УДК 621.774.8

О. С. АНІЩЕНКО, В. В. КУХАР, А. Г. ПРИСЯЖНИЙ, М. Г. КОРЕНКО, Ю. Г. САГІРОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТУРУ БОКОВОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ОСАДЦІ НАДВИСОКИХ ЗАГОТОВОК

В статі показані етапи формоутворення діжкоподібної бокової поверхні при осадці циліндричних заготовок. Вихідна висота заготовок була в 2-4 рази більше їх вихідного діаметру. Була обумовлена доцільність апроксимації контуру подвійної діжки деформованої заготовки за допомогою суперформули Йохана Геліса. Ця суперформула є універсальним рівнянням, яке може апроксимувати як сферичні, так і параболічні, еліптичні та інші можливі контури поверхні заготовки. Визначені системи розмірних та безрозмірних координат для апроксимуючої функції та умови їх вибору. В статті повідомляється про розробку спеціальної програми для визначення коефіцієнтів апроксимуючої функції за результатами експериментальної осадки заготовок. Представлені графіки розподілу відносного діаметру діжки вздовж висоти заготовок, які були осаджені зі ступенем деформації 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 і 0,5. Автори повідомляють, що створення та зникнення подвійної діжки відбувається при ступенях деформації заготовки 0,1…0,3. При збільшенні ступеня деформацій від 0,1 до 0,4 максимальний відносний діаметр діжки зміщується від торців до центру заготовки. Різниця між відносними діаметрами подвійної діжки і центру заготовки незначна і складає 0,01…0,04. Для формули, за допомогою якої визначають тиск і зусилля осадки і яка використовує радіус кривизни бокової поверхні замість значень коефіцієнтів тертя, встановлено найбільш прийнятне рівняння для попереднього розрахунку поправочного параметру *C*. Радіус кривизни контуру для визначення параметра *C* обчислювали за допомогою суперформули.

Ключові слова: осадка, стійкість, діжкоутворення, контур, апроксимація, подвійна бочка, радіус кривини. суперформула.

А. С. АНИЩЕНКО, В. В. КУХАРЬ, А. Г. ПРИСЯЖНЫЙ, М. Г. КОРЕНКО, Ю. Г. САГИРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТУРА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОСАДКЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЗАГОТОВОК

В статье показаны этапы формообразования бочкообразной боковой поверхности при осадке цилиндрических заготовок. Начальная высота заготовок была в 2-4 раза больше исходного диаметра. Обусловлена целесообразность аппроксимации контура двойной бочки деформированной заготовки с помощью суперформулы Йохана Гелиса. Эта суперформула является универсальным уравнением, которое может аппроксимировать как сферические, так и параболические, эллипсоидальные и другие возможные контуры боковой поверхности заготовки. Определены системы размерных и безразмерных координат для аппроксимирующей функции и условия их выбора. В статье сообщается о разработке специальной программы для определения коэффициентов аппроксимирующей функции по результатам экспериментальной осадки заготовки. Предоставлены графики распределения относительного диаметра бочки по высоте заготовок, которые были осажены со степенью деформации 0,1, 0,2, 03, 0,4 и 0,5. Авторы сообщают, что образование и исчезновение двойной бочки происходит при степени деформации заготовки 0,1…0,3. При увеличении степени деформации от 0,1 до 0,4 максимальный относительный диаметр бочки смещается от торцов к центру заготовки. Разница между относительными диаметрами двойной бочки и центра заготовки незначительна и составляет 0,01…0,04. Для формулы, с помощью которой определяют давление и силы осадки, и которая использует радиус кривизны боковой поверхности вместо значений коэффициентов трения, установлено наиболее приемлемое уравнение для предварительного расчета поправочного параметра *C*. Радиус кривизны контура для определения параметра *C* вычисляли с помощью суперформулы.

Ключевые слова: осадка, устойчивость, бочкообразование, контур, аппроксимация, двойная бочка, радиус кривизны, суперформула.

O. S. ANISHCHENKO, V. V. KUKHAR, A. H. PRYSYAZHNYI, M. G. KORENKO, Yu. G. SAHIROV

STUDY OF THE CONTOUR OF THE SIDE SURFACE DURING THE PRECIPITATION OF ULTRAHIGH BILLET

The article shows the stages of formation of a barrelled lateral surface during the upsetting of cylindrical billets. The initial height of the blanks is 2-4 times the original diameter. The authors proposed to approximate the contour of the double barrel of the deformed billet with the Johan Gielis superformula. This superformula is a universal formula that can approximate both spherical and parabolic, ellipsoidal, and other possible contours of the side surface of the billet. The authors determined the systems of dimensional and dimensionless coordinates for the approximating function and the conditions for their selection. The article reports on the development of a special program for determining the coefficients of the approximating function according to the results of experimental upsetting of the billet. The authors provided graphs of the distribution of the relative diameter of the barrel along the height of the billet, which were deformed with a degree of deformation of 0.1, 0.2, 03, 0.4 and 0.5. The authors reported that the formation and disappearance of a double barrel occurs when the degrees of deformation of the billet are 0.1…0.3. As the degree of deformation increases from 0.1 to 0.4, the maximum relative diameter of the barrel shifts from the ends to the center of the billet. The difference between it and the relative diameter in the center of the billet is insignificant and is 0.01…0.04. Taking into account the radius of curvature of the contour of the superformula, the authors determined the most accurate formula for calculating the pressure and slump force, which does not contain the values of the friction coefficient.

