

УДК 621.762

О.В.Заболотний, В.А.Сичук, О.В.Гордіян
Луцький національний технічний університет

РОЗВИТОК МОДЕЛІ ПЛАСТИЧНОСТІ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ПОРОШКОВИХ СЕРЕДОВИЩ З ЧАСТИНКАМИ СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ

В даній статті наводяться результати теоретичних та експериментальних досліджень по уточненню моделі пластичності ущільнювального порошкового середовища з частинками сферичної форми, яка базується на умові текучості з поверхнею навантаження у вигляді центрального еліпсоїда. Запропонована умова пластичності дозволяє з достатньою точністю встановити зв'язок компонент тензора напружень з густиною, механічними і структурними характеристиками пресовки, що дасть змогу керувати властивостями порошкових проникних матеріалів і забезпечує більш високий рівень достовірності розрахунків енергосилових параметрів сухого радіально-ізостатичного пресування (СР-ІІІ)

Однією з важливих задач механіки матеріалів різноманітної природи і структури є формулювання критерію, який встановлює зв'язок між силовими та структурними параметрами при деформуванні матеріалів. Для пластичних матеріалів такий критерій відображає умову виникнення пластичної течії. Аналіз існуючих типів поверхонь навантаження показує, що поверхні текучості у вигляді еліпсоїда обертання розширюють уявлення про механізм деформаційної поведінки пористих середовищ [1]. Слід також відмітити, що поверхні навантаження у вигляді еліпсоїдів мають тісний зв'язок із енергетичними концепціями, що лежать в основі встановлення областей граничних станів [2, 3]. Ці моделі в більшій чи меншій мірі адекватно описують поведінку пористих матеріалів при їх складному навантаженні. Вони враховують, хоча і не завжди у повній мірі мікромеханічні характеристики матеріалу та макромеханіку процесу деформування.

Для розуміння процесів, що супроводжують консолідацію порошків при різних схемах навантаження, застосування моделей такого плану це позитивний факт. З другого боку, велика кількість параметрів, що входять до цих критеріїв, обмежує в деякій мірі їх практичне застосування. Як альтернативний підхід в таких випадках, можливо використовувати малопараметричні моделі [4]. Використання малопараметричних критеріїв текучості доцільно при чисельному аналізі різних схем пресування або при описі конкретної технологічної схеми формування.

Отже очевидно, що реальна модель пластичності порошкових матеріалів (ПМ) має бути багатопараметричною і повинна враховувати особливості порошкового середовища, що ущільнюється. Тому, на нашу думку, перспективним напрямком є розробка континуальних моделей, що враховують структурну будову пористого тіла.

Існуючі моделі пластичності, які базуються на гіпотезі про те, що умови пластичності описуються еліпсоїдальною поверхнею навантаження, звичайно пов'язані з припущенням, що механічна реакція матеріалу визначається тільки одним параметром – пористістю. В тому випадку, коли мова йде про пористий спечений матеріал, відомо, що два фактори вносять вклад в опір його деформуванню.

Перший – структурний (геометричний) фактор визначає пряму залежність від пористості (саме завдяки йому і з'являється логарифм в рівняннях типу К.А.Конопицького-С.Торре, Р.Дж.Гріна та ін.).

Другий фактор визначається тим вкладом який вносить деформація твердої фази. В пористому матеріалі, на відміну від сипкого, матриця є зв'язаною і в ній відбувається пластична деформація. Міра цієї деформації і визначає другу складову опору пористого матеріалу. У випадку порошкового матеріалу матриця не існує, що не дозволяє використати другий параметр для його характеристики. Між тим, завдяки злому частинок при пресуванні, їх взаємному проковзуванню, в порошковому середовищі теж спостерігається дисипація енергії, яка тим не менше не може бути описана таким же чином як у випадку наявності пластичної матриці. Для того, щоб це врахувати ми пропонуємо використати припущення про те, що даний фактор виражається у вигляді степеневі залежності від густини:

$$\sigma_T = \sigma_{T_0} \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^k,$$

де σ_{T_0} і σ_T , – границі текучості порошкового матеріалу до і в процесі пресування, відповідно; ν і ν_0 – поточна і початкова відносна густина пресовки відповідно; k – показник зміцнення, що залежить від властивостей порошкового матеріалу і схеми пресування (визначається експериментально).

