

УДК 621.777.01

Алиева Л. И.  
Сивак Р. И.  
Коцюбивская Е. И.  
Сухоруков С. И.

## ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ЗАГОТОВОК ПРИ РАДИАЛЬНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ

Холодная штамповка металлов выдавливанием широко используется во всех отраслях машиностроения. К преимуществам холодного выдавливания можно отнести высокую точность и качество поверхности получаемых заготовок, что позволяет получать штамповкой заготовки сложных конфигураций, которые не требуют последующей доработки методами обработки резанием [1–3]. Кроме того, при холодной пластической деформации происходит упрочнение деформируемого металла. Для изготовления сплошных и пустотелых деталей с фланцами разных толщин и диаметров в большинстве случаев используют способы холодного радиального выдавливания [1].

К факторам, которые ограничивают распространение холодного радиального выдавливания можно отнести наличие высоких удельных усилий, а также неблагоприятную схему напряженного состояния в области экватора фланца, что ограничивает возможности получения фланцев относительно больших размеров. При свободном выдавливании имеют место искажения формы фланцев в виде грибовидности или утяжин [1, 2]. Для управления формообразованием деталей с фланцами и утолщениями, получаемых поперечным выдавливанием, используются различные приемы силового и кинематического воздействия на деформируемую заготовку [1, 3]. Для повышения предельной степени формоизменения и устранения искажений формы фланца перспективными являются схемы радиального выдавливания с противодействием, которое может быть создано путем выдавливания в клиновидную или ступенчатую полость твердой рабочей среды [4–9].

Одними из первых работ, посвященных возможностям увеличения предельной степени формоизменения за счет создания противодействия, являются исследования Когана Р. [4] и Александера И. [5]. Ими обращено внимание на трудность обеспечения равномерного вытекания металла в радиальную полость и приложения противодействия из-за грибовидного искажения формы выдавливаемых фланцев. Выравнивание торца фланца для облегчения приложения противодействия может быть обеспечено путем последовательного двустороннего выдавливания металла заготовки в полость на начальной стадии процесса [1]. Теоретическому обоснованию целесообразности приложения противодействия при выдавливании фланцев и энергетическим расчетам процесса посвящены работы [6–9]. Актуальным представляется оценка изменения деформируемости заготовок, обусловленного созданием противодействия в приемной полости при радиальном выдавливании.

Целью работы является оценка технологической деформируемости заготовки при радиальном выдавливании с приложением противодействия с использованием критериев, учитывающих схему напряженного состояния.

Для исследования процесса радиального выдавливания с противодействием, которое создается техническим свинцом, использовали трубчатые заготовки из алюминиевого сплава АД1. На рис. 1 показана схема процесса, заготовка с  $d_{\text{вн}} = 20$  мм и  $d_{\text{нар}} = 30$  мм высотой  $h = 55$  мм и свинцовое кольцо с внешним диаметром, равным диаметру полости (ширина щели  $\delta = 2$  мм), в которую выдавливается фланец ( $d_{\text{пол}} = 120$  мм) и внутренним диаметром равным внешнему диаметру заготовки. Полученная после выдавливания заготовка показана на рис. 2. Диаметр фланца полученной заготовки составляет  $D_{\text{ф}} = 59,6$  мм. Применение для создания противодействия пластической среды позволяет устранить трудности уплотнения, возникающие при использовании жидкости.

