

**Грушко О.В.,
Молодецька Т.І.**

Вінницький національний технічний
університет
м. Вінниця, Україна
E-mail: grushko_alex@mail.ru

ДЕФОРМОВНІСТЬ ТОВСТОЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК В УМОВАХ ПОПЕРЕЧНОГО ЗГИНУ

УДК 621.981

Стаття присвячена задачі вдосконалення процесу холодного гнуття широких заготовок з малопластичних металів щодо раціонального підбору геометричних параметрів для запобігання їх руйнування при формозміні. Для процесів гнуття отримала подальший розвиток теорія деформовності у вигляді вдосконалення побудови діаграм пластичності з використанням параметра, що враховує властивості матеріалу. Розроблено технологічні рішення, що дозволяють забезпечити деформовність на формозмінювальних операціях.

Ключові слова: деформовність, поперечний згин, товстолистові заготовки, холодне пластичне деформування.

Вступ

Процеси холодного гнуття товстолистових заготовок знайшли застосування при виробництві відповідних виробів різноманітних форм та призначення (для машинобудування, літакобудування, сільського господарства тощо) в умовах дрібносерійного та одиничного виробництва. Найпоширенішим способом виготовлення таких деталей, особливо з малопластичних матеріалів, зазвичай є гаряче штампування. Використання холодної обробки має очевидні переваги за енергоємністю, екологічністю, трибологічними властивостями виробу проте вимагає уточнювати граничні можливості процесу з метою уникнення тріщин. Існуючі на сьогоднішній день теоретичні розв'язки та експериментально-аналітичні моделі не дозволяють з необхідною точністю прогнозувати напружено-деформований стан (НДС) в процесі гнуття зусиллям товстолистових заготовок навіть для найпростіших випадків, зокрема для поперечного згину (рис. 1). Це пов'язано з невиконанням гіпотези плоских перерізів та наявністю великого рівня зсувних деформацій в осередку згину під час товстолистого штампування [1, 2] (рис. 1, в). Використання відомостей про НДС разом із діаграмами пластичності, згідно з феноменологічною теорією деформовності, дозволяє прогнозувати руйнування [3]. Однак в процесі згину реалізуються такі умови, в яких метал може поводитись нехарактерно щодо монотонної зміни пластичності від схеми напруженого стану (НС), що визначається показником жорсткості НС

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} \quad (1)$$

Відмітимо, що найбільш уживана апроксимація діаграми пластичності в жорсткій області (показник напруженого стану $\eta \geq 0$) застосовується у вигляді експоненти [3]:

$$e_p(\eta) = e_p(\eta_0) \exp(-\eta \lambda_1), \quad (2)$$

де $e_p(\eta_0)$ – пластичність матеріалу при чистому зсуві;

λ_1 – коефіцієнт чутливості пластичності до схеми напруженого стану – $\lambda_1 = \ln \frac{e_p(\eta_0)}{e_p(\eta_{+1})}$;

$e_p(\eta_{+1})$ – пластичність матеріалу при одноосьовому розтягу.

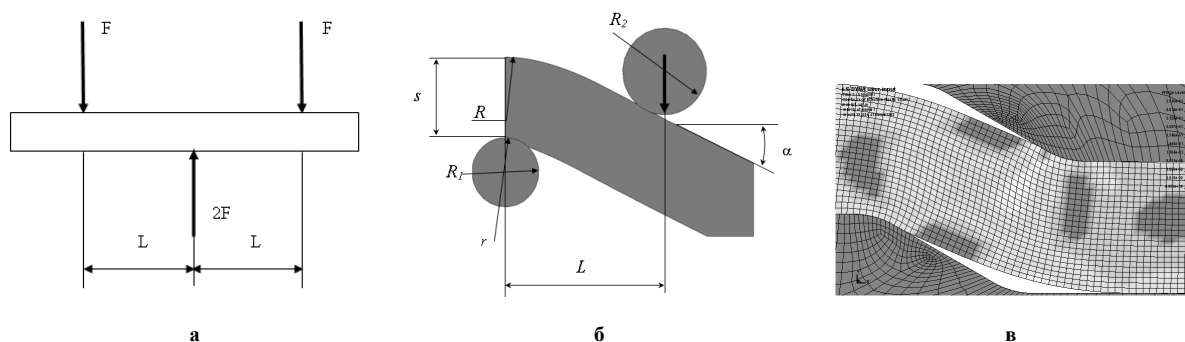


Рис. 1 – Схема (а), половина заготовки по площині симетрії (б) та моделювання процесу згину методом скінченний елементів (в)

Проте апроксимація (1) не є чутливою до можливих аномальних проявів пластичності матеріалів, які реалізуються в умовах поперечного згину товстолістових заготовок [4, 5]. В результаті для процесів, що перебігають близько до межі технологічних можливостей, важливо мати надійні дані щодо пластичності металу в умовах, що тотожні умовам формоутворення виробу.

