

УДК 621.77

Грушко О. В.  
Молодецька Т. І.**МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІЦНЕННЯ МАТЕРІАЛУ В ПРОЦЕСІ ШТАМПУВАННЯ  
Z-ПОДІБНИХ ЗАГОТОВОК**

Застосування гнутих профілів із листового та полосового прокату замість профілів, що отримуються безпосередньо прокаткою, дозволяє суттєво знизити вагу деталей, що з них виготовляються, та складальних одиниць машин. Розміри поперечних перерізів гнутих профілів регламентуються галузевими стандартами, і виробу виготовляються гнуттям в універсальних штампах. Одним із варіантів отримання z-подібного профілю є процес штампування, в основі якого лежить одночасне подвійне гнуття заготовки в штампі. При проектуванні технологічного процесу штампування важливе місце посідають вивчення енергосилових характеристик формування з метою підбору обладнання, розрахунків на міцність інструменту та визначення граничних деформацій. Останнє пов'язане із можливістю руйнування заготовки, втратою стійкості, набуттям небажаної технологічної спадщини. Деформівність визначатиме технологічні параметри при гнутті профілів з малопластичних матеріалів (У7, У8, У10), що потребує дослідження механіки процесу формоутворення [1, 2]. Згідно феноменологічної теорії деформівності для подібних розрахунків необхідні знання про механічні властивості матеріалів у вигляді діаграми пластичності та шляхи деформування матеріалу в небезпечних осередках деформацій. Головною перевагою шляхів деформування, побудованих в координатах «накопичена інтенсивність деформацій – показник жорсткості напруженого стану» є незалежність цих шляхів від механічних властивостей матеріалу та масштабу моделі при інших рівних чинниках (граничні умови) [3, 4]. Це дає змогу переносити результати моделювання процесу формоутворення на інші матеріали та геометрично подібні заготовки.

Надалі обмежимося гнуттям заготовок, ширина яких набагато більша за товщину, що є досить розповсюдженим явищем у практиці виробництва. В цьому випадку в осередках деформації реалізується плоский деформівний стан. В роботі [5] показано, що при гнутті симетричного z-подібного профілю небезпечними з т. з. деформівності є осередки деформацій 1–3 (рис. 1). Показник напруженого стану в цих областях мало змінюється, і навантаження можна вважати близьким до простого [5]. Отже, єдиним параметром, який необхідно розрахувати для оцінки деформівності є накопичена інтенсивність деформацій.

Попередньо проведені дослідження [5] показали, що на механіку процесу (деформівний стан заготовки) впливають переважно геометричні параметри заготовки, а коефіцієнт тертя, крива течії матеріалу та закон руху інструменту виявляють слабкий вплив. Відмітимо, що основні геометричні параметри процесу, що досліджується, сумірні з товщиною стінки заготовки, отже процес займає проміжне місце між листовим та об'ємним штампуванням, тобто його можна віднести до товстолистового. В цьому випадку в осередках деформації не виконується гіпотеза плоских нормалей, відбувається формоутворення за схемою згину та зсуву [5]. В літературі аналіз механіки таких процесів висвітлено недостатньо широко. Варто відмітити, що в роботах [6, 7], приведені залежності щодо вивчення енергосилових параметрів простого одностороннього гнуття листових заготовок як функції радіуса згину та товщини стінки заготовки. Проте їх некоректно застосовувати для процесу двостороннього товстолистового гнуття, оскільки факторів, що впливають, суттєво більше і має місце невиконання гіпотез, які закладені в відомі залежності.

Метою роботи є вивчення механіки процесу штампування товстолистових z-подібних широких заготовок для отримання моделей накопиченої інтенсивності деформацій в небезпечних зонах в залежності від основних технологічних параметрів.

