

УДК 621.7.011

Грушко О. В.
Гуцалюк О. В.**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РЕДУКУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК
З ВИЗНАЧЕННЯМ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ**

З розвитком енерго-, ресурсозберігаючих технологій ставляться нові вимоги до матеріалів, які використовуються, зокрема, щодо фізико-механічних характеристик, які формуються шляхом технологічного зміцнення. Для матеріалів, що використовуються в порошкострої металургії і виготовляються за допомогою методу спікання виникає потреба їх обробки пластичним деформуванням з метою поліпшення механічних характеристик. Одним із таких є порошковий сплав системи вольфрам-нікель-залізо з вмістом вольфраму 89%, нікелю 7,7%, заліза 3,3% (ВНЗ). Оскільки в процесі спікання реалізуються заготовки з відносно малими відношеннями довжини до діаметра, то логічним для отримання необхідних фізико-механічних властивостей цих заготовок буде використання осесиметричного навантаження заготовки на обмеженій довжині [1]. В літературі даний спосіб навантаження називається охоплююче деформування або редукування.

Процес редукування дозволяє отримати зміцнені заготовки малих розмірів. Внаслідок особливостей деформування заготовки в процесі її редукування виникають зони нестационарності, розподіл напружень і деформацій в яких на сьогоднішній день не досліджувався. В літературних джерелах відсутні відомості про розрахунок довжини таких ділянок.

Для нестационарних процесів пластичного деформування аналітичний розрахунок окремих параметрів в статично невизначених задачах осесиметричного навантаження деталей має значні труднощі, пов'язані з інтегруванням диференціальних рівнянь рівноваги та умовою пластичності. Тому, при вирішенні багатьох задач пружно-пластичного деформування активно використовують комп'ютерне моделювання в програмах, що базуються на використанні кінцево-елементного методу моделювання [1].

Метою дослідження є аналіз механіки процесу редукування коротких заготовок сплаву ВНЗ з встановленням закономірностей між основними технологічними параметрами та розподілом інтенсивності накопичених деформацій (наклепу).

Попередньо проведено моделювання процесу редукування для циліндричних заготовок із використанням програмного комплексу ANSYS/LS-DYNA, оскільки він зарекомендував себе в світовій практиці стабільністю розрахунків та широкими можливостями на усіх етапах моделювання [2]. Циліндрична заготовка проштовхується через пуансон з деяким натягом (рис. 1). Під час моделювання пуансон задавався абсолютно жорстким тілом (rigid), а заготовка – деформованим. Використано квадратну форму кінцевих елементів, на які розбивалась деталь. Відношення довжини заготовки до діаметра заготовки становить 30/10 (кількість елементів 600). Таке співвідношення є оптимальним з точки зору оцінювання довжини нестационарних ділянок. Збільшення довжини заготовки від вказаних меж не надає більшої інформативності, оскільки збільшується лише довжина стаціонарної ділянки $l_{стац}$ (рис. 1).

По аналогії з [3] осередок деформації осесиметричного процесу редукування можна представити у вигляді сукупності кількох деформованих зон заготовки, що плавно переходять одна в іншу внаслідок нерозривності деформацій. На рис. 1 показано схему процесу, розміщення осередка деформацій та розподіл деформацій по довжині для суцільних циліндричних заготовок, що використовуються в процесі редукування.