Для штампування широких товстолістових заготовок відсутні науково обгрунтовані рекомендації, за допомогою яких визначають основні раціональні технологічні параметри при обробці тиском малопластичних та важкодеформівних металів. Прикладами використання цих матеріалів є ріжучий інструмент складної конфігурації (наприклад, бурякорізальний ніж, що виробляється із сталей типу У8, У12); профільні деталі з титанових сплавів (ВТ-6, ВТ-22, ОТ-4) в полегшених конструкціях (використовуються в літальних апаратах).

Для вивчення можливості пластичного деформування заготовки необхідно з одного боку мати інформацію про механічні властивості матеріалу, що відображаються в його карті [6], а з іншого боку мати інформацію про НДС в процесі формоутворення з якого отримуються шляхи деформування частинки заготовки в небезпечних осередках.

Мета і постановка задачі

Метою роботи є оцінка деформовності товстолістових заготовок в умовах їх поперечного згину та розрахунок використаного ресурсу пластичності в небезпечних осередках для передбачення їх руйнування при формоутворенні виробів.

Дослідження

Параметри карти матеріалу отримували на основі дослідів з визначення граничних величин пластичних деформацій. Для цього проводились випробування на розтяг, зсув та згин плоских зразків. При дослідженні на розтяг використовували плоскі зразки з бічними круглими вирізами, що дає можливість реалізовувати шляхи деформування, які близькі до простих і з різними показниками жорсткості напруженого стану в залежності від геометричних параметрів зразка [1, 4, 7].

В результаті випробувань отримані характеристики пластичності трьох дослідних матеріалів, що наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики пластичності для дослідних металів

Випробування на	ВТ6			У12			У8		
	η	e_p	ζ	η	e_p	ζ	η	e_p	ζ
Зсув	0,02	0,22	1,01	0	0,44	1,03	-0,01	0,54	1,03
Розтяг(зразки з канавками)	-	-	-	0,61	0,42	1,05	0,32	0,495	1,05
Розтяг (зразки з викружками)	0,97 1,4	0,480 0,09	1,00 1,17	0,95 1,41	0,240 0,48	1,01 1,12	1,05 1,35	0,620 0,34	1,02 1,12
Плоский згин	1,75	0,060	1,27	1,72	0,260	1,17	1,7	0,340	1,20
Двоосьовий розтяг	1,98	0,085	1,25	1,97	0,370	1,10	0,96	0,560	1,16

Внаслідок немонотонного зв'язку величин граничних деформацій в жорсткій області від показника η (при $\eta \geq 0$) використаємо показник напруженого стану ζ у вигляді суми відносних головних напружень з коефіцієнтами їх впливу [5]. Це дає змогу апроксимувати діаграму пластичності монотонними функціями в області $0 \leq \eta \leq 2$ з суттєво меншим відхиленням від експериментальних даних та з меншою кількістю дослідів, ніж при традиційному підході, з використанням параметра η та апроксимації (2):

$$\zeta = \frac{\sigma_1 + k_2 \sigma_2 + k_3 \sigma_3}{\sigma_i} = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} + k_2 \frac{\sigma_2}{\sigma_i} + k_3 \frac{\sigma_3}{\sigma_i},$$

де k_2, k_3 – коефіцієнти впливу відносних головних напружень на пластичність металу, що виражені в частках щодо впливу відносного першого головного напруження.

Діаграму пластичності апроксимували залежністю (1), яка набуває такого вигляду

$$e_p = d \cdot \exp(-q \cdot \zeta), \quad (3)$$

де d, q – константи діаграми пластичності, що визначається показником ζ (табл. 2).