Теоретичні та експериментально-розрахункові методи, що використовуються в дослідженнях процесів обробки металів тиском, мають певні обмеження, які пов'язані з необхідністю введення низки гіпотез щодо процесу формоутворення, граничних умов, властивостей матеріалу тощо. Крім того, точність розв'язку, із врахуванням накопичених похибок може бути суттєвою. Прямі експериментальні методи щодо вивчення, наприклад, деформувальних зусиль, деформівності потребують великої кількості експериментів. Натурний експеримент є найбільш достовірним шляхом отримання шуканих величин, проте велика вартість, трудомісткість та негнучкість є його суттєвими вадами. Альтернативою експериментальним дослідженням є метод кінцевих елементів (МКЕ), точність якого із врахуванням сучасного розвитку техніки сумірна з натурними випробовуваннями.

При пошуку оптимальних технологічних параметрів, для аналізу їхнього впливу на характеристики процесу формоутворення, необхідно мати його математичну модель. Теорія планування експерименту дає змогу побудувати необхідні математичні моделі на основі значень обмеженої кількості точок гіперпростору впливаючих параметрів [8].

Таким чином, для вивчення механіки процесу штампування поєднаємо два потужних методи наукових досліджень – теорію планування експерименту та МКЕ. Останній використовуємо для отримання «експериментальних» значень, які потребує планування експерименту. Вочевидь, натурний експеримент замінюється на чисельний.

Опираючись на досвід проектування процесу штампування листових заготовок [1], основними факторами впливу вважаємо такі (рис. 2): товщина заготовки  $t$ ; довжина прямолінійної ділянки  $a$ ; висота профілю  $H$ ; радіуси заокруглень штампу  $R_1$  та  $R_2$ ; кут нахилу штампу  $\alpha$ .

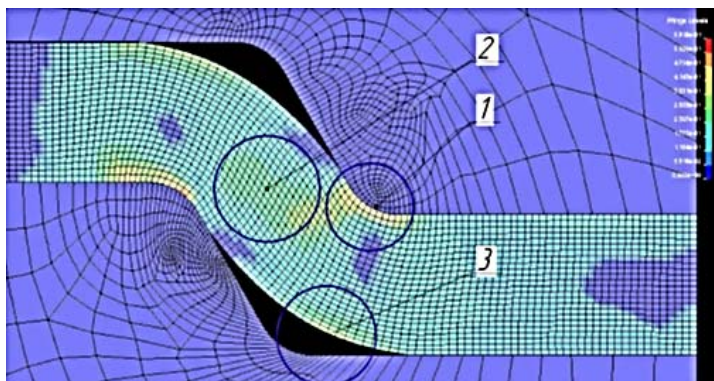


Рис. 1. Здеформована частина заготовки:  
1, 2, 3 – осередки деформацій

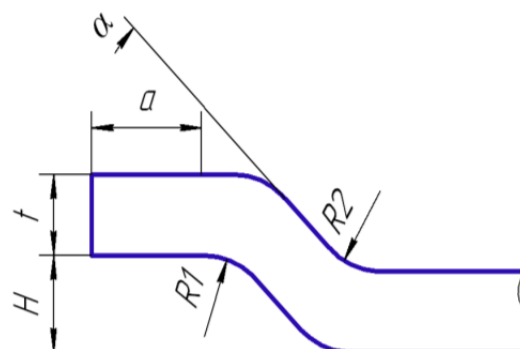


Рис. 2. Схема основних параметрів заготовки

Всі лінійні величини віднесемо до товщини стінки заготовки, що зменшить кількість параметрів та дасть змогу розглядати геометрично подібні моделі. Обмежимося таким діапазоном варіювання аргументів, з врахуванням  $t = 10$  [1].