Таке припущення можна вважати оправданим коли мова йде про вузький спектр траєкторій навантаження – від гідростатичного рівномірного стиску до осьового пресування в жорсткій матриці. Ця залежність отримана на основі експериментально-емпіричного підходу, що базується на проведенні променевих навантажень. Таким чином для аналітичного опису процесу пресування в діапазоні схем ущільнення від осьового пресування в жорсткій матриці без зовнішнього тертя до гідростатичного стиску, нами запропоновано уточнене рівняння пресування К.А.Конопицького-С.Торре, яке враховує властивості ПМ, його зміцнення в процесі пресування, схему навантаження і дозволяє у цілому достовірно описати деформаційну поведінку матеріалу [5]:

$$p = 2\sigma_{T_0} \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^k \ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu}, \quad (1)$$

Явний вид еліпсоїдальної поверхні навантаження визначимо за розрахунковими оцінками опорів деформуванню порошкових пресовок різної густини у вибраному діапазоні схем навантажень [5, 6]. Поверхня навантаження у вигляді центрального еліпсоїда обертання має вид [1]:

$$\frac{3p^2}{\psi^2} + \frac{2T^2}{\varphi^2} = 1, \quad (2)$$

де p – гідростатичний тиск; T – інтенсивність дотичних напружень; ψ і φ – функції механічних і структурних характеристик матеріалів, що ущільнюються.

В результаті спільного розв'язку рівняння (2), розрахункових залежностей по визначенню опорів деформуванню у вибраних схемах навантаження, з врахуванням рівняння (1) уточнено критерій текучості, що визначається залежностями:

$$\psi = 2\sqrt{3}\sigma_{T_0} \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^m \ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu}, \quad \varphi = \frac{2\sqrt{6}\sigma_{T_0} (1-\xi) \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{m+l} \ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu}}{\sqrt{9 \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{2m} - (1+2\xi)^2 \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{2l}}}, \quad (3)$$

$$p^2 \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^{2m} + \frac{T^2 \left[9 \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{2m} - (1+2\xi)^2 \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{2l} \right] \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^{2(m+l)}}{3(1-\xi)^2} = 4\sigma_{T_0}^2 \left(\ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu} \right)^2, \quad (4)$$

де ξ – коефіцієнт бічного тиску, який залежить від густини та властивостей матеріалу порошку і пресовки, тобто, у певному ступені, є носієм інформації про структурні особливості порошкового тіла (форму частинок, спосіб отримання порошку, зміцнення матеріалу і т.д.); m і l – показники зміцнення при гідростатичному і осьовому пресуванні відповідно (визначаються експериментально).

Як відомо, основними параметрами, які впливають на коефіцієнт бічного тиску ξ , є густина і вид матеріалу порошку. В меншому ступені мають вплив розміри і форма частинок, спосіб отримання порошку та ін. Для його визначення можна скористатись результатами досліджень по визначенню коефіцієнта бічного тиску ξ , що наведені у роботі [7]. Або для його визначення можна використати залежність Г.М.Ждановича, яка враховує вплив густини, пружних і міцнісних параметрів, стан контактів на коефіцієнт бічного тиску [8]:

$$\xi = \frac{\mu_p}{1-\mu_p}, \quad (5)$$

де μ_p – коефіцієнт Пуасона пресовки визначеної густини (ρ , ν). Він може бути виражений у

вигляді функції густини: $\mu_p = \mu v^a$, де a – показник, що враховує вплив пружних, міцнісних властивостей і стан контакту ($a = 1,05 \div 1,3$); μ – коефіцієнт Пуасона матеріалу частинок порошку.

Для визначення явного виду еліпсоїдальної поверхні навантаження окрім коефіцієнта бічного тиску необхідно мати розрахункові чи емпіричні залежності опорів деформуванню у вибраних схемах навантаження. Експериментальна перевірка уточненого рівняння пресування та критерію текучості проводилась за допомогою оригінального експериментального комплексу (до 1000 МПа) (рис. 1), розробленого і виготовленого у Луцькому національному технічному університеті, який дозволяє реалізувати як прості так і складні траєкторії навантаження.