Параметри карти дослідних матеріалів

Матеріал	d	q	k_2	k_3
BT6	38,4	5,09	0,2	-0,75
У12	23,33	3,63	0,02	-0,79
У8	11,24	3,153	0,08	-0,78

При плоскому напруженому та деформованому станах існує однозначний зв'язок між показниками η і ζ , формули перерахунку наведені в [5]. Отже, для зручності можна використовувати традиційну площину $e_i - \eta$ для представлення як діаграми пластичності так і шляхів деформування. Тим паче, що останні слабко залежать від параметрів карти матеріалу в тому числі для процесу гнуття, що знаходить експериментальне підтвердження.

На рис. 2 показані діаграми пластичності (для сталей У8, У12 та титанового сплаву BT6), що апроксимовані за функцією (2) для жорсткої області (пунктир) та перераховані на показник η діаграми, що апроксимовані за (3), із використанням показника ζ .

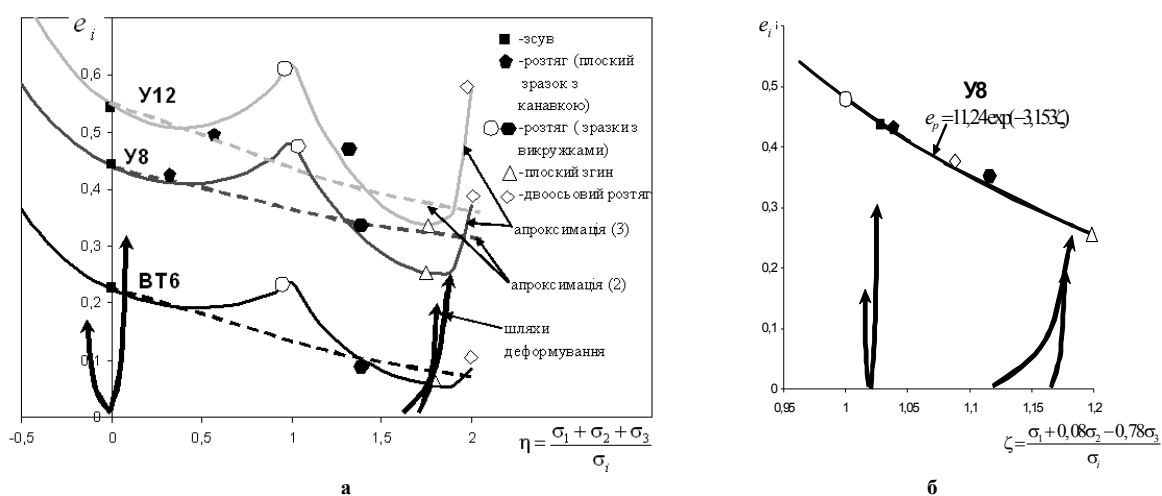


Рис. 2 – Діаграми пластичності досліджуваних металів за показником η (а), показником ζ (б) (сталь У8) та характерні залежності $e_i(\eta)$ в небезпечних зонах

За регресійною моделлю [2] отримано шляхи деформування матеріалу в характерних осередках в координатах $e_i(\eta)$. На рис. 2 показані деякі з них в небезпечних зонах заготовки (рис. 3), які є характерними для дослідженої області зміни параметрів. В області 3 ($\eta \approx -1,73$) деформації незначно перевищують відповідні величини в області 1 ($\eta \approx 1,73$). Проте пластичність конструкційних малопластичних металів в умовах при $\eta \approx 1,73$ суттєво нижча (в 2 ... 10 разів), ніж при $\eta \approx -1,73$. Тому, навіть при екстремальності деформацій в області 1 ($e_{\max 1}$), вона завжди буде менш небезпечною з точки зору руйнування, ніж область 3, з урахуванням, що перевищення $e_{\max 1}$ над $e_{\max 3}$ складає не більше 40 %. В області 2 при низькій чутливості пластичності матеріалу до зміни схеми напруженого стану при $\eta \geq 0$ можливо більш інтенсивне вичерпання пластичності, ніж в зоні 1. Проте матеріалів з пластичністю при зсуві ($\eta \approx 0$) порівнянню з пластичністю при плоскому згині ($\eta \approx 1,73$), є небагато (деякі сплави на основі міді, алюмінію [3, 4]). В результаті можна зробити висновок, що для переважної більшості малопластичних металів у досліджуваній області зміни параметрів небезпечною областю, з точки зору деформовності, є позаконтактна зона 1, оскільки в ній реалізується «жорстка» схема напруженого стану при відносно великих деформаціях.