- довжина прямолінійної ділянки  $1 \leq \bar{a} \leq 3$  (відносна довжина  $\bar{a} = a/t$ );
- висота профілю  $0,6 \leq \bar{H} \leq 1,8$  (відносна висота  $\bar{H} = H/t$ );
- радіуси заокруглень штампу  $0,2 \leq \bar{R}_1 \leq 0,6$  та  $0,2 \leq \bar{R}_2 \leq 0,6$  (відносний радіус  $\bar{R}_1 = R_1/t$ ,  $\bar{R}_2 = R_2/t$ );
- кут нахилу штампу  $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$
- Шуканими функціями математичної моделі є накопичені деформації в осередках 1–3 [5].

Попередньо виконані розрахунки вказали на нелінійність функцій, щодо зазначених параметрів, тому в основу моделі покладемо поліном 2-го ступеню:

$$e_{imax1} = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i X_i + \sum_{i=1}^5 a_{ii} X_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq 5} a_{ij} X_i X_j;$$

$$e_{imax2} = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i X_i + \sum_{i=1}^5 b_{ii} X_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq 5} b_{ij} X_i X_j;$$

$$e_{imax3} = c_0 + \sum_{i=1}^5 c_i X_i + \sum_{i=1}^5 c_{ii} X_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq 5} c_{ij} X_i X_j, \quad (1)$$

де  $a, b, c$  – коефіцієнти регресійної моделі;

$X_i$  – основні технологічні параметри.

Для визначення коефіцієнтів моделі (1) необхідно варіювання параметрів принаймні на 3-х рівнях, які наведені в табл. 1. Повний факторний експеримент для 5-ти параметрів, що варіюються на 3-х рівнях потребує  $3^5 = 243$  експериментальних значень. Кількість експериментів скорочується без суттєвої похибки для моделі, при використанні дрібного експерименту [8]. Відповідно до 5 факторів, використовуємо дрібний 5 факторний експеримент, центральний композиційний план якого представлений в табл. 2.

Таблиця 1

Рівні варіювання факторів

Фактори	$\bar{a}$	$\bar{H}$	$\bar{R}_1$	$\bar{R}_2$	$\alpha'$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
Основний рівень (0)	2	1,2	0,4	0,4	45
Інтервал варіювання	1	0,6	0,2	0,2	15
Нижній рівень (-1)	1	0,6	0,2	0,2	30
Верхній рівень (+1)	3	1,8	0,6	0,6	60

Таблиця 2

Центральний композиційний план

№ досліджу	$\bar{a}$	$\bar{H}$	$\bar{R}_1$	$\bar{R}_2$	$\alpha'$	№ досліджу	$\bar{a}$	$\bar{H}$	$\bar{R}_1$	$\bar{R}_2$	$\alpha'$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1	-1	-1	-1	-1	1	15	1	1	1	-1	-1
2	-1	-1	-1	1	-1	16	1	1	1	1	1
3	-1	-1	1	-1	-1	17	-1	0	0	0	0
4	-1	-1	1	1	1	18	1	0	0	0	0
5	-1	1	-1	-1	-1	19	0	-1	0	0	0
6	-1	1	-1	1	1	20	0	1	0	0	0
7	-1	1	1	-1	1	21	0	0	-1	0	0
8	-1	1	1	1	-1	22	0	0	1	0	0
9	1	-1	-1	-1	-1	23	0	0	0	-1	0
10	1	-1	-1	1	1	24	0	0	0	1	0
11	1	-1	1	-1	1	25	0	0	0	0	-1
12	1	-1	1	1	-1	26	0	0	0	0	1
13	1	1	-1	-1	1	27	0	0	0	0	0
14	1	1	-1	1	-1						

Дані, що отримані шляхом моделювання МКЕ, обробляли з використанням пакету програм Statistica. В результаті розраховані коефіцієнти нелінійної регресійної моделі (1), що представлені в табл. 3.