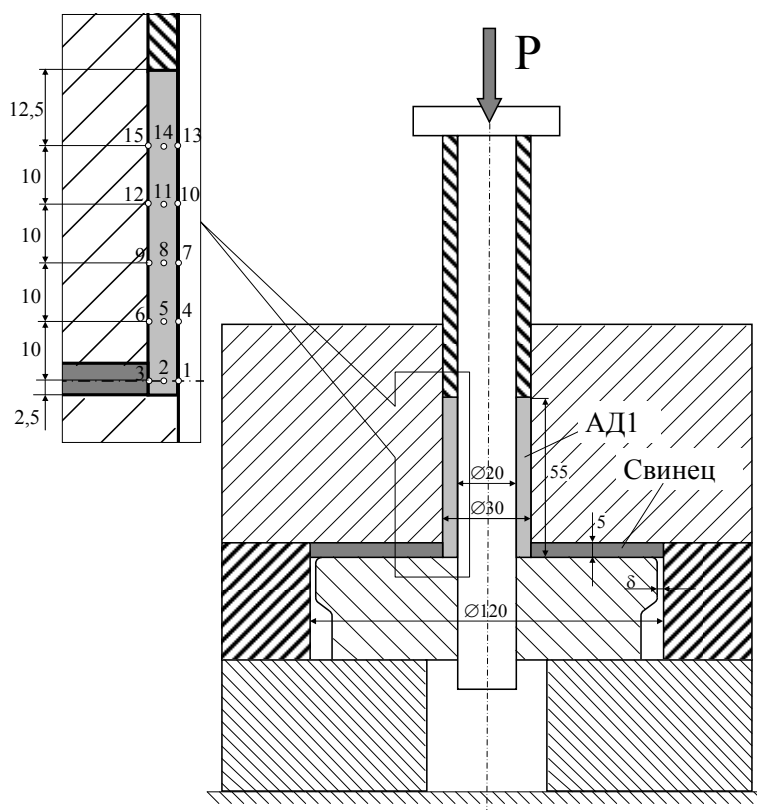


Рис. 1. Схема радиального выдавливания осесимметричных деталей с относительно тонким фланцем



Рис. 2. Заготовка до и после выдавливания

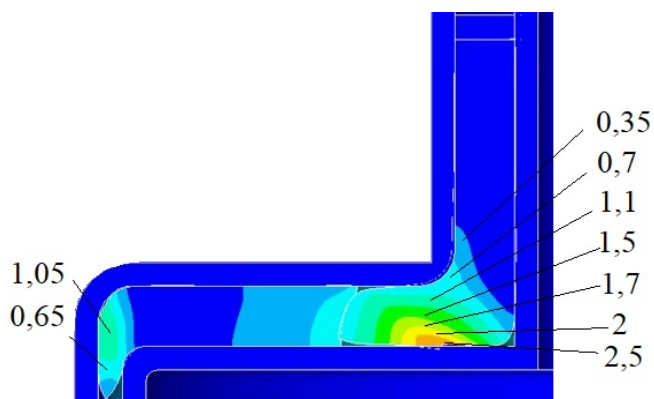


Рис. 3. Деформированное состояние заготовки

В работе [6] получено приближенное решение такой задачи инженерным и численным методами. При этом твёрдая рабочая среда выдавливалась в горизонтально расположенную клиновидную полость, образованную плоскостями разёма верхней и нижней матриц и расположенную в средней (по высоте) части выдавливаемого фланца. При такой схеме выдавливания значительно упрощается решение задачи пластического течения металла, однако существенно усложняется конструкция необходимого приспособления. В данной работе щель расположена вертикально, как показано на рис. 1, что упрощает конструкцию приспособления для выдавливания и позволяет получить такое приспособление меньших размеров. Для расчетов напряжённо-деформированного состояния (рис. 3) использована программа ANSYS.

Условия трения на поверхностях контакта заготовки и инструмента задавали по Кулону. Коэффициент трения принимали равным 0,3. Кривые течения алюминия и свинца аппроксимировали зависимостями:

для сплава алюминия АД1:

$$\sigma_u = 136e_u^{0,22}; \quad (1)$$

для технического свинца:

$$\sigma_u = 13,4e_u^{0,06}. \quad (2)$$

Напряжённно-деформированное состояние и закон его изменения в течение всего процесса формоизменения рассчитывали в характерных точках заготовки, показанных на рис. 1. В данной работе полученные результаты использовали для построения траекторий нагружения этих точек в координатах  $\eta, \mu_\sigma, e_u$  или  $\eta, \chi, e_u$ . Так как в качестве параметра выбрана одна из координат – степень деформации  $e_u$ , то уравнения траектории нагружения имеют вид:

$$\eta = \eta(e_u), \mu_\sigma = \mu_\sigma(e_u) \text{ или } \eta = \eta(e_u), \chi = \chi(e_u).$$

Полученные траектории в координатах  $\eta, \mu_\sigma, e_u$  приведены на рис. 3, а в координатах  $\eta, \chi, e_u$  на рис. 4. Значения показателя жёсткости напряжённного состояния  $\eta$ , параметра Лодде-Надаи  $\mu_\sigma$  и показателя В. А. Огородникова  $\chi$ , учитывающего влияние третьего инварианта тензора напряжений [10, 11], рассчитывали по формулам:

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}, \mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \chi = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u}. \quad (3)$$

