

УДК 621.73.043

Абхари П. Б.  
Сивак Р. И.  
Таган Л. В.  
Малий К. В.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКРЫТОГО РАДИАЛЬНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ФЛАНЦА С РЕДУЦИРОВАНИЕМ

Одной из основных тенденций развития современного машиностроения является разработка и внедрение новых технологий, повышающих качество изделий, снижающих трудоемкость, материалоемкость, себестоимость их изготовления. Проектирование малоотходных технологий штамповки для получения изделий с заданными свойствами сопряжено с решением комплекса задач по определению условий устойчивого протекания процессов штамповки, нагрузок на инструмент, напряженно-деформированного состояния (НДС) и свойств штампуемой детали, выбору смазки, оптимальных технологических параметров и режимов обработки для повышения стойкости инструмента, предотвращения образования дефектов и т. д.

Потребность в улучшении технологий приводит к необходимости разработки новых и усовершенствованию существующих способов формообразования и штампового инструмента. Изучение новых способов штамповки и резервных возможностей известных процессов пластической деформации металлов для поиска оптимальных режимов металлообработки требует проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Применение планирования экспериментов, математического и компьютерного моделирования, а также систем автоматизированного проектирования, использование которых сокращает сроки и снижает стоимость технологической подготовки производства, позволяет научно обосновать, разработать и воплотить эффективные технические и технологические решения.

Оценка особенностей формоизменения и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) выдавливаемого образца позволяют получить важные сведения, необходимые для прогнозирования качества штамповок, оценки деформируемости и степени использования запаса пластичности материала, а также для расчетов энергосилового режима процессов деформирования. Характерной особенностью процессов закрытого радиального выдавливания является сложный режим силового воздействия как на деформируемую заготовку, так и на элементы штамповой оснастки.

Поэтому задачей теоретического анализа процессов выдавливания является определение как усилия выдавливания, так и усилия раскрытия полуматриц. Уровень усилий раскрытия определяет надежность работы штампов с разъемными матрицами. Чем выше технологическое усилие раскрытия, тем более жесткими должны быть зажимные узлы штампов и тем выше вероятность их заклинивания, вызванная высокими нагрузками, действующими на зажимной механизм. Для уменьшения влияния усилия раскрытия на работу зажимных узлов в литературе рекомендуются различные способы: так усилие раскрытия можно уменьшить усилиями трения деформируемого металла о стенки матрицы, для этой же цели можно применить схемы выдавливания с совмещенными очагами деформации [1, 2].

Для моделирования процесса использован программный комплекс QForm 2D/3D, в основе которого лежит метод конечных элементов. С помощью данной программы был изучен процесс радиального выдавливания детали с фланцем на конце стержня. Также были определены интенсивность напряжений, энергосиловые параметры и деформация на различных стадиях процесса. Предложенный технологический процесс позволяет снизить массу деталей, увеличить коэффициент использования материала, повысить производительность труда и сократить сроки подготовки производства и трудоемкость изготовления изделий [3].

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов, а также силовые параметры процесса закрытого радиального

выдавливания фланца с односторонней подачей на конце стержня с редуцированием в разъемных матрицах. В силу симметрии рассматривается одна половина схемы (а) и полученный полуфабрикат (б), представленные на рис. 1. Для моделирования процесса выбраны следующие параметры: механические свойства: кривая истинных напряжений для материала заготовки АМцМ описывается уравнением  $\sigma_s = 188,4 \varepsilon^{0,15}$ , предел текучести  $\sigma_{0,2} = 105$  МПа, модуль Юнга  $E = 75000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$  и коэффициент трения между материалом заготовки и инструментом  $\mu = 0,08$  (закон Зибеля); геометрические параметры процесса:  $R_1$  – радиус заготовки,  $R_0$  – радиус отверстия верхней полуматрицы ( $R_0 = 18$  мм),  $R_1/R_0$  – отношение радиусов отверстия верхней полуматрицы и заготовки ( $R_1/R_0 = 1,1; 1,2; 1,3$ ),  $R$  – радиус фланца ( $R = 36$  мм),  $h$  – высота приемной полости для выдавливаемого фланца верхней полуматрицы ( $h = 11,7$  мм),  $h_1$  – высота участка отверстия верхней полуматрицы ( $h_1 = 10$  мм),  $r$  – радиус скругления переходной кромки матрицы ( $r = 2$  мм),  $\alpha$  – угол конуса в отверстии верхней полуматрицы ( $\alpha = 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$ ),  $L$  – высота заготовки ( $L = 70$  мм).



