

**Висновки.** В умовах сьогодення підготовка фахівців-металургів вимагає впровадження сучасних форм і методів навчання, корінної перебудови процесу діяльності викладачів і здобувачів, вдосконалення методичного забезпечення. Використання інноваційних освітніх технологій є одним з пріоритетних напрямків розвитку вищих навчальних закладів, що дозволяє підвищити професійний рівень викладання окремої дисципліни та системи магістерської підготовки, уникнути перенавантаження студентів та викладачів, сприяє творчій продуктивності мислення, навичок та вмінь майбутнього фахівця.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Про вищу освіту : Закон України від 04 червня 2020 р. № 676-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2020. № 42.
2. Хуторской А. В. Технология проектирования ключевых и предметных компетенций. *Интернет-журнал «Эйдос»*. URL: <http://www.eidos.ru/journal/2005/1212.htm>.
3. Зеер Э.Ф. Психология профессионального развития : учеб. пособие для студ. высш. учебн. завед. М. : Изд. центр «Академия», 2006. 240 с.
4. Кремень В. Освіта і наука України: шлях модернізації (Факти, роздуми, перспективи). К. : Грамота, 2003. 216 с.
5. Василев Я. Д., Минаев А. А. Теория продольной прокатки : учебник для магистров вузов. Донецк : УНИТЕХ, 2010. 456 с.
6. Царенко М. О., Нікуліна І. Ю. Застосування мультимедіа у формуванні методичної компетентності майбутніх учителів фізики. *Наука і освіта*. 2015. № 6. С. 130–136.
7. Нікулін О. В., Наконечна Т. В. Використання інноваційних педагогічних технологій на випускаючій кафедрі. *Materials of the XVI International Scientific and Practical Conference «European Science of the XXI Century»*. Przemysl : Nauka I Studia, 2020. Vol. 2. P. 100–103.

Надійшла до редколегії 03.09.2020.

УДК 621.73: 621.735.32

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.15

КУХАРЬ В.В., д.т.н., професор  
ПРИСЯЖНЫЙ А.Г., к.т.н., доцент  
КОРЕНКО М.Г., к.т.н., доцент  
АНИЩЕНКО А.С., к.т.н., доцент  
НИКОЛЕНКО Р.С.\* к.т.н., науч.сотруд.

ГБУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь  
\*Технологический учебно-научный институт Государственного университета экономики и технологий, г. Кривой Рог

#### **АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ОСАДКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ РАДИУСНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

**Введение.** На целесообразность использования ковки выпуклым продолговатым инструментом цилиндрических заготовок в качестве профилирующей операции в технологиях производства поковок типа пластин указано в работах [1, 2]. При осадке выпуклой плитой создается вогнутая конфигурация боковой поверхности блока, которая выравнивается при последующей протяжке вследствие неравномерности продольной

деформации. В процессе деформирования заготовки в ручьях происходит изменение её формы в продольном и поперечном направлении, а сравнение конечных и начальных размеров показывает величину макропоказателей деформации. Часть металла, которая не будет ограничена формой инструмента, течет неравномерно и в различных направлениях. При этом не следует рассматривать неравномерность деформации или отклонение от цилиндрической формы заготовки как негативное явление [3, 4].

В исследованиях [5, 6] показано, что в процессе осадки радиусными выпуклыми штамповыми вставками наблюдается вытяжка заготовки в направлении, перпендикулярном горизонтальной оси инструмента, и выраженное бочкообразование различной формы. Конфигурация полуфабриката зависит от отношения исходных геометрических размеров заготовки (высоты ( $H_0$ ) к диаметру ( $D_0$ )), отношения радиуса выпуклости ( $R$ ) осадочных плит к начальному диаметру заготовки (т.е. от величины, называемой радиусностью  $R/D_0$  инструмента) и от степени обжатия заготовки  $\varepsilon_i$ . Боковой профиль преобразовывается в одинарную либо двойную бочку. В процессе осадки и возникновения бочкообразности у полуфабриката появляются зоны затруднённой деформации, что приводит к лучшей проработке осевой зоны заготовки, заварке внутренних дефектов и раздроблению зернистой структуры металла [1]. При использовании осадки в качестве предварительного профилирования перед последующей штамповкой поковок пластин наличие бочкообразования и сформировавшихся выступов способствует лучшему заполнению гравюры окончательного ручья штампа [4].