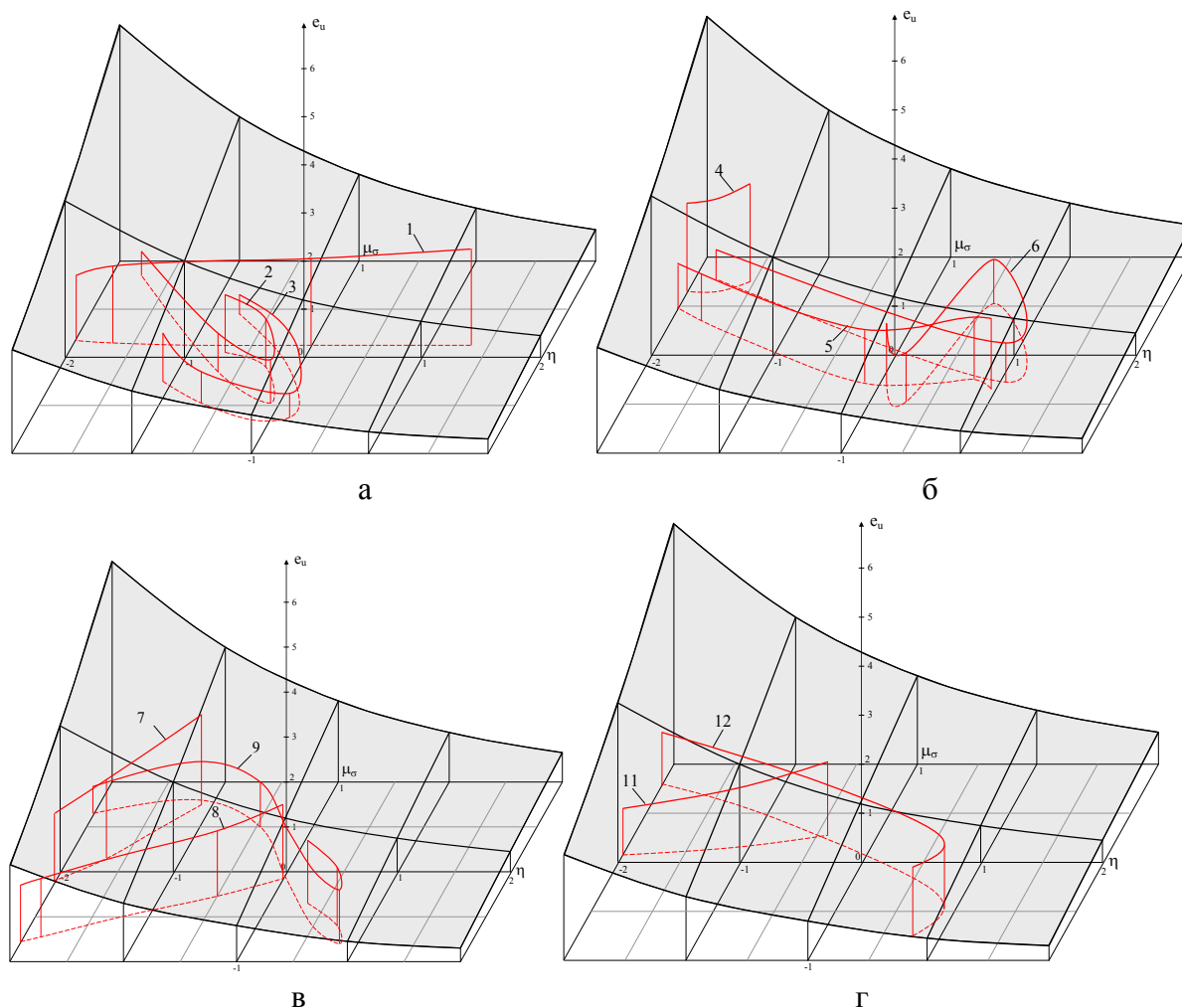


Рис. 4. Поверхность предельных деформаций АД1 и траектории нагружения в координатах  $\eta, \mu_\sigma, e_u$

