

**II. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛОБРОБКА****Деревенько І.А.**

к.т.н., старший викладач

**Вінницький  
національний аграрний  
університет****Derevenko I.****Vinnitsia National  
Agrarian University****УДК 621-01****СПОСІБ МОДЕЛЮВАННЯ  
ПРОЦЕСІВ КОМБІНОВАНОГО  
ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ  
МЕТАЛІВ**

Розроблено спосіб моделювання для оцінки граничної формозміни заготовок деталей, що деформуються способом комбінованого холодного видавлювання, без порушення їхньої цілісності. Запропонований спосіб моделювання враховує фактори, які впливають на пластичність металів. На основі гіпотези про кінематичну подібність і подібність шляхів деформування, пропонується формула за допомогою якої можна розраховувати гранично-допустиме обтиснення для матеріалів, діаграма пластичності яких відома.

Розраховано ресурс пластичності з урахуванням і без урахування третього інваріанта тензора напружень. Показано, що при побудові діаграм пластичності необхідно враховувати вплив третього інваріанта тензора напружень на пластичність.

**Ключові слова:** ресурс пластичності, моделювання, холодна формозміна, напружено-деформований стан, шляхи деформування частинок матеріалу.

**Постановка проблеми.** Виготовлення високоякісних деталей з найбільшою продуктивністю, з найбільшим коефіцієнтом використання металу та найменшими затратами праці є основним завданням металообробного виробництва.

Успішне вирішення поставленого завдання можливе на основі впровадження прогресивних технологічних процесів обробки металів тиском, до яких відноситься і комбіноване холодне видавлювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процеси комбінованого видавлювання є складними за технологічними параметрами, що викликає необхідність проведення комплексних досліджень причин дефектоутворення та їх усунення [1, 2].

У зв'язку із застосуванням матеріалів зі складною реологією і зростанням вимог до якості штампованих заготовок виникає необхідність в розробці раціональних параметрів процесів холодного видавлювання, які забезпечать сприятливу технологічну спадковість і будуть запобігати браку від руйнування металу [3].

**Формулювання мети досліджень.** Метою роботи є розробка способу моделювання процесів комбінованого холодного видавлювання, за допомогою якого можливе отримання інженерних формул для

оцінки граничної формозміни без порушення цілісності заготовок, що деформуються.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо вісесиметричну задачу видавлювання заготовок і оцінимо напружено-деформований стан в осередку деформації з точки зору подальшого залучення критеріїв деформованості, які враховують вплив історії деформування на накопичення пошкоджень в процесі формозміни.

Напружений стан визначали за допомогою співвідношень теорії течії із залученням кінематики (ліній струму)

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

Гідростатичний тиск знаходимо інтегруванням інтегрального і диференціального рівнянь рівноваги

$$\frac{d\sigma}{dx_j} \delta_{ij} + \frac{d}{dx_j} \left[ \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} \left( \frac{dv_i}{dx_j} + \frac{dv_j}{dx_i} \right) \right] \quad (2)$$

Компоненти тензора напружень в циліндричній системі координат  $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z, \tau_{rz}$  дозволяють розрахувати показник напруженого стану  $\eta$ , який дорівнює відношенню гідростатичного тиску до інтенсивності напружень. Інтегруванням інтенсивності швидкостей деформації уздовж ліній струму



можна отримати накопичену інтенсивність деформацій  $\bar{e}_u$ . У результаті отриману інформацію про зміну показника  $\eta$  і ступеню деформації  $\bar{e}_u$  можна показати у вигляді шляхів деформування.

Скористаємося експериментально-розрахунковими даними роботи [3], в якій наведено результати розрахунку компонент тензора напружень  $\sigma_{ij}$ , показника напруженого стану  $\eta$  і накопиченої інтенсивності деформацій  $\bar{e}_u$  в процесі вісесиметричного видавлювання міді, латуні ЛС62, латуні ЛС59-1, дюралюмінію Д16 через матриці с кутами розходження  $2\gamma=180^\circ, 120^\circ, 90^\circ, 60^\circ$  і матриць сигмоїдального профілю. Випуклий профіль матриці (II) – розрахований за рівнянням

$$D_x = D_k \left[ 1 + \left( \frac{D_k}{D_0} - 1 \right) \frac{x}{x_k} \right]^{-0.5} \quad (3)$$

Увігнутий профіль матриці (III) – [4] розрахований за рівнянням:

$$R_x = R_0 \exp\left(\frac{-0,33x}{a}\right), \quad (4)$$

де  $R_x, R_0, a$  показані на рис. 1.

