

## РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621. 777.01

Алиева Л. И.  
Алиев И. С.  
Картамышев Д. А.  
Чучин О. В.

### ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ В ПРОЦЕССЕ КОМБИНИРОВАННОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА СТАКАНА

Выдавливание является эффективным ресурсосберегающим методом получения высокоточных заготовок и деталей [1, 2]. Развитие технологии выдавливания неразрывно связано с поиском, разработкой и освоением новых способов деформирования, позволяющих получить штамповкой детали ранее недоступных сложных форм более высокого качества и с меньшими затратами труда и материала. К таким способам можно отнести поперечное (радиальное и боковое) и комбинированное продольно-поперечное выдавливание [2, 3]. Способы поперечного и продольного выдавливания можно комбинировать по пути и времени как совмещенно, так и последовательно. Совмещенное выдавливание предполагает истечение металла из одного очага деформации одновременно по нескольким направлениям, т.е. с большей степенью свободы течения. Это сопровождается существенным снижением сил деформирования, но одновременно вызывает и трудность прогнозирования характера заполнения полости и формообразования штампуемой детали [3–6].

Последовательное комбинирование простых схем радиального и продольного (обратного и прямого) выдавливания является менее изученным способом получения полых деталей. Оно может быть осуществлено по двум принципиально отличающимся схемам деформирования: как с раздачей металла, т.е. с радиальным истечением наружу [3, 7, 8], так и с обжатием – с радиальным течением (стоком) металла к центру заготовки [3, 9].

Целью данной работы является анализ особенностей формоизменения при комбинированном радиально-прямом выдавливании с раздачей деталей типа гильз.

Основные схемы радиально-прямого выдавливания даны на рис. 1.

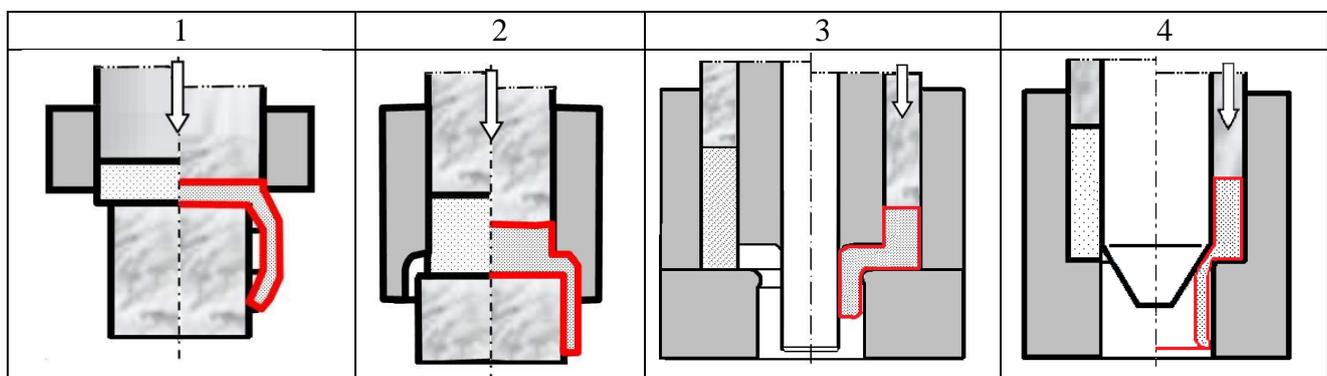


Рис. 1. Схемы процесса радиально-прямого выдавливания.

В способах «безматричного» выдавливания течение металла происходит одновременно через боковую и нижнюю торцовую поверхности заготовки (схема 1). Эти способы применяют для изготовления глубоких полых сосудов, т.к. в этом случае по сравнению с обратным выдавливанием значительно снижаются удельные силы деформирования [3, 10, 11].

Процесс деформирования по схеме 2, названный радиально-прямым выдавливанием с раздачей, позволяет подобно продольному выдавливанию с раздачей [7] снизить силы деформирования за счёт разноимённой схемы напряжённо-деформированного состояния заготовки [12–15]. Исследования силового режима процесса последовательного радиально-прямого выдавливания полых изделий типа стакана показали преимущества способа деформирования не только в снижении силовых параметров, но и в расширении технологических возможностей [11, 12].