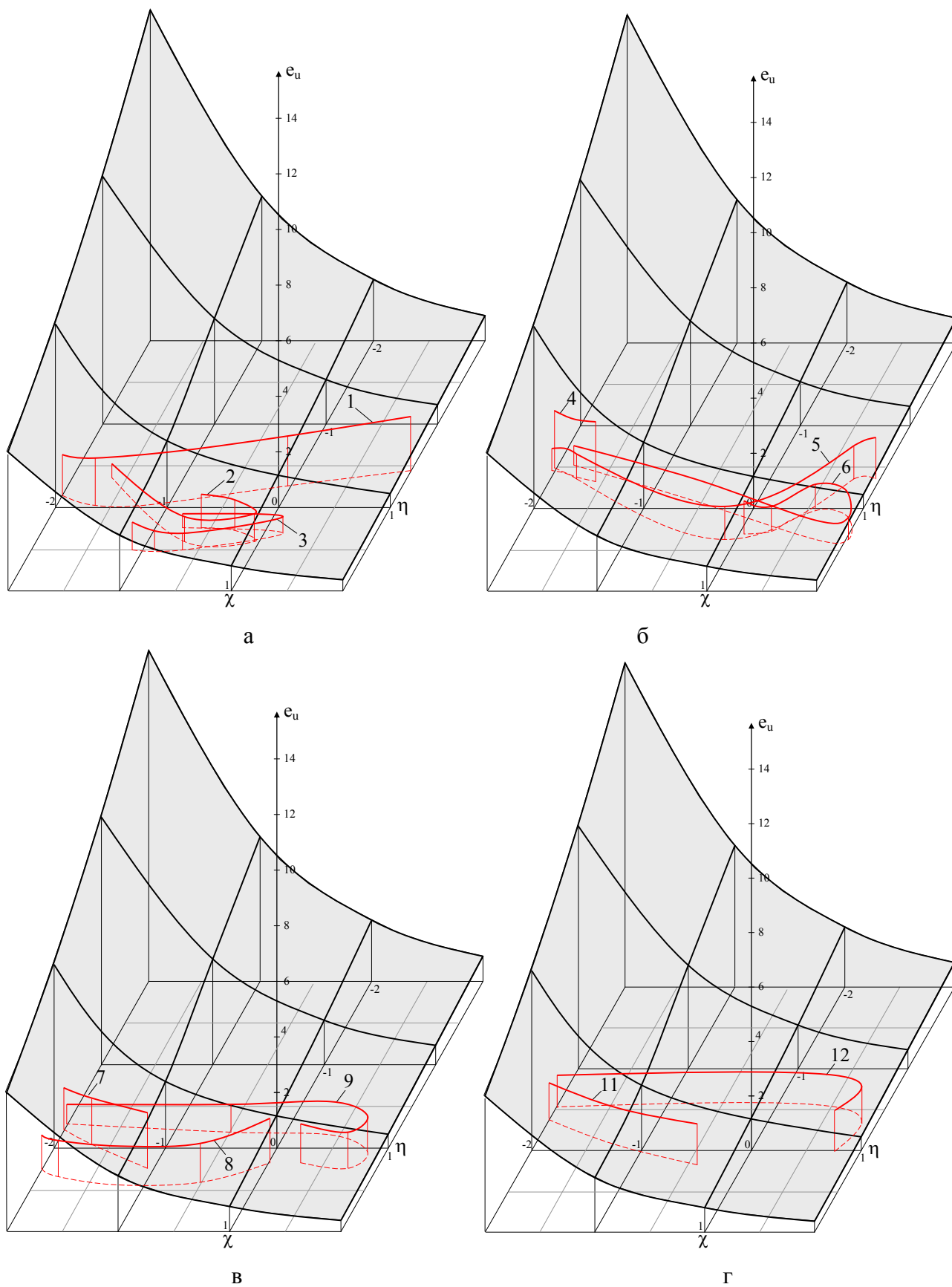


Рис. 5. Поверхность предельных деформаций АД1 и траектории нагружения в координатах  $\eta, \chi, e_u$

Степень деформации  $e_u$  рассчитывали по формуле:

$$e_u = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (4)$$

в которой использовали значения интенсивности скоростей деформаций  $\dot{\varepsilon}_u$ , полученные методом конечных элементов.

Так как траектории нагружения  $\eta(e_u)$ ,  $\mu_\sigma(e_u)$  и траектории  $\eta(e_u)$ ,  $\chi(e_u)$  имеют значительную кривизну (см. рис. 4, 5), то величину использованного ресурса пластичности рассчитывали по критерию Г. Д. Деля [12], который позволяет рассчитывать величину использованного ресурса пластичности  $\psi$  как при немонотонном, так и при сложном монотонном нагружении. Для оценки влияния истории нагружения на пластичность при объёмном напряжённом состоянии использовано пространство с координатами  $\eta$ ,  $\mu_\sigma$ ,  $e_u$ , в котором этот критерий принимает вид [13, 14]:

$$\psi = \sqrt{\psi_{ij}\psi_{ij}}, \quad (5)$$

где

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left( 1 - a + 2a \frac{e_u^*}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \right) \beta_{ij} \frac{de_u^*}{e_p(\eta, \mu_\sigma)}, \quad (6)$$

или пространство с координатами  $\eta$ ,  $\chi$ ,  $e_u$ :

где

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left( 1 - a + 2a \frac{e_u^*}{e_p(\eta, \chi)} \right) \beta_{ij} \frac{de_u^*}{e_p(\eta, \chi)}, \quad (7)$$

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u},$$

$e_u^*$  – степень деформации при соответствующих значениях  $\eta$  и  $\mu_\sigma$

$e_p = \int_0^{t_p} \dot{\varepsilon}_u d\tau$  – предельная деформация,

$t_p$  – время деформирования до разрушения, константу  $a$  принимали равной  $a = 0,2$ .

