УДК 621.77

Гунько І.В. к.т.н.
Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

ОЦІНКА ДЕФОРМІВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПРИ ХОЛОДНОМУ ВАЛЬЦЮВАННІ

Gunko I.
Vinnitsa National Agrarian University, Vinnitsa, Ukraine

ESTIMATION DEFORMABLE MATERIAL OF BLANKS IN COLD ROLLING

Предложена методика определения напряженно-деформированного состояния на свободной поверхности заготовки при вальцовке. В основу методики положен экспериментально-аналитический метод, предусматривающий восстановление по экспериментальным данным аналитической зависимости между компонентами логарифмических деформаций. Построены обобщенные скалярная и тензорная модели предельного состояния материала свободной поверхности заготовки при вальцовке, что позволяет оценить уровень накопленных повреждений как для операций формирования заготовок вальцовкой, так и для последующих операций.

Ключевые слова: напряженно-деформированного состояние, свободная поверхность, показатель наряженного состояния, предельная деформация, накопленные повреждения, скалярная модель, тензорная модель, вальцовка.

Введення

Процес формування вальцюванням використовується переважно в якості підготовчої операції до об'ємного штампування з метою цілеспрямованого перерозподілу металу вихідної заготовки. Цим забезпечується усунення надмірної нерівномірності деформації і неодночасного заповнення металом порожнини штампу при об'ємному штампуванні; досягнення зростання ступеня деформації і виготовлення якісних штампованих виробів з високим коефіцієнтом використання металу; виготовлення складнопрофільованих виробів, в тому числі з криволінійною віссю; формування сприятливої структури металу і покращення його механічних характеристик [1].

Разом з тим, для усунення браку і забезпечення високої якості виробів, важливо уміти оцінювати рівень накопичених в матеріалі заготовки пошкоджень. Оскільки, навіть за умови відсутності макротріщин, ділянки заготовки з реально досягнутим високим рівнем накопичених пошкоджень є потенційно небезпечними як для фінішних операцій об'ємного штампування, так і в процесі експлуатації готових виробів. Тому необхідні надійні методи виявлення таких ділянок на етапах контролю якості готової продукції. Крім того, вирішення задачі оцінки накопичення пошкоджень надає можливість назначати раціональні параметри процесу холодного вальцювання або обґрунтовано переходити до більш енергомістких процесів гарячого вальцювання матеріалів при їх недостатній пластичності.

Задача оцінки деформівності та рівня накопичених пошкоджень матеріалу заготовки в процесах вальцювання складається фактично із двох окремих задач:

1. Визначення напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу заготовки.
2. Визначення рівня накопичених пошкоджень із застосуванням деякої моделі накопичення пошкоджень (критерії деформівності [2, 3, 4]).

Задача визначення НДС матеріалу заготовки при вальцюванні може бути розв'язана за допомогою сучасних суперпотужних спеціалізованих пакетів типу ANSYS/LS-DYNA та DEFORM 3D. Вказані пакети є комерційними, вільний доступ до них відсутній. Окрім цього, вибір параметрів моделювання під час користування подібними пакетами реально може бути здійсненим в широких межах. Тому результати скінченно-елементного моделювання не завжди достатньо адекватні реальним умовам деформування конкретної заготовки. В роботі [5] запропоновано методику використання експериментально-аналітичного методу визначення НДС до налаштування моделювання пластичного деформування за допомогою програмного комплексу DEFORM 3D. Удосконалений експериментально-аналітичний метод визначення НДС [2, 3, 6, 7] може бути покладений в основу аналізу НДС матеріалу заготовки на вільній поверхні в процесах вальцювання. Такі результати мають самостійне значення, а не лише для налаштування моделювання пластичного деформування за допомогою програмного комплексу DEFORM 3D, або йому подібних. Це пов'язане з тим, що вільна поверхня заготовки в процесах вальцювання може виявитися небезпечною з точки зору тріщиноутворення.

