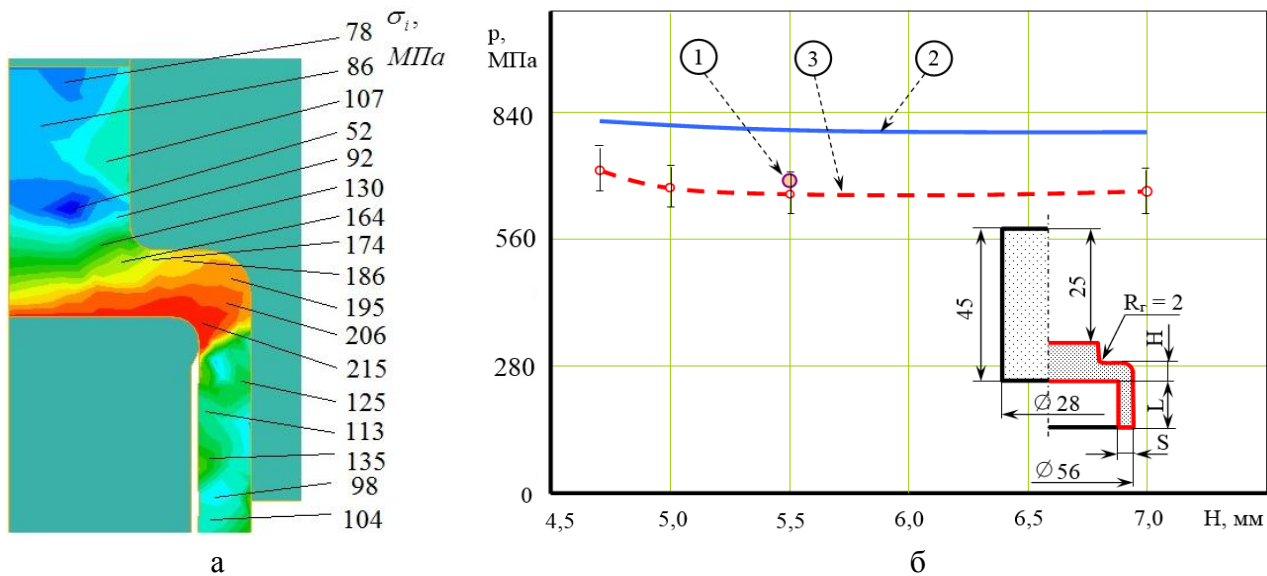


Рис. 4. Математическое и экспериментальное моделирование процесса комбинированного выдавливания (сплав АД31):

а – распределение интенсивности напряжений; б – сопоставление расчетных (1-МКЭ, 2-ЭМВО) и экспериментальных (3) значений давления деформирования

Как видно из рис. 4, б, наибольшее превышение теоретических значений (энергетический метод) давлений деформирования p над экспериментальными данными составило 16 %. В целом можно сказать, что сходимость теоретических и экспериментальных значений хорошая, результаты теоретического анализа хорошо качественно и количественно соответствуют результатам экспериментальных исследований.

В этой части рассмотрены результаты моделирования процесса радиально-прямого выдавливания полой детали из материала АД31 с помощью конечно-элементной программы Qform VX по оценке влияния геометрических параметров процесса радиально-прямого выдавливания \bar{h} , \bar{s} на изменение давления на активном пуансоне.

Толщина стенки стакана s (рис. 5, а) изменяется от 3 до 9 мм с шагом 3 мм при других неизменных параметрах матрицы. Как показано на графике, толщина стенки стакана оказывает влияние на изменение давления на открытом пуансоне не на стадии радиального течения металла, а только после разворота металла с радиального на прямое течение. При этом увеличение значений s приводит к заметному снижению давления на пуансоне.

Толщину фланца h изменяли от 5 до 11 мм с шагом 3 мм при других неизменных параметрах матрицы. Полученные результаты (рис. 5, б) показывают, что увеличение h приводит к снижению давления на пуансоне при радиальном выдавливании. Затем, при дальнейшем движении пуансона, происходит разворот и прямое течение. Эти зоны не оказывают однозначного влияния на максимальное давление на пуансоне при изменении высоты зазора.

Характер изменения сил и давлений деформирования по ходу процесса радиально-прямого выдавливания полых детали прогнозируемо с МКЭ-моделью качественно и количественно приближен к экспериментальным данным (рис. 6). Полученные результаты качественно подтверждаются при сопоставлении с результатами других исследований [14, 15].