Характерно, що показники напруженого стану η і ζ є малозмінним як відносно геометричних параметрів заготовки так і від стадії деформування заготовки. Це дає можливість не вивчати історію деформування в залежності від геометрії заготовки. Тому для оцінки деформовності варто визначати лише максимальні деформації та користуватись найпростішим скалярним критерієм [8]:

$$e_i = \int_0^{t_0} \varepsilon_i d\tau \leq e_p(\eta) \text{ або } \psi = \frac{e_i^*}{e_p(\zeta)} \leq 1, \quad (4)$$

де $e_p(\zeta)$ – гранична деформація в момент появи перших тріщин, що виявляються візуально;

Ψ – ступінь використаного запасу пластичності (СВЗП), який при деформуванні без руйнування має бути менший за одиницю.

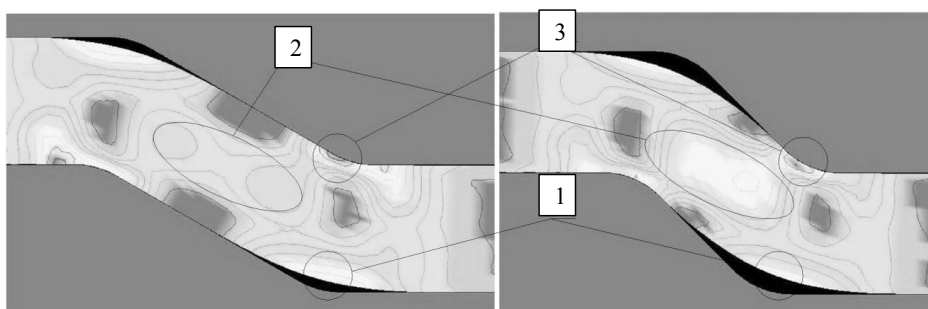


Рис. 3 – Деформована частина зігнутої заготовки:
а – $\alpha = 30^\circ$, $R = 4$ мм;
б – $\alpha = 45^\circ$, $R = 4$ мм;
1, 2, 3 – характерні небезпечні осередки деформації

Результати розрахунку використаного ресурсу пластичності для досліджуваних матеріалів при $s = 10$ мм; $L = 10$ мм; $R_1 = 2$ мм; $R_2 = 2$ мм; $\alpha = 60^\circ$ (параметри взяті для приклада – для одного із дослідів [2]) подані в табл. 3. В найнебезпечнішому осередку (зона 1, рис. 3) СВЗП розрахована в залежності від параметрів η і ζ , а також показана розбіжність в розрахункових величинах. Як видно, вона сягає близько 30 %, що є суттєво для інженерних розрахунків. Експеримент показує, що руйнування заготовок відбувається саме коли $\Psi_2(\zeta) = 1$, отже при виборі граничних параметрів технологічного процесу гнуття варто використовувати методику із застосуванням показника ζ .

Таблиця 3

Розрахунок СВЗП для досліджених матеріалів

Матеріал	1 осередок			2 осередок	3 осередок
	$\Psi_1(\eta)$	$\Psi_2(\zeta)$	$\Delta = ((\Psi_1 - \Psi_2) / \Psi_2) \cdot 100\%$	$\Psi_1 = \Psi_2$	$\Psi_1 = \Psi_2$
У8	0,553	0,636	13,16	0,864	0,421
У12	0,636	0,875	27,27	0,704	0,32
ВТ6	2,471	3,5	29,41	1,727	1,455

Зауважимо, що у більшості операцій згинання широких заготовок в штампах, незалежно від форми профілю, реалізуються умови плоского деформованого стану, при якому пластичність металу позначимо $e_i^*(\zeta_{ПДС})$. Оскільки характеристики пластичності металу мають природний статистичний розкид, а також унаслідок неврахованих чинників і прийнятих гіпотез (неточність розроблених моделей, схем деформації і т. д.) при розрахунку безпечних режимів слід зменшити деформації руйнування $e_i^*(\zeta_{ПДС})$ на величину запасу k_3 . Останній досить прийняти 1,2 ... 1,3, що забезпечить величину $\Psi \leq 0,9$, якщо проводити випробування пластичності металу в умовах згину або на основі параметрів карти по діаграмі $e_i^*(\zeta)$. В результаті запишемо умову деформовності у вигляді

$$e_i \leq \frac{e_i^*(\zeta_{ПДС})}{k_3}, \quad (5)$$

де e_i – значення інтенсивності деформацій на випуклій поверхні вигину; $e_i^*(\zeta_{ПДС})$ – значення деформацій в'язкого руйнування при плоскому деформованому стані (реалізується в зоні 1); $k_3 = 1,2 \dots 1,3$ – коефіцієнт запасу по деформаціях руйнування.