Keywords: upsetting, stability, barrel formation, contour, approximation, double barrel.

Вступ. Осадка заготовок є поширеною операцією кування і штампування, призначеної, в першу чергу, для виготовлення поковок з великими поперечними розмірами з заготовок меншого поперечного перерізу, дроблення литої структури злитка, попереднього профілювання заготовки для подальшої прошивки або об'ємного штампування. Крім того, осадкою отримують текстуру деформації в металі, що деформується, для поліпшення експлуатаційних властивостей деталей, заварюють флокени, видаляють окалину з поверхні і вирівнюють механічні властивості по осі поковок [1]. Одним з обмежень процесу осадки є гранична висота H_0 заготовки/злитка відносно діаметру D_0, перевищення якої веде до втрати стійкості обсягу металу, що деформується. У літературі з початку минулого століття і донині [1-3] копіюється співвідношення, що забезпечує стійкість процесу осадки:

$$H_0/D_0 \leq 2{,}5 \qquad (1)$$

Через обмеження (1) часто доводиться використовувати в якості вихідних заготовок ковані поковки замість більш дешевого прокату, тому що останній з розмірами поперечного перерізу більш, ніж 250 мм виготовляється в обмеженому обсязі.

Аналіз стану питання. Сучасні технології, обладнання та інструмент вже давно дозволяють осаджувати заготовки за межами нерівності (1). Наприклад, гідропрес моделі PStPÖ1Z-4000 силою 40 МН (м. Кривий Ріг, завод «Констар») забезпечує точне центрування осей заготовки та головного гідроциліндра за рахунок центрувального пристрою, розташованого між колонами преса [4, 5]. В результаті при осадці усувається ймовірність поздовжнього вигину для заготовок із співвідношенням $H_0/D_0 \leq 3{,}3$.

Підвищення стійкості надвисоких заготовок досягають в спеціальних штампах, що забезпечують підпір бічній поверхні заготовок, що осаджують [6]. Наявність штампа обмежує абсолютні розміри деформованого металу, але дозволяє значно збільшити довжину деформованої заготовки.

Осадку злитків і прокату із співвідношенням $H_0/D_0 = 2{,}0–2{,}5$ рекомендують проводити між осадочними плитами з увігнутою кульової поверхнею, що центрує вісь деформованого напівфабрикату співвісно осі преса [2].

За кордоном для напівфабрикатів з $H_0/D_0 > 3$, що біллетировані, використовують осадку з хвостовиком, що поміщається в отвір нижньої осадочної плити [7].

В літературі вкрай мало досліджень осадки заготовок із співвідношенням $H_0/D_0 > 2{,}5$ [8, 9], хоча збільшення граничної величини H_0/D_0, крім можливого здешевлення вихідного металу, дозволяє поліпшити його фізико-механічні властивості, наприклад, корозійно-втомну міцність [5], збільшити уков. До того ж змінюється контур бокової поверхні заготовки (з'являється «подвійна діжка») і енергосилові параметри осадки. Для розрахунків тиску та зусилля осадки використовують формули двох типів (табл. 1). У вітчизняній літературі прийнято вважати, що зусилля осадки за першим типом формул залежить від площі контакту заготовки з інструментом F та тиску осадки p, який, в свою чергу, визначається межею текучості деформованого матеріалу σ_T, помноженою на поправочний коефіцієнт C (табл.1, верхня частина), що враховує відношення діаметра до висоти заготовки H/D і коефіцієнт тертя μ між торцями заготовки і осадочними плитами. При цьому для гарячої осадки коефіцієнт тертя апріорі приймають $\mu = 0{,}5$.

Коефіцієнт μ не є постійною величиною в процесі деформації. Методів визначення коефіцієнта тертя існує досить багато [10]. При цьому розкид значень μ буває значним для одного і того ж матеріалу з однією і тією ж геометричною формою. Для операцій осадки найчастіше використовують значення коефіцієнта тертя, які визначають методом осадки кільцевих зразків. Він не забезпечує геометричної подоби з процесом осадки циліндричних заготовок, що розглядається, і, отже, ставить під сумнів відповідність отриманих кількісних значень коефіцієнта тертя його реальному значенню при осадці циліндричної заготовки.