Способы радиально-прямого выдавливания с обжатием (схемы 3 и 4) отличаются тем, что в них на этапе радиального выдавливания течение металла происходит в направлении от периферии к центру исходной трубчатой заготовки. Для схемы 4 характерно использование конической оправки, способной к возвратно-поступательному перемещению, что позволяет получить полые детали с переменной толщиной стенки [3, 9].

Экспериментальные исследования имели целью подтверждение результатов компьютерного моделирования и теоретических исследований, проведенных ранее при помощи энергетического метода верхней оценки. Для исследования закономерностей формоизменения и оценки деформированного состояния заготовки в процессе радиально-прямого выдавливания применили метод делительных координатных сеток. Делительная квадратная сетка с базой 2 мм была нанесена на меридиональное сечение полуфабриката, предварительно деформированного до завершения нестационарной стадии процесса и переходу к этапу прямого выдавливания. Это помогло избежать деформации составной заготовки и получить при дальнейшем деформировании на стадии комбинированного последовательного выдавливания изделие с деформированной сеткой.

Исследовалась стационарная стадия процесса радиально-прямого выдавливания. Вертикальные линии сетки до деформации и после имели номера от  $j=1$  до  $j=7$  (на оси симметрии  $j=0$ ), горизонтальные – от  $i=1$  до  $i=33$ , ячейки – от  $m=1$  до  $m=32$  (рис. 2, а).

Для сопоставления результатов экспериментальных и теоретических исследований были выделены две частицы металла, расположенные в точках 1 и 2 (соответственно, ячейках 1 и 26) (см. рис. 2, а). После совершённого ползуном испытательной машины рабочего хода 34 мм первая частица металла переместилась из точки 1 в точку 2, находясь постоянно в жёсткой области, а вторая частица металла прошла весь очаг деформации, занимаемый пластичной областью, начав движение из точки 2 и закончив движение в точке 3. Были рассчитаны траектории перемещения материальных частиц, координаты  $R$  и  $Z$  положения исследуемой точки, а также построен график зависимости приращения деформаций второй частицей при перемещении её из точки 2 в точку 3 в зависимости от координаты  $R$ .

Производились оценка деформированного состояния в процессе деформаций с помощью программ DEFORM 3D. МКЭ позволил получить картины распределения интенсивностей деформации в деформируемой заготовке из алюминиевого сплава АД31 в процессе радиально-прямого выдавливания. Был построен график зависимости приращения деформаций второй частицей при перемещении её из точки 2 в точку 3 в зависимости от координаты  $R$  (рис. 2, б). Деформированное состояние заготовки в процессе деформации имеет идентичный вид в программных пакетах Qform 2D/3D.

Горизонтальные и вертикальные линии деформированной делительной сетки достаточно точно описали реальное течение металла в процессе деформации (см. рис. 2, б). В центральной области заготовки очаг деформации имеет верхнюю коническую граничную поверхность. Наибольшей деформации подвержены слои металла, примыкающие ко дну полый детали. Большие значения интенсивности деформации сосредоточены в слое материала заготовки вблизи внутреннего радиуса стакана, а меньшие – в слое вблизи внешнего радиуса.

Произведена оценка и сопоставление данных, полученных в ходе эксперимента, и математическим моделированием, основанным на энергетическом методе баланса мощностей (верхней оценки) и методе конечных элементов.

Расчеты по энергетической математической модели (см. рис. 2, в), учитывающей деформационное упрочнение материала заготовки [16, 17], позволили установить значения следующих параметров: приращения компонент деформации для ячеек, расположенных между двумя выделенными линиями тока, накопленной деформации ячейкой при её перемещении из предыдущего положения, а также итоговой степени деформации, накопленной ячейкой на выходе из очага деформации. Энергетическая модель хорошо качественно и количественно описывает результаты экспериментальных исследований.