Поверхности предельных деформаций аппроксимировали зависимостями, полученными в работах [8, 14]:

– поверхность предельных деформаций алюминия АД1 в координатах  $\eta$ ,  $\mu_\sigma$ ,  $e_u$  [8]:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1,20 \exp(0,5246\mu_\sigma - 0,32540\eta);$$

– поверхность предельных деформаций алюминия АД1 в координатах  $\eta$ ,  $\chi$ ,  $e_u$  [14]:

$$e_p(\eta, \chi) = 1,2 \exp(-0,85\eta - 0,3\chi).$$

Значение  $de_u$  берется в точке с координатами  $\eta$ ,  $\mu_\sigma$ ,  $e_u$  в формуле (6) или в точке с координатами  $\eta$ ,  $\chi$ ,  $e_u$  в формуле (7).

На рис. 3 приведены траектории нагружения для интервалов значений  $-2 \leq \eta \leq 1$ ,  $-1 \leq \mu_\sigma \leq 1$ , а на рис. 4 для интервалов  $-2 \leq \eta \leq 1$  и  $-2 \leq \chi \leq 1$ . Такие интервалы выбраны потому, что для всех точек значения  $\chi$  находятся в интервале  $-2,5 \leq \chi \leq 0,5$ , значения  $\mu_\sigma$

в интервале  $-1 \leq \mu_\sigma \leq 1$ , а значения  $\eta$  не превышают единицы, то есть во всех точках  $\eta < 1$ . Однако в отрицательной области  $\eta$  достигает величины  $\eta = -10,4$  (точка 11). Минимальные значения  $\eta$  для выбранных точек заготовки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Минимальные значения  $\eta$  для точек заготовки 1 – 15.

Точки	$\eta$	Точки	$\eta$	Точки	$\eta$	Точки	$\eta$	Точки	$\eta$
1	-5,35	4	-3,9	7	-4,95	10	-7	13	-8,6
2	-1,66	5	-5,56	8	-8,34	11	-10,4	14	-9,76
3	-0,86	6	-1,85	9	-8,3	12	-8,7	15	-8,31

Выбранные на рис. 3, 4 интервалы значений  $\eta$  обусловлены тем, что при  $\eta < -2$ ,  $\mu_\sigma > 0$  и  $\chi < 0$  интенсивность процессов накопления повреждений очень низка и с дальнейшим уменьшением  $\eta$  более интенсивны процессы «залечивания», которые при  $\eta < -4$  сопровождаются изменением структуры деформированного металла. Поэтому такие условия пластической деформации часто используют для улучшения механических характеристик материалов [15].

На рис. 3, 4 полностью приведены траектории точек 2, 3 и 6. Для остальных точек показана только та часть траектории, значения  $\eta$ ,  $\chi$  и  $\mu_\sigma$  которой соответствуют принятым на рис. 3, 4 интервалам этих величин. Часть траекторий для значений  $\eta < -2$  не показана.

Траектории точек 13, 14, 15 на рис. 3, 4 не показаны, так как  $\eta$  в этих точках изменяется в пределах:

$$-8,60 \leq \eta_{13} \leq -4,35, -9,76 \leq \eta_{14} \leq 4,11, -8,31 \leq \eta_{15} \leq 3,65.$$

Анализ характера траекторий нагружения, приведённых на рис. 3, 4, показывает, что для точек 5, 6, 9, 12, 15 характерно немонотонное нагружение, в остальных точках имеет место сложное нагружение в условиях объёмного напряжённого состояния. Поэтому величину использованного ресурса пластичности  $\psi$  рассчитывали по критерию (5) для всего интервала значений  $\eta$ ,  $\chi$ ,  $\mu_\sigma$  и  $e_u$ . Результаты расчётов  $\psi_\eta$  по формуле (5) с использованием компонент тензора повреждений (6) и  $\psi_\chi$  – по (5) с использованием компонент тензора повреждений (7) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчётов  $\psi_\eta$  по (5) с использованием (6) и  $\psi_\chi$  – по (5) с использованием (7)

Точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Расчёт $\psi$ по (5) с использованием (6)															
$\psi_\eta$	0,60	0,48	0,52	0,30	0,47	0,43	0,28	0,36	0,51	0,08	0,28	0,46	0,06	0,08	0,08
Расчёт $\psi$ по (5) с использованием (7)															
$\psi_\chi$	0,53	0,41	0,44	0,24	0,40	0,35	0,24	0,30	0,43	0,05	0,23	0,40	0,05	0,06	0,07

Как видно из табл. 2, при выбранной модели процесса накопления повреждений, описываемой критерием (5), результаты расчётов значений  $\psi$  с использованием координат  $\eta$ ,  $\mu_\sigma$ ,  $e_u$  или  $\eta$ ,  $\chi$ ,  $e_u$  отличаются незначительно.

Незначительное уменьшение расчётных значений  $\psi_\chi$  по сравнению с  $\psi_\eta$  обусловлено тем, что предельная деформация  $e_p$  в области отрицательных значений  $\eta$  и  $\chi$  увеличивается быстрее, чем в области, где  $\eta < 0$ , а  $\mu_\sigma > 0$ . Необходимо отметить, что в работах Огородникова В. А. [10, 15] показано, что использование при исследовании пластичности металлов в условиях объёмного напряжённого состояния показателя  $\chi$  вместо  $\mu_\sigma$  при оценке использованного ресурса пластичности  $\psi$  позволяет получить расчётные значения  $\psi$  более близкие к экспериментальным.

Кроме того, при пересечении плоскости  $\chi = 0$  (плоское напряжённое состояние) с поверхностью предельных деформаций  $e_p(\eta, \chi)$ , получается предельная кривая  $e_p(\eta, 0)$ , которая полностью совпадает с диаграммой пластичности  $e_p(\eta)$ .

В работе [13] показано, что при использовании в качестве координат  $\eta, \mu_\sigma, e_u$  для исследования пластичности металлов при объёмном напряжённом состоянии, плоское напряжённое состояние описывается тремя предельными кривыми.

При  $\sigma_2 = 0$  зависимость пластичности от схемы напряжённого состояния описывается предельной кривой  $e_{p2}(\eta)$ , которая получается от пересечения поверхности  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$  с поверхностью:

$$f_2(\eta, \mu_\sigma) = \eta + \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} = 0 \quad (8)$$

и в интервале значений  $-1 \leq \eta \leq 1$  полностью совпадает с известной диаграммой пластичности  $e_p(\eta)$ .

При  $\sigma_1 = 0$  имеет место плоское сжатие и зависимость  $e_p$  от  $\eta$  описывается предельной кривой  $e_{p1}(\eta)$ , которая является результатом пересечения поверхности:

$$f_1(\eta, \mu_\sigma) = \eta - \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} \quad (9)$$

с поверхностью предельных деформаций  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ . Показатель напряжённого состояния  $\eta$  в этом случае изменяется в пределах  $-2 \leq \eta \leq -1$ .

Третий случай отвечает условиям плоского растяжения ( $\sigma_3 = 0$ ). В этом случае зависимость пластичности от схемы напряжённого состояния описывается предельной кривой  $e_{p3}(\eta)$ , которая получается в результате пересечения поверхности:

$$f_3(\eta, \mu_\sigma) = \eta - \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} = 0 \quad (10)$$

с поверхностью предельных деформаций  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ . Показатель  $\eta$  в этом случае изменится в пределах  $1 \leq \eta \leq 2$ .

Наличие трёх предельных кривых значительно усложняет расчёт  $\psi$  при плоском напряжённом состоянии в случае использования координат  $\eta, \mu_\sigma, e_u$  по сравнению с расчётом  $\psi$  при использовании координат  $\eta, \chi, e_u$ , где плоское напряжённое состояние ( $\chi = 0$ ) описывается известной диаграммой пластичности  $e_p(\eta)$  во всём интервале значений  $\eta$ .

## ВЫВОДЫ

Из анализа полученных результатов следует, что наиболее опасными, с точки зрения разрушения, является точка 1, которая находится на внутренней поверхности заготовки, и точки 3, 9 на внешней поверхности заготовки. В точках 10, 13, 14, 15 значения использованного ресурса пластичности минимальны.

Использование координат  $\eta, \chi, e_u$  вместо  $\eta, \mu_\sigma, e_u$  для оценки  $\psi$  упрощает расчёты  $\psi$ , так как плоское напряжённое состояние в этом случае описывается известной диаграммой пластичности  $e_p(\eta)$ , кроме того, расхождение между расчётными и экспериментальными значениями  $\psi$  уменьшается.