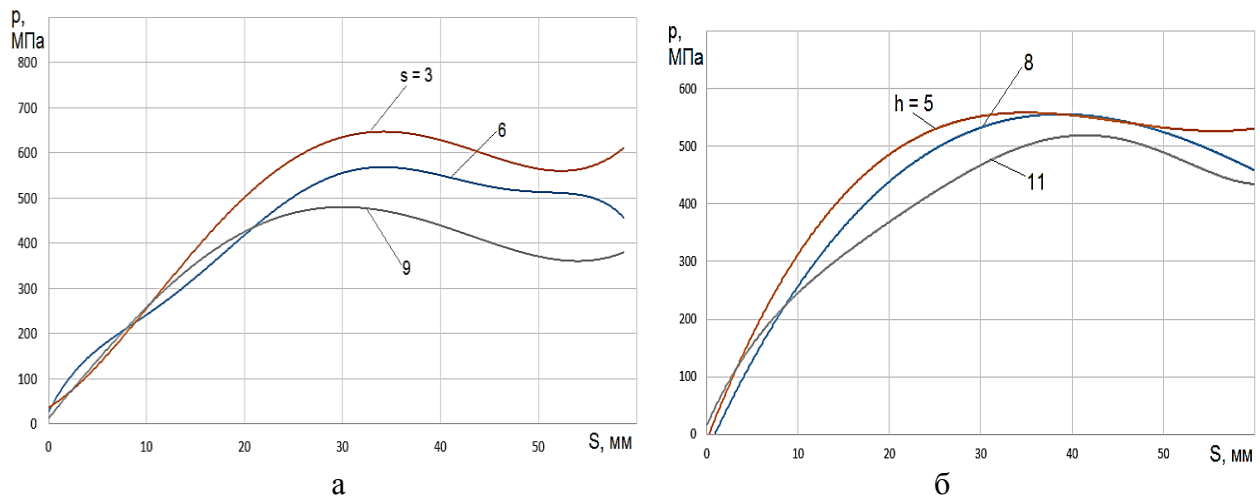


Рис. 5. Аппроксимированные графики изменения давлений на пуансоне по ходу комбинированного выдавливания в зависимости от толщины стенки стакана (а) и от толщины фланца (б)

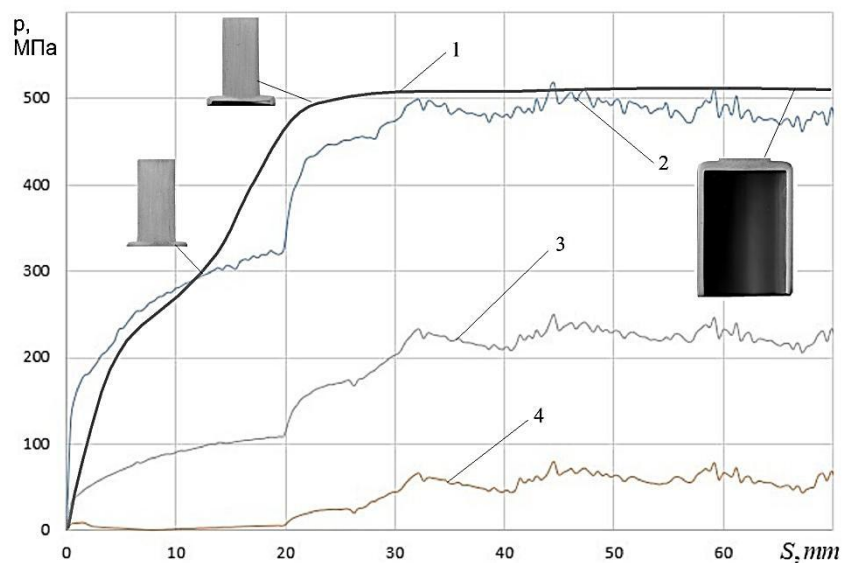


Рис. 6. Сопоставление расчетных (МКЭ) и экспериментальных значений давлений радиально-прямого выдавливания (сплав АД31) (давление: 1 – эксперимент; 2 – на пуансоне; 3 – на контрпуансоне; 4 – на матрице)

Пустотелые детали с внешним диаметром 28 мм, изготовленные в процессе радиально-прямого выдавливания из сплава АД31 и меди М1, приведены на рис. 7.