Для прикладу, запишемо вираз розрахунку  $e_{max1}$  згідно виразу (1) та коефіцієнтів табл. 3:

$$e_{max1} = 1,136 - 0,213 \cdot \bar{a} - 0,214 \cdot \bar{H} - 0,557 \cdot \bar{R}_1 - 1,189 \cdot \bar{R}_2 - 0,0112 \cdot \alpha + 0,0483 \cdot \bar{a}^2 + \\ + 0,1340 \cdot H^2 + 1,831 \cdot R_1^2 + 1,581 \cdot R_2^2 + 0,0003 \cdot \alpha^2 + 0,0422 \cdot \bar{a} \cdot \bar{H} - 0,036 \cdot \bar{a} \cdot R_1 + \\ + 0,126 \cdot \bar{a} \cdot R_2 - 0,0030 \cdot \bar{a} \cdot \alpha - 0,466 \cdot \bar{H} \cdot R_1 + 0,367 \cdot \bar{H} \cdot R_2 - 0,0010 \cdot \bar{H} \cdot \alpha - \\ - 1,273 \cdot \bar{R}_1 \cdot R_2 + 0,0009 \cdot \bar{H} \cdot \alpha - 0,013 \cdot \bar{R}_2 \cdot \alpha.$$

Вирази щодо  $e_{max2}$  та  $e_{max3}$  будуть мати таку ж форму запису з власними коефіцієнтами згідно табл. 3.

Таблиця 3

Коефіцієнти регресійної моделі центрального композиційного плану для факторів в натуральному масштабі

Множник біля коефіцієнта	Коефіцієнти регресійної моделі згідно (1)		
	$a$	$b$	$c$
вільний член	1,136	1,14	0,210
$X_1$	-0,213	0,220	-0,107
$X_1^2$	0,0483	0,0190	0,026
$X_2$	-0,214	0,615	0,357
$X_2^2$	0,1340	-0,169	-0,054
$X_3$	-0,557	0,677	0,103
$X_3^2$	1,831	-1,399	0,0170
$X_4$	-1,189	0,387	-0,132
$X_4^2$	1,581	-1,399	0,0170
$X_5$	-0,0112	-0,058	-0,007
$X_5^2$	0,0003	0,0007	0,00009
$X_1 \cdot X_2$	0,0422	0,034	-0,0005
$X_1 \cdot X_3$	-0,036	0,102	-0,055
$X_1 \cdot X_4$	0,126	0,036	0,108
$X_1 \cdot X_5$	-0,0030	0,001	-0,0002
$X_2 \cdot X_3$	-0,466	-0,206	-0,201
$X_2 \cdot X_4$	0,367	0,0390	0,070
$X_2 \cdot X_5$	-0,0010	-0,0046	-0,0006
$X_3 \cdot X_4$	-1,273	1,242	-0,179
$X_3 \cdot X_5$	0,0009	-0,003	0,003
$X_4 \cdot X_5$	-0,013	0,002	-0,0009

В табл. 4 наведено результати, отримані за МКЕ, та розрахунок тих же величин за отриманими математичними моделями. Похибка розрахункової моделі складає в середньому – 6 %. Отже, у вказаних діапазонах використання отриманих залежностей (1) дає результати з достатньою для інженерних розрахунків точністю.