Таблиця 1 – Деякі формули для розрахунків коефіцієнта C

Формули, які враховують коефіцієнт тертя і геометричні розміри заготовок	
$C = 1 + \frac{\mu D}{3H}$	(2)
$C = \frac{\mu D_0 \sqrt{H_0}}{3H^{3/2}}$	(3)
$C = \frac{1}{2}\left(\frac{\mu D}{H}\right)^2 \left[exp\left(\frac{\mu D}{H}\right) - \left(\frac{\mu D}{H}\right) - 1\right]$	(4)
$C = \left[1 + \frac{\mu D_0}{H_0} exp\left(\frac{3\varepsilon}{2}\right)\right]^{-1}$	(5)
Формули, які враховують геометричні розміри і радіус кривини діжкоподібного контуру заготовок	
$C = \left[\left(1 - \frac{2R}{R_б}\right) ln\left(1 - \frac{R_б}{2R}\right)\right]^{-1}$	(6)
$C = \left[\left(1 - \frac{2R}{D_б}\right) ln\left(1 - \frac{D_б}{2R}\right)\right]^{-1}$	(7)
$C = \left[\left(1 - \frac{4R}{D_б}\right) ln\left(1 - \frac{D_б}{4R}\right)\right]^{-1}$	8)
$C = \left[\frac{(D_б^2 - 4RD_m) ln\left(1 - \frac{D_б}{4R}\right)}{D_б^2}\right]^{-1}$	(9)

Поправочний коефіцієнт C в формулах другого типу (табл.1, нижня частина) не враховує параметр μ і залежить від діаметрів бочки $D_б$, торців D_m та контуру бічної поверхні заготовки при осадці, що характеризується радіусом кривини R:

$$R = \frac{[1 + (y')^2]^{3/2}}{y''}, \qquad (10)$$

де y', y'' – перша і друга похідні функції, що апроксимує контур меридіональної твірної бічної поверхні заготовки, що осаджена.

Найчастіше апроксимуючі функції визначають за значеннями H, $D_б$ і D_m.

Таблиця 2 – Деякі формули апроксимації поверхні діжкоподібної заготовки після осадки

Формула	Позначення
парабола $y=\frac{2(D_m-D_б)}{H^2}x^2+\frac{D_б}{2}$	$D_б$, D_m, H – діаметри діжки, торця і висота заготовки
еліпс $\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$	$a=\frac{H}{2\sqrt{1-\left(\frac{D_m}{D_б}\right)^2}}, b=\frac{D_б}{2}$
коло $x^2+(y-b)^2=R^2_{кола}$	$b=\frac{D^2_б-D^2_m-H^2}{4(D_б-D_m)}$ $R_{кола}=\frac{(D_б-D_m)^2+H^2}{4(D_б-D_m)}$
косинус $y=acos(bx)$	$a=\frac{D_б}{2}$ $b=\frac{2}{H}arccos\left(\frac{D_m}{D_б}\right)$
косинус гіперболічний $y=acosh(bx)$	$a=\frac{D_m}{2}$ $b=\frac{2}{H}argcos\left(\frac{D_б}{D_m}\right)$

Ці параметри, отримані прямими вимірами, замість величини μ, розрахованої по результатах непрямих вимірювань без повного дотримання масштабного відповідності та геометричної подоби, в принципі дозволяють зменшити похибки в розрахунках зусилля осадки. Однак при розрахунках радіуса кривини R необхідно знати точний вид функції, що апроксимує контур бічної поверхні діжки. Невеликі неточності у виборі функції можуть привести до великих відхилень значення R, оскільки в рівняння (10) входять перша і друга похідні апроксимуючої функції.

На сьогодні дослідники наперед інтуїтивно припускають той або інший вид контуру бічної поверхні заготовки, що осаджена, а отже і вид апроксимуючої функції (табл. 2), а потім підбирають відповідні значення коефіцієнтів, що входять в цю функцію. Тобто для осадки заготовок поки не існує функції універсального виду, яка в змозі описати будь-який з можливих контурів бокової поверхні деформованих заготовок (зокрема. контур «подвійної діжки»).

Мета роботи – вивчення процесу осадки надвисоких заготовок і виявлення універсальної формули апроксимації діжкоподібних контурів заготовок, що осаджені.

Основна частина. Дослідження проводили на свинцевих заготовках діаметром D_0 = 30 мм з відносною висотою H_0/D_0 = 2 – 4. Осадку проводили без мастила між плоскими осадочними плитами зі швидкістю деформування 2 мм/с. Коефіцієнт тертя між зразком та плитами за методом Губкіна складав μ = 0,41. Ступінь деформації визначали за формулою:

$$\varepsilon=(H_0-H)/H_0 \qquad (11)$$

На боковій поверхні заготовок на відстані вздовж висоти, що дорівнює 0,1 від вихідної висоти H_0, виконували кільцеві риски. Викривлення контуру бокової поверхні при осадці вивчали за результатами змінення діаметру цих рисок при поетапній осадці заготовок зі ступенями деформації 0,1 – 0,5 з кроком 0,1.