При выдавливании трубчатой заготовки без противодействия максимальный диаметр фланца, который можно было получить из алюминия, не превышал  $D_{\phi} = 44,36$  мм, при этом он имеет коническую форму. При использовании противодействия, создаваемого пластической средой, даже при ширине щели выпускного канала  $\delta = 2$  мм величина использованного ресурса пластичности в самой опасной точке 1 не превышала  $\psi_6 \leq 0,6$  при диаметре фланца  $D_{\phi} = 59,6$  мм.

Применение для создания противодействия пластической среды позволяет устранить трудности уплотнения, возникающие при использовании жидкости. В тоже время из результатов расчётов следует, что при использовании твёрдого тела с низким пределом текучести, создаваемое противодействие близко к гидростатическому.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 6. – С. 1–4.
2. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion / I. Aliiev, L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zbankov // Scientific and technical journal Metallurgical and mining industry. – Dnepropetrovsk, 2011. – Vol. 3. – № 7. – P. 17–22.
3. Aliieva Leila. Radial-direct extrusion with a movable mandrel / Leila Aliieva, Yaroslav Zbankov // Metallurgical and Mining Industry. «International scientific conference «RELIABILITY SAFETY TECHNOLOGIC EQUIPMENT» RSTE-2015». – Dnepropetrovsk, 2015. – № 11. – P. 175–183.
4. Коган Р. М. Штамповка с противодействием / Р. М. Коган // Конструирование и технология машиностроения. – 1965. – № 2. – С. 1–7.
5. Alexander I. On the Cold Extrusion of Flanges against High Hydrostatic Pressure / I. Alexander, B. Lengyel // I. Inst. Metals. – 1964–1965. – Vol. 93. – Part 5. – P. 137–145.
6. Оценка деформируемости заготовок при радиальном выдавливании с противодействием / Е. И. Коцюбовская, И. О. Сивак, Л. И. Алиева, С. В. Куценко // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 29–33.
7. Алиева Л. И. Деформирование заготовок способом радиального выдавливания с противодействием / Л. И. Алиева // Вестник ХНТУ. Херсон. – 2016. – № 2 (57) – С. 29–36.
8. Алиева Л. И. Деформируемость заготовок при радиальном выдавливании с противодействием / Л. И. Алиева, Е. И. Коцюбовская // Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта : Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції 21–24 червня 2016, Одеса – Київ : Національний технічний університет України «КПІ», 2016. – С. 61–64.
9. Оценка технологической деформируемости при поперечном выдавливании / Л. И. Алиева, Р. И. Сивак, Е. И. Коцюбовская, С. И. Сухоруков // Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта. Матеріали XVIII Міжнародної науково-технічної конференції 29 червня – 1 липня 2017. – Київ : НТУУ «КПІ», 2017. – С. 108–110.
10. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.
11. Алиева Л. И. Влияние гидростатического давления и истории его изменения на пластичность в задачах обработки металлов давлением / Л. И. Алиева, В. А. Огородников // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула : ТулГУ, 2014. – Вып. 10. – Ч. 1. – С. 118–128.
12. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла / Г. Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. – 1982. – № 11. – С. 28–32.
13. Сивак И. О. Пластичность металлов при холодной пластической деформации / И. О. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць. – Краматорськ–Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 168–171.
14. Сивак Р. І. Залежність пластичності металів від історії навантаження при об'ємному напруженому стані / Р. І. Сивак, О. В. Нахайчук, В. А. Огородніков // Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Вінниця : ВДАУ, 2009. – С. 79–83.
15. Огородников В. А. Ресурс пластичности металлов при холодном объемном формоизменении : монография / В. А. Огородников, И. А. Деревенько, Л. И. Алиева. – Винница : ВНТУ, ООО «Меркьюри-Подолье» 2016. – 176 с. – ISBN 978-966-2696-69-1.

### REFERENCES

1. Aliiev I. S. Tehnologicheskie processy holodnogo poperechnogo vydavlivaniya / I. S. Aliiev // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1988. – № 6. – S. 1–4.
2. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion / I. Aliiev, L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zbankov // Scientific and technical journal Metallurgical and mining industry. – Dnepropetrovsk, 2011. – Vol. 3. – № 7. – P. 17–22.