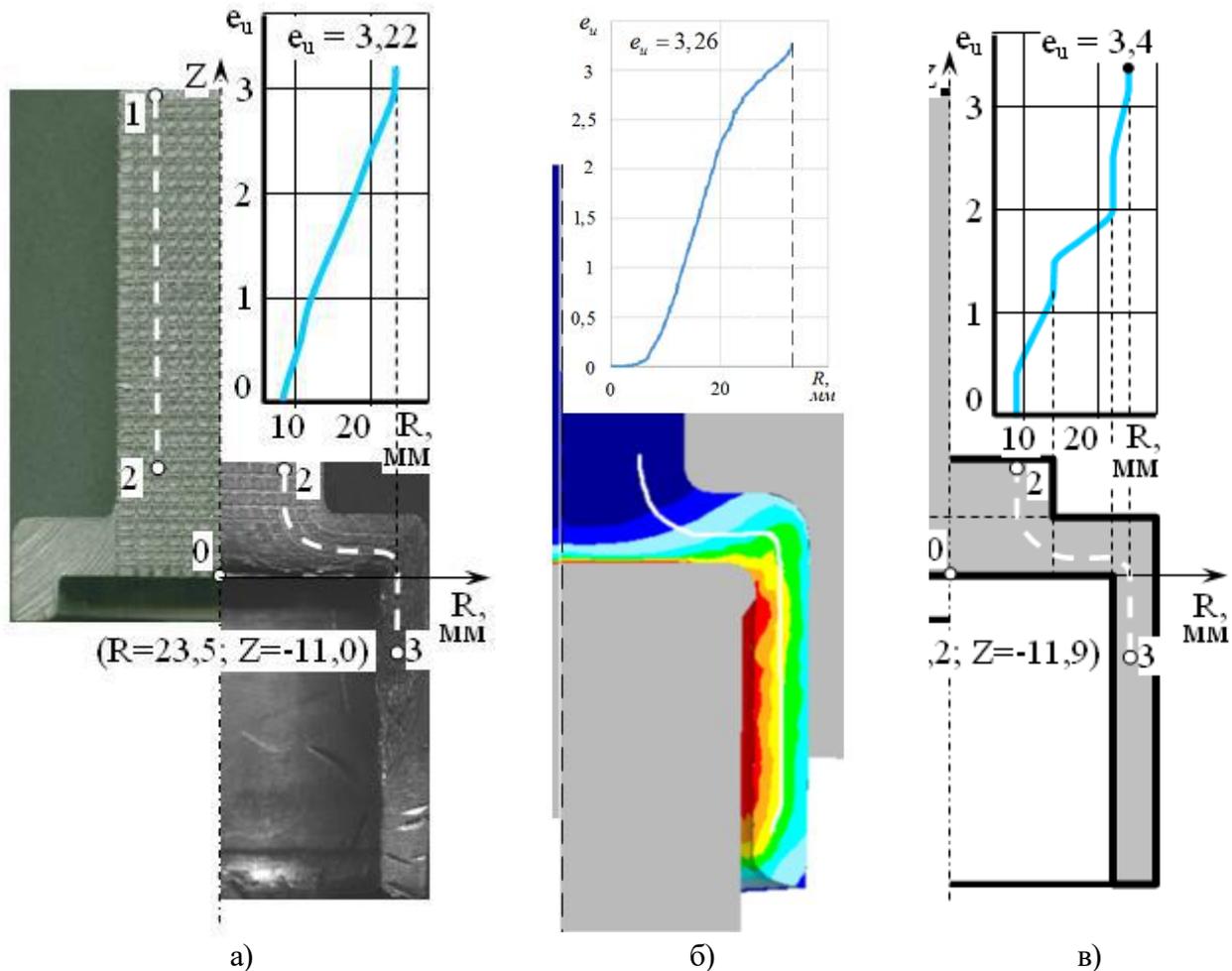


Рис. 2. Траектории движения частиц и накопленные деформации в детали: эксперимент (а), КЭ-модель (б), энергетическая модель (в).

Картина деформаций, полученные графики приращения степени деформаций, а также подобие картин искажения делительной сетки свидетельствуют о соответствии проведённых исследований с использованием различных методов моделирования.

Для оценки показателей напряжённо-деформированного состояния заготовки в очаге деформации на последовательных стадиях процесса радиально-прямого выдавливания были выбраны 5 характерных точек (P1–P5) в различных исследуемых зонах заготовки (см. рис. 3).