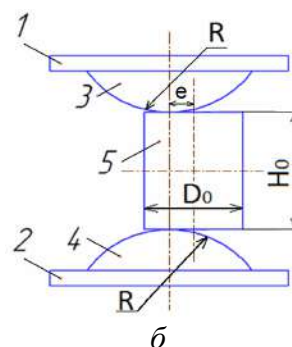
**Постановка задачи.** Необходимый для назначения рациональных режимов деформации теоретический анализ процесса асимметричной осадки радиусными бойками затруднен отсутствием определенных геометрических соотношений в очаге деформации, которым охвачена вся деформируемая заготовка.

Цель работы – провести теоретический анализ формоизменения цилиндрических заготовок при асимметричной осадке радиусным инструментом и определить основные геометрические соотношения в очаге деформации.

**Результаты работы.** Предварительное определение характера течения металла заготовки выполняли с использованием специализированного компьютерного пакета Deform 3D для конечно-элементного анализа процессов обработки металлов давлением. Схема асимметричной осадки цилиндрической заготовки выпуклым радиусным инструментом приведена на рис. 1. Постановочное моделирование проводили для различных условий; примеры результатов моделирования асимметричной осадки заготовок при  $f_i = 0,3$ , с указанием стрелочками направления и скорости течения материала (векторов перемещения материальных частиц металла заготовки), приведены на рис. 2.



а

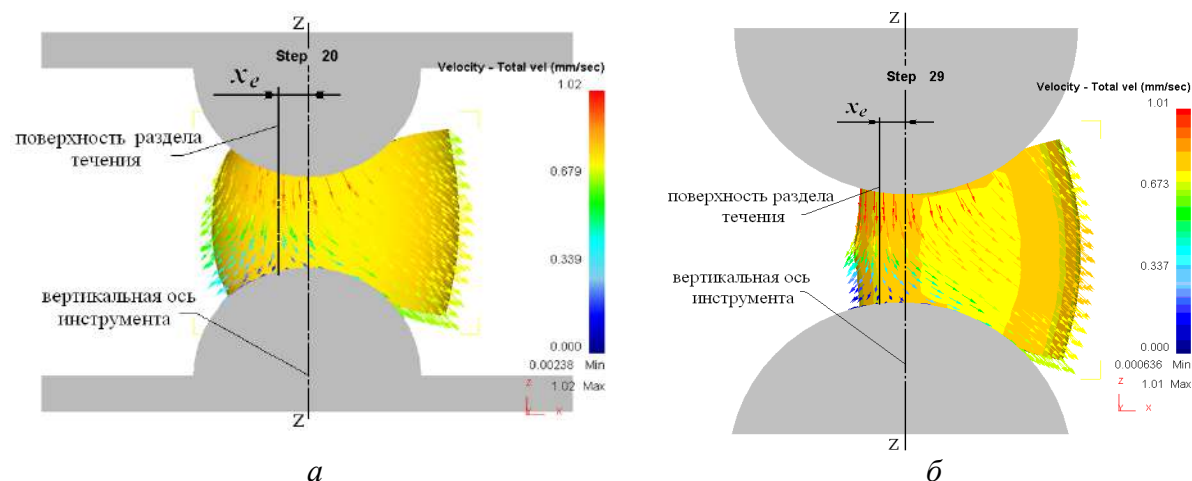


б

1 и 2 – верхняя и нижняя осадочная плита;

3 и 4 – верхний и нижний радиусный боек; 5 – заготовка

Рисунок 1 – Набор бойков для проведения эксперимента (а) и схема асимметричной осадки заготовки радиусными бойками (б)