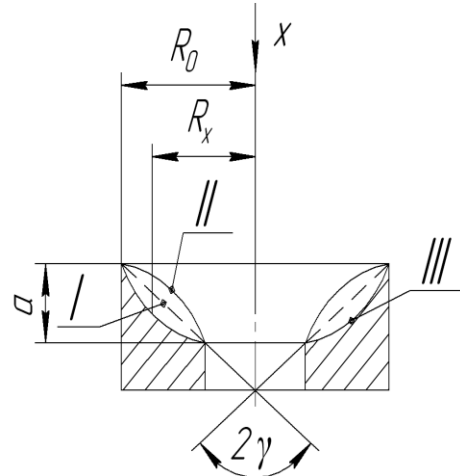


Рис. 1. Матриця

Побудовані шляхи деформування частинок матеріалу, що належать осі симетрії заготовок, що видавлювались з міді через матриці різної геометрії. На рис. 2 показані шляхи деформування частинок матеріалу, що належать осі симетрії видавлюваної заготовки в координатах  $e_u = e_u(\eta)$ . Там же наведені діаграми пластичності латуней ЛС 59-1, ЛС62, дюралюмінію Д16, побудовані з урахуванням і без урахування третього інваріанта тензора напружень.

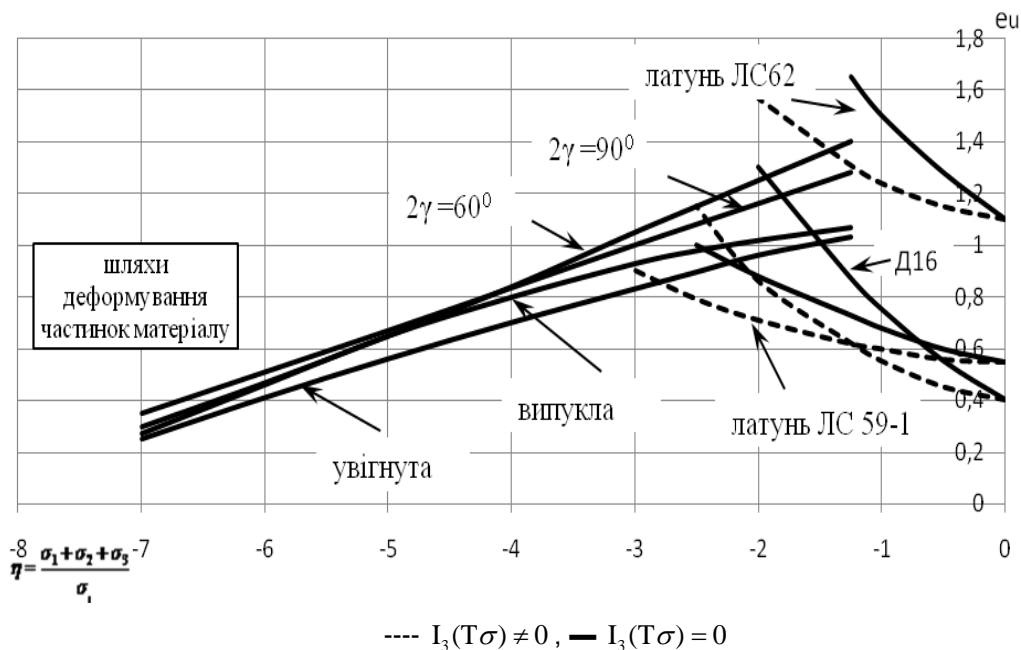


Рис. 2. Шляхи деформування частинок матеріалу заготовки з модельного матеріалу (міді) уздовж осі симетрії матриць різної геометрії в координатах  $e_u = e_u(\eta)$

Це дозволило розрахувати ресурс пластичності з урахуванням і без урахування третього інваріанта тензора напружень. На рис. 3 представлені результати розрахунку.