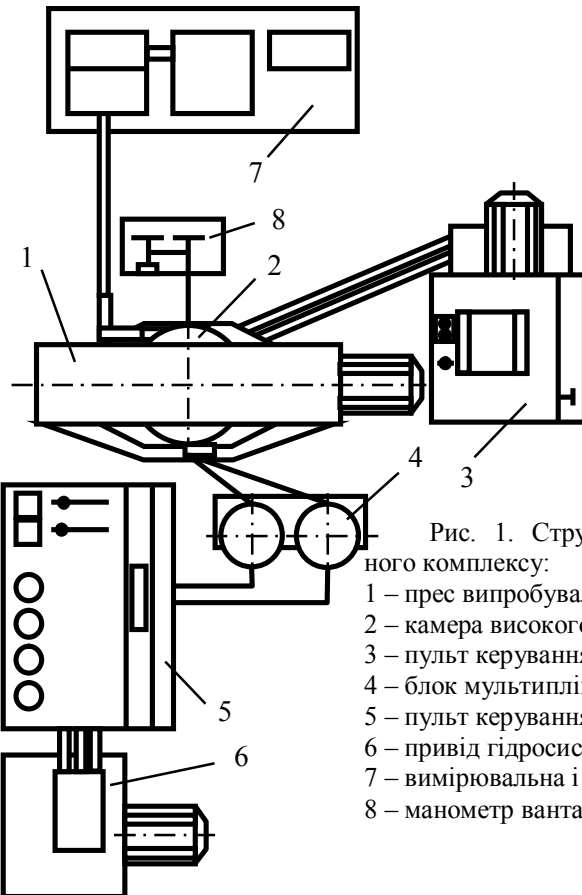


Рис. 1. Структурна схема експериментального комплексу:

- 1 – прес випробувальний мод. ПСУ 500;
- 2 – камера високого тиску;
- 3 – пульт керування пресом;
- 4 – блок мультиплікації;
- 5 – пульт керування гідросистемою;
- 6 – привід гідросистеми;
- 7 – вимірювальна і реєструюча апаратура;
- 8 – манометр вантажопоршневий

Опір гідростатичному стиску визначався за допомогою вищевказаного експериментального комплексу на базі стандартного гідравлічного пресу 1 мод. ПСУ 500 на столі нижнього плунжера якого змонтована камера високого тиску 2. Керування комплексом забезпечується пультами керування пресом 3 та гідросистемою 5. Подача робочої рідини в камеру високого тиску 2 здійснюється від блоку мультиплікації 4 за допомогою автономної гідросистеми 5 з гідроприводом 6. Контроль за параметрами процесу ведеться за допомогою вимірювальної апаратури 7. Робочою рідиною у гідросистемах є масло індустріальне марки И-20А ГОСТ 20799-75.

Опір деформуванню при осьовому пресуванні в жорсткій матриці визначався записом діаграм ущільнення на універсальній випробувальній машині 1195 ("Instron-1195", Англія). З метою зменшення зовнішнього тертя, внутрішня поверхня матриці змащувалась MoS_2 і співвідношення висоти до діаметру пресовки складало 0,3. Пікнометрична і насипна густина визначались за ГОСТ 19440-74.

На рис. 2 представлені отримані залежності функцій механічних і структурних характеристик залежно від відносної густини пресовок з порошку титану марки ПТС-1 побудованих за рівняннями (3). На рис. 3 показано вид поверхонь текучості в площині $p - T$ для пресовок титанового порошку марки ПТС-1 побудованих за рівнянням (4). Отримані залежності для визначення критерію текучості добре узгоджуються з отриманими експериментальними даними і з достатньою для практичних розрахунків точністю описують процеси деформування ПМ у вибраному діапазоні схем навантаження.