В літературі [11, 12] є відомості про те, що величезна кількість різних контурів, в тому числі і діжкоподібні контури досить точно описуються суперформулою Йохана Геліса (J. Gielis). У полярних координатах для радіус-вектора r і кута φ суперформула Геліса має вигляд:

$$r=\frac{1}{\sqrt[n_1]{\left[\left(\left|\frac{1}{a}\cos\left(\frac{k}{4}\varphi\right)\right|\right)\right]^{n_2}+\left[\left(\left|\frac{1}{b}\sin\left(\frac{k}{4}\varphi\right)\right|\right)\right]^{n_3}}} \qquad (12)$$

де n_1, n_2, n_3 – параметри, що визначають форму кривої;

a, b – габарити (величини напівосей);

k – коефіцієнт, який характеризує число фрагментів, що повторюються.

Попередні спроби апроксимації суперформулою показали, що важливе значення для можливості і точності апроксимації має вибір системи координат.

На рис. 1 представлена схема вибору системи координат апроксимуючої функції щодо геометричних розмірів деформованої діжкоподібної заготовки. Відповідно до цієї схеми апроксимацію експериментальних даних можна проводити в системі розмірних і безрозмірних координат.

Якщо контур бокової поверхні осаджених заготовок являє собою одинарну діжку, то вибирається система безрозмірних координат *y0x* з межами вимірювань по обох осях від нуля до одиниці. Ось *x* паралельна осі заготовки і збігається з твірною, котра утворює циліндр з діаметром, рівним діаметру торця D_m. Ось *y* перетинає вісь *x* у площині максимального діаметра діжки заготовки $D_б$.

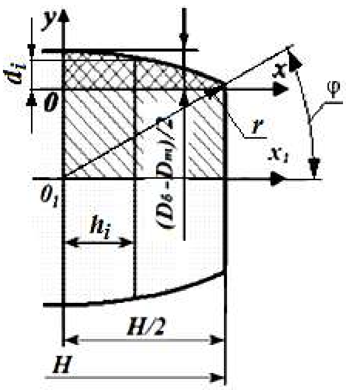

Рис.1 – Схема щодо вибору системи координат апроксимуючої функції

Безрозмірність координат X_i та Y_i забезпечували діленням відповідно виміряного реального розміру h_i (мм) на максимально можливий розмір, який дорівнює половині висоти осадженої заготовки $H/2$, тобто $[X_i = h_i/(H/2)]$, а також виміряного реального розміру

$$d_i = \left(D_б^i - D_m\right)/2\,, \qquad (13)$$

при $x = h_i$ на максимально можливий розмір, який дорівнює напіврізниці діаметрів діжки і торця заготовки, тобто

$$Y_i = \frac{\left(D_б^i - D_m\right)/2}{\left(D_б^{max} - D_m\right)/2} \qquad (14)$$

У цій системі координат (*y0x*) контур одинарної діжки описується радіус-вектором *r* суперформули при зміненні кута *φ* в межах [0; 90º].

Якщо контур бокової поверхні заготовок при осадці еволюціонує від подвійної до одинарної діжки, вибирається система координат $y0_1x_1$, в якій вісь x_1 збігається з центральною віссю заготовки, а безрозмірність координати Y_i забезпечується поділом виміряного реального розміру радіусу діжки вздовж вісі заготовки на максимально можливий, тобто

$$Y_i = \frac{D_б^i/2}{D_б^{max}/2} = {D_б^i}\big/{D_б^{max}} \qquad (15)$$

Для апроксимації експериментально визначених точок бокової поверхні осаджених заготовок використовували спеціальну програму розрахунку коефіцієнтів, що входять в суперформулу. Інтерфейс цієї програми представлений на рис. 2.

Оскільки суперформула не перетворюється до лінійного вигляду, апроксимація за методом найменших квадратів неможлива, тому коефіцієнти визначали методом перебору можливих варіантів з заданим кроком і отриманий розрахунковий результат порівнювали з експериментально отриманим. За шуканий брали той коефіцієнт, який забезпечував мінімальну різницю вищеназваних результатів.

Програма дозволяє: віртуально генерувати будь-яку кількість «експериментальних» точок з заданим розкидом значень; додавати, видаляти або змінювати в таблиці експериментально встановлені координати точок контуру заготовок; задавати значення коефіцієнта *k* в суперформулі, хоча його значення за замовчуванням має дорівнювати $k = 4$ [11]; розраховувати коефіцієнти n_1, n_2, n_3, суперформули із заданим кроком перебору варіантів; фіксувати в нижньому вікні вид шуканої апроксимуючої функції.

На рис. 3 надані результати збільшення діаметру кільцевих рисок *D* відносно вихідного діаметру D_0 в залежності від висоти заготовок *H,* що зменшується при осадці. Розташування кільцевих рисок вимірювали параметром *f* – відстанню від нижнього торця до кільцевої риски, зокрема, f/H = 0,5 для риски, що ділить навпіл висоту зразка *H.*

Рисунки 3 *б-г* вказують на те, що подвійне діжкоутворення виникає, якщо осаджують заготовки зі співвідношенням $H_0/D_0 > 2$. Крім того, подвійна діжка фіксується при ступенях деформації зразків не більше ніж 0,3.