Як впливає з отриманих результатів розбіжність величини ресурсу пластичності підрахованого з урахуванням і без урахування

третього інваріанта тензора напружень знаходиться в межах від 14 до 40% і залежить від властивостей матеріалу і геометрії матриці. Отже, при побудові діаграм пластичності необхідно враховувати вплив третього інваріанта тензора напружень на пластичність.

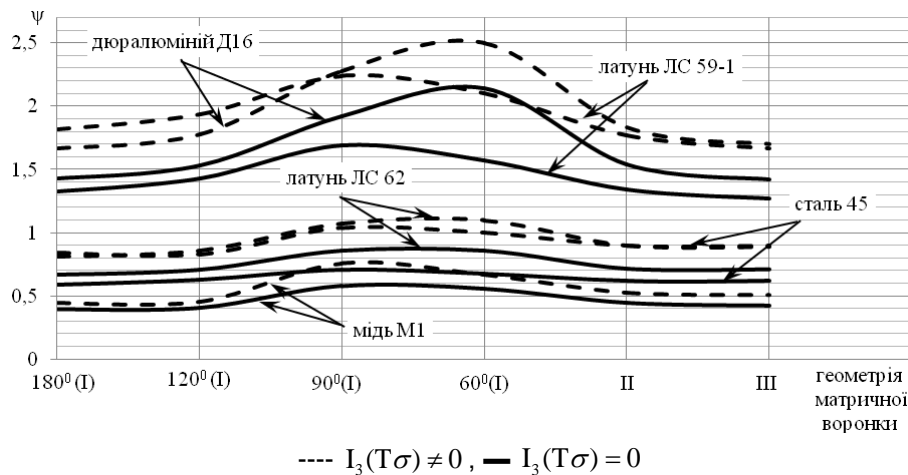


Рис. 3. Ресурс пластичності, розрахований для матриць різної геометрії при вісесиметричному видавлюванні заготовок з кольорових металів

З метою отримання інженерної формули, що дозволяє розрахувати калібруючий діаметр матриці, пропонується наступний алгоритм.

Ресурс пластичності можна розрахувати за допомогою критерію, в якому на відміну від критерію Г.А. Смирнова-Аляєва коефіцієнт  $\omega$  враховує історію деформування

$$\psi = \frac{e_u(\delta, \gamma, \mu)}{e_p(\eta_k)\omega} \leq 1. \quad (5)$$

Коефіцієнт  $\omega$  у критерії (5) розрахований за допомогою критерію [3], який враховує вплив історії деформування і вплив третього інваріанта тензора напружень на пластичність. Величина коефіцієнта  $\omega$  залежить від геометрії матриць і змінюється від  $\omega=1,27$  до  $\omega=1$  (див. рис. 4).

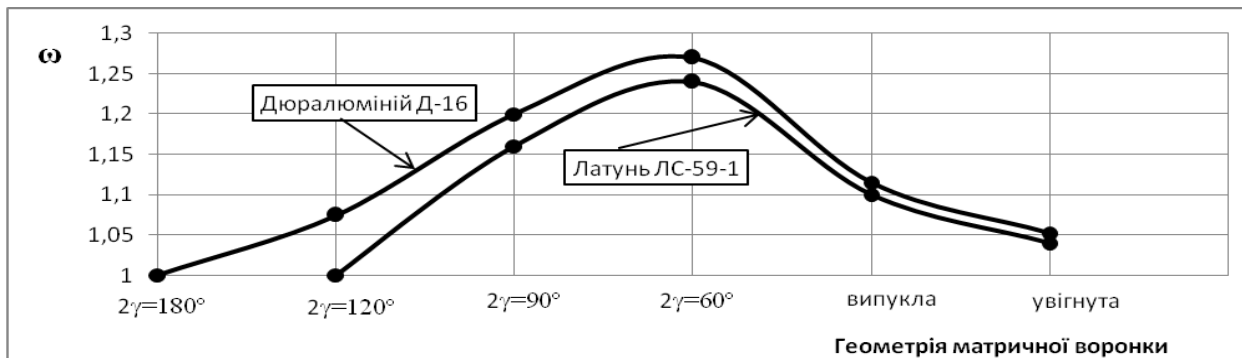


Рис. 4. Залежність коефіцієнта, що враховує вплив історії деформування  $\omega$  від геометрії матричної воронки для деяких матеріалів

У критерії (5)  $\delta$  – обтиснення,  $\gamma$  – кут розходження матриці,  $\mu$  – коефіцієнт тертя,  $\eta_k$  – показник напруженого стану в небезпечній

області заготовки. Показник напруженого стану  $\eta_k$  залежить від геометрії матриць і представлений на рис. 5.