3. Aliieva Leila. Radial-direct extrusion with a movable mandrel / Leila Aliieva, Yaroslav Zhbakov // *Metalurgical and Mining Industry. «International scientific conference «RELIABILITY SAFETY TECHNOLOGIC EQUIPMENT» RSTE-2015»*. – Dnipropetrovsk, 2015. – № 11. – R. 175–183.

4. Kogan R. M. Shtampovka s protivodavleniem / R.M. Kogan // *Konstruivovanie i tehnologija mashinostroeni-ja*. – 1965. – № 2. – S. 1–7.

5. Alexander I. On the Cold Extrusion of Flanges against High Hydrostatic Pressure / I. Alexander, B. Lengyel // *I. Inst. Metals*. – 1964–1965. – Vol. 93. – Part 5. – P. 137–145.

6. Ocenka deformiruemosti zagotovok pri radial'nom vydavlivanii s protivodavleniem / E. I. Kocjubivskaja, I. O. Sivak, L. I. Aliieva, S. V. Kucenko // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2008. – № 1 (19). – С. 29–33.

7. Aliieva L. I. Deformirovanie zagotovok sposobom radial'nogo vydavlivaniija s protivodavleniem / L. I. Aliieva // *Vestnik HNTU. Herson*. – 2016. – № 2 (57) – S. 29–36.

8. Aliieva L. I. Deformiruemost' zagotovok pri radial'nom vydavlivanii s protivodavleniem / L. I. Aliieva, E. I. Kocjubivskaja // *Progresivna tehnika, tehnologija i inzhenerna osvita : materialy XVII Mizhnarodnoji naukovno-tehnichnoji konferenciji 21–24 chervnja 2016, Odesa – Kijiv : Nacional'nij tehnicnij universitet Ukraini «KPI»*, 2016. – S. 61–64.

9. Ocenka tehnologicheskoj deformiruemosti pri poperechnom vydavlivanii / L. I. Aliieva, R. I. Sivak, E. I. Kocjubivskaja, S. I. Suhorukov // *Progresivna tehnika, tehnologija i inzhenerna osvita. Materialy XVIII Mizhnarodnoji naukovno-tehnichnoji konferenciji 29 chervnja – 1 lipnja 2017*. – Kijiv : NTUU «KPI», 2017. – S. 108–110.

10. Ogorodnikov V. A. Deformiruemost' i razrushenie metallov pri plasticheskom formoizmenenii / V. A. Ogorodnikov. – K. : UMK VO, 1989. – 152 s.

11. Aliieva L. I. Vlijanie gidrostaticheskogo davlenija i istorii ego izmenenija na plastichnost' v zadachah obrabotki metallov davleniem / L. I. Aliieva, V. A. Ogorodnikov // *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*. – Tula : TulGU, 2014. – Vyp. 10. – Ch. 1. – S. 118–128.

12. Del' G. D. Plastichnost' deformirovannogo metalla / G. D. Del' // *Fizika i tehnika vysokih davlenij*. – 1982. – № 11. – S. 28–32.

13. Sivak I. O. Plastichnost' metallov pri holodnoj plasticheskoj deformacii / I. O. Sivak // *Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgiji i mashinobuduvanni : temat. zb. nauk. prac'*. – Kramatorsk-Slov'jans'k : DDMA, 2000. – S. 168–171.

14. Sivak R. I. Zalezhnist' plastichnosti metaliv vid istorii navantazhennja pri ob'emnomu napruzhenomu stani / R. I. Sivak, O. V. Nahajchuk, V. A. Ogorodnikov // *Zbirnik naukovih prac' Vinnic'kogo derzhavnogo agrarnogo universitetu. Serija : Tehnicni nauki*. – Vinnicja : VDAU, 2009. – S. 79–83.

15. Ogorodnikov V. A. Resurs plastichnosti metallov pri holodnom ob'emnom formoizmenenii : monografija / V. A. Ogorodnikov, I. A. Dereven'ko, L. I. Aliieva. – Vinnica : VNTU, ООО «Merk'juri-Podol'e» 2016. – 176 s. – ISBN 978-966-2696-69-1.

Алиева Л. И. – д-р техн. наук, доц. каф. ОМД ДГМА;

Сивак Р. И. – канд. техн. наук, доц., докторант ВНТУ;

Коцюбивская Е. И. – канд. техн. наук, доц. КНУКиИ;

Сухоруков С. И. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

КНУКиИ – Киевский национальный университет культуры и искусств, г. Киев.

E-mail: [omd@dgma.donetsk.ua](mailto:omd@dgma.donetsk.ua)

Статья поступила в редакцию 20.09.2018 г.