В джерелі [7] зазначається, що умова $\lim\limits_{\varepsilon_\varphi \to \infty} \dfrac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi} = -\dfrac{1}{2}$, де ε_z, ε_φ - осьова та колова логарифмічні деформації відповідно, є досить жорсткою. Згідно указаній умові напружений стан в досліджуваній області із збільшенням деформацій наближається до схеми напруженого стану розтягу. Зауважимо, що йшлося про вісесиметричне осадження циліндричних зразків. Очевидно, що для дослідження процесів вальцювання указана умова є ще більш жорсткою, оскільки, на відміну від осадження циліндричних зразків, при вальцюванні заготовок відбувається також їх витяжка, до того ж відсутні дані про перевірку достовірності даної умови. Авторами [7] запропоновано узагальнене співвідношення для визначення залежності між осьовою ε_z та коловою ε_φ деформаціями бічної поверхні циліндричного зразка при торцевому стисненні ($\varepsilon_z = f(\varepsilon_\varphi)$) та отримано аналітичне описання траєкторії деформацій в таких координатах: показник напруженого стану η – накопичена деформація ε_u. Але відсутні відповідні моделі граничних деформацій.

Метою даної статті є побудова для процесів вальцювання моделей граничних деформацій для точок матеріалу вільної поверхні заготовки.

Дослідження

Користуючись результатами роботи [7] залежність між осьовою ε_z та поздовжньою ε_y деформаціями вільної поверхні зразка під час вальцювання подамо у вигляді диференціального рівняння

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_y} = -\frac{\xi \cdot \varepsilon_y^2 + 2 \cdot m^2}{\varepsilon_y^2 + m^2}, \quad m > 0, \quad \frac{1}{2} \le \xi \le 2; \tag{1}$$

де m, ξ – константи, які визначаються експериментально.

Очевидно, що величина ξ буде визначатися умовами вальцювання: схемою формування, коефіцієнтами обтискування та витяжки заготовки та її типорозміром, умовами тертя на контакті валків з заготовкою та ін.

Розв’язком диференціального рівняння (1) є співвідношення:

$$\varepsilon_z = -\xi \cdot \varepsilon_y - (2-\xi) \cdot m \cdot arctg\left(\frac{\varepsilon_y}{m}\right). \tag{2}$$

Параметричне представлення (2) має наступний вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_y = m \cdot tg(t); \\ \varepsilon_z = -m \cdot (\xi \cdot tg(t) + (2-\xi) \cdot t); \end{cases} \quad t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right[. \tag{3}$$

Із урахуванням (3) отримано аналітичне описання траєкторії деформацій [7]

$$\varepsilon_u(t, m, \xi) = \frac{2}{3} \cdot m \cdot \sqrt{3} \cdot \int_0^t \sqrt{\frac{\xi^2 - \xi + 1}{\cos^4(\tau)} - \frac{2 \cdot \xi^2 - 5 \cdot \xi + 2}{\cos^2(\tau)} + (2-\xi)^2} \cdot d\tau, \tag{4}$$

$$\eta(t, \xi) = \frac{6 \cdot (-\xi - (2-\xi) \cdot \cos^2(t) + 1)}{\sqrt{9 + 3 \cdot (1 - 2 \cdot \xi - 2 \cdot (2-\xi) \cdot \cos^2(t))^2}}. \tag{5}$$

На основі використання методики побудови аналітичних моделей граничних деформацій бічної поверхні зразків із використанням залежності між компонентами деформацій [6, 7] та апроксимації кривої граничних деформацій [8]

$$\varepsilon_{*c}(\eta) = a_2 \cdot \exp\left(-\eta \cdot \ln\left(\frac{(1-\eta) \cdot a_1}{2 \cdot a_2} + \frac{(1+\eta) \cdot a_2}{2 \cdot a_3}\right)\right), \ \eta \in [-1, 1], \tag{6}$$

де $a_1 = \varepsilon_{*c}, a_2 = \varepsilon_{*k}, a_3 = \varepsilon_{*p}$ - граничні деформації для стиску, зсуву та розтягу відповідно, побудовано узагальнену аналітичну модель граничних деформацій

$$\psi(\varepsilon_u(t,m)) = \overline{\psi}(t,m) = \frac{m}{3 \cdot \varepsilon_{*k}} \times$$
$$\times \int_0^t \frac{\exp\left[\omega(\tau) \cdot \ln\left(\varepsilon_{*c} \cdot \dfrac{1-\omega(\tau)}{2 \cdot \varepsilon_{*k}} + \varepsilon_{*k} \cdot \dfrac{1+\omega(\tau)}{2 \cdot \varepsilon_{*p}}\right)\right]}{f(2,\tau) \cdot \cos^2(\tau)} d\tau, \tag{7}$$