Рис. 1. Схема процесса закрытого радиального выдавливания фланца с редуцированием (а) и полученный полуфабрикат (б)

Определено напряженно-деформированное состояние по всему объему заготовки. На рис. 2 представлены результаты моделирования процесса закрытого радиального выдавливания фланца при  $h/R_0 = 0,65$ , такие как искажение делительной сетки, распределение интенсивности деформаций ( $\varepsilon_i$ ) и интенсивности напряжений ( $\sigma_i$ , МПа) по ходу деформирования. Как видно из рисунков, очаг деформации по высоте ограничивается высотой приемной полости под фланец, а наибольшая интенсивность деформаций сосредоточена в нижней части очага деформации. Интенсивность напряжений по очагу деформации распределяется практически равномерно и достигает своего наибольшего значения. Значения максимальной интенсивности деформаций и напряжений (рис. 2) достигают следующих отметок: при  $h/R_0 = 0,65$ , и  $R_1/R_0 = 1,2$ . –  $\varepsilon_i = 5,0$  и  $\sigma_i = 200$  МПа.

В соответствии с проведенным моделированием были получены графики зависимости приведенного давления процесса выдавливания и приведенного давления раскрытия полуматрицы от хода пуансона в определенном интервале значений  $\alpha$  и  $R_1/R_0$  при  $h/R_0 = 0,65$  с помощью программы Origin (рис. 3–6). Из графика зависимости приведенного давления процесса выдавливания от хода пуансона [4, 5] на рис. 3 видно, что при увеличении угла конуса в отверстии верхней полуматрицы с увеличением хода процесса приведенное давление возрастает. Например, при  $\alpha = 15^\circ$  с ходом пуансона  $S = 68$  мм приведенное давление равно 4,4, при  $\alpha = 30^\circ$  с ходом пуансона  $S = 67$  мм – 4,7, при  $\alpha = 45^\circ$  с ходом пуансона  $S = 65$  мм – 4,8. На рис. 4 представлен график зависимости приведенного давления раскрытия полуматрицы от параметра незаполнения «а», из которого видно, что при увеличении угла конуса в отверстии верхней полуматрицы ( $\alpha = 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$ ) приведенное давление раскрытия полуматрицы уменьшается и также с увеличением параметра незаполнения «а» приведенное давление раскрытия уменьшается. Например, при  $\alpha = 15^\circ$  с параметром незаполнения «а» = 7 мм приведенное давление равно 0,37, при  $\alpha = 45^\circ$  с параметром незаполнения «а» = 7 мм приведенное давление равно 0,2. На кривой 1 видно, что при параметре не заполнения «а» = 2 мм приведенное давление равно 1,5, а на кривой 3 при «а» = 2 мм – 1,36.