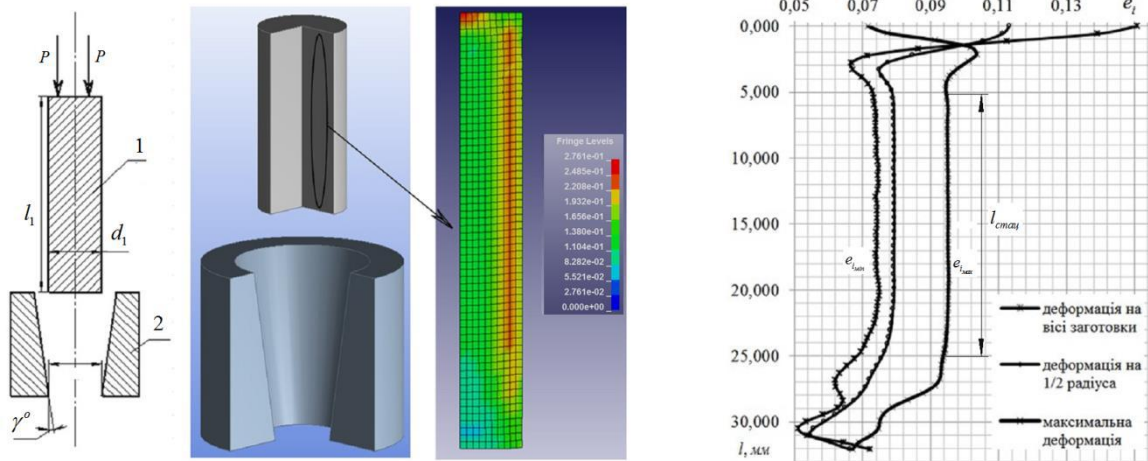


Рис. 1. Редукування заготовки (1 – заготовка, 2 – матриця)

Відносні натяги $\bar{a} = (d_2 - d_1)/d_2$ по аналогії з рекомендаціями роботи [4] були прийняті 0,002..0,1. В роботі [1] досліджено вплив кутів конуса інструменту (2..15°) на відносні натяги інструменту – усталеність процесу забезпечується при натягові 2...9%. Оскільки досліджуваний процес редукування має подібну постановку задачі з вищезрозглянутими дослідженнями, було прийнято для моделювання такі величини: відносні натяги $\bar{a} = 0,01...0,13$ з інтервалом 0,01; кути редукування – $\gamma = 3^\circ..15^\circ$ з інтервалом 2° .

Механічні характеристики матеріалу в пластичній області переважно визначаються його кривою течії, яка представляє собою залежність інтенсивності напружень σ_i від інтенсивності логарифмічних деформацій e_i . Для більшості процесів обробки металів тиском при деформаціях в холодному стані, суттєво перевищуючих границю текучості, криву течії металу ВНЗ апроксимовано степеневою функцією П. Людвіга [5]

$$\sigma_i = A e_i^n, \quad (1)$$

де σ_i – інтенсивність напружень; e_i – інтенсивність деформацій; A – модуль зміцнення; n – показник зміцнення.

На основі проведених експериментів досліджуваного порошкового сплаву ВНЗ розраховані: модуль пружності $E = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, границя міцності $\sigma_s = 920 \text{ МПа}$, границя текучості $\sigma_m = 650 \text{ МПа}$, модуль зміцнення $A = 1732 \text{ МПа}$; показник зміцнення $n = 0,259$; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$.

Фактором, що обмежує процес на закріпленій оправці, є несприятливі умови тертя в осередку деформації, які вимагають застосування вискоєфективних технологічних мастил і надійного кріплення оправки, спеціальної підготовки вихідної заготовки та раціонального вибору натягів (рис. 2).

Співставлення результатів моделювання [6] з різними значеннями коефіцієнта тертя f показало, що мінімальні величини коефіцієнта тертя сприяють більш рівномірному деформуванню заготовки по довжині та зменшення величини ділянки нестационарності. Значення коефіцієнта тертя більше 0,12 спричиняє вищу нерівномірність плинності матеріалу по перерізу, що призведе до незадовільної якості напівфабрикату. В умовах виробництва технологічно можливим є забезпечення мінімальної величини коефіцієнта тертя $f = 0,1$, тому для розрахунків прийнято $f = 0,1$.

З'ясовано, що відносний натяг \bar{a} спричиняє суттєвий вплив на механіку процесу редукування. При великих значеннях відносного натягу розподіл деформацій по довжині зразка має значну нерівномірність та виникають небезпечні напруження при виході заготовки з пуансона (рис. 3). Моделювання процесу редукування при різних значеннях відносного натягу \bar{a} показало нам, що при $\bar{a} < 0,02$ спостерігається поверхневе зміцнення матеріалу заготовки,

при $0,02 \leq \bar{a} \leq 0,1..0,11$ - матеріал заготовки зміцнюється по всьому перерізі ($\bar{a} \leq 0,1$ для $\gamma = 3..5^\circ$; $\bar{a} \leq 0,11$ для $\gamma = 7..15^\circ$), при $\bar{a} > 0,1..0,11$ - матеріал характеризується значною нерівномірністю зміцнення по довжині заготовки.