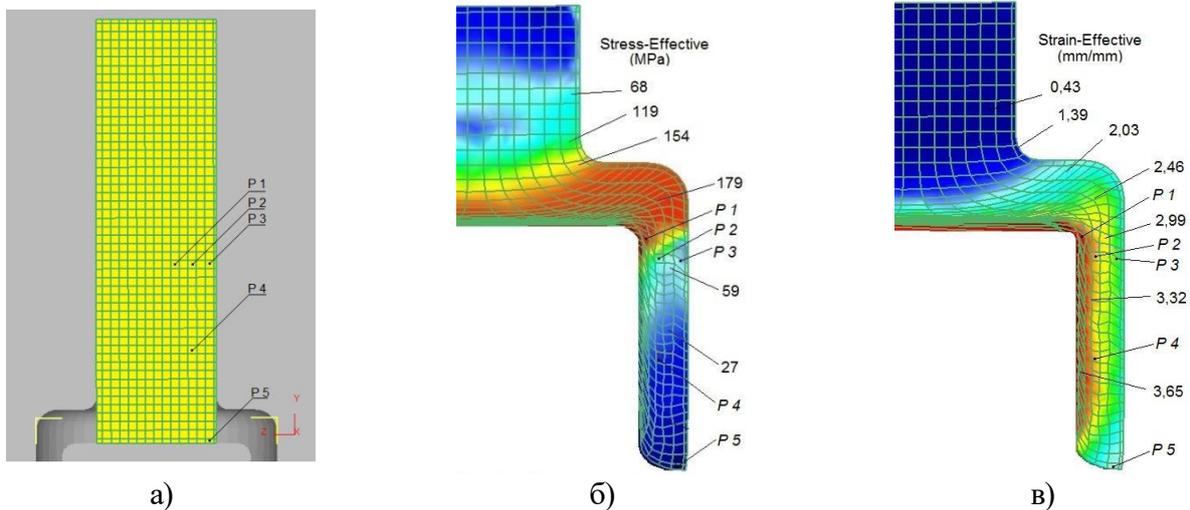


Рис. 3. Характерные точки (а) и распределения интенсивности напряжений  $\sigma_i$  (б) и интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  (в) в очаге деформации

Высокие значения интенсивности напряжений характерны для точек, находящихся в зоне разворота течения материала, то есть в очаге интенсивной деформации (точка P1, см. рис. 3, б)). Для точек, только что покинувших очаг деформации (P2 и P3), интенсивность напряжений заметно меньше, а для точек P4 и P5, полностью покинувших очаг деформации и расположенных в зоне прямого течения металла интенсивность напряжений существенно меньше максимальных величин в очаге деформации. Графики изменения интенсивности напряжений по мере прохождения частицами пластическую зону показывают различие в развитии напряжённого состояния зон, расположенных на боковой поверхности и в центральных областях исходной заготовки (рис. 4).

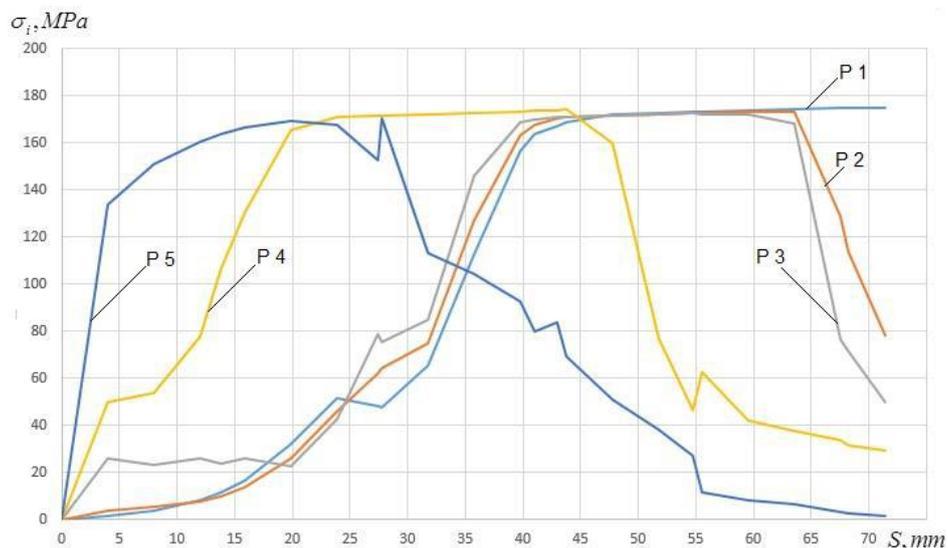


Рис. 4. Интенсивность напряжений в характерных точках очага деформации

Распределение интенсивности деформации, как уже было отмечено, отличается заметной неравномерностью. В центральной области детали наиболее деформированные слои прилегают к дну полости. В стенке стакана наибольшую деформацию приобретают внутренние слои (см. рис. 3, в). Графики нарастания деформаций по ходу процесса выдавливания отображают различие в характере накопления деформаций точками, расположенными в центральных зонах и на боковой поверхности исходной заготовки (рис. 5).