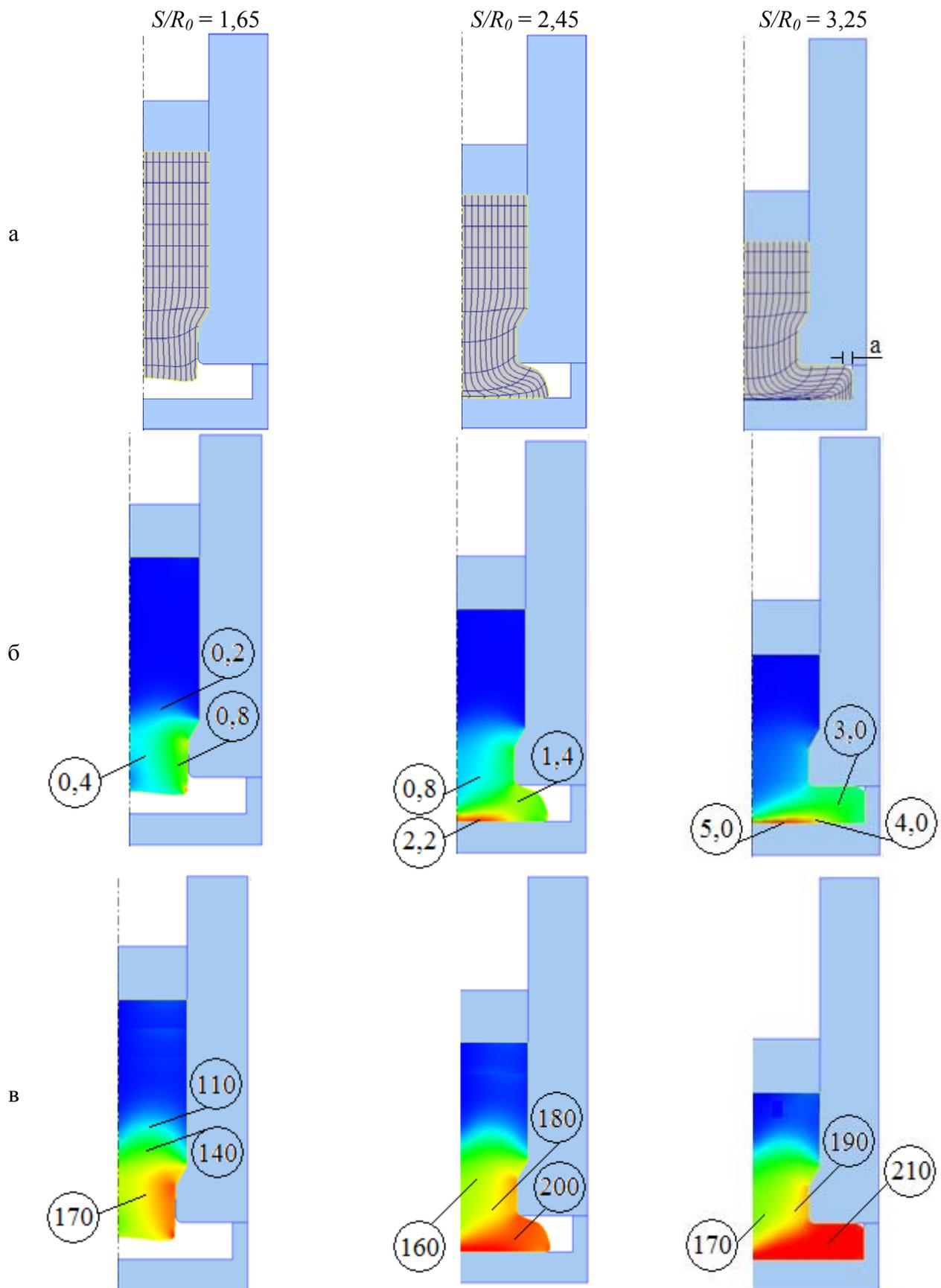


Рис. 2. Искажение делительной сетки (а), распределение интенсивности деформаций  $\epsilon_i$  (б), распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , МПа (в) при закрытом радиальном выдавливании фланца с односторонней подачей на конце стержня с редуцированием по ходу деформирования при  $R_1/R_0 = 1,2$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\mu = 0,08$

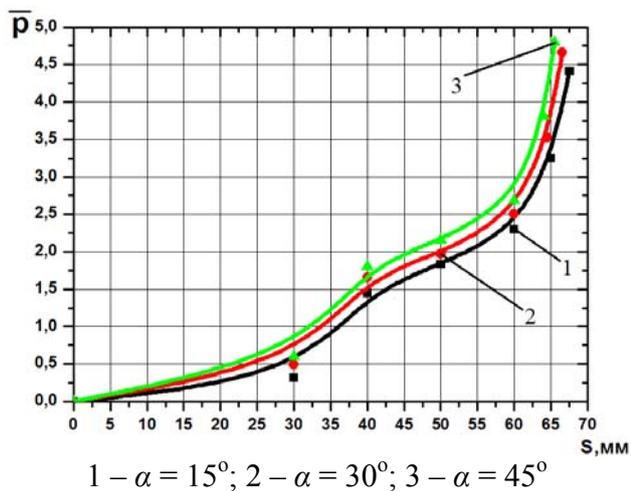


Рис. 3. График зависимости приведенного давления процесса выдавливания от хода пуансона и параметра незаполнения «а» при  $h/R_0 = 0,65$

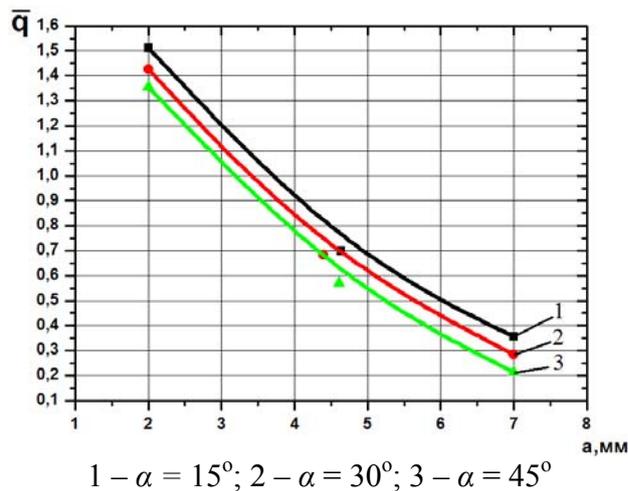


Рис. 4. График зависимости приведенного давления раскрытия полуматрицы от хода пуансона и параметра незаполнения «а» при  $h/R_0 = 0,65$