Таблиця 4

## Перевірка моделювання

№	Розрахунок за МКЕ			Розрахунок за моделі (1), табл. 3			Похибка моделі, %		
	$e_{max1}$	$e_{max2}$	$e_{max3}$	$e_{max1}$	$e_{max2}$	$e_{max3}$	$e_{max1}$	$e_{max2}$	$e_{max3}$
1	0,8	0,38	0,21	0,79	0,374	0,211	0	1	0
2	0,35	0,125	0,17	0,34	0,122	0,164	2	2	3
3	0,58	0,14	0,18	0,579	0,139	0,178	0	0	1
4	0,5	0,3	0,2	0,496	0,296	0,198	0	1	0
5	0,55	0,35	0,4	0,550	0,346	0,395	0	1	1
6	0,8	0,2	0,42	0,797	0,194	0,416	0	3	0
7	0,8	0,03	0,35	0,805	0,025	0,35	0	2	0
8	0,35	0,2	0,3	0,354	0,198	0,292	1	0	2
9	0,3	0,13	0,17	0,296	0,134	0,172	1	-3	-1
10	0,33	0,22	0,25	0,323	0,221	0,253	1	0	-1
11	0,6	0,22	0,18	0,601	0,223	0,187	0	-1	-3
12	0,22	0,17	0,175	0,219	0,176	0,174	0	-3	0
13	0,65	0,3	0,38	0,652	0,300	0,384	0	0	-1
14	0,7	0,2	0,5	0,701	0,203	0,497	0	-1	0
15	0,4	0,15	0,25	0,408	0,154	0,251	-2	-3	0
16	0,375	0,25	0,35	0,381	0,252	0,351	-1	-1	0
17	0,32	0,2	0,25	0,331	0,226	0,273	-3	-1	-6
18	0,2	0,25	0,3	0,190	0,222	0,281	4	2	6
19	0,17	0,15	0,15	0,198	0,145	0,144	-1	3	3
20	0,35	0,14	0,31	0,323	0,143	0,319	6	2	-3
21	0,3	0,17	0,28	0,323	0,176	0,284	-6	3	-1
22	0,27	0,13	0,22	0,247	0,122	0,22	7	5	0
23	0,35	0,15	0,25	0,342	0,151	0,238	2	0	4
24	0,2	0,15	0,25	0,208	0,147	0,265	-4	1	-6
25	0,2	0,35	0,24	0,198	0,338	0,258	0	3	-6
26	0,37	0,38	0,3	0,373	0,390	0,286	0	-2	4
27	0,22	0,2	0,27	0,212	0,205	0,251	3	-2	6

Відмітимо деякі особливості отриманої моделі.

Деформації в осередку 3 для більшості матеріалів визначатимуть деформівність заготовки. Найвпливовішим фактором на  $e_{max3}$  є висота  $\bar{H}$ , зі збільшенням якої  $e_{max3}$  зростає (рис. 3 (легенда стосується позначень приведених у табл. 4)).

Вплив інших факторів на  $e_{max3}$  є неоднозначним. Він залежить від їхнього співвідношення. Зокрема, збільшення довжини прямолінійної ділянки  $\bar{a}$ , кута  $\alpha$  переважно збільшують  $e_{max3}$ , проте, в низці випадків може виявлятися їхній слабкий вплив (рис. 4, 5)

При збільшенні параметра  $R_1$  деформації  $e_{max3}$  переважно зменшуються (рис. 6). Лише в окремих випадках (дослід № 1, 3, 4) значення радіуса заокруглення  $R_1$  майже не впливає на деформації  $e_{max3}$  (дослід № 3, 4) або призводить до їх незначного зростання (дослід № 1).