де

$$\omega(\tau) = f(1,\tau) \cdot f(2,\tau), \tag{8}$$

$$f(k,\tau)=\left(9\cdot(k-1)+3\cdot(3-k)\cdot\left(1-k\cdot\xi-k\cdot(2-\xi)\cdot\cos^2(\tau)\right)^k\right)^{\frac{(-1)^{k+1}}{k}},\ k=1,2. \qquad (9)$$

Визначення моменту досягнення граничної деформації для даного матеріалу, який ідентифікується значеннями граничних деформацій $\varepsilon_{*c}, \varepsilon_{*k}, \varepsilon_{*p}$, і для певної траєкторії деформацій, яка визначається фіксованим значенням параметра апроксимації m, полягає у розв'язанні нелінійного рівняння

$$\frac{m}{3\cdot\varepsilon_{*k}}\cdot\int\limits_0^{t_*(m)}\frac{\exp\left[\omega(\tau)\cdot\ln\left(\varepsilon_{*c}\cdot\frac{1-\omega(\tau)}{2\cdot\varepsilon_{*k}}+\varepsilon_{*k}\cdot\frac{1+\omega(\tau)}{2\cdot\varepsilon_{*p}}\right)\right]}{f(2,\tau)\cdot\cos^2(\tau)}d\tau-1=0, \qquad (10)$$

де $t_*(m)$ - значення параметра t, який характеризує стадію процесу вальцювання за даних умов, що відповідає моменту утворення тріщини.

Слід зазначити, що відома модель граничних деформацій [6, 9] є частинним випадком (7)-(10) для $\xi=0,5.$ У цьому випадку маємо

$$\frac{m}{\varepsilon_{*k}}\cdot\int\limits_0^{t_*(m)}\frac{\exp\left[\omega(\tau)\cdot\ln\left(\varepsilon_{*c}\cdot\frac{1-\omega(\tau)}{2\cdot\varepsilon_{*k}}+\varepsilon_{*k}\cdot\frac{1+\omega(\tau)}{2\cdot\varepsilon_{*p}}\right)\right]}{f(2,\tau)\cdot\cos^2(\tau)}d\tau-1=0, \qquad (11)$$

$$\omega(\tau)=f(1,\tau)\cdot f(2,\tau), \qquad f(k,\tau)=\left(1+(-1)^k\cdot 3\cos^{2k}(\tau)\right)^{\frac{(-1)^{k+1}}{k}},\quad k=1,2. \qquad (12)$$

Побудовану модель граничних деформацій доцільно використовувати для випадків вальцювання заготовок без переформування, наприклад для вальцювання в гладких валках [10]. Разом з тим, для формування заготовок вальцюванням, як підготовчої операції до процесів холодного об'ємного штампування, використовують овальні, круглі, квадратні, ромбічні та інші калібри. У таких випадках маємо дискретну зміну головних напрямів приростів деформацій і для коректної оцінки граничних деформацій потрібно використовувати тензорну модель накопичення пошкоджень.

Для побудови тензорної моделі граничного стану матеріалу вільної поверхні заготовки при вальцюванні використовуватимемо тензорно-лінійну модель накопичення пошкоджень [9]:

$$\psi_{ij}(\varepsilon_u)=\int\limits_0^{\varepsilon_u}\frac{\beta_{ij}(\varepsilon_u)}{\varepsilon_{*c}\left[\eta(\varepsilon_u)\right]}\cdot d\varepsilon_u\ , \qquad (13)$$

де ψ_{ij} – компоненти девіатора пошкоджень; $\varepsilon_{*c}=\varepsilon_{*c}(\eta)$ – крива граничних деформацій під час стаціонарного деформування, тобто діаграма пластичності [2], яка апроксимується за допомогою співвідношення (6); β_{ij} – напрямний тензор приростів деформацій, який визначається за допомогою співвідношення:

$$\beta_{ij}=\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\frac{d\varepsilon_{ij}}{d\varepsilon_u}, \qquad (14)$$

де $d\varepsilon_{ij}$ – компоненти тензора приростів деформацій; $d\varepsilon_u$ - інтенсивність приростів деформацій.