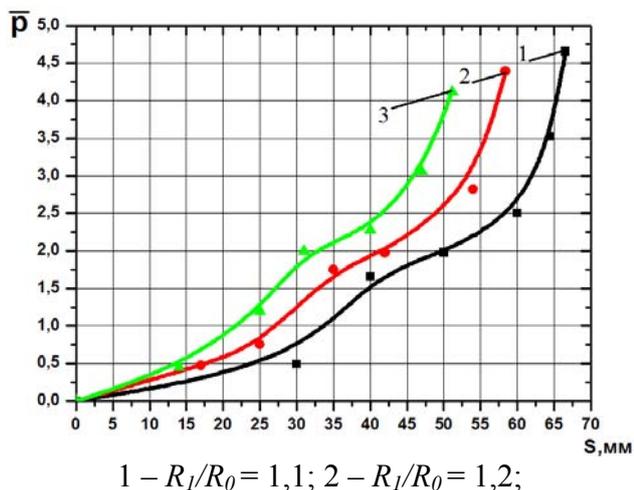


Рис. 5. График зависимости приведенного давления процесса выдавливания от хода пуансона и параметра незаполнения «а» при  $h/R_0 = 0,65$

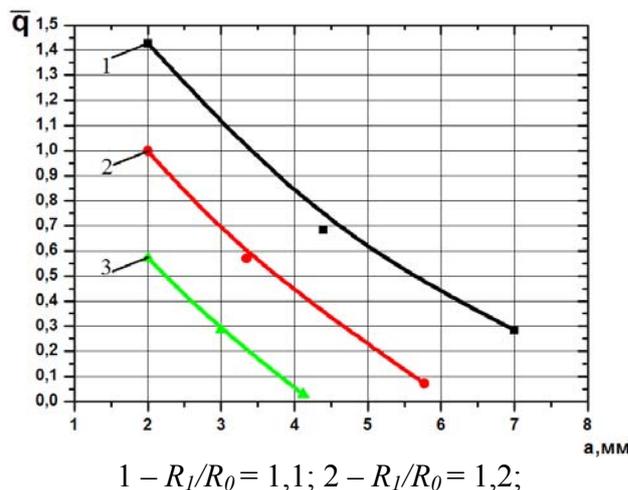


Рис. 6. График зависимости приведенного давления раскрытия полуматрицы от хода пуансона и параметра незаполнения «а» при  $h/R_0 = 0,65$

На рис. 5 показан график зависимости приведенного давления процесса выдавливания от хода пуансона при разном отношении радиусов отверстия верхней полуматрицы и заготовки ( $R_1/R_0 = 1,1; 1,2; 1,3$ ). Из рис. 5 видно, что при увеличении  $R_1/R_0$  увеличивается приведенное давление процесса выдавливания. Например, при  $R_1/R_0 = 1,1$  с ходом пуансона  $S = 66$  мм приведенное давление равно 4,7; при  $R_1/R_0 = 1,2$  с ходом пуансона  $S = 58$  мм приведенное давление равно 4,4; при  $R_1/R_0 = 1,3$  с ходом пуансона  $S = 52$  мм приведенное давление равно 4,1. На рис. 6 представлен график зависимости приведенного давления раскрытия полуматрицы от параметра незаполнения «а» при  $h/R_0 = 0,65$ , из которого видно, что с увеличением отношения радиусов отверстия верхней полуматрицы и заготовки ( $R_1/R_0 = 1,1; 1,2; 1,3$ ) приведенное давление раскрытия полуматрицы уменьшается, то есть с увеличением параметра незаполнения «а» приведенное давление раскрытия уменьшается. Например, при  $R_1/R_0 = 1,1$  с параметром незаполнения «а» = 2 мм – приведенное давление равно 1,4, при  $R_1/R_0 = 1,3$  с параметром незаполнения «а» = 2 мм – 0,6. На кривой 1 видно, что при параметре не заполнения «а» = 7 мм – приведенное давление равно 0,3, а на кривой 2 при «а» = 5,8 мм – 0,1.