При H_0/D_0 = 2 осадка заготовок збільшує максимальний діаметр діжки *D* (при f/H = 0,5) в 1,05 – 1,47 рази при ε = 0,1…0,5. Збільшення відносної висоти до H_0/D_0 = 2,5 збільшує максимальний діаметр діжки до D/D_0 = 1,49. Крім цього, в інтервалі ступенів деформації ε = 0,1 – 0,3 виникає подвійна діжка на боковій поверхні заготовок.

Зі зростанням ε від 0,1 до 0,4 максимальний відносний діаметр діжки зміщується в напрямі від торців до центру заготовок та фіксується при f/H = 0,78, 0,77, 0,73 і 0,68 відповідно для заготовок з H_0/D_0 = 2, 2,5, 3, 3,5.

Подвійна діжка для заготовок з H_0/D_0 = 3, що осаджуються, вже майже непомітна при $\varepsilon \geq 0,3$. Максимальний відносний діаметр діжки фіксується в інтервалі f/H = 0,76 – 0,74, а максимальна різниця $\Delta(D/D_0)$ = 0,02 при ε = 0,2. Помітно, що кільцеві зони, які віддалені від торця на відстань 0,1*H* зі зростанням ε становляться торцевою поверхнею заготовок. Так, якщо графіки 1–4 мають 5 експериментальних замірів діаметрів *D*, то графік 5 – тільки чотири заміри.

Збільшення відносної висоти заготовок до H_0/D_0 = 3,5 (рис. 3 *г*) за показниками D/D_0 при осадці майже не відрізняється від графіків (рис. 3 *в*) для осадки заготовок з H_0/D_0 = 3. Зокрема, подвійна діжка фіксується в інтервалі ступенів деформації ε = 0,1 – 0,3 і за параметром $\Delta(D/D_0)$ також досить незначна.