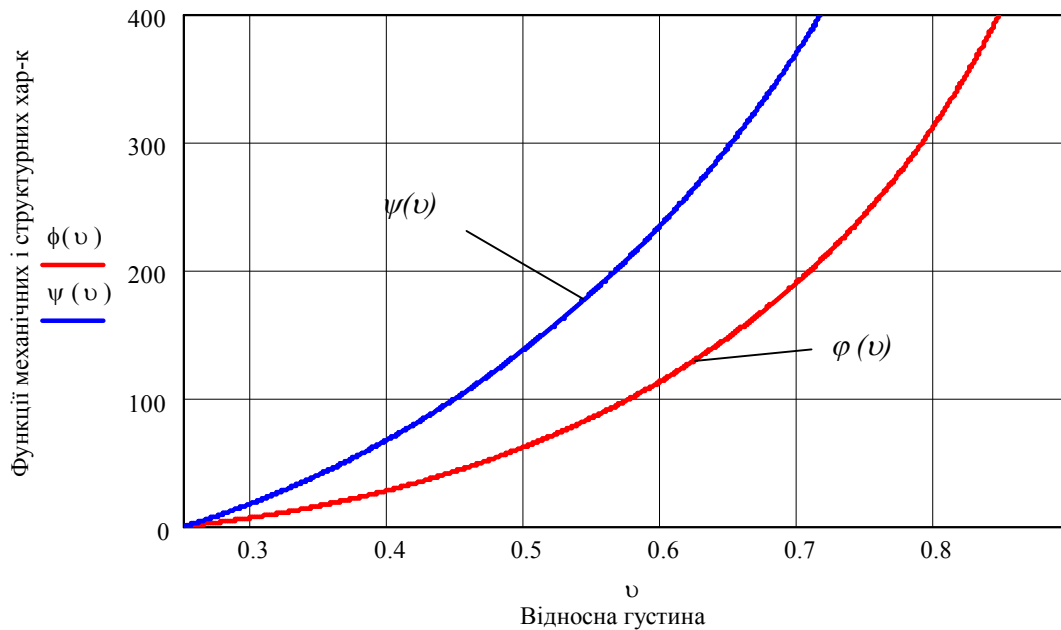


Рис. 2. Залежності функцій механічних і структурних характеристик $\psi(v)$ та $\phi(v)$ залежно від відносної густини пресовок з порошку титану марки ПТС-1 ($v_0=0,25$)

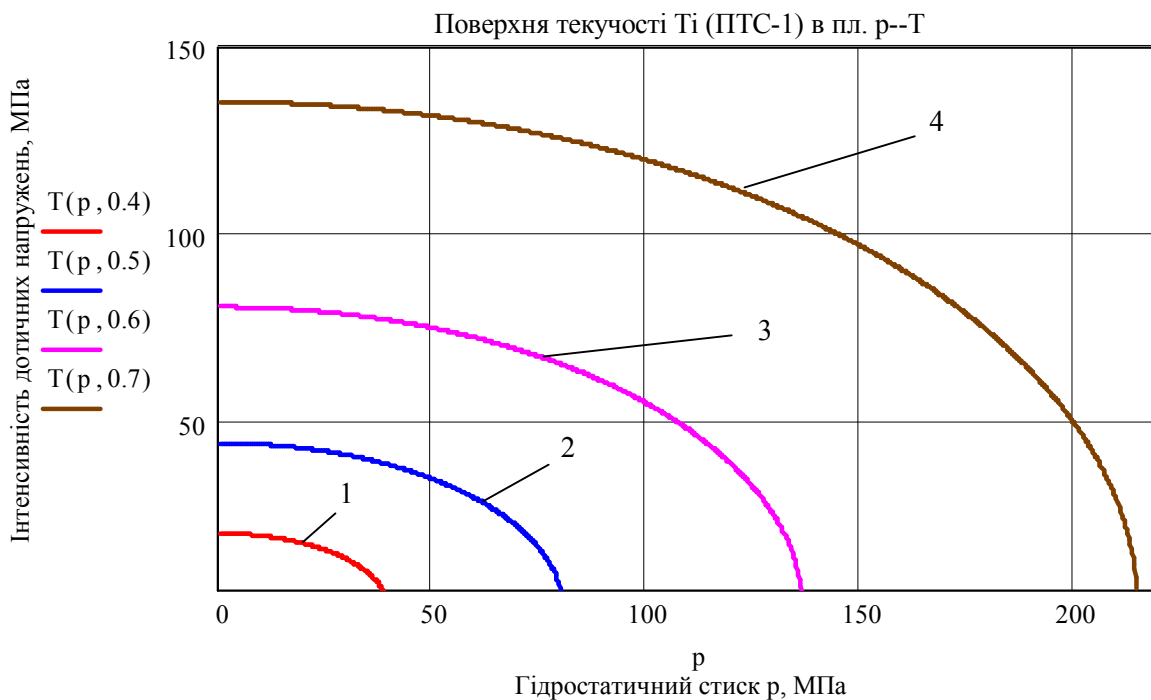


Рис. 3. Вид поверхонь текучості в площині $p - T$ для пресовок з порошку титану марки ПТС-1 ($v_0=0,25$) з кінцевою відсною густиною: 1) $v=0,4$; 2) $v=0,5$; 3) $v=0,6$; 4) $v=0,7$