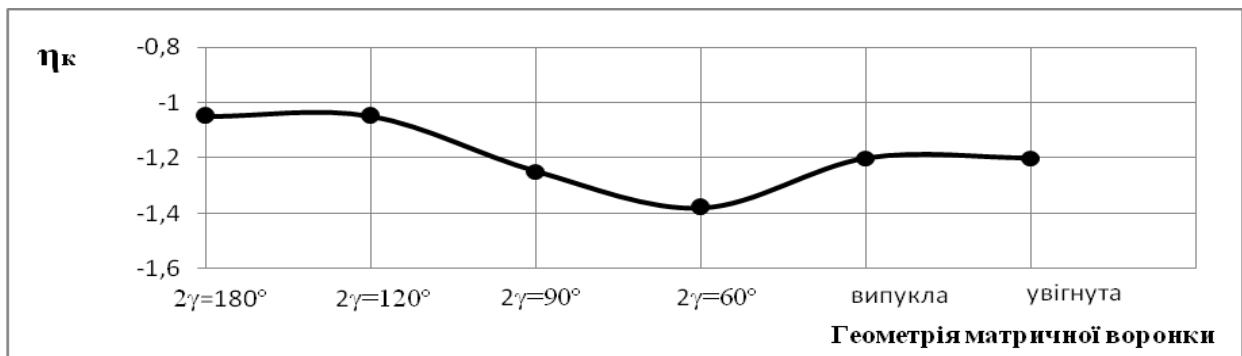


Рис.5. Залежність показника  $\eta_k$  від геометрії матричної воронки



У критерії (5)  $e_p(\eta_k)$  апроксимуємо за допомогою формули [3]:

$$e_p(\eta_k) = e_p(\eta = 0) \exp(-\lambda \eta), \quad (6)$$

$$\psi = \frac{2 \ln \frac{D}{d} m}{e_p(\eta_k) = e_p(\eta = 0) \exp(-\lambda \eta) \omega} \leq 1, \quad (7)$$

де

$$\lambda = \ln \frac{e_p(\eta = -1)}{e_p(\eta = 0)}$$

З формули (7) випливає рівність, за допомогою якої можна розрахувати калібруючий діаметр матриці

$$d \geq \frac{D}{\exp[e_p(\eta = 0) \exp(-\lambda \eta_k)]} \frac{\omega}{2m}. \quad (8)$$

У формулі (8)  $m$  – коефіцієнт нерівномірності накопиченої інтенсивності деформацій залежить від геометрії матричної воронки (рис. 6).

Зауважимо, що на основі гіпотези про кінематичну подібність і подібність шляхів деформування, формула (8) дозволяє розрахувати гранично допустиме обтиснення для матеріалів, діаграма пластичності яких відома.

У ряді робіт [3, 5-6] показано, що при відповідному виборі граничних умов і при інших рівних умовах (обтиснення, геометрія інструменту, число переходів і ін.) деформований стан виявляється близьким навіть для тіл, що відносяться до різного реологічного класу.