*a* – эксцентриситет (по рис. 1) –  $e = 5$  мм ( $e/D_0 = 0,1$ );  
*б* – эксцентриситет (по рис. 1) –  $e = 12,5$  мм ( $e/D_0 = 0,25$ )

Рисунок 2 – Результаты постановочного моделирования асимметричной осадки цилиндрических заготовок (материал – Сталь 40) диаметром  $D_0 = 50$  мм и высотой  $H_0 = 50$  мм выпуклыми бойками радиусом  $R = 30$  мм при температуре деформирования  $t = 1100$  °С до степени обжатия  $\varepsilon_h = 0,5$

При теоретическом анализе осадки цилиндрической заготовки радиусными бойками с асимметрией внедрения в торец, ввиду симметричности процесса относительно горизонтальной оси  $x'x$ , рассматривали 1/2 высоты заготовки – верхнюю половину (рис. 3).

Деформация по двум сторонам заготовки происходит несимметрично относительно вертикальной оси. Угол касания бойка от меньшей высоты  $h$  до высоты  $h_1$  обозначим через  $\alpha_1$ , соответственно угол касания бойка от высоты  $h$  до высоты  $h_2$  – через  $\alpha_2$ . С двух сторон заготовки происходят абсолютные обжатия различной величины:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= h_1 - h = 2(R - R \cos \alpha_1) = 2R(1 - \cos \alpha_1); \\ \Delta h_2 &= h_2 - h = 2(R - R \cos \alpha_2) = 2R(1 - \cos \alpha_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Поскольку  $\cos \alpha = \sqrt{1/(1 + tg^2 \alpha)}$ , то в ином виде запишем:

$$\Delta h_1 = 2R \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + tg^2 \alpha_1}} \right); \quad \Delta h_2 = 2R \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + tg^2 \alpha_2}} \right). \quad (2)$$

Кроме того:  $\frac{1}{2} \Delta h = 2R \sin \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha}{2}$ , т.е. в третьем варианте обжатие можно записать как:

$$\Delta h_1 = 4R \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}; \quad \Delta h_2 = 4R \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}. \quad (3)$$

И, наконец, учитывая, что  $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$ , в четвертом варианте запишем:

$$\Delta h_1 \approx R\alpha_1^2; \quad \Delta h_2 \approx R\alpha_2^2. \quad (4)$$