Таким чином, з позицій континуальної теорії уточнена модель пластичності порошкових середовищ, яка базується на умові текучості з поверхнею навантаження у вигляді центрального еліпсоїда і відрізняється тим, що встановлює зв'язок компонент тензору напружень σ_{ij} не тільки з густиною та механічними характеристиками матеріалу, але й враховує параметри, які містять інформацію про структурні особливості порошкового тіла та зміцнення порошкового матеріалу в процесі пресування. Уточнена модель пластичності (4) є багатопараметричною і може використовуватись для розрахунку технологічних параметрів СР-ПІ [5, 6]. Дана модель пластичності розроблена з позицій континуальної теорії і може використовуватись для розрахунку основних параметрів різних схем ущільнення порошків складної форми.

Для порошків правильної форми (куля, сфера), які знаходять достатньо широке розповсюдження для отримання фільтруючих матеріалів, розроблено варіант контактної моделі пластичності, яка відрізняється тим, що вона спочатку будується як вихідна реперна із спрощеною конструкцією з наступним її ускладненням за ознаками геометричної та реологічної відповідності [7]. Геометрична модель процесу представляється ідеально пластичним тілом у вигляді ортогональної системи упаковки частинок, орієнтованої відносно напрямків навантаження, що прикладається. Ускладнення моделі по ознаці геометричної відповідності передбачає перехід від плоского деформування до об'ємного. Це викликано тим, що рівень теорії пластичності відповідає умовам плоских задач, а перехід до об'ємних практично не має аналітичних рішень. В роботі [7] проведено аналіз напружено-деформованого стану на рівні частинки, для чого залучена теорія ліній ковзання, і на її основі отримано залежності для визначення пористості (густини) при заданому напруженому стані або, навпаки, параметрів контактів і напруженого стану від необхідної густини.

Уточнимо умову пластичності ущільнювальних середовищ з частинками правильної форми використовуючи ті ж підходи для визначення функцій механічних характеристик ψ і φ , що входять в рівняння (2). В якості двох допустимих напружень можна вибрати опір деформуванню порошкових брикетів з частинками сферичної форми у двох крайніх схемах навантаження: осьове навантаження в жорсткій матриці без зовнішнього тертя і гідростатичний стиск. Скористаємося рівняннями Е.М.Макушка і О.П.Реута для визначення опорів деформуванню ППМ за вибраними схемами [7, 9]:

$$\sigma_{zc} = 3,57\bar{\sigma}_{zc}^2 \left[1 - \left(\frac{\nu - \nu_0}{1 - \nu_0} \right)^{5,45} \right]^{-0,5} K_{\sigma} K_{\delta} k, \quad (6)$$

де $\bar{\sigma}_{zc}$ – безрозмірний параметр фактичної контактної площадки при гідростатичному стиску [7], $\bar{\sigma}_{zc} = \sigma/R (0 \leq \bar{\sigma}_{zc} \leq 1)$ і R – радіус частинки; K_{δ} – коефіцієнт, що враховує перехід контактної площадки до форми з ознаками осесиметричності; K_{σ} – коефіцієнт зниження фактичних контактних напружень; k – опір пластичному зсуву;

$$K_{\delta} = \frac{0,636 \arcsin \sqrt{\bar{\sigma}_{zc}}}{\bar{\sigma}_{zc}}, \quad K_{\sigma} = \frac{0,636 \arcsin \sqrt{1,362\Delta\nu - 0,362}}{1,362\Delta\nu - 0,362}, \quad \Delta\nu = \frac{\nu - \nu_0}{1 - \nu_0};$$

$$\sigma_{oc} = 3,57\bar{\sigma}_{oc}^2 \left[1 - \left(\frac{\nu - \nu_0}{1 - \nu_0} \right)^{5,45} \right]^{-0,5} K_{\sigma} K_{\delta} k, \quad (7)$$

де $\bar{\sigma}_{oc}$ – безрозмірний параметр фактичної контактної площадки при осьовому пресуванні ППМ, $\bar{\sigma}_{oc} = \sigma/R (0 \leq \bar{\sigma}_{oc} \leq 1)$.