Міра пошкодженості під час використання тензорно-лінійної моделі накопичення пошкодження (13), визначається виразом

$$\psi_u=\psi_{ij}\cdot\psi_{ij}\,. \qquad (15)$$

Відповідно до моделі накопичення пошкоджень (13), компоненти тензора-девіатора пошкоджень набувають вигляду

$$\psi_{zz}(\varepsilon_u)=\int\limits_0^{\varepsilon_u}\frac{\beta_{zz}(\varepsilon_u)}{\varepsilon_{*c}\left[\eta(\varepsilon_u)\right]}\cdot d\varepsilon_u\ , \qquad (16)$$

$$\psi_{yy}(\varepsilon_u)=\int\limits_0^{\varepsilon_u}\frac{\beta_{yy}(\varepsilon_u)}{\varepsilon_{*c}\left[\eta(\varepsilon_u)\right]}\cdot d\varepsilon_u\ . \qquad (17)$$

У відповідності до міри пошкодженості (15), гранична умова, досягнення якої пов'язується з моментом руйнування під час деформування, матиме вигляд

$$\sqrt{\psi_{zz}^2+\psi_{yy}^2+\left(\psi_{zz}+\psi_{yy}\right)^2}=1\,. \tag{18}$$

Для апроксимації (3) залежностей між компонентами деформацій, компоненти напрямного тензора набудуть вигляду:

$$\beta_{zz}(t)=-\sqrt{6}\cdot\frac{\xi+(2-\xi)\cdot\cos^2(t)}{\sqrt{9+3\cdot\left(1-2\cdot\xi-2\cdot(2-\xi)\cdot\cos^2(t)\right)^2}}\,, \tag{19}$$

$$\beta_{yy}(t)=\frac{\sqrt{6}}{\sqrt{9+3\cdot\left(1-2\cdot\xi-2\cdot(2-\xi)\cdot\cos^2(t)\right)^2}}\,. \tag{20}$$

З урахуванням (19), (20) та (4), (5), (6), вирази (16) та (17) набудуть вигляду

$$\psi_{zz}(t)=-\frac{\sqrt{6}\cdot m}{3\cdot\varepsilon_{*k}}\times$$
$$\times\int\limits_0^t\frac{\xi+(2-\xi)\cdot\cos^2(t)\cdot\exp\left[\omega(\tau)\cdot\ln\left(\varepsilon_{*c}\cdot\frac{1-\omega(\tau)}{2\cdot\varepsilon_{*k}}+\varepsilon_{*k}\cdot\frac{1+\omega(\tau)}{2\cdot\varepsilon_{*p}}\right)\right]}{\cos^2(\tau)}d\tau\,, \tag{21}$$

$$\psi_{yy}(t)=\frac{\sqrt{6}\cdot m}{3\cdot\varepsilon_{*k}}\cdot\int\limits_0^t\frac{\exp\left[\omega(\tau)\cdot\ln\left(\varepsilon_{*c}\cdot\frac{1-\omega(\tau)}{2\cdot\varepsilon_{*k}}+\varepsilon_{*k}\cdot\frac{1+\omega(\tau)}{2\cdot\varepsilon_{*p}}\right)\right]}{\cos^2(\tau)}d\tau\,. \tag{22}$$

Розв’язок нелінійного рівняння (18) із урахуванням співвідношень (21) та (22), відповідно до тензорно-лінійної моделі накопичення пошкоджень (13), для аналітичного представлення залежностей між компонентами деформацій (3), майже співпадає із результатами, що випливають із скалярної моделі (10). Але для другого етапу деформування, при переформуванні заготовок вальцюванням, різниця між результатами розрахунків за цими моделями може бути суттєвою.

Слід зазначити, що тензорна модель граничних деформацій [9] є частинним випадком (18, 21, 22) для $\xi=0,5$ та конкретних числових значень $\varepsilon_{*c},\varepsilon_{*k},\varepsilon_{*p}$.