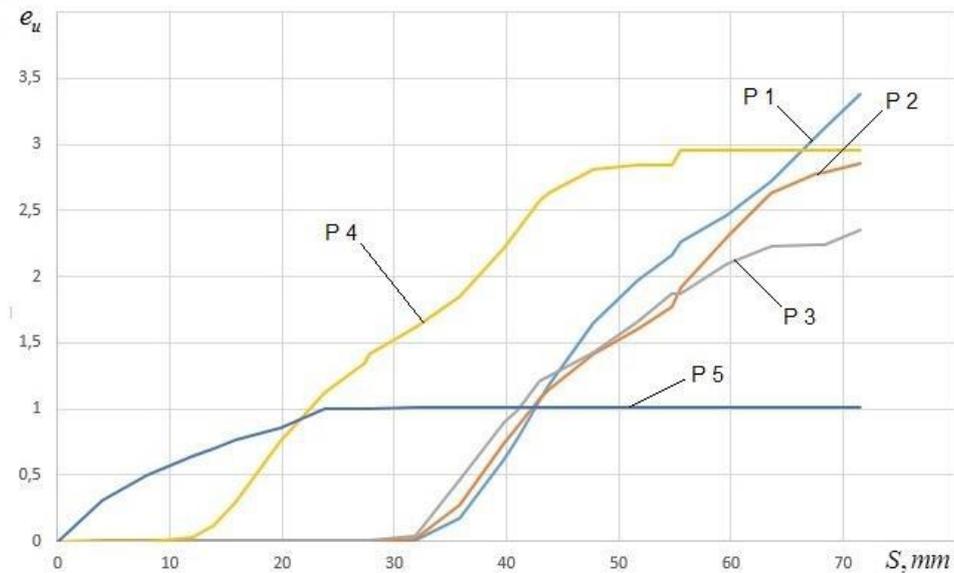


Рис. 5. Нарастание интенсивности деформации в характерных частицах по ходу процесса выдавливания

Видно также, что после прохождения материальными частицами очага деформации интенсивность деформации точек P4–P5 остается неизменной. До вхождения в очаг интенсивной деформации точек P1–P3 (до хода пуансона 34 мм) деформация соответствующих им зон практически незаметна, далее приращение деформации происходит относительно равномерно и без скачков. При этом более интенсивное нарастание присуще частицам, расположенным ближе к внутренней поверхности полости стакана (P1).

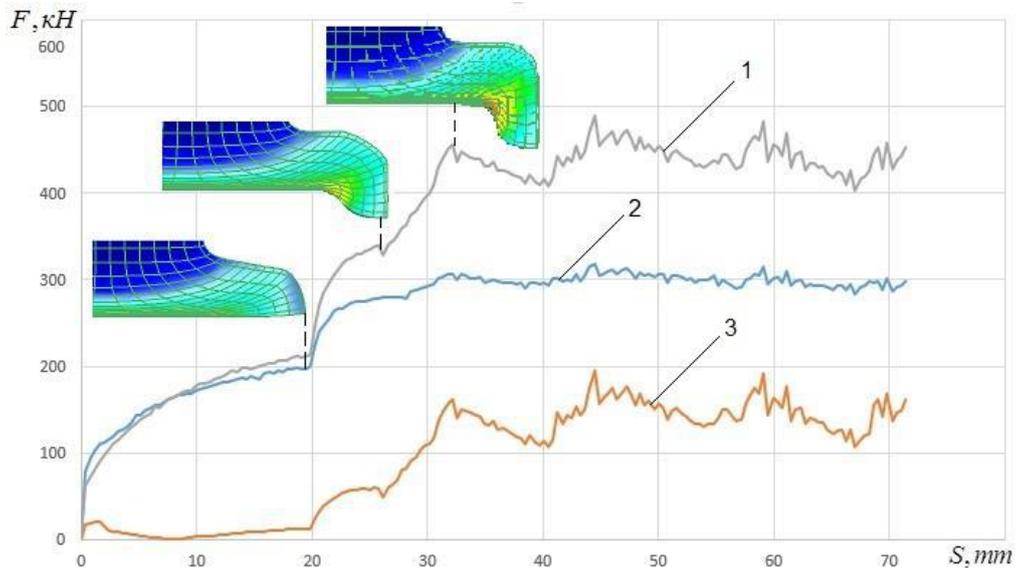


Рис. 6. Графики изменения силы выдавливания на контрпуансоне (1), матрице (2) и пуансоне (3)