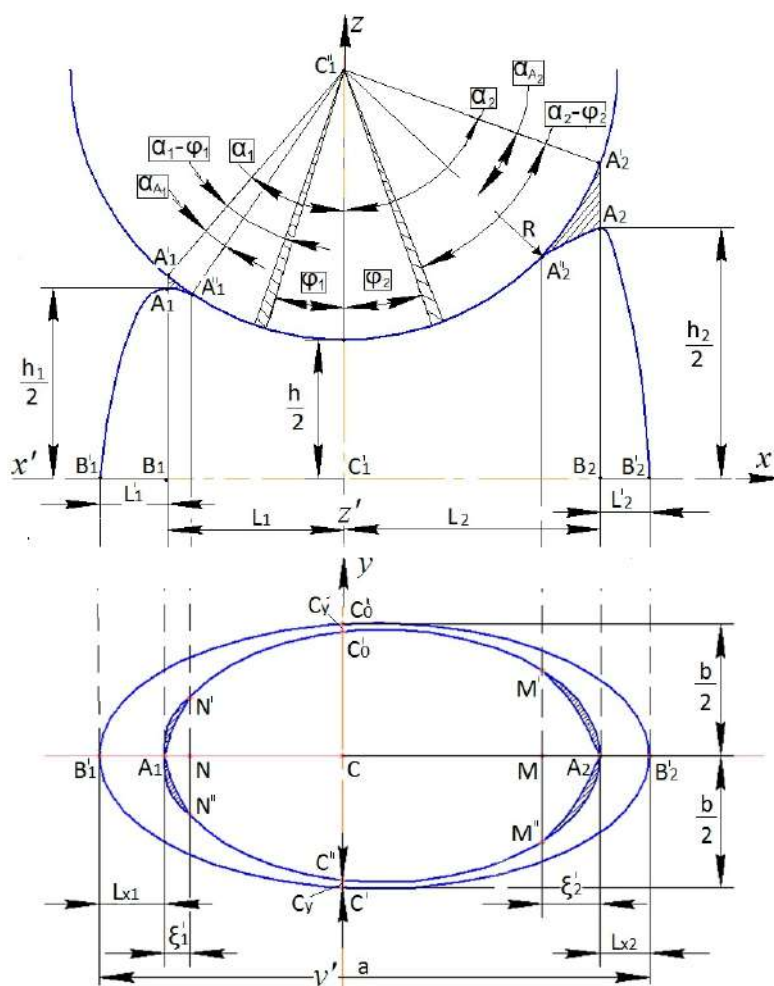


Рисунок 3 – Схема асимметричной осадки цилиндрической заготовки

Формулы (4) справедливы для малых значений углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , т.е. при малых обжатиях заготовки. Анализируя формулы (1) – (4), заметим, что обжатие является тем большим, чем большим будет радиус выпуклых бойков и углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , значение которых зависит от условий трения и свойств осаживаемого материала.

Обратная зависимость угла контакта от величины обжатия и радиуса профиля бойков для двух сторон заготовки:

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_1}{2R}\right); \quad \alpha_2 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_2}{2R}\right). \quad (5)$$

В другом варианте, из уравнения (3) получаем:

$$\alpha_1 = 2 \arcsin \sqrt{\frac{\Delta h_1}{4R}}; \quad \alpha_2 = 2 \arcsin \sqrt{\frac{\Delta h_2}{4R}}. \quad (6)$$

Также, в третьем варианте, из уравнения (4) находим:

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{\Delta h_1}{R}}; \quad \alpha_2 = \sqrt{\frac{\Delta h_2}{R}}. \quad (7)$$

Анализируя формулы (5) – (7), видим, что угол касания  $\alpha$  увеличивается с увеличением абсолютного обжатия  $\Delta h$  и уменьшением радиуса бойков. Установленные

взаимосвязи между обжатиями с двух сторон, радиусом бойков и углами касания являются чисто геометрическими и не отражают в полной мере физический смысл процесса осадки заготовки радиусными бойками с асимметрией нагрузки.

При решении теоретических и технологических задач необходимо знать размеры длин, высот и ширин деформированной заготовки после асимметричной осадки бойками радиусного профиля. При этом высоты и ширины с двух сторон осажённой заготовки являются клиньями сложной формы. Длины дуг контакта в зоне деформации:

$$l_{\partial 1} = R\alpha_1; \quad l_{\partial 2} = R\alpha_2. \quad (8)$$

Или

$$l_{\partial 1} = R \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_1}{2R}\right); \quad l_{\partial 2} = R \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_2}{2R}\right). \quad (9)$$

Или

$$l_{\partial 1} = 2R \arccos\left(\sqrt{\frac{\Delta h_1}{4R}}\right); \quad l_{\partial 2} = 2R \arccos\left(\sqrt{\frac{\Delta h_2}{4R}}\right). \quad (10)$$

В исключительных (наиболее грубых) случаях возможно использование такого параметра, как хорда:

$$l_{\text{hord1}} = 2R \sin \frac{\alpha_1}{2}; \quad l_{\text{hord2}} = 2R \sin \frac{\alpha_2}{2}. \quad (11)$$

А поскольку  $\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\Delta h}{2l_{\text{hord}}}$ , то:

$$l_{\text{hord1}} = \sqrt{R\Delta h_1}; \quad l_{\text{hord2}} = \sqrt{R\Delta h_2}. \quad (12)$$

Длины деформационных клиньев определяют как горизонтальные проекции хорды или дуг касания с каждой стороны заготовки:

$$l_{\partial x1} = R \sin \alpha_1; \quad l_{\partial x2} = R \sin \alpha_2; \quad (13)$$