Висновки

1. Запропоновано методику визначення НДС на вільній поверхні заготовки при вальцюванні. 2. Побудовано скалярну та тензорну моделі граничного стану матеріалу вільної поверхні заготовки при вальцюванні, що надає можливість оцінити рівень накопичених пошкоджень як для операцій формування заготовок вальцюванням, так і для наступних операцій, якщо такі передбачено технологічним процесом виготовлення виробів. 3. Отримані аналітичні моделі граничного стану є узагальненням відомих аналітичних моделей для точок вільної поверхні заготовки. 4. Отримані результати мають як самостійне значення для аналізу якості поверхневого шару в областях вільної поверхні заготовки під час вальцювання, так і для налаштування моделювання пластичного деформування всієї заготовки методом скінченних елементів за допомогою існуючих комплексів.

Анотація. *Запропоновано методику визначення напружено-деформованого стану на вільній поверхні заготовки при вальцюванні. В основу методики покладено експериментально-аналітичний метод, що передбачає відновлення за експериментальними даними аналітичної залежності між компонентами логарифмічних деформацій. Побудовано узагальнені скалярну і тензорну моделі граничного стану матеріалу вільної поверхні заготовки при вальцюванні, що надає можливість оцінити рівень накопичених пошкоджень як для операцій формування заготовок вальцюванням, так і для подальших операцій.*

Ключові слова: напружено-деформований стан, вільна поверхня, показник напруженого стану, гранична деформація, накопичені пошкодження, скалярна модель, тензорна модель, вальцювання.

Abstract. *Object of research are the processes of formation by rolling. Subject of research is the stress-strain state of the free surface of the workpiece material in the process of rolling. The purpose of this paper is to construct models of limit strains for points of the free surface of the workpiece in the process of rolling. Method for determination of stress-strain state at the free surface of the workpiece during forge-rolling was developed. Stress-strain state of the material is determined using experimental and analytical method. This method is based on the construction of an analytical relationship between the logarithmic strain components by of the experimental data. Scalar and tensor models of the limiting state material of the free surface of the workpiece during forge-rolling are developed. The analytical models of the limit state are a generalization of known analytical models for the points of the free surface of the workpiece. These results represent an independent value for the analysis of the quality of the surface layer in the areas*

of free surface of the workpiece during rolling. It is also important for to set up simulation of plastic deformation of the entire workpiece by finite element method.
Keywords: stress-strain state, free surface, stress state parameter, ultimate strain, accumulated damage, the scalar model, the tensor model, rolling.

1. *Скрябин С.А.* Определение возможности появления дефектов при штамповке поковок с применением процесса вальцовки подготовительных ручьев /С.А.Скрябин, И.В.Гунько, Д.С.Чайка, И.А.Бубновская /Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. — Краматорск: ДГМА. — 2010. — №3(24). — С. 76—81.
2. *Огородников В.А.*Оценка деформируемости металлов при обработке давлением — К. : Выща шк., 1983. — 200 с.
3. *Матвийчук В.А.*Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография/В.А.Матвийчук, И.С.Алиев.-Краматорск: ДГМА, 2009.-268 с. ISBN 978-966-379-317-7.
4. *Михалевич В.М.* Тензорні моделі накопичення пошкоджень.-Вінниця:УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998.-195 с.-ISBN 966-7199-20-7.
5. *Добранюк Ю.В.* Моделювання за допомогою програмного комплексу DEFORM 3D напружено-деформованого стану на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення /Добранюк Ю. В., Алієва Л. І., Михалевич В.М. //Обработка металлов давлением: сборник научных трудов.—Краматорск: ДГМА.—2010.—№4(25). — С. 3—10.
6. *Михалевич В.М.* Моделирование предельных деформаций на свободной поверхности при осесимметричной осадке / Михалевич В.М., Краевський В. А., Добранюк Ю.В. // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: мат. международ. науч.-техн. конф. — Балт. гос. техн. ун-т., СПб. — 2009. — С. 108—112. — ISBN 978-5-85546-474-0.
7. *Михалевич В.М.* Моделирование пластического деформирования цилиндрического образца при торцевом сжатии / Михалевич В.М., Лебедев А. А., Добранюк Ю.В. // Пробл. прочности. — 2011. — № 6. — С. 5—22.
8. *Михалевич В.М.* Аппроксимация кривых предельной деформации сплайн-функциями/В.М. Михалевич, Л. И. Алиева // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. — Краматорск : ДГМА. — 2010. — №3(24). — С. 3—10.
9. *Dependence* of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression /[Mikhalevich V. M., Dobranuk Y.V., Kraevsky V.A., Mikhalevich O.V.] / Bulet. Inst. Politehnic Din Iasi. — Iasi. — 2008. — Tomul LIV(LVIII), Fasc. 3—4. — pp. 49—53.
10. *Скрябин С. А.* Исследование неравномерности деформации и распределения температурного поля в очаге деформации с учетом развития деформации во времени /Скрябин С.А., Гунько И.В., Бубновская И. А.// Технологические системы: научно-технический журнал.–Киев: Технологические системы.-2011. - №1(54).– С. 50-53.