Рис. 7. Полые детали, полученные радиально-прямым выдавливанием с раздачей

ВЫВОДЫ

Для процесса комбинированного последовательного радиально-прямого выдавливания с раздачей полых деталей типа гильз была разработана модель силового режима на основе энергетического метода верхней оценки.

Получены зависимости приведенных давлений деформирования от параметров процесса с учетом влияния значений варьируемых геометрических параметров h и s , устанавливающих форму кинематических модулей и точнее отображающих условия деформирования.

Установлено, что увеличение толщины фланца h и толщины стенки стакана s приводит к уменьшению давления на пуансоне на всех этапах радиально-прямого выдавливания.

Экспериментальные оценки адекватности разработанных математических моделей по силовому режиму подтверждают приемлемость математических моделей для технологических расчетов давлений деформирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев И. С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания / И. С. Алиев // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1990. – № 2. – С. 7–9.
2. Алиева Л. И. Процессы комбинированного выдавливания и деформирования / Л. И. Алиева // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 100–108.
3. Чучин О. В. Комбинированное последовательное радиально-прямое выдавливание полых деталей / О. В. Чучин, Л. И. Алиева // *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2002. – С. 352–355.
4. Kalyuzhnyi V. L. Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts / V. L. Kalyuzhnyi, L. I. Alieva, D. A. Kartamyshev, I. G. Savchinskii // *Metallurgist. Volume 61, Issue 5–6, Sept. 2017*. – P. 359–365. – Access mode: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>.
5. Farhoumand A. Analysis of forward-backward-radial extrusion process / A. Farhoumand, R. Ebrahimi // *Materials and Design*. – 2009. – Nr 30. – P. 2152–2157.
6. Дмитриев А. М. Выдавливание полых изделий с раздачей заготовки в движущейся матрице / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // *Вестник машиностроения*. – 2004. – № 10. – С. 55–61.
7. Ренне И. П. Технологические возможности процесса свободного выдавливания (без матрицы) полых деталей / И. П. Ренне, А. И. Сумарокова // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1987. – № 6. – С. 25–26.
8. Alieva L. Radial-direct extrusion with a movable mandrel / L. Alieva, I. Zhbankov // *Metallurgical and Mining Industry*. – Dnipropetrovsk, 2015. – № 11. – P. 175–183.
9. Алиева Л. И. Силовой режим формообразования полых деталей при холодном радиально-прямом выдавливании с обжатием / Л. И. Алиева // *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ" : зб. наук. пр. Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. – Харків : НТУУ «ХПІ», 2016. – № 38 (1210). – С. 5–12.
10. Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением / Л. Г. Степанский. – М. : Машиностроение, 1982. – 217 с.
11. Алюшин Ю. А. Энергетические основы механики : учеб. пособ. для вузов / Ю. А. Алюшин. – М. : Машиностроение, 1999. – 192 с.
12. Алиев И. С. Методика анализа процессов точной объемной штамповки с помощью модульных полей скоростей / И. С. Алиев // *Разработка и исследование высокоэффективных технологических процессов, оснастки и оборудования. Обработка металлов давлением : темат. сб. науч. трудов*. – К. : УМК ВО, 1990. – С. 7–17.
13. Алиева Л. И. Анализ процесса последовательного радиально-прямого выдавливания методом кинематических модулей [Электронный ресурс] / Л. И. Алиева, О. В. Чучин // *Научный вестник ДГМА : сб. науч. трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 3(18Е). – С. 5–21. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_yesnik/%E2%84%963\(18%D0%95\)_2015/article/3.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_yesnik/%E2%84%963(18%D0%95)_2015/article/3.pdf).
14. Jafarzadeh H. Numerical Studies of Some Important Design Factors in Radial-Forward Extrusion Process / H. Jafarzadeh, M. Zadshakoyan, E. Abdi Sobbouhi // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2010. – 25 :8. – P. 857–863
15. Investigation of defect in combined precision extrusion process with multiple ram / I. Aliiev, L. Aliieva, P. Abhari, K. Goncharuk // *XVI International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering*. – Series : Monographs. – № 48. – Czestochowa, 2015. – P. 90–93.