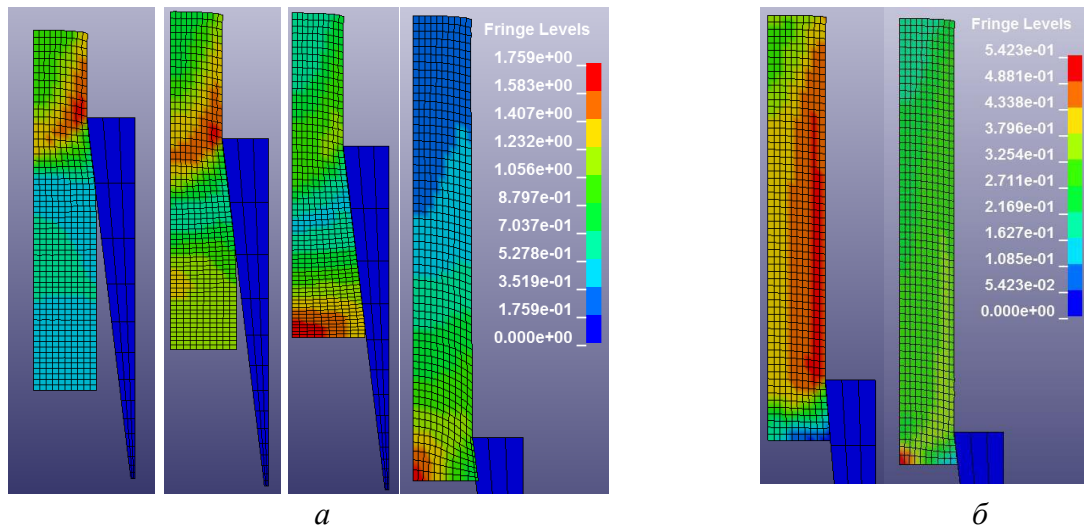


Рис. 2. Редукування заготовки при різних значеннях коефіцієнта тертя (а – коефіцієнт тертя $f=0,12..0,16$; б- коефіцієнт тертя $f=0,1$)

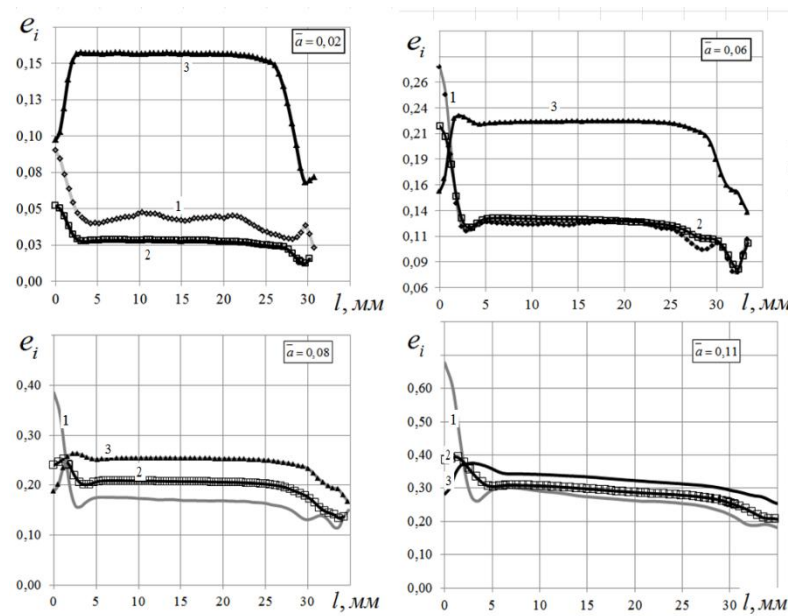


Рис. 3. Деформація заготовки при різних значеннях натягу (1 – деформація на вісі симетрії; 2 – деформація заготовки на 1/2 радіуса; 3 – деформація на поверхні)

З графіків видно (рис. 3), що в процесі редукування суттєвих значень досягає інтенсивність деформацій в місці прикладення зусилля (максимальне значення на вісі симетрії). Ця зона являється найбільш небезпечною з точки зору руйнування. Для того, щоб зразок не зруйнувався в процесі навантаження, необхідно, щоб шлях деформування для конкретного процесу редукування не перетинав діаграму пластичності досліджуваного зразка [7].

Розподіл інтенсивності деформацій по перерізу стержня в стаціонарній ділянці має нерівномірність. Позначимо максимальне та мінімальне значення інтенсивності деформацій як $e_{i_{max}}$ та $e_{i_{min}}$ (рис. 4).