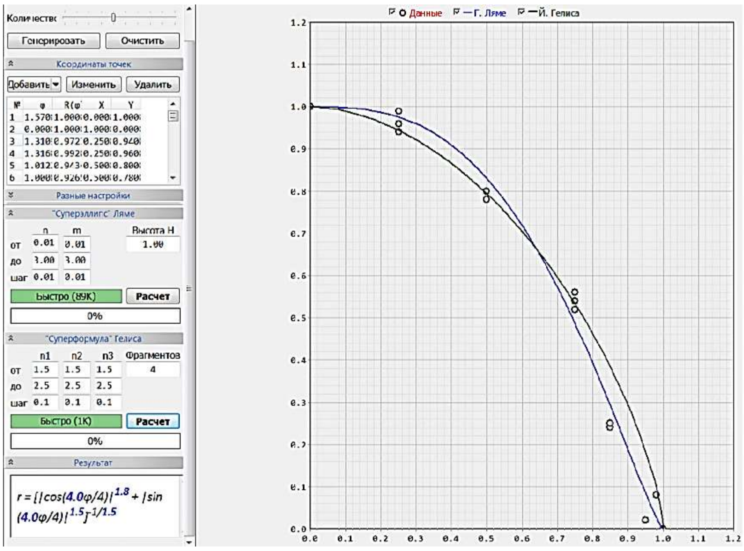

Рис. 2 – Інтерфейс програми розрахунку коефіцієнтів суперформули

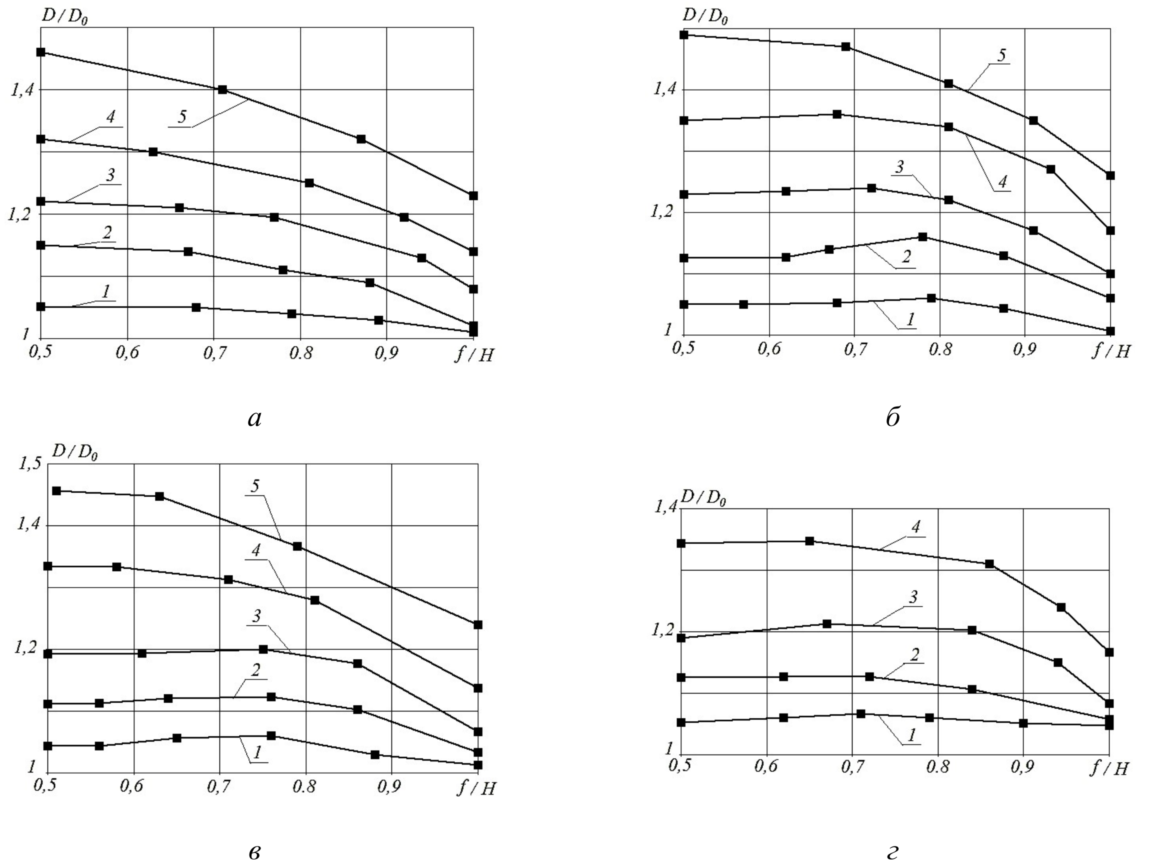

Рис. 3 – Розподіл відносного діаметру діжки вздовж висоти заготовок, що осаджені: 1…5 – ε = 0,1…0,5 з кроком 0,1: а – H_0/D_0 = 2, б – H_0/D_0 = 2,5; в – H_0/D_0 = 3, г– H_0/D_0 = 3,5

Що стосується осадки заготовок з H_0/D_0= 4, то вже при ε = 0,08 вони втрачали стійкість і вигиналися так, що подальша їх деформація була неможливою.

Суперформула, що апроксимує контур з подвійною діжкою в координатах $y0_1x_1$, відтворює такий же контур замість прямої лінії на торцевій поверхні заготовки. Оскільки торець плаский, то апроксимовані значення коефіцієнтів суперформули при зміненні кута φ від 0 до arctg[(D_m/2)/(H/2)] не дійсні, а розрахунок контуру подвійної діжки слід проводити при зміненні кута φ в межах {arctg[(D_m/2)/(H/2)]; π/2}.

На рис. 4 показані графіки апроксимуючої суперформули Йохана Геліса для осадки заготовок з відносною висотою H_0/D_0 = 3,5.

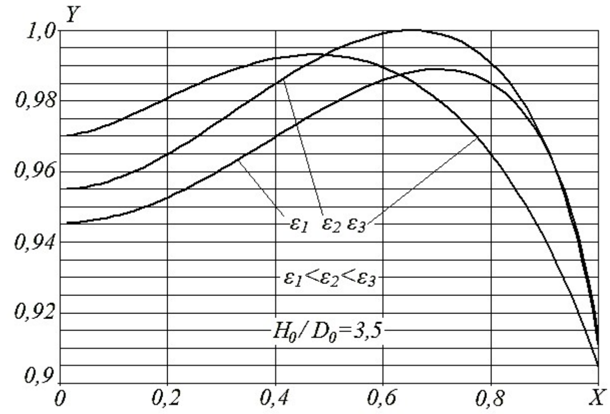

Рис. 4. Апроксимація контуру подвійної діжки на боковій поверхні заготовок з $H_0/D_0 = 3{,}5$, що осаджені: $\varepsilon_1 = 0{,}1$; $\varepsilon_2 = 0{,}2$, $\varepsilon_3 = 0{,}3$.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів суперформули

Відносна висота заготовок, що осаджені, H_0/D_0	Ступінь деформації заготовки, ε	Значення коефіцієнтів суперформули		
		n_1	n_2	n_3
2	0,1	1,4 (0,7)	13,5 (2.1)	1,3 (1,6)
	0,2	33 (2,1)	34 (2,1)	25.4 (1.4)
	0,3	2,1 (8,9)	12,3 (0.5)	1,6 (0.7)
	0,4	1,6 (2,2)	15,4 (1,2)	1,1 (1,0)
	0,5	6,1 (1,2)	66,2 (1.4)	3,7 (1,2)
2,5	0,1	2,7	10	2,6
	0,2	2,2	13,8	2
	0,3	1,8	8,1	1,7
	0,4	1,8	7,5	1,7
	0,5	2,3	11,8	1,6
3	0,1	7,9	11,9	7,8
	0,2	8	10,5	7,9
	0,3	3,1	7,5	3
	0,4	7,6	11,4	5,8
	0,5	3,4	15,9	2,2
3,5	0,1	3,7	19,9	3,5
	0,2	1,5	10,7	1,4
	0,3	3,4	7,3	3,4
	0,4	2,4	7,6	2,2
	0,5	3,3	11,5	2,3