REFERENCES

1. Aliiev I. S. *Tehnologicheskie vozmozhnosti novyh sposobov kombinirovannogo vydavlivaniya* / I. S. Aliiev // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. – 1990. – № 2. – S. 7–9.
2. Aliieva L. I. *Processy kombinirovannogo vydavlivaniya i deformirovaniya* / L. I. Aliieva // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2016. – № 1 (42). – S. 100–108.
3. Chuchin O. V. *Kombinirovannoe posledovatel'noe radial'no-prjamoje vydavlivanie polyh detalej* / O. V. Chuchin, L. I. Aliieva // *Sovershenstvovanie processov i oborudovaniya obrabotki davleniem v metallurgii i mashinostroenii : sb. nauch. tr.* – Kramatorsk : DGMA, 2002. – S. 352–355.
4. Kalyuzhnyi V. L. *Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts* / V. L. Kalyuzhnyi, L. I. Aliieva, D. A. Kartamyshev, I. G. Savchinskii // *Metallurgist. Volume 61, Issue 5–6, Sept. 2017*. – P. 359–365. – Access mode: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>.
5. Farhoumand A. *Analysis of forward-backward-radial extrusion process* / A. Farhoumand, R. Ebrahimi // *Materials and Design*. – 2009. – № 30. – P. 2152–2157.
6. Dmitriev A. M. *Vydavlivanie polyh izdelij s razdachej zagotovki v dvizhushhejsja matricje* / A. M. Dmitriev, A. L. Voroncov // *Vestnik mashinostroeniya*. – 2004. – № 10. – S. 55–61.
7. Renne I. P. *Tehnologicheskie vozmozhnosti processa svobodnogo vydavlivaniya (bez matricy) polyh detalej* / I. P. Renne, A. I. Sumarokova // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. – 1987. – № 6. – S. 25–26.
8. Aliieva L. *Radial-direct extrusion with a movable mandrel* / L. Aliieva, I. Zbankov // *Metallurgical and Mining Industry*. – Dnipropetrovsk, 2015. – № 11. – R. 175–183.
9. Aliieva L. I. *Silovoj rezhim formoobrazovaniya polyh detalej pri holodnom radial'no-prjamom vydavlivanii s obzhatiem* / L. I. Aliieva // *Visnik Nac. tehn. un-tu "HPI" : zb. nauk. pr. Ser. : Innovacijni tehnologii ta obladnannja obrobki materialiv u mashinobudivanni ta metalurgii*. – Harkiv : NTUU «HPI», 2016. – № 38 (1210). – S. 5–12.
10. Stepanskij L. G. *Raschety processov obrabotki metallov davleniem* / L. G. Stepanskij. – M. : Mashinostroenie, 1982. – 217 s.
11. Aljushin Ju. A. *Jenergeticheskie osnovy mehaniki : ucheb. posob. dlja vuzov* / Ju. A. Aljushin. – M. : Mashinostroenie, 1999. – 192 s.
12. Aliiev I. S. *Metodika analiza processov tochnoj ob#jomnoj shtampovki s pomoshh'ju modul'nyh polej skorostej* / I. S. Aliiev // *Razrabotka i issledovanie vysokoeffektivnyh tehnologicheskikh processov, osnastki i oborudovaniya. Obrabotka metallov davleniem : temat. sb. nauch. trudov*. – K. : UMK VO, 1990. – S. 7–17.
13. Aliieva L. I. *Analiz processa posledovatel'nogo radial'no-prjamogo vydavlivaniya metodom kine-maticheskikh modulej [Jelektronnyj resurs]* / L. I. Aliieva, O. V. Chuchin // *Nauchnyj vestnik DGMA : sb. nauch. trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2015. – № 3(18E). – S. 5–21. – *Rezhim dostupa*: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%9663\(18%D0%95\)_2015/article/3.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%9663(18%D0%95)_2015/article/3.pdf).
14. Jafarzadeh H. *Numerical Studies of Some Important Design Factors in Radial-Forward Extrusion Process* / H. Jafarzadeh, M. Zadshakoyan, E. Abdi Sobbouhi // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2010. – 25 :8. – P. 857–863
15. *Investigation of defect in combined precision extrusion process with multiple ram* / I. Aliiev, L. Aliieva, P. Abhari, K. Goncharuk // *XVI International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering*. – Series : Monographs. – № 48. – Czestochowa, 2015. – P. 90–93.

Исследование выполнено на кафедре ОМД ДГМА в рамках соглашения по использованию программы Qform.

Алиева Л. И. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД ДГМА;

Картамышев Д. А. – аспирант каф. ОМД ДГМА;

Грудкина Н. С. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. ВМ ДГМА;

Чучин О. В. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. ОМД ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: omd@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 20.03.2018 г.