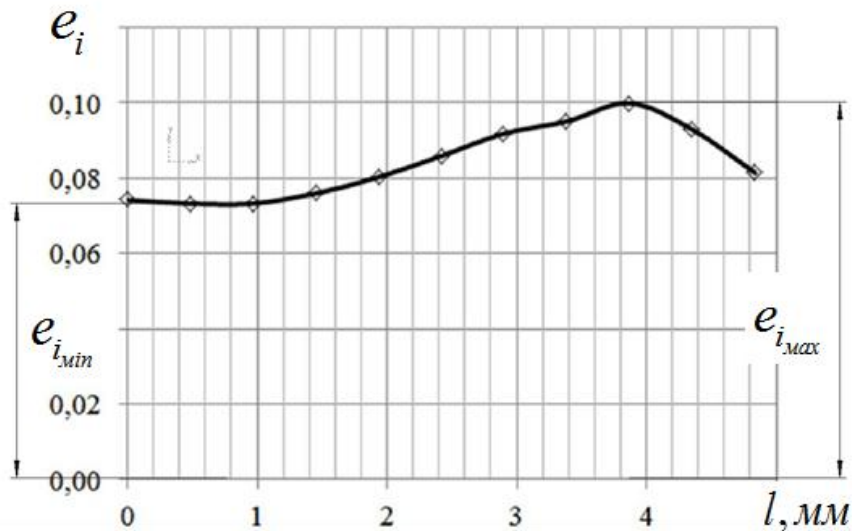


Рис. 4. Розподіл інтенсивності деформацій по перерізу стержня

За результатами моделювання отримали значення максимальної ($e_{i_{max}}$) та мінімальної ($e_{i_{min}}$) інтенсивності деформацій в умовно стаціонарній ділянці при різних значеннях кута редукування γ та відносного натягу \bar{a} (рис. 5).

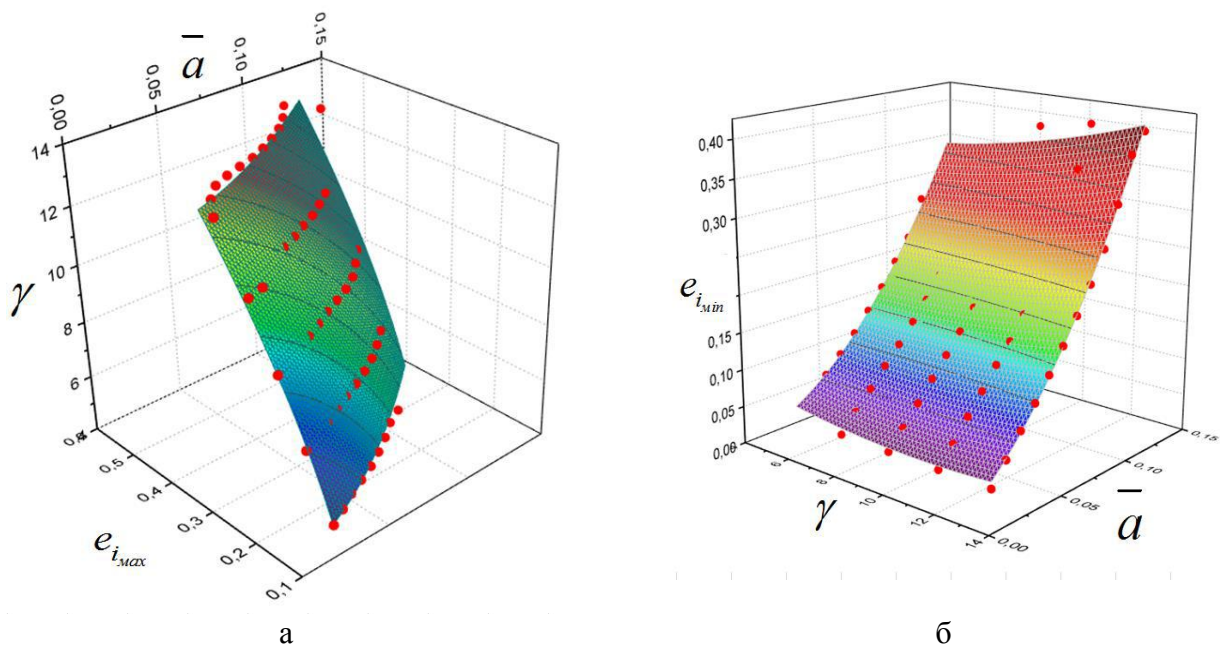


Рис. 5. Залежність e_i від \bar{a} та γ в координатах: (а) максимальна $e_{i_{max}}$ та (б) мінімальна $e_{i_{min}}$ інтенсивність деформацій в умовно стаціонарній ділянці – кут редукування γ – відносний натяг \bar{a}

Використавши науковоспрямовану програму обробки статистичних даних «Oridgin Pro» апроксимуємо розрахункові значення максимальної(мінімальної) інтенсивності деформацій в залежності від кута редукування φ та відносного натягу \bar{a} (рис. 5).