Или с учётом (12) и при  $l_{\partial x}^2 = l_{\text{hord}}^2 - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2$ , имеем:

$$l_{\partial x1} = \sqrt{\Delta h_1 \left(R - \frac{1}{4} \Delta h_1\right)}; \quad l_{\partial x2} = \sqrt{\Delta h_2 \left(R - \frac{1}{4} \Delta h_2\right)}. \quad (14)$$

Вертикальная проекция хорды или дуги контакта:

$$l_{\partial y1} = \frac{1}{2} \Delta h_1; \quad l_{\partial y2} = \frac{1}{2} \Delta h_2. \quad (15)$$

С учётом уравнений (1) и (3) получим:

$$l_{\partial y1} = R(1 - \cos \alpha_1); \quad l_{\partial y2} = R(1 - \cos \alpha_2). \quad (16)$$

Или

$$l_{\partial y1} = 2R \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}; \quad l_{\partial y2} = 2R \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}. \quad (17)$$

Высоты деформационных клиньев с двух сторон заготовки определяются высотами  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h$ . Изменение высоты заготовки в зоне деформации, определяемой произвольным углом  $\phi$ , с учётом уравнений (1)–(4):

$$h_\phi = h + 2R(1 - \cos \phi). \quad (18)$$

Или

$$h_\phi = h + 4R \sin^2 \frac{\phi}{2}. \quad (19)$$

Или

$$h_\phi \approx h + R\phi^2. \quad (20)$$

Среднюю высоту деформационных клиньев наиболее точно можно определить как среднеинтегральную, используя переменную высоту (18) или (19) и дифференциал высоты:

$$dh_\phi = 2R \sin \phi d\phi.$$

При этом

$$h_{\text{cp1}} = \frac{1}{R \sin \alpha_1} \int_0^{\alpha_1} h_\phi \frac{dh_\phi}{2tg\phi} = \frac{1}{2R \sin \alpha_1} \int_0^{\alpha_1} [h + 2R(1 - \cos \phi)] 2R \cos \phi d\phi;$$

$$h_{\text{cp2}} = \frac{1}{R \sin \alpha_2} \int_0^{\alpha_2} h_\phi \frac{dh_\phi}{2tg\phi} = \frac{1}{2R \sin \alpha_2} \int_0^{\alpha_2} [h + 2R(1 - \cos \phi)] 2R \cos \phi d\phi.$$

После интегрирования и подстановки пределов:

$$h_{\text{cp1}} = \frac{1}{2}(h_1 + h) - R \left( \frac{\alpha_1}{\sin \alpha_1} - 1 \right); \quad h_{\text{cp2}} = \frac{1}{2}(h_2 + h) - R \left( \frac{\alpha_2}{\sin \alpha_2} - 1 \right) \quad (21)$$

Или

$$h_{\text{cp1}} = \frac{1}{2}(h_1 + h) - \left[ \frac{R \arccos \left( 1 - \frac{\Delta h_1}{2R} \right)}{\sqrt{\Delta h_1 \left( R - \frac{1}{4} \Delta h_1 \right)}} - 1 \right]; \quad h_{\text{cp2}} = \frac{1}{2}(h_2 + h) - \left[ \frac{R \arccos \left( 1 - \frac{\Delta h_2}{2R} \right)}{\sqrt{\Delta h_2 \left( R - \frac{1}{4} \Delta h_2 \right)}} - 1 \right]. \quad (22)$$

Иногда допустимо пользоваться приближёнными формулами:

$$h_{\text{cp1}} \approx \frac{1}{2}(h_1 + h); \quad h_{\text{cp2}} \approx \frac{1}{2}(h_2 + h). \quad (23)$$

Или

$$h_{\text{cp1}} \approx \sqrt{h_1 h} \quad \text{и} \quad h_{\text{cp2}} \approx \sqrt{h_2 h}. \quad (24)$$

Ширина деформационных клиньев в начале и в конце дуги касания бойка с заготовкой с каждой её стороны определяется шириной заготовки  $b$  после деформации, а также шириной зоны контакта заготовки с радиусным бойком. Данная ширина изменяется от величины  $\tilde{N}'_0 C''$  по центру заготовки до величины  $N'N''$  и далее до точки  $A_1$  с одной стороны, и до величины  $M'M''$  и далее до точки  $A_2$  с другой стороны заготовки (см. рис. 3). Ширина деформационных клиньев с двух сторон заготовки зависит от величины эксцентриситета  $e$  при осадке и реализующихся смещений от эксцентриситета  $\xi'_1$  и  $\xi'_2$  (см. рис. 3).