REFERENCES

1. *Skriabin S.A*., Gunko I.V., Chajka D.S., Bubnovska I.A. Opredelenie vozmozhnosti pojavlenija defektov pri shtampovke pokovok s primeneniem processa valcovki podgotovitel'nyh ruch'ev. Obrabotka materialov davleniem (Determining the possibility of defects at stamping forgings with rolling preparatoryprocess streams. Materials working by pressure). Kramatorsk, 2010, no. 3(24), pp. 76—81.
2. *Ogorodnikov V.A*. Ocenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem (Evaluation of deformability of metals under pressure treatment). Kyiv: Vywa shkola, 1983. 200 p.
3. *Matvijchuk V.A.,* Aliev I.S. Sovershenstvovanie processov lokal'noj rotacionnoj obrabotki davleniem na osnove analiza deformiruemosti metallov (Improving the processes of local rotary forming based on an analysis of deformability of metals: a monograph). Kramatorsk, 2009. 268 p.
4. *Mykhalevych V.M*. Tenzorni modeli nakopichennja poshkodzhen (Tensor model of accumulation of damages). Vinnitsa, 1998. 195 p.
5. *Dobranjuk Ju.V*., Alieva L.I., Mykhalevych V.M. Modeljuvannja za dopomogoju programnogo kompleksu DEFORM 3D napruzheno-deformovanogo stanu na bichnij poverhni cilindrichnogo zrazka pid chas torcevogo stisnennja. Obrabotka metallov davleniem (Simulation stress-strain state on the side of a cylindrical specimen during mechanical compression using the software package DEFORM 3D), Kramatorsk, 2010, no. 4(25), pp. 3—10.
6. *Mihalevich V.M*., Kraevskij V.A., Dobranjuk Ju.V. Modelirovanie predelnyh deformacij na svobodnoj poverhnosti pri osesimmetrichnoj osadke. Progressivnye metody i tehnologicheskoe osnawenie processov obrabotki metallov davleniem (Simulation of marginal deformations on the free surface for the axisymmetric upsetting. Advanced techniques and technological equipment of metal forming: Math. International. scientific and engineering. conf.). St. Petersburg, 2009, pp.108-112.
7. *Mihalevich V.M*., Lebedev A. A., Dobranjuk Ju.V. Modelirovanie plasticheskogo deformirovanija cilindricheskogo obrazca pri torcevom szhatii. Probl. Prochnosti (Modeling the plastic deformation of the cylindrical sample at face-end compression. Problems of strength), 2011, no. 6, pp. 5—22.
8. *Mihalevich V. M*., Alieva L. I. Approksimacija krivyh predel'noj deformacii splajn-funkcijami. Obrabotka metallov davlenie (Approximation curves of marginal deformation of spline functions. Materials working by pressure), Kramatorsk, 2010, no. 3(24), pp. 3—10.
9. *Mikhalevich V.M*., Dobranuk Y.V., Kraevsky V.A., Mikhalevich O.V. Dependence of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression. Bulet. Inst. Politehnic Din Iasi., Iasi, 2008, Tomul LIV(LVIII), Fasc.3-4, pp.49-53.
10. *Skriabin S. A.,* Gun'ko I. V., Bubnovska I. A. Issledovanie neravnomernosti deformacii i raspredelenija temperaturnogo polja v ochage deformacii s uchetom razvitija deformacii vo vremeni. Tehnologicheskie sistemy: nauchno-tehnicheskij zhurnal (The study of deformation and the distribution of temperature field in the deformation with the development of strain in time. Technological Systems: Scientific and Technical Journal). Kyiv, 2011, no.1(54), pp. 50-53.