

УДК 621.762.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВОЙ ЗАГОТОВКИ В ЖЕСТКОЙ ПРЕСС-ФОРМЕ ВИБРАЦИОННО-СТАТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ**Д. В. Савелов**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: savelov@vazit-net.com

Рассмотрена математическая модель процесса одностороннего вибрационно-статического прессования порошковой заготовки в жесткой пресс-форме без учета бокового давления от стенок ее. Процесс деформирования порошковой заготовки был смоделирован исходя из того, что порошковая заготовка, находящаяся в жесткой пресс-форме, наделена реологическими характеристиками. При моделировании процесса прессования порошковой заготовки рассматривались малые относительные линейные деформации. Определены соотношения между начальной и конечной скоростью деформирования; динамическим давлением и плотностью порошковой заготовки с учетом начальных и конечных (достигаемых) значений реологических характеристик. Найдено выражение для определения времени процесса прессования, необходимого для достижения заданной плотности порошковой заготовки.

Ключевые слова: модель, прессование, заготовка, деформация, пресс-форма.**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКОВОЇ ЗАГОТОВКИ У ЖОРСТКІЙ ПРЕС-ФОРМІ ВІБРАЦІЙНО-СТАТИЧНИМ СПОСОБОМ****Д. В. Савелов**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: savelov@vazit-net.com

Розглянуто математичну модель процесу однічного вібраційно-статичного пресування порошкової заготовки в жорсткій прес-формі без врахування бічного тиску від її стінок. Процес деформації порошкової заготовки був змодельований виходячи з того, що порошкова заготовка, яка знаходиться в жорсткій прес-формі, наділена реологічними характеристиками. При моделюванні процесу пресування порошкової заготовки розглядалися малі відносні лінійні деформації. Визначені співвідношення між початковою і кінцевою швидкістю деформації; динамічним тиском і щільністю порошкової заготовки з врахуванням початкових і кінцевих (що досягаються) значень реологічних характеристик. Знайдено вираз для визначення часу процесу пресування, необхідного для досягнення заданої щільності порошкової заготовки.

Ключові слова: модель, пресування, заготовка, деформация, прес-форма.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Методами вибрационного и вибрационно-статического прессования изготавливается значительная часть заготовок и изделий из конструкционных металлических порошков. Процесс вибрационно-статического прессования порошковых заготовок имеет ряд характерных особенностей, связанных с волновым характером нагружения, межчастичным взаимодействием элементов металлических порошков и их смесей, разрушением арочных образований и созданием новых более прочных связей, одновременно действующим статическим пригрузением на порошок в пресс-форме, и изучен недостаточно полно.

Традиционно в теории обработки материалов давлением [1–3], теории пластичности неоднородных сред рассматривается связь между напряжением и деформацией при линейной схеме напряженного состояния. При этом описываются случаи продольного и поперечного нагружения. Такой же подход и расчетные схемы были применены в развитии теории вибрационного прессования цементобетонных и асфальтобетонных смесей [4–6]. В этих работах деформируемый слой представлен как однородное тело, не наделенное никакими реологическими характеристиками естественного материала. Поэтому зависимости, описывающие в рассмотренных моделях связь между деформацией и внешней нагрузкой, изменением плотности материала под действием внешней нагрузки, временем уплотнения фактически не учитывают физической

природы деформируемых материалов, носят условный характер и не могут быть критерием оценки эффективности вибрационного оборудования. Общеизвестным также является исследование продольных и поперечных деформаций, когда свойства деформируемого материала моделируются модулем упругости Юнга [7].

Следовательно, дальнейшие теоретические исследования процесса деформирования порошковых заготовок, наделенных реологическими характеристиками реальных материалов, являются актуальными.

Цель работы – моделирование процесса вибрационно-статического прессования порошковой заготовки, наделенной упруговязкопластическими свойствами, для установления зависимости плотности порошковой заготовки от давления прессования.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Данная работа является попыткой дополнить существующие исследования процесса вибрационно-статического прессования порошковых заготовок. Для решения поставленной задачи рассмотрим механизм деформации порошковой заготовки в жесткой пресс-форме. На расчетной схеме (рис. 1) пуансон 1 массой m , подвешенный на упругих амортизаторах 2 с коэффициентами жесткости k_1 и демпфирования b_1 к нажимной плите 3, деформирует металлический порошок 4, находящийся в жесткой пресс-форме 5, от начальной высоты H_H с началь-

ной плотностью ρ_H до конечной высоты H_k с конечной (достигаемой) плотностью ρ_k . Влияние

бокового давления от стенок пресс-формы 5 не учитывается.