Тогда длины проекций на ось  $x'x'$  пятен контакта:

$$l_1 = l_{\text{ox1}} = CN + NA_1 = CN + \xi'_1; \quad l_2 = l_{\text{ox2}} = CN + NA_2 = CN + \xi'_2. \quad (25)$$

Отметим, что осажённая заготовка деформируется с неравномерным уширением вдоль оси  $x'x'$  и оси  $y'y'$ . Тогда ширина пятна контакта будет:

$$\tilde{N}'_0 C' = \tilde{N}'_0 C'' - 2C_y = b - 2C_y. \quad (26)$$

Длина пятна контакта от центра в левую и правую сторону:

$$A_1 A_2 = B'_1 B'_2 - l'_1 - l'_2;$$

$$A_1 A_2 = \dot{a} - \tilde{N}'_{x1} - \tilde{N}'_{x2}, \quad (27)$$

где

$$\dot{a} = \hat{A}'_1 \hat{A}'_1 + \hat{A}'_1 C' + C' B'_2 + B'_2 B'_2 = \hat{A}'_1 A_1 + A_1 C + C A_2 + A_2 B'_2.$$

Величины конечных размеров по ширине и длине можно вычислить в зависимости от начальных и конечных размеров на рассматриваемых участках заготовки по известным формулам для расчёта уширения [7, 8] (Л. Жеза, Э. Зибеля, С.И. Губкина, А.П. Чекмарёва, Б.Л. Бахтинова, А.И. Целикова, А.И. Гришкова и др.). Однако первоначальная цилиндрическая форма заготовки приводит к существенным погрешностям в расчётах по выражениям для уширения, справедливым для процессов обжатия полосы прямоугольного поперечного сечения валками (прокатки). Это требует использования в качестве формул для вычисления значений стрел бочкообразования  $\hat{A}'_1 \hat{A}'_1 = \hat{A}'_1 A_1 = C_{x1}$ ,  $B_2 B'_2 = A_2 B'_2 = C_{x2}$  и  $C_0 C' = C C' = C_y$  (см. рис. 3) выражений, предложенных Я.М. Охрименко (приведены в работах [9, 10]), которые, применительно к условиям несимметричной осадки, запишутся:

$$\tilde{N}_{x1} = \frac{3}{4} 2l_1 \left( \sqrt{1 + \frac{\lambda'_{x1}}{1 - \lambda'_{x1}}} - 1 \right);$$

$$\tilde{N}_{x2} = \frac{3}{4} 2l_2 \left( \sqrt{1 + \frac{\lambda'_{x2}}{1 - \lambda'_{x2}}} - 1 \right); \quad (28)$$

$$\tilde{N}_y = \frac{3}{4} 2C'_0 C \left( \sqrt{1 + \frac{\lambda'_y}{1 - \lambda'_y}} - 1 \right). \quad (29)$$

Здесь:

$$\lambda'_{x1} = 0,01\lambda_{x1}; \quad \lambda'_{x2} = 0,01\lambda_{x2}; \quad \lambda'_y = 0,01\lambda'_{y1} \quad (30)$$

Параметры  $\lambda'_{x1}$ ,  $\lambda'_{x2}$ ,  $\lambda'_y$  зависят от начальных и конечных размеров заготовки на рассматриваемом участке, при этом:

$$\lambda = 5a_l \left( 15 - \frac{D_0}{H_0} \right) \left[ \left( 1 - 0,1 \frac{D_0}{H_0} \right) + 0,06 \frac{D_0}{H_0} a_l \right] / \sqrt{\frac{D_0}{H_0}} (a_l + 1)^2, \quad (31)$$

где  $D_0$  и  $H_0$  – диаметр и высота исходной цилиндрической заготовки.