Графіки показують максимум діжкоутворення при $\varepsilon_2 = 0{,}2$, після чого починає інтенсивніше зростати діаметр центральної частини заготовки, і подвійна діжка поступово перетворюється в одинарну. Для інших значень відносної висоті заготовок та ступенів деформації графіки приблизно такі ж самі, тобто накладаються один на одного, тому не показані.

В таблиці 3 надані значення коефіцієнтів суперформули, які були отримані при апроксимації твірних бокових поверхонь заготовок, що осаджені, у тому числі з одинарною та подвійною діжкою. При розрахунках були витримані рекомендації Йохана Геліса [11] призначати (для випадків, що схожі на наш) значення коефіцієнта $k = 4$, хоча змінення значень k в інтервалі [3; 5], як показали наші розрахунки, забезпечувало інші значення коефіцієнтів $n_1...n_3$, також придатні до використання.

Коефіцієнти $n_1...n_3$ суперформули були використані для визначення параметрів C згідно з формулами (6-9), а також їх порівняння з такими ж параметрами в формулах (2–3). В результаті виявили, що формула (2) збігається з формулами (8-9), якщо $\mu = 0{,}25$ і 0,43, а формула (3) – якщо $\mu = 0{,}20$ і 0,34. Отже формула (9) непридатна для визначення C, оскільки значення $\mu = 0{,}34$, 0,43, як і $\mu = 0{,}41$ (метод Губкіна), завищені. Вірогідно, найбільш придатні для розрахунків тиску та зусилля осадки формули (2) і (8). Значення апроксимуючих коефіцієнтів $n_1...$ n_3 в лапках,

наведені в табл. 3 для зразків з відносною висотою $H_0/D_0 = 2$, тобто осаджених
без подвійної діжки, отримані для того випадка, коли були вибрані координати *y0x,* а ординату Y_i розраховували за формулою (14).

Висновки/ Запропонована універсальна суперформула Йохана Геліса, яка апроксимує всі можливі контури бокової поверхні заготовок, що осаджені, зокрема, одинарну та подвійну діжку. Встановлено найбільш прийнятне рівняння для обчислення поправочного параметра *C* в формулі для визначення тиску та зусилля осадки, яка використовує радіус кривини бокової поверхні заготовки.

Список літератури

1. Матвеев А. С. Кочетков В. А. *Справочник кузнеца*. Москва: Машиностроение, 2011. – 360 с.
2. Семенов В. И. *Ковка и горячая штамповка: Учебник*. Москва: МГИУ, 2011. – 414 с.
3. Соколов Л. М., Алієв І. С., Марков О. Є., Алієва Л.І. *Технологія кування*. Краматорськ: ДДМА, 2010. – 300 с.
4. Анищенко А. С., Каргин С. Б. Совершенствование технологии раскатки кольцевых титановых поковок /А.С. Анищенко. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Зб. наук. пр.* Харків: ХПІ, 2011. №46. – С. 14–18.
5. Анищенко А.С., Кухарь В. В., Присяжный А.Г. Разработка технологии кольцераскатки титановых поковок с повышенной коррозионно-усталостной прочностью. *Обработка металлов давлением. Сб. науч. тр. ДГМА*. Краматорск: ДГМА. 2015. №2 (41). – С.272-277.
6. Попов А. В., Хван А. Д. Штамп для осадки длинномерной цилиндрической заготовки. *Обработка металлов давлением. Сб. науч. тр. ДГМА*. Краматорск: ДГМА. 2010. №1 (22). – С. 262–265.
7. Faszinierende Großtechnik https://www.youtube.com/watch?v=mnx8GAxF3Ow.
8. Тарновский И.Я. [и др.]. Теория обработки металлов давлением. Москва: Металлургиздат, 1963. 672 с.
9. Антощенков Ю. М., Таупек И. М. Исследование процесса осесимметричной осадки методами компьютерного моделирования. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2015. – т. 58, №1. – С.49–52.
10. Зиновьев А. В., Чумаков Ю. П. Теория обработки металлов давлением. Москва: МИСиС, 1983. – 81 с.
11. Gielis J. A. Generic Geometric Transformation that unifies a Wide Range of Natural and Abstract Shapes. *American Journal of Botany.* 2003. No 90(3). P. 333–338.
12. Анищенко А. С., Кухарь В. В., Мкртчян Е. А. Аппроксимация формулами Ляме-Гелиса контура оболочек при сверхпластической формовке листовых заготовок. *Вісник ПДТУ: зб. наук. пр. Серія «Технічні науки».* Маріуполь: ПДТУ. 2017. Вип. 34. - С. 7-17.