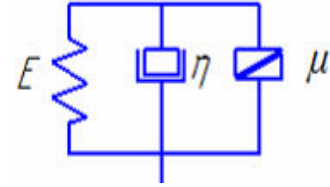
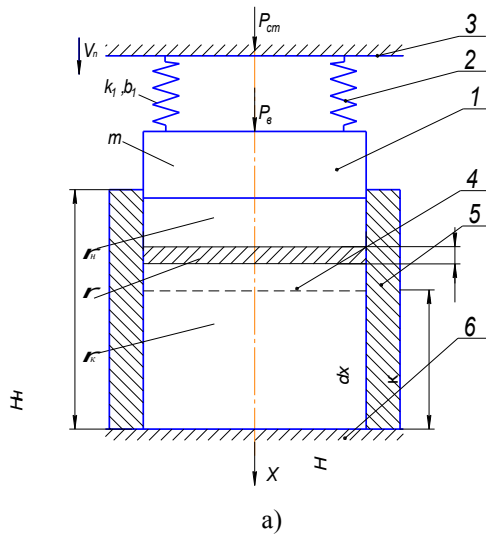


Рисунок 1 – Расчетная схема процесса деформирования порошковой заготовки:

а) для определения деформации при вибрационно-статическом прессовании; б) реологическая модель слоя металлического порошка; 1 – пуансон; 2 – упругий амортизатор; 3 – нажимная плита; 4 – порошковая заготовка; 5 – пресс-форма; 6 – основание пресс-формы

При этом полагаем, что первоначальная скорость пуансона V_H уменьшается в момент удара о порошок до значения V_K . Теоретические исследования проведены в соответствии с подходом, принятым в работе [8, 9]. Для определения величины динамического давления, которое бы позволило получать порошковую заготовку с требуемой плотностью, запишем сначала уравнение движения пуансона 1 без учета статической нагрузки от нажимной плиты 3 [9]:

$$-m \frac{d^2 u}{dt^2} - b_1 \frac{du}{dt} - k_1 u = S \cdot \sigma = \frac{S_H \cdot H_H \cdot Y_0}{H_k} \cdot \dot{\varepsilon}^n, \quad (1)$$

где S_H и S – начальное и текущее значение площади поперечного сечения прессуемой порошковой заготовки; Y_0 и n – постоянные [8]; σ – напряжение, возникающее в уплотняемом слое металлического порошка; $\dot{\varepsilon}$ – линейная скорость деформации; t – время.

Линейная скорость деформации может быть определена из следующей зависимости [8]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{H_H}, \quad (2)$$

тогда

$$\frac{d\dot{\varepsilon}}{dt} = \frac{1}{H_H} \cdot \frac{dV}{dt}. \quad (3)$$

Подставляя $\frac{dV}{dt}$ из выражения (3) в уравнение движения (1) и, проведя преобразования, получим:

$$-m \cdot \frac{H_H}{S_H \cdot Y_0} \cdot \frac{d\dot{\varepsilon}}{dt} - b_1 \cdot \frac{H_H}{S_H \cdot Y_0} \cdot \dot{\varepsilon} - k_1 \cdot \frac{H_H}{S_H \cdot Y_0} \cdot t = \frac{\dot{\varepsilon}^n}{1-\varepsilon}. \quad (4)$$

Поскольку $\frac{H}{H_H} = 1 - \varepsilon$ [1, 8] и учитывая, что

$\frac{d\varepsilon}{\dot{\varepsilon}} = dt$, выражение (4) примет следующий вид:

$$-\alpha \cdot \frac{d\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}^{n-1}} - \dot{\varepsilon}^{2-n} (\beta + \gamma \cdot t) \cdot dt = \frac{d\varepsilon}{1-\varepsilon}, \quad (5)$$

где коэффициенты α , β и γ определяются из выражений:

$$\alpha = m \cdot \frac{H_H}{S_H \cdot Y_0}; \quad \beta = b_1 \cdot \frac{H_H}{S_H \cdot Y_0}; \quad \gamma = k_1 \cdot \frac{H_H}{S_H \cdot Y_0}. \quad (6)$$

Интегрируя полученное выражение (5) в границах от $\dot{\varepsilon}_0$ до $\dot{\varepsilon}$ получим:

$$-\alpha \cdot \left[\frac{\dot{\varepsilon}^{2-n}}{2-n} \right]_{\dot{\varepsilon}_0}^{\dot{\varepsilon}} - (\beta + \gamma \cdot t) \cdot t \cdot \dot{\varepsilon}^{2-n} \Big|_{\dot{\varepsilon}_0}^{\dot{\varepsilon}} = -[\ln(1-\varepsilon)]_0^\varepsilon, \quad (7)$$

где $\dot{\varepsilon}_0$ – относительная линейная скорость деформирования порошковой заготовки в начале процесса прессования при $\varepsilon = 0$.