Тоді для функцій механічних характеристик ψ і φ умови пластичності (2) запишемо:

$$\psi = \sqrt{3}\sigma_{zc} = 3,57\sqrt{3}\bar{\sigma}_{zc}^2 \left[1 - \left(\frac{\nu - \nu_0}{1 - \nu_0} \right)^{5,45} \right]^{-0,5} K_{\sigma} K_{\delta} k, \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{\sqrt{6}(1-\xi)\sigma_{oc}\sigma_{zc}}{\sqrt{9\sigma_{zc}^2 - (1-2\xi)^2\sigma_{oc}^2}} = \frac{8,74\bar{\sigma}_{zc}^2\bar{\sigma}_{oc}^2 K_{\sigma} K_{\delta} k}{\sqrt{9\bar{\sigma}_{zc}^2 - (1+2\xi)^2\bar{\sigma}_{oc}^2}}, \quad (9)$$

де [7]

$$\bar{\sigma}_{zc} = \frac{1 - \sqrt[3]{1 - \nu + \nu_0}}{0,194}, \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_{oc} = \frac{\nu - \nu_0}{0,477}. \quad (11)$$

Тоді умова пластичності (2) з позиції контактної теорії набуде вигляду:

$$\frac{p^2 \left[1 - \left(\frac{\nu - \nu_0}{1 - \nu_0} \right)^{5,45} \right]}{12,7 \bar{b}_{zc}^4} + \frac{T^2 \left[9 \bar{b}_{zc}^2 - (1 + 2\xi)^2 \bar{b}_{oc}^2 \right]}{4,37 \bar{b}_{zc}^4 \bar{b}_{oc}^4} = K_\sigma K_\delta k. \quad (12)$$

Отже, з позицій контактної теорії уточнено умову пластичності ущільнювальних порошкових середовищ з частинками сферичної форми. Рівняння (12) встановлює зв'язок компонент тензору напружень з вихідною і поточною густинами, механічними і структурними характеристиками пресовки. Уточнена модель пластичності є багатопараметричною і може використовуватись для розрахунку технологічних параметрів СР-ІІ. Дана модель пластичності розроблена з позицій континуальної теорії і може використовуватись для розрахунку основних параметрів різних схем ущільнення порошків з частинками, що мають форму наближену до сферичної.

Таким чином, незалежне використання континуального і контактної підходів, або використання їх в сукупності дозволить нам одержати найбільш достовірну картину поведінки ущільнювального порошкового середовища і усієї пресовки в цілому.

1. Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А. и др. Феноменологические теории прессования порошков. – Киев: Наукова думка, 1982. – 140 с.
2. Степаненко А.В., Исаевич Л.А., Харлан В.Е. Обработка давлением порошковых сред. – Мн.: Наука і техніка, 1993. – 167 с.
3. Штерн М.Б. Определяющие уравнения для уплотняемых пластичных пористых тел // Порошковая металлургия. – 1981. – №4. – с. 17-23.
4. Штерн М.Б., Михайлов О.В. Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы прессования на распределение плотности // Порошковая металлургия. – 2002. – № 11/12. – С. 29-36.
5. Уточнення умови пластичності ущільнювального порошкового середовища з частинками складної форми / О.В.Заболотний // Вісник ЖІТІ. – 2001. – №19 / Технічні науки. – С. 14-17.
6. Boginsky L., Reut O., Piatsiushyk Y., Zabolotny O., Kupryianov I. The Development of Processes of Pressing of Articles from Powders on the Bases of Metals, Ceramics and Graphite // 15 International Plansee Seminar. Austria, Reutte, 2001, V. 3. – P. 197-209.
7. Реут О.П., Богинкий Л.С., Петюшик Е.Е. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов. – Мн.: Дзбор, 1998. – 258с.
8. Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков. М.: Металлургия, 1969. – 260с.
9. Макушок Е.М., Реут О.П. Усложняющаяся контактная модель прессования порошковых материалов // Докл. НАН Беларуси, Т. 44, № 4, июль-август 2000 г., – С. 116-199.