На диаграмме «Путь-Сила» можно выделить три характерных этапа роста сил выдавливания на пуансоне, матрице и контрпуансоне, соответствующих следующим стадиям: свободного радиального течения металла, разворота течения металла с радиального на прямое направление и стадии стационарного течения с образованием очага деформации неизменной формы и устойчивого объема (рис. 6).

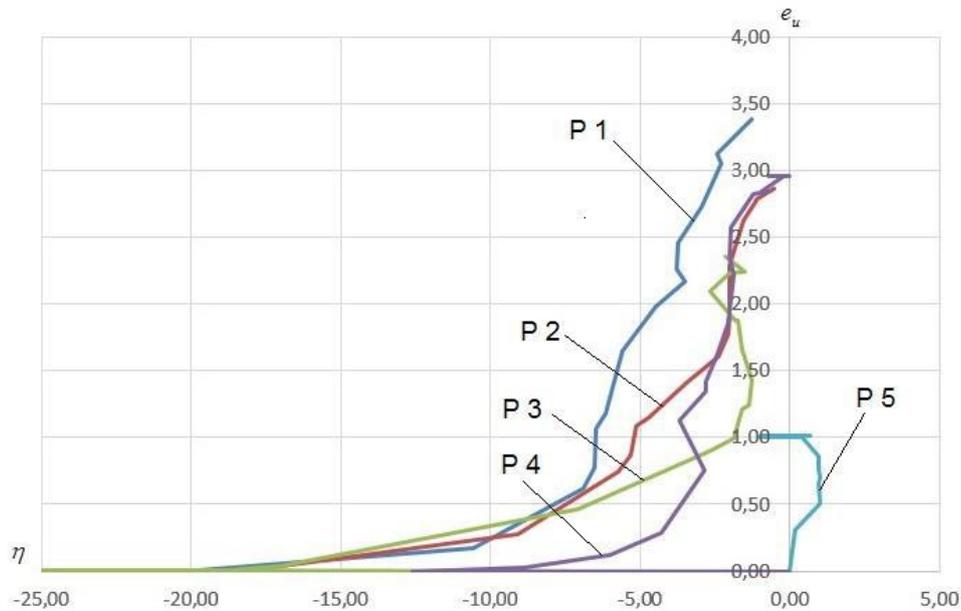


Рис. 7. Графики зависимости интенсивности деформации от показателя напряжённого состояния для частиц P 1–P5

Для количественной оценки характера изменения напряжённого состояния было установлено значение показателя жесткости напряжённого состояния в характерных зонах пластической деформации и построены «пути деформирования» в координатах интенсивность деформаций  $e_u$  – показатель напряженного состояния  $\eta$  (рис. 7): Значения  $\eta$  устанавливали по зависимости [18]:

$$\eta = \frac{3 \cdot \sigma_{mean}}{\sigma_i}, \quad \sigma_{mean} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3},$$

В основном, в координатах диаграммы пластичности « $e_u - \eta$ » значения показателя напряженного состояния расположены в благоприятной зоне отрицательных величин. Для частиц, расположенных на периферии фланца, формируемого на первой стадии радиального выдавливания (в точке P5), путь деформирования проходит и через зону с положительными значениями показателя  $\eta$ , что свидетельствует о вероятности разрушения металла из-за действия окружающих растягивающих напряжений. Интересно, что после достижения кромки выдавливаемого фланца зоны разворота металла с радиального направления на прямое вследствие изменения схемы напряженного состояния путь деформирования « $e_u - \eta$ » разворачивается и переходит в более благоприятную область. В последующем, «отстающие» частицы (P1–P2) деформируются более монотонно и не подвергаются такой опасности разрушения, так как обеспечены подпором со стороны уже сформированного участка стакана.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены разновидности комбинированного выдавливания полых деталей и способы радиально-продольного выдавливания в зависимости от кинематики и степени свободы течения металла, разделены на 2 группы – совмещенного и последовательного комбинированного выдавливания. Экспериментальным путем и моделированием методами конечных элементов и верхней оценки установлены характер распределения деформированного состояния для полых деталей типа стакана и накопления деформаций при холодном деформировании. Установлено, что зоны наиболее интенсивной деформации прилегают ко дну и внут-