Величина e_i знаходиться з виразів, що викладені в [1]. Формула (5) набуде вигляду:

$$(b_0 + b_1 \bar{R} + b_2 \bar{L} + b_3 \bar{R}^2 + b_4 \bar{L}^2 + b_5 \bar{R} \bar{L}) (1 - \exp(-q \alpha^p)) \leq \frac{e_i^*(\zeta_{ПДС})}{k_3}, \quad (6)$$

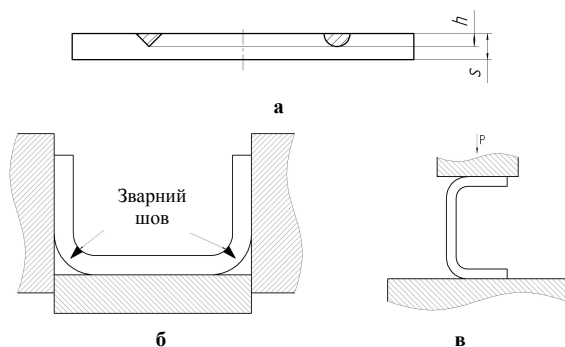


Рис. 4 – Рішення для забезпечення деформовності і зниження сили гнуття (приклад холодного гнуття товстостінного П-подібного профілю):

- а – заготовка з надрізами;
б – зварювання місць надрізу;
в – підгинання полиць

де $b_0, b_1 \dots b_5, q, p$ – коефіцієнти моделі, що визначаються за методикою [1].

З виразу (6) можуть бути знайдені граничні поєднання величини плеча прикладення згинальної сили, відносного радіусу інструменту \bar{R} і кута вигину α .

У практичних задачах далеко не завжди є можливість варіювання всіма технологічними величинами, тому велика частина аргументів в (6) для конкретної задачі є константами. Оскільки лінійні розміри у виразі (6) віднесені до товщини стінки заготовки, то у низці випадків, при неможливості зміни конструктивних параметрів штампу, можна змінювати товщину стінки, виконуючи надрізи заготовки на певну глибину h (рис. 4). Остання визначається з виразу (6):

$$\left[b_0 + \frac{b_1 R + b_2 L}{s_0 - h} + \frac{b_3 R^2 + b_4 L^2 + b_5 RL}{(s_0 - h)^2} \right] (1 - \exp(-q\alpha^p)) \leq \frac{e_i^* (\zeta_{ПДС})}{k_3}, \quad (7)$$

де s_0 – початкова товщина стінки заготовки.

Виконані надрізи також зумовлюють значне зниження деформуючих сил, необхідних для гнуття і особливо калібрування [9]. При необхідності надрізи зварюються (рис. 4) [1].

Висновки

Для розрахунку СВЗП при гнутті слід використовувати діаграми пластичності, в яких в якості аргумента використовується показник напруженого стану з коефіцієнтами – параметрами карти матеріалу. Це уточнює розрахунок СВЗП до 30 % і дозволяє вибирати режими гнуття, які запобігають руйнуванню. Ефективним технологічним забезпеченням деформовності є надрізання заготовки по товщині, гнуття і зварювання по внутрішньому радіусу деталі. Отриманий аналітичний вираз дозволяє провести розрахунок необхідної глибини надрізу.