Залежність $e_{i_{max}}$ від \bar{a} та γ , що зображена на рис. 5а, знайдена у вигляді:

$$e_{i_{max}} = e_{i_0} + B \cdot \gamma^C + D \cdot (\bar{a})^E + F \cdot \gamma^C \cdot (\bar{a})^E, \quad (2)$$

де $e_{i_0}=0,034 \pm 0,0179$; $B=0,00304 \pm 0,0014$; $C=1,82 \pm 0,163$; $D=4,24 \pm 1,24$; $E=1,39 \pm 0,144$; $F=-0,0042 \pm 0,0046$.

Скорегований коефіцієнт детермінації $R^2_{adj} = 0,986$.

Залежність $e_{i_{min}}$ від \bar{a} та γ , що зображена на рис. 5б, знайдена у вигляді:

$$e_{i_{min}} = e_{i_0} + A \cdot \gamma + B \cdot \bar{a} + C \cdot \gamma^2 + D \cdot (\bar{a})^2 + F \cdot \gamma \cdot \bar{a}, \quad (3)$$

де $e_{i_0}=0,074 \pm 0,0154$; $A=-0,0123 \pm 0,0029$; $B=0,223 \pm 0,184$; $C=5,19 \cdot 10^{-4} \pm 1,54 \cdot 10^{-4}$; $D=14,2 \pm 1,07$; $F=0,084 \pm 0,0124$.

Скорегований коефіцієнт детермінації $R^2_{adj} = 0,991$.

Для забезпечення рівномірного наклепу по заготовці проведемо аналіз впливу γ, \bar{a} на інтенсивність деформацій. Ведемо коефіцієнт нерівномірності деформацій у вигляді:

$$\omega = \frac{e_{i_{min}}}{e_{i_{max}}}.$$

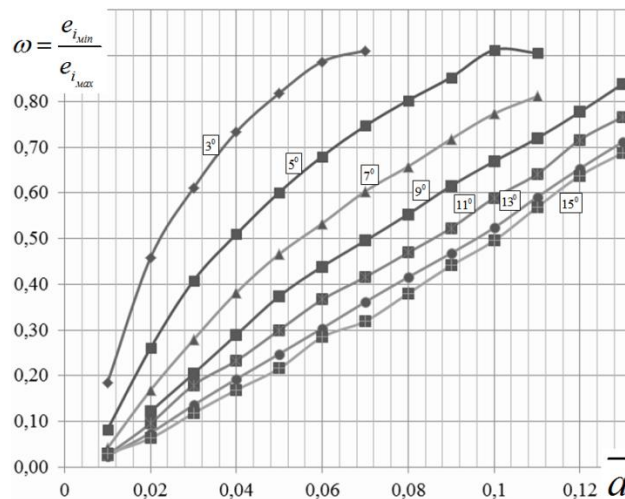


Рис. 6. Залежність ω від натягу \bar{a} та кута γ

Залежність ω від \bar{a} та γ (рис. 6) знайдена у вигляді :

$$\omega = \omega_0 + A \cdot \gamma + B \cdot \bar{a} + C \cdot \gamma^2 + D \cdot (\bar{a})^2 + F \cdot \gamma \cdot \bar{a}, \quad (4)$$

де $\omega_0=0,586 \pm 0,267$; $A=-0,106 \pm 0,0045$; $B=10,5 \pm 0,569$; $C=0,0041 \pm 2,37 \cdot 10^{-4}$; $D=-14,96 \pm 3,835$; $F=-0,228 \pm 0,0296$.

Скорегований коефіцієнт детермінації $R^2_{adj} = 0,99$.

Отримана залежність (4) дає можливість оцінити нерівномірність деформацій по перерізу зразка без проведення натурних досліджень. Для забезпечення рівномірності розподілу деформацій по перерізу зразка варто використовувати коефіцієнт нерівномірності деформацій $\omega \leq 0,9$: при значеннях кута $\gamma = 3..5^\circ$ коефіцієнт знаходиться в межах $0,25 \leq \omega \leq 0,9$; при значеннях кута $\gamma = 7..15^\circ$ – $0,05 \leq \omega \leq 0,75$ (рис. 6).