ренной поверхности полости стакана. Методом конечных элементов изучены закономерности развития напряженно-деформированного состояния заготовок при радиально-прямом выдавливании с раздачей и дана оценка силовому режиму процесса. Установлено, что материальные частицы заготовки, расположенные на периферийных участках, подвергаются немонокотной деформации с положительным значением показателя напряженного состояния.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Евстратов В.А. *Основы технологии выдавливания и конструирования штампов*. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 144 с.
2. Алиев И.С. *Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания* / И.С. Алиев // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1990. – №2. – С. 7–9.
3. 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.
4. Farhoumand A. *Analysis of forward-backward-radial extrusion process* / A. Farhoumand, R. Ebrahimi // *Materials and Design*. – 2009. – Nr 30. – P. 2152–2157.
5. *Експериментальне дослідження деформованого стану комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання* / Алиева Л. І., Солодун Є. М., Гончарук Х. В., Шкіра О. В. // *Вестник Херсонского национального технического университета*. – Херсон, 2015. – № 4 (55). – С. 82–87.
6. *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.
7. 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.
8. 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.
9. Aliieva L. *Radial-direct extrusion with a movable mandrel* / L. Aliieva, I. Zhbankov // *Metallurgical and Mining Industry*. – Dnipropetrovsk, 2015. – № 11. – P. 175–183.
10. 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.
11. Алиева Л.И. *Способы снижения сил деформирования при холодном выдавливании* / Л.И. Алиева, О.В. Чучин, П.В. Гнездилов // *Вісник ХНТУ*. – Херсон, 2016. – № 1 (56). – С. 18–25.
12. Алиева Л.И. *Технологические возможности процессов радиально-прямого выдавливания с раздачей* / Л.И. Алиева, О.В. Чучин // *Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы XII Всероссийской НПК. Том 1. Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС*. 2015. – С. 148–152.
13. Osen W. *Kombiniertes Quer-Hohl-Worwarts-Fließpressen* / W. Osen // *Draht*. – 1986. – №3. – S. 133–137.
14. Шестаков Н.А. *Расчётная модель прессования труб по методу “RAFLO”* / Н.А. Шестаков // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр.* – Краматорськ: ДДМА, 2002. – С. 324–330.
15. Данилин Г.А. *Теория и расчеты процессов комбинированного пластического формоизменения* / Г.А. Данилин, В.П. Огородников. СПб.: БГТУ, 2004. 304 с.
16. Чучин О.В. *Течение упрочняющегося материала при комбинированном радиально-прямом выдавливании* / О.В. Чучин, Л.И. Алиева, А.И. Лобанов // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр.* – Луганськ: СНУ, 2001. – С.37–44.
17. Алиева Л.И. *Комбинированное выдавливание упрочняющегося материала* / Л.И. Алиева, О.В. Чучин, Е.В. Мироненко // *Научный вестник ДГМА*. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (19Е)– С. 116–131 – URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/%E2%84%963%2818%D0%95%29\\_2015/article/10.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963%2818%D0%95%29_2015/article/10.pdf).
18. Огородников В.А. *Ресурс пластичности металлов при холодном объемном формоизменении* / В.А. Огородников, И.А. Деревенько, Л. И. Алиева // *Монография*. – Винница : ВНТУ, ООО «Меркьюри-Подолье» 2016. – 176 с. – ISBN 978-966-2696-69-1.

#### REFERENCES

1. Evstratov V.A. *Osnovy tehnologii vydavlivaniya i konstruirovaniya shtampov*. – Har'kov: Vishha shkola. Izd-vo pri Har'k. un-te, 1987. – 144 s.
2. Aliiev I.S. *Tehnologicheskie vozmozhnosti novyh sposobov kombinirovannogo vydavlivaniya* / I.S. Aliiev // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. – 1990. – №2. – S. 7–9.
3. 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.