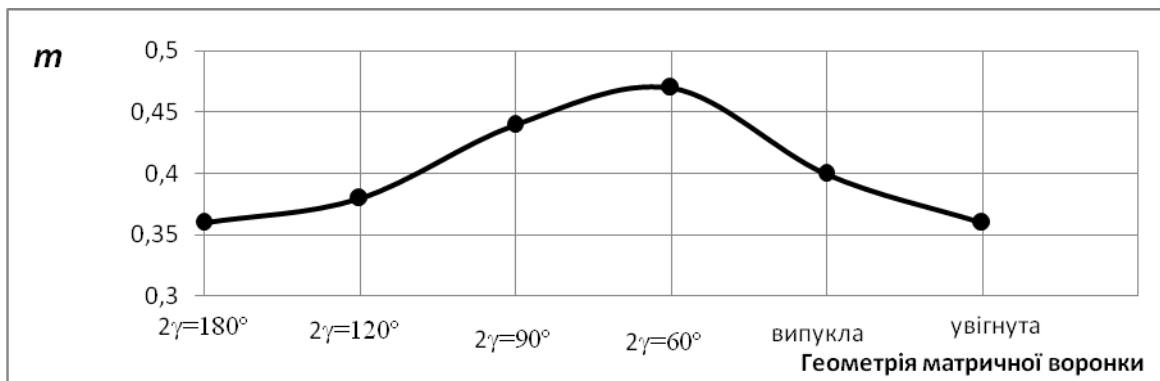


Рис. 6. Залежність коефіцієнта нерівномірності накопиченої інтенсивності деформацій  $m$  від геометрії матричної воронки

Будемо вважати отримані шляхи деформування, представлені на рис. 2 незалежними від властивостей матеріалів (гіпотеза про кінематичну подібність і подібність шляхів деформування) [7]. Для умов одноісного розтягу, стиску, кручення, а так само для будь-яких простих видів навантаження гіпотеза про подібність шляхів деформування виконується точно. У поєднанні з гіпотезою про кінематичну подібність полів інтенсивності деформацій (гіпотезу про

ідентичність деформованого стану модельного і натурального зразків будемо називати гіпотезою про кінематичну подібність) вона призводить до твердження про подібність показника  $\eta$ , що можна використовувати як додаткову інтегральну умову, необхідну при визначенні напруженого стану натурального зразка. Розрахунок ресурсу пластичності з урахуванням історії деформування за критерієм деформуемості [3]

$$\psi = \int_0^{e_u^*} \left( 1 + 0,2 \arctg \frac{d\eta}{de_u} \frac{d\chi}{de_u} \right) \frac{[e_u(\eta, \chi)]^{0,2 \arctg \frac{d\eta}{de_u}}}{[e_p(\eta, \chi)]^{1+0,2 \arctg \frac{d\eta}{de_u}}} \leq 1 \quad (9)$$

показав, що при видавлюванні міді  $\psi = 0,76$ , а при видавлюванні латуні ЛС 59-1  $\psi = 2,28$ , отже вона повинна зруйнуватися, що і підтвердилось при експериментальній перевірці (див. рис.3).

**Висновки.** Розроблено методику вибору раціональних параметрів операцій штампування на основі оцінки деформованості заготовок. Так в сталіх процесах вісесиметричного видавлювання отримана

інженерна формула, за допомогою якої оцінюється гранично-допустиме обтиснення при прямому вісесиметричному видавлюванні для матеріалів різної реології. Пропонується метод моделювання процесів комбінованого холодного видавлювання металів, що дозволяє оцінювати напружено-деформований стан і розраховувати використаний ресурс пластичності на модельних і натурних заготовках.

**Список використаних джерел**

1. Алиева Л.И. Совершенствование процессов холодного выдавливания осесимметричных деталей с фланцем: Дис. канд. техн. наук: 05.03.05 /Алиева Лейла Ибрагимовна. – Краматорск: ДГМА, 2006. – 298 с.

2. Алиев И.С. Оценка технологической деформируемости при холодном выдавливании втулок с фланцем / И.С. Алиев, Л.И. Алиева, С.В. Мартынов, Н.Ю. Ткаченко // Научный вестник ДГМА., – 2010. – №1(6Е). – С. 9-14.

3. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением: монография / В. А.Огородников. – Київ: Вища школа, 1983. – 176 с.

4. Деревенько И.А. Деформируемость и качество заготовок в условиях комбинированного формоизменения. / И.А. Деревенько// Обработка металлов давлением. Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА. – 2012. – №3(32). – С. 87-96.

5. Огородников В.А., Выдавливание инструментальных сталей / В.А. Огородников, В.А. Рвачев, О.Л. Гайдамак// Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – №8. – С. 8-11.

6. Теорияковки и штамповки: Учеб. пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов. Под общ. ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с.

7. Огородников В.А. Моделирование процессов обработки давлением на основе гипотезы о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования / В.А. Огородников, А.В. Грушко, И.А. Деревенько // Обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА. – 2012. – №4(34). – С. 46-52.