Для вычисления величины  $\lambda_{x1}$  и  $\lambda_{x2}$  в формулу (31) вместо  $a_l$  необходимо подставить соответственно:

$$a_1 = \frac{D_0 \sqrt{\frac{H_0}{h_1}}}{h_1} - \frac{D_0}{H_0}$$

и

$$a_2 = \frac{D_0 \sqrt{\frac{H_0}{h_2}}}{h_2} - \frac{D_0}{H_0}. \quad (32)$$

Аналогично, для вычисления величины  $\lambda_y$  в формулу (31) необходимо подставить:

$$a = \frac{D_0 \sqrt{\frac{H_0}{h}}}{h} - \frac{D_0}{H_0}.$$

Если известны материал и условия деформирования заготовки, величину  $\lambda$  можно определить более точно, используя результаты работ [4, 11, 12].

**Выводы.** Полученные геометрические соотношения позволяют более точно оценивать неравномерность деформации и течение металла в очаге деформации, что позволяет более точно выбирать конфигурацию инструмента, температурные и деформационные режимы при проектировании технологических процессов штамповки на основе профилирующей асимметричной осадки заготовок радиусным инструментом. Учет смещения нейтрального сечения при проектировании технологий штамповки с предварительной асимметричной осадкой радиусными бойками на кривошипных прессах позволяет контролировать перекося ползуна на профилирующей операции и снижать его значения путем рационального расположения заготовки в штамповом пространстве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ковка слитков на прессах / Л. Н. Соколов и др. ; под ред. Л. Н. Соколова. К. : Техніка, 1984. 127 с.
2. Марков О. Е., Злыгорев В. Н., Руденко Н. А., Ячмень Ю. О. Формоизменение и напряженно-деформированное состояние заготовки при ковке с применением профилирования заготовки. *Научный Вестник ДГМА : сб. науч. тр.* Краматорск : ДГМА, 2015. №3 (18Е). С. 213–219.
3. Новые подходы к исследованию бочкообразования при осадке / В. В. Кухарь и др. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр.* Краматорськ : ДДМА. 2005. С. 241–246.
4. Кухарь В. В., Бурко В. А. Технологические возможности подготовительного профилирования заготовок осадкой выпуклыми плитами перед горячей объемной штамповкой. *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* Краматорск : ДГМА. 2010. № 4 (25). С. 88–93.
5. Кухарь В. В., Бурко В. А. Исследование формоизменения цилиндрических заготовок при осадке выпуклыми продолговатыми плитами. *Металлургическая и горно-рудная промышленность.* 2009. № 1. С. 66–68.
6. Кухарь В. В., Каргин Б. С., Николенко Р. С. Исследование формоизменения заготовок при профилировании выпуклыми плитами с эксцентриситетом нагрузки. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ» : зб. наук. пр.* Харків. 2012. Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях. № 46 (952). С. 71–76.
7. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.
8. Грудев А. П. Теория прокатки. М. : Металлургия, 1988. 239 с.
9. Ребельский А. В. Основы проектирования процессов горячей объемной штамповки. М. : Машиностроение, 1965. 248 с.
10. Охрименко Я. М., Тюрин В. А. Теория процессовковки. М. : Высшая школа, 1977. 295 с.
11. Кухарь В. В., Лаврентик О. А., Бурко В. А. Неравномерность деформации при свободном формоизменении заготовок из цветных металлов и сплавов. *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. пр.* Маріуполь : ПДТУ. 2006. Вип. 16. С. 123–127.
12. Кухарь В. В., Лаврентик О. А., Бурко В. А. Бочкообразование при осадке черных и цветных металлов и сплавов. *Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов : тр. междунар. науч.–техн. конф., посвящ. 100-летию основания кафедры «Пластическая обработка металлов».* СПбГТУ. СПб. 2007. С. 347–351.

Поступила в редколлегию 10.09.2020.