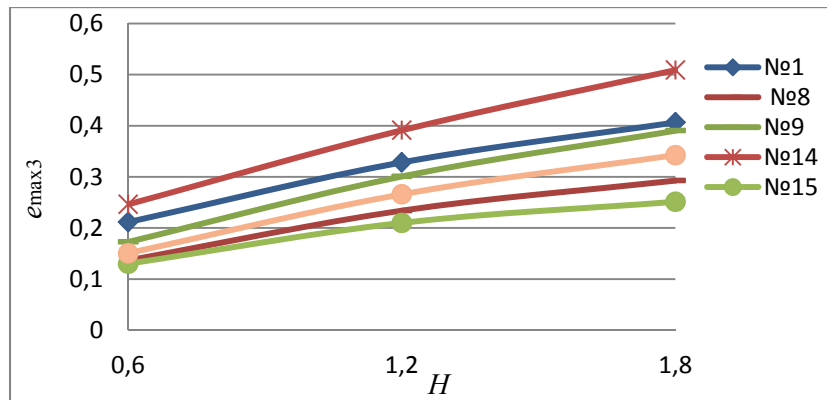


Рис. 3. Вплив висоти  $\bar{H}$  на  $e_{max3}$

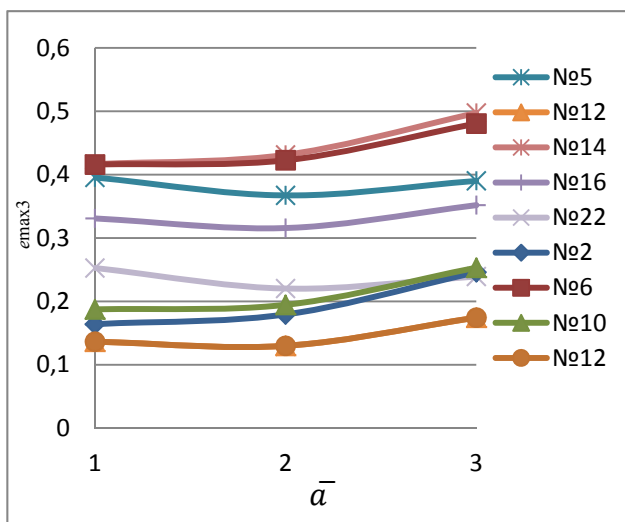


Рис. 4. Вплив довжини  $\bar{a}$  на  $e_{max3}$

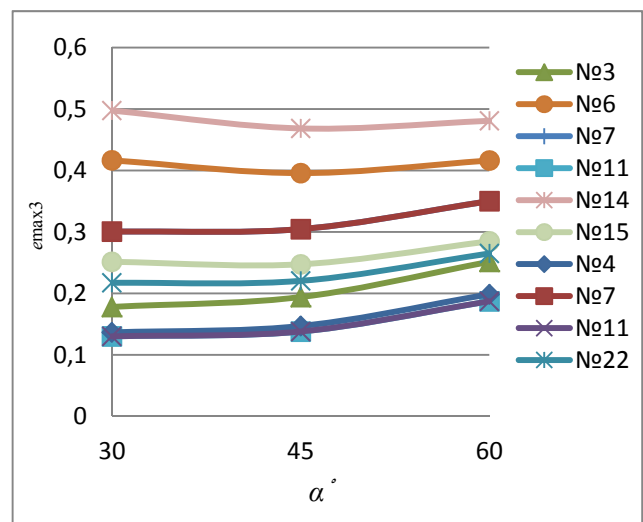


Рис. 5. Вплив кута  $\alpha$  на  $e_{max3}$

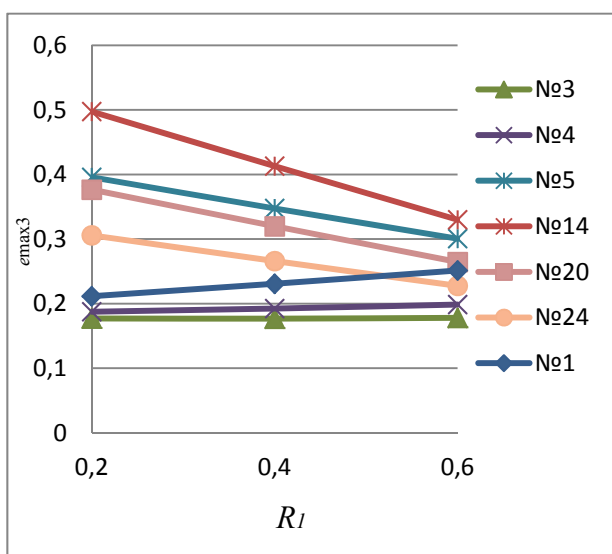


Рис. 6. Вплив радіуса  $R_1$  на  $e_{max3}$

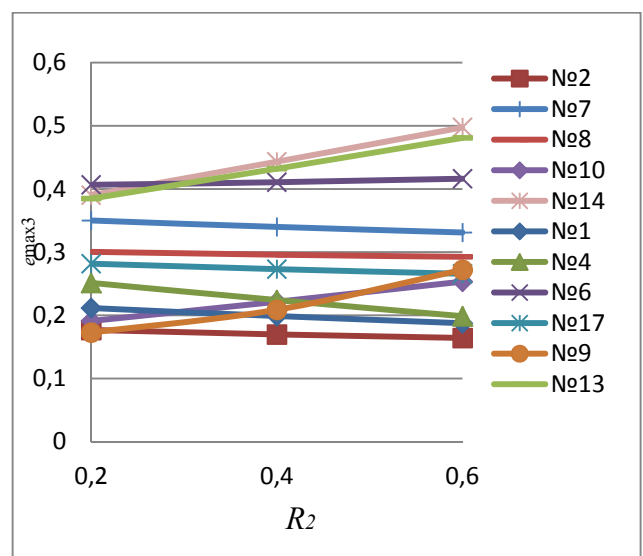


Рис. 7. Вплив радіуса  $R_2$  на  $e_{max3}$

Вплив радіуса заокруглення  $R_2$  (рис. 7) більш складний, ніж  $R_1$ , зокрема в дослідах № 6, 7, 8, 17 – ріст інтенсивності деформації не спостерігається при зміні  $R_2$ ; № 9, 10, 13, 14 – зі збільшенням значень  $R_2$  спостерігається зростання інтенсивності деформації; № 1, 2, 3, 4 – зі збільшенням значень  $R_2$  спостерігається зменшення росту інтенсивності деформації.

Відмітимо, що при  $\bar{a} = 3$ ,  $\bar{H} = 1,8$ ,  $\bar{R}_1 = 0,2$ ,  $\bar{R}_2 = 0,6$ ,  $\alpha = 30^\circ$  (дослід № 14) спостерігаються найбільші деформації  $e_{max3}$ . Це пов'язано поєднанням максимальних значень довжини вільної поверхні та висоти профілю заготовки з мінімальними значеннями радіусів заокруглень та кута нахилу профілю заготовки. Мінімальна  $e_{max3}$  спостерігаються в досліді № 19.

## ВИСНОВКИ

Отримана математична модель, що дозволяє розрахувати деформації в небезпечних з точки зору деформовності зонах в залежності від таких технологічних параметрів: вільна поверхня заготовки  $a$ , висота профілю заготовки  $H$ , радіуси заокруглень  $R_1$  та  $R_2$ , кут нахилу заготовки  $\alpha$  (рис. 2).

Встановлено, що модель в розглянутому діапазоні варіювання аргументів не має глобальних екстремумів. Найбільша деформація  $e_{max3}$  складає 0,5 (дослід № 14), найменша – 0,15 (дослід № 19).

Показано, що найвпливовішими факторами щодо максимальних деформацій є кут нахилу  $\alpha$  та висота профілю  $H$  заготовки. При необхідності зменшення (або збільшення) величини деформацій варто змінювати, за можливістью, саме ці параметри. При конструктивній неможливості таких змін варто розрахувати, згідно моделі (1) низку варіантів з різними значеннями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $a$  та обрати найкращий.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении : учеб. пособие / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.
2. Савуляк В. В. Деформація і напружений стан тонколистових матеріалів в процесі формування гофрів / В. В. Савуляк // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 1 (3). – С. 48–53.
3. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев : Вища школа, 1983. – 175 с.
4. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.
5. Грушко О. В. Особливості товстолістового штампування за схемою згину та зсуву / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – 2011. – № 62. – С. 193–197.
6. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.
7. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.
8. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

Грушко О. В. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ;

Молодецька Т. І. – аспірант ВНТУ.

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

E-mail: molodetska\_tanya@ukr.net

Стаття надійшла до редакції 01.02.2012 р.