References (transliterated)

1. Matveev A.S., Kochetkov V.A. Spravochnik kuznetsa [Handbook for the blacksmith]. Moscow: Mashinostroenie. 2011. – 360 p.
2. Semenov V.I. Kovka i goryachaya shtampovka: Uchebnik [Forging and hot stamping: Textbook]. Moscow: MGIU, 2011. – 414 p.
3. Sokolov L. M. Aliev I. S., Markov O. E., Alieva L. I. Tekhnologia kuvannya [Forging technology]. Kramators'k: DDMA, 2010. – 300 p.
4. Anishchenko A. S., Kargin S. B. Sovershenstvovanie tekhnologii raskatki koltsevikh titanovikh pokovok. *Visnyk natsionalnogo tehnichnogo universitetu "HPI", Zb. nauk. pr.* Kharkiv: HPI, 2011. No46. – P .16–18.
5. Anishchenko A. S., Kukhar V. V., Prisiaznyi A. G. Razrabotka tekhnologii kol'tseraskatki titanovikh pokovok s povyshennoi korrozionno-ustalostnoi prochnostiu. *Obrabotka metallov davleniem. Sb. nauch. tr. DGMA*. Kramators'k: DGMA, 2015. No (41). – P. 272–277.
6. Popov A. V., Hvan A.D. Shtamp dlia osadki dlinnomernoi tsilindricheskoi zagotovki. *Obrabotka metallov davleniem. Sb. nauch. tr. DGMA.* Kramators'k: DGMA, 2010. No (22). – P. 262–265.
7. Faszinierende Großtechnik https://www.youtube.com/watch?v=mnx8GAxF3Ow.
8. Tarnovskiy I. Ya. [i dr.] Teoria obrabotki metallov davleniem [Metal forming theory]. Moscow: Metallurgizdat, 1963. – 672 p.
9. Antoshchenkov Iu. M., Taupek I. M. Issledovanie protsessa osesimmetrichnoi osadki metodami kompiuternogo modelirovania. *Izvestia vuzov. Chernaia metallurgia*, 2015. Vol. 58, No 1. – P. 49–52.
10. Zinoviev A, V., Chumakov Yu. P. Teorya obrabotky metallov davleniev [Metal forming theory] – Moscow: MISiS. 1983. – 81 p/
11. Gielis J. A. Generic Geometric Transformation that unifies a Wide Range of Natural and Abstract Shapes. *American Journal of Botany.* 2003. No 90(3). – P. 333–338.
12. Anishchenko A. S., Kukhar V. V., Mkrtchan E. A. Approksimatsya formulamy Lame-Gelisa kontura obolochek pri sverkhplasticheskoy formovke listovykh zagotovok. *Visnyk PDTU: zb. nauk. prarts. Serya "Tkhnichny nauky".* Mariopol: PDTU, 2017. Vyp.34. – P. 7–17.

Надійшла (received) 15.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах /About the Autors

Аніщенко Олександр Сергійович (***Анищенко Александр Сергеевич, Anishchenko Oleksandr Serhiiovych)*** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Державний вищий науковий заклад «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри обробки металів тиском, Маріуполь, Україна, ORCID https: //orcid.org/0000-0002-1350-836X, e-mail: aas540628@gmail.com

Кухар Володимир Валентинович (***Кухарь Владимир Валентинович, Kukhar Volodymyr Valentynovych)*** – доктор технічних наук, професор, Державний вищий науковий заклад «Приазовський державний технічний університет», завідувач кафедри обробки металів тиском, Маріуполь, Україна, ORCID https: //orcid.org/0000-0002-4863-7233, e-mail: kvv.mariupol@gmail.com

Присяжний Андрій Григорович (***Присяжний Андрей Григорьевич, Pryisyazhnyi Andrii Hryhorovych)*** – кандидат технічних наук, Державний вищий науковий заклад «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри обробки металів тиском, Маріуполь, Україна, ORCID https: //orcid.org/0000-0001-8062-075X, e-mail: agp87514@gmail.com

Коренко Марина Георгіївна (***Коренко Марина Георгиевна, Korenko Marina Georgievna)*** – кандидат технічних наук, доцент, Криворізький металургійний інститут Національної металургійної академії України, доцент кафедри металургійних технологій, Кривий Ріг, Україна, ORCID https: //orcid.org/0000-0002-2931-4076, e-mail: marinak2010@bk.ru

Сагіров Юрій Георгійович (***Сагиров Юрий Георгиевич, Sahirov Yurii Georhiiovych)*** – кандидат технічних наук, доцент, Державний вищий науковий заклад «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри підйомно-транспортних машин і деталей машин, Маріуполь, Україна, ORCID https: //orcid.org/0000-0002-8854-0639, e-mail: sagirov1978@ukr.net