Література

1. Грушко О. В. Холодне гнуття товстостілових заготовок з малопластичних металів : монографія / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька. – Вінниця : ВНТУ, 2014 – 144 с. – ISBN 978-966-641-597-7.
2. Грушко О. В. Моделювання зміцнення матеріалу в процесі штампування z-подібних заготовок / О. В. Грушко, Т. І. Молодецька // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 31 - 37. – ISSN 2076-2151.
3. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.
4. Dell H. CrachFEM – A Comprehensive Approach For The Prediction Of Sheet Metal Failure / H. Dell, H. Gese, G. Oberhofer // AIP Conference Proceedings. – 2007. – Vol. 908, May 17. – P. 165 - 170.
5. Грушко А. В. Параметр напряженного состояния, учитывающий свойства материала, и его влияние на пластичность / А. В. Грушко // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Машинобудування». – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – № 64. – С. 220 - 226. – ISSN 2305-9001.
6. Грушко О. В. Феноменологічні аспекти створення карт матеріалів для процесів холодного пластичного деформування / О. В. Грушко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 85 - 95. – ISSN 2076-2151.
7. Хван Д. В. Повышение эффективности в обработке металлов давлением / Д. В. Хван. – Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 1995. – 224 с.
8. Смирнов–Аляев Г. А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г. А. Смирнов–Аляев, В. П. Чикидовский. – Л. : Машиностроение, 1972. – 360 с.
9. Лысов М. И. Формообразование деталей гибкой / М. И. Лысов, Н. В. Сосов. – М. : Машиностроение, 2001. – 388 с.

Поступила в редакцію 25.01.2015

Grushko O. V., Molodeska T. I. Deformability of thick-sheet workpiece in conditions transverse bending.

The paper is devoted to the scientific problem of improving the cold bending process for wide workpieces made from low-plasticity metals regarding rational choice of products geometric parameters, prevention of their damage during forming process.

Analysis of the stress-strain condition of metal at cold bending wide workpiece is made by computer simulation using the finite element method. Investigated the strain state of the workpiece during transverse bending. The mathematical model of the process of plate bending wide workpieces, allowing to calculate the strain in hazardous areas, in terms of deformability, depending on the basic technological parameters. This makes it possible to generate recommendations for the rational selection of process parameters for the production of parts without the rejection characteristics. It is show that the plasticity chart should be built using the parameter that takes into account the properties of the material. Using this parameter allows higher accuracy to determine the degree of plasticity of the material stock utilization as compared with other charting methods and evaluate the deformability workpiece in transverse bending. Proposed technological solutions aimed at adapting the operations of plate bending pieces of hard materials due to scoring in the blank spot bending. The formulas allowing to calculate the depth of cut depending on the mechanical characteristics of the material and geometrical parameters of the workpiece.

Key words: deformability, transverse bending, thick-sheet workpiece, cold plastic deformation.

References

1. Grushko O. V. Holodne gnuttja товстолістових заготовок з малопластичних металів : монографія. O. V. Grushko, T. I. Molodec'ka. Vinnicja : VNTU, 2014. 144 s. ISBN 978-966-641-597-7.
2. Grushko O. V. Modeljuvannja zmichennja materialu v procesi shtampuvannja z-podibnih zagotokov. O. V. Grushko, T. I. Molodec'ka. Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. Kramatorsk : DGMA, 2012. № 1 (30). S. 31–37. ISSN 2076-2151.
3. Ogorodnikov V. A. Deformiruemost' i razrushenie metallov pri plasticheskom formoizmenenii. K. : UMK VO, 1989. 152 s.
4. Dell H. CrachFEM – A Comprehensive Approach For The Prediction Of Sheet Metal Failure. H. Dell, H. Gese, G. Oberhofer. AIP Conference Proceedings. 2007. Vol. 908, May 17. P. 165–170.
5. Grushko A. V. Parametr naprjazhennogo sostojanija, uchityvajushhij svojstva materiala, i ego vlijanie na plastichnost'. Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraїni «KPI». Serija «Mashinobuduvannja». K. : NTUU «KPI», 2012. № 64. S. 220–226. ISSN 2305-9001.
6. Grushko O. V. Fenomenologichni aspekti stvorennja kart materialiv dlja procesiv holodnogo plastichnogo deformuvannja. Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. Kramatorsk : DGMA, 2013. № 1 (34). S. 85–95. ISSN 2076-2151.
7. Hvan D. V. Povyszenie jeffektivnosti v obrabotke metallov davleniem. Voronezh : Izd-vo Voronezh. un-ta, 1995. 224 s.
8. Smirnov–Aljaev G. A. Jeksperimental'nye issledovanija v obrabotke metallov davleniem. G. A. Smirnov–Aljaev, V. P. Chikidovskij. L. : Mashinostroenie, 1972. 360 s.
9. Lysov M. I. Formoobrazovanie detalej gibkoj. M. I. Lysov, N. V. Sosov. M. : Mashinostroenie, 2001. 388 s.