ВИСНОВКИ

Механіка процесу редукування суцільних коротких заготовок визначається умовами тертя на контактних поверхнях, відносними натягами та величиною коефіцієнта нерівномірності інтенсивності деформацій.

Мінімальне значення коефіцієнта тертя сприяє більш рівномірному деформуванню заготовки по довжині та зменшує величину ділянки нестационарності.

При відносному натягові $\bar{a} < 0,02$ спостерігається переважно поверхневе зміцнення матеріалу заготовки. При відносному натягові $0,02 \leq \bar{a} \leq 0,1..0,11$ – матеріал заготовки зміцнюється по всьому перерізі ($\bar{a} \leq 0,1$ для $\gamma = 3..5^0$; $\bar{a} \leq 0,11$ для $\gamma = 7..15^0$). При відносному натягові $\bar{a} > 0,1..0,11$ – матеріал характеризується значною нерівномірністю зміцнення по довжині заготовки.

Нерівномірність розподілу деформацій, що визначається коефіцієнтом нерівномірності деформацій ω , залежить від натягу \bar{a} та кута γ , зокрема при значеннях кута $\gamma = 3..5^0$ коефіцієнт знаходиться в межах $0,25 \leq \omega \leq 0,9$; при значеннях кута $\gamma = 7..15^0$ – $0,05 \leq \omega \leq 0,75$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зайдес С.А. *Технологическая механика осесимметрического деформирования: монография* / С.А. Зайдес, А.Н. Исаев. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2007. – 432 с.
2. Режим доступа : <http://www.ls-dyna.com/>.
3. Исаев А.Н. *Механико-математическое моделирование формообразующих операций в процессах изготовления изделий из трубчатых заготовок* / А. Н. Исаев // ГОУ Рост. гос. академ. с.-х. машиностроения. – Ростов-на-Дону, 2004 – 272 с.
4. Розенберг А.М. *Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания* / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг. – Киев : Наукова думка, 1990 – 320 с.
5. Людвик П. *Основы технологической механики* / П. Людвик // *Расчеты на прочность: сборник научных трудов.* – М. : Машиностроение, 1970. – Вып. 15. – С. 130–166.
6. Грушко О. В. *Моделивання 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.
7. Огородников В. А. *Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении* / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.

REFERENCES

1. Zajdes S.A. *Tehnologicheskaja mehanika osesimetricheskogo deformirovanija: monografija* / S.A. Zajdes, A.N. Isaev. – Irkutsk : Izd-vo IrGTU, 2007. – 432 s.
2. Rezhim dostupa : <http://www.ls-dyna.com/>.
3. Isaev A.N. *Mehaniko-matematicheskoe modelirovanie formoobrazujushhijh operacij v procesah izgotovlenija izdelij iz trubchastijh zagotovok* / A. N. Isaev // GOU Rost. gos. akadem. s.-h. mashinostroenija. – Rostov-na-Donu, 2004 – 272 s.
4. Rozenberg A.M. *Mehanika plasticheskogo deformirovanija v processah rezanija i deformirujushhego protjagivaniya* / A. M. Rozenberg, O. A. Rozenberg. – Kiev : Naukova dumka, 1990 – 320 s.
5. Ljudvik P. *Osnovy tehnologicheskoi mehaniki* / P. Ljudvik // *Raschety na prochnost': sbornik nauchnyh trudov.* – M. : Mashinostroenie, 1970. – Vyp. 15. – S. 130–166.
6. Grushko O. V. *Modeljvannja zmicnennja materialu v procesi shtampuvannja z-podibnih zagotovok* / O. V. Grushko, T. I. Molodec'ka // *Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. tr.* – Kramatorsk : DGMA, 2012. – № 1 (30). – S. 31–37. – ISSN 2076-2151.
7. Ogorodnikov V. A. *Deformiruemost' i razrushenie metallov pri plasticheskom formoizmenenii* / V. A. Ogorodnikov. – K. : UMK VO, 1989. – 152 s.

Грушко О. В. – д-р техн. наук, проф. ВНТУ

Гуцалюк О. В. – аспірант ВНТУ

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

E-mail: grushko_alex@mail.ru, oleksandrompm@mail.ua

Статья поступила в редакцию 20.03.2016 г.