## ВЫВОДЫ

Использование схемы закрытого радиального выдавливания фланца с редуцированием позволяет снизить силу раскрытия на величину, равную силе редуцирования. На основе результатов моделирования проведен анализ силового режима. Построены графики зависимости изменения силы выдавливания и раскрытия полуматрицы по ходу деформирования от основных геометрических характеристик схемы. Установлено, что при увеличении угла конуса в отверстии верхней полуматрицы с увеличением хода процесса приведенное давление возрастает, а приведенное давление раскрытия полуматрицы – уменьшается. Аналогичный характер изменения силовых параметров при изменении отношения радиусов отверстия верхней полуматрицы и заготовки  $R_1/R_0$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование процессов выдавливания в разъемных матрицах / Л. И. Алиева, А. И. Лобанов, Р. С. Борисов, И. Г. Савчинский // *Известия Тульского государственного университета. Серия «Механика деформируемого твердого тела и ОМД»*. – Тула : ТулГУ, 2004. – Вып. 2. – С. 132–139.
2. Алиева Л. И. *Формоизменение при радиальном выдавливании фланцев* / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Я. Г. Жбанков // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць*. – Краматорськ, 2006. – № 1Е(6). – С. 136–139.
3. Abhari P. B. *Modeling simulation for flashless precision forging process with finite element method* / P. B. Abhari, O. A. Zhykova // *Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти : матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції : збірник тез доповідей, "КПІ" – Київ, 2013. – С. 98.*
4. Алиева Л. И. *Определение энергосиловых параметров совмещенного радиального выдавливания в разъемных матрицах* / Л. И. Алиева, П. Б. Абхари, К. В. Гончарук // *«Высокоэнергетические устройства автоматических систем» БГТУ «ВОЕНМЕХ» 14–17 октября 2014 года. – СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 28–32.*
5. Алиев И. С. *Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечных элементов* / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Ерёмина // *Пластическая деформация металлов : сб. науч. тр. в 2-х т. – Т. 1. – Днепрпетровск : Акцент ПП., 2014. – С. 192–196.*

## REFERENCES

1. *Proektirovanie processov vydavlivaniya v razemnyh matricah* / L. I. Alieva, A. I. Lobanov, R. S. Borisov, I. G. Savchinskij // *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija «Mehanika de-formiruemogo tverdogo tela i OMD»*. – Tula : TulGU, 2004. – Vyp. 2. – S. 132–139.
2. Alieva L. I. *Formoizmenenie pri radial'nom vydavlivanii flancev* / L. I. Alieva, S. V. Martynov, Ja. G. Zhbankov // *Visnik Donbaskoi derzhavnoi mashinobudivnoi akademii : zb. nauk. prac.* – Kramators'k, 2006. – № 1E(6). – S. 136–139.
3. Abhari P. B. *Modeling simulation for flashless precision forging process with finite element method* / P. B. Abhari, O. A. Zhykova // *Teoretichni ta praktichni problemi v obrobci metaliv tiskom i yakosti fahovoi osviti : materialy IV mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii : zbirnik tez dopovidej, "KPI" – Kiev, 2013. – S. 98.*
4. Alieva L. I. *Opredelenie jenergosilovyh parametrov sovmeshhennogo radial'nogo vydavlivaniya v razemnyh matricah* / L. I. Alieva, P. B. Abhari, K. V. Goncharuk // *Vysokojenergeticheskie ustrojstva av-tomaticheskikh sistem BGTU «VOENMEH» 14–17 oktjabrja 2014 goda. – SPb : Balt. gos. tehn. un-t, 2014. – S. 28–32.*
5. Aliev I. S. *Modelirovanie processa shtampovki v zakrytyh shtampah metodom konechnyh jelemen-tov* / I. S. Aliev, P. B. Abhari, A. A. Erjomina // *Plasticheskaja deformacija metallov : sb. nauch. tr. v 2-h t. – T. 1. – Dnepropetrovsk : Akcent PP., 2014. – S. 192–196.*

- Абхари П. Б. – канд. техн. наук, доц. кафедры ОМД ДГМА;  
Сивак Р. И. – канд. техн. наук, доц. ВНАУ;  
Таган Л. В. – канд. техн. наук, ассистент кафедры ОМД ДГМА;  
Малий К. В. – ассистент кафедры ОМД ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.  
ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

E-mail: omd@dgma.donetsk.ua; roma@vsau.vin.ua