4. Farhoumand A. Analysis of forward-backward-radial extrusion process / A. Farhoumand, R. Ebrahimi // *Materials and Design*. – 2009. – Nr 30. – P. 2152–2157.
5. Eksperimental'ne doslidzhennja deformovanogo stanu kombinovanogo radial'no-pozdovzhn'ogo vidavljuvannja / Aliiva L. I., Solodun C. M., Goncharuk H. V., Shkira O. V. // *Vestnik Hersonskogo nacional'nogo tehniceskogo universiteta*. – Herson, 2015. – № 4 (55). – S. 82–87.
6. 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.
7. Dmitriev A. M. Vydavlivanie polyh izdelij s razdachej zagotovki v dvizhushhejsja matrice / A. M. Dmitriev, A. L. Voroncov // *Vestnik mashinostroenija*. – 2004. – № 10. – S. 55–61.
8. Chuchin O.V. Kombinirovannoe posledovatel'noe radial'no-prjamoe vydavlivanie polyh detalej / O.V. Chuchin, L.I. Aliieva // *Sovershenstvovanie processov i oborudovanija obrabotki davleniem v metallurgii i mashinostroenii: Sb. nauch. tr.* – Kramatorsk: DGMA, 2002. – S. 352–355.
9. Aliieva L. Radial-direct extrusion with a movable mandrel / L. Aliieva, I. Zhbankov // *Metallurgical and Mining Industry*. – Dnipropetrovsk, 2015. – № 11. – R. 175–183.
10. Renne I.P. Tehnologicheskie vozmozhnosti processa svobodnogo vydavlivannja (bez matricy) polyh detalej / I.P. Renne, A.I. Sumarokova // *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo*. – 1987. – №6. – S. 25–26.
11. Aliieva L.I. Sposoby snizhenija sil deformirovanija pri holodnom vydavlivannii / L.I. Aliieva, O.V.Chuchin, P.V. Gnezdilov // *Visnik HNTU*. – Herson, 2016. – № 1 (56). – S. 18–25.
12. Aliieva L.I. Tehnologicheskie vozmozhnosti processov radial'no-prjamogo vydavlivannja s razdachej / L.I. Aliieva, O.V. Chuchin // *Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo. Materialy XII Vserossijskoj NPK. Tom 1. Staryj Oskol: STI NITU MISiS*. 2015. – S. 148–152.
13. Osen W. Kombiniertes Quer-Hohl-Worwarts-Fliepressen / W. Osen // *Draht*. – 1986. – №3. – S. 133–137.
14. Shestakov N.A. Raschjotnaja model' pressovanija trub po metodu "RAFLO" / N.A. Shestakov // *Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni: Tematich. zb. nauk. pr.* – Kramatorsk: DDMA, 2002. – S. 324–330.
15. Danilin G.A. Teorija i raschety processov kombinirovannogo plasticheskogo formoizmenenija / G.A. Danilin, V.P. Ogorodnikov. SPb.: BGTU, 2004. 304 s.
16. Chuchin O.V. Techenie uprochnjajushhegosja materiala pri kombinirovannom radial'no-prjamom vydavlivannii / O.V. Chuchin, L.I. Aliieva, A.I. Lobanov // *Resursozberigajuchi tehnologii virobnictva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni: Zb. nauk. pr.* – Lugans'k: SNU, 2001. – S.37–44.
17. Aliieva L.I. Kombinirovannoe vydavlivanie uprochnjajushhegosja materiala / L.I. Aliieva, O.V. Chuchin, E.V. Mironenko // *Nauchnyj vestnik DGMA*. – Kramatorsk : DGMA, 2016. – № 1 (19E)– S. 116–131 – URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vestnik/%E2%84%963%2818%D0%95%29\\_2015/article/10.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vestnik/%E2%84%963%2818%D0%95%29_2015/article/10.pdf).
18. Ogorodnikov V.A. Resurs plastichnosti metallov pri holodnom ob#emnom formoizmenenii / V.A. Ogorodnikov, I.A. Dereven'ko, L. I. Aliieva // *Monografija*. – Vinnica : VNTU, OOO «Merk'juri-Podol'e» 2016. – 176 s.– ISBN 978-966-2696-69-1.

Алиева Л. И. – канд. техн.наук, доц., докторант ДГМА  
Алиев И. С. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД ДГМА  
Картамышев Д. А. – аспирант каф. ОМД 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 10.03.2017 г.