**Список джерел в транслітерації**

1. Alieva, L.I. (2006). Sovershenstvovanie processov holodnogo vydavlivaniya osesimmetrichnyh detalej s flancem [Improvement of the processes of cold extrusion of axisymmetric parts with a flange]. *Candidate's thesis*. Kramatorsk: DGMA [in Ukrainian].

2. Aliev, I.S., & Alieva, L.I., & Martynov, S.V., & Tkachenko, N.Yu. (2010). Otsenka tehnologicheskoy deformiruemosti pri holodnom vyidavlivanii vtulok s flants'em [Evaluation of technological deformability at cold extrusion of bushings with a flange] *Nauchnyy vestnik DGMA - Scientific Herald DSEA*, 1(6E),

9-4. [in Ukrainian].

3. Ogorodnikov, V. A. (1983). *Otsenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem [Evaluation of the deformability of metals during pressure treatment]*. Kiev: Vyischa shkola [in Ukrainian].

4. Derevenko I.A. (2012) Deformiruemost i kachestvo zagotovok v usloviyah kombinirovannogo formoizmeneniya [Deformability and quality of blanks in conditions of combined shaping]. *Obrabotka metallov davleniem. Sbornik nauchnykh trudov – Metal forming. Collection of scientific papers*, 3(32), 87-96 [in Ukrainian].

5. Ogorodnikov, V.A., & Rvachev, V.A., & Gaydamak, O.L. (1987). *Vyidavlivanie instrumentalnykh staley [Extrusion of tool steels]. Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo - Forging and stamping production*, 8, 8-11 [in Russian].

6. Unksov, E.P., & Ovchinnikov, A.G. (Ed.). (1992). *Teoriya kovki i shtampovki [Theory of forging and stamping]*. Moskov.: Mashinostroenie [in Russian].

7. Ogorodnikov, V.A., & Grushko, A.V., & Derevenko, I.A. (2012). Modelirovanie processov obrabotki davleniem na osnove gipotezy o silovom i kinematicheskom podobii parametrov deformirovaniya [Modeling of the processes of pressure treatment on the basis of the hypothesis of the force and kinematic similarity of deformation parameters]. *Obrabotka metallov davleniem: Sb. nauchn. tr. - Metal forming. Collection of scientific papers*, 4(34), 46-52. [in Ukrainian].

**СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
КОМБИНИРОВАННОГО ХОЛОДНОГО  
ВЫДАВЛИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ**

*Разработан способ моделирования для оценки предельного формоизменения заготовок деталей, деформируемых способом комбинированного холодного выдавливания, без нарушения их целостности. Предложенный способ моделирования учитывает факторы, влияющие на пластичность металлов. На основе гипотезы о кинематическом подобии и подобии путей деформирования, предлагается формула, с помощью которой можно рассчитывать предельно допустимое обжатие для материалов, диаграмма пластичности которых известна. Рассчитан ресурс пластичности с учетом и без учета третьего инварианта тензора напряжений. Показано, что при построении диаграмм пластичности необходимо учитывать влияние третьего инварианта тензора напряжений на пластичность.*

**Ключевые слова:** ресурс пластичности, моделирование, холодное формоизменение,



*напряженно-деформированное состояние, пути деформирования частиц материала.*

#### **METHOD MODELING OF COMBINED COLD METAL EXTRACTION PROCESSES**

*A modeling method is developed for estimating the limiting form-modification of the workpieces of the parts deformed by the method of combined cold extrusion without disturbing their integrity. The proposed modeling method takes into account the factors influencing the plasticity of metals. Based on the hypothesis of kinematic*

*similarity and similarity of paths of deformation, we propose a formula by which one can calculate the maximum permissible contractions for materials, whose diagram of plasticity is known. The resource of plasticity is calculated taking into account and without taking into account the third invariant of the stress tensor. It is shown that when constructing plasticity diagrams, it is necessary to take into account the influence of the third invariant of the stress tensor on plasticity.*

**Keywords:** *resource of plasticity, modeling, cold form modification, strain-strain state, paths of deformation of material particles.*

#### **Відомості про автора**

**Деревенько Ірина Анатоліївна** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри загально технічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: i.a.derevenko@gmail.com).

**Деревенько Ирина Анатольевна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: i.a.derevenko@gmail.com).

**Derevenko Iryna** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection, Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyschaya St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: i.a.derevenko@gmail.com).