Подставляя в полученное выражение (7) границы интегрирования получим:

$$\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{2-n} = 1 + \frac{(2-n) \cdot \ln(1-\varepsilon)}{\dot{\varepsilon}_0^{2-n} \cdot [\alpha - (2-n) \cdot (\beta + \gamma \cdot t) \cdot t]}, \quad (8)$$

В конце процесса прессования слоя металлического порошка при $\dot{\varepsilon} = 0$, обозначив через ε_k конечную величину деформирования, получим:

$$\ln(1-\varepsilon_k) = - \frac{[\alpha - (2-n) \cdot (\beta + \gamma \cdot t) \cdot t \cdot (2-n)] \cdot \dot{\varepsilon}_0^{2-n}}{(2-n)}. \quad (9)$$

Основываясь на данных [8], для практических расчетов реальных порошковых материалов значение показателя $n = 0,3$, при котором наблюдается наибольшая сходимость теоретических и экспериментальных данных, а относительная скорость деформирования может быть выражена через начальные значения скорости V_H и высоту слоя порошка H_H (рис. 1,а) [8]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2}{3} \cdot \frac{V_H}{H_H} \quad (10)$$

Для рассматриваемого случая прессования слоя порошка, свойства которого представлены упруго-вязко-пластической моделью (рис. 1,б), малую относительную линейную деформацию ε_x можно представить в виде:

$$\varepsilon_x = \frac{P_\partial}{E \cdot (1 + \mu) + \frac{2}{3} \cdot \frac{V_0}{H_H} \cdot \eta} \quad (11)$$

где P_∂ – динамическое давление, при котором происходит деформирование порошковой заготовки; E – динамический модуль упругой деформации (модуль упругости Юнга); μ – коэффициент внутреннего трения, позволяющий моделировать уплотнение слоя порошка; η – коэффициент динамической вязкости смеси из металлического порошка и поверхностно-активных веществ.

Опираясь на законы сохранения массы и импульса [10], запишем выражения для определения динамического давления для начальной и конечной стадии уплотнения порошковой заготовки:

$$P_{\partial H} = \rho_H \cdot V_H^2; \quad (12)$$

$$P_{\partial K} = \rho_K \cdot V_K^2, \quad (13)$$

$$\rho_K = \frac{\left(E_K \cdot (1 + \mu) + \frac{2}{3} \cdot \frac{V_K}{H_K} \cdot \eta_K \right) \cdot \left[1 - \frac{P_{\partial H}}{P_{\partial K}} \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}_K}{\dot{\varepsilon}_H} \right)^n \right] \cdot \left[1 - \frac{\rho_H \cdot V_H^2}{E_H \cdot (1 + \mu) + \frac{2}{3} \cdot \frac{V_H}{H_H} \cdot \eta_H} \right]}{V_K^2} \quad (18)$$

Полученное выражение (18) наряду с кинематическими и нагрузочными параметрами, геометрическими размерами заготовки учитывает и реологические характеристики порошковой заготовки.

В оборудовании, работающему по принципу одновременного действия вибрации и статической нагрузки, вибрационный способ прессования является основным. Поэтому импульсные напряжения и частота их приложения оказывают преобладающее влияние на процесс прессования металлического порошка и формования готового изделия в целом. В этом случае динамическое давление P_∂ , действующее на порошковую заготовку в жесткой пресс-форме, можно представить в некотором измененном виде [4–6]:

где $P_{\partial H}$ – начальное динамическое давление, соответствующее значению плотности ρ_H ; $P_{\partial K}$ – конечное динамическое давление, при котором достигается требуемая плотность ρ_K ; V_H и V_K – массовые скорости деформирования порошковой заготовки в начале и конце процесса прессования.

На основании уравнений (12) и (13) выражение (11) можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon_{xH} = \frac{\rho_H \cdot V_H^2}{E_H \cdot (1 + \mu) + \frac{2}{3} \cdot \frac{V_H}{H_H} \cdot \eta_H} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{xK} = \frac{\rho_K \cdot V_K^2}{E_K \cdot (1 + \mu) + \frac{2}{3} \cdot \frac{V_K}{H_K} \cdot \eta_K} \quad (15)$$

где E_H , E_K , η_H и η_K – начальные и конечные значения динамического модуля упругой деформации (модуль упругости Юнга) и коэффициента динамической вязкости, соответствующие началу и концу процесса прессования порошковой заготовки.

Усилие прессования с учетом уравнения (1) и выражений (14) и (15) можно представить следующим образом:

– для начала процесса прессования

$$F_H = \frac{S_H \cdot Y_0}{1 - \varepsilon_{xH}} \cdot \dot{\varepsilon}^n; \quad (16)$$

– для конечной стадии процесса прессования

$$F_K = \frac{S_K \cdot Y_0}{1 - \varepsilon_{xK}} \cdot \dot{\varepsilon}^n. \quad (17)$$

Разделив выражение (16) на (17), можно получить выражение для определения значения конечной плотности порошковой заготовки в виде:

$$P_\partial = p \cdot \omega \cdot t, \quad (19)$$

где p – интенсивность динамической силы F , распределенной по площади сечения S порошковой заготовки [7]; ω – угловая частота вынужденных колебаний.

Пользуясь основными положениями [7], можно сделать вывод о том, что интенсивность p внешней динамической силы F , распределенной по площади сечения S порошковой заготовки, и будет фактически определять эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{эКВ}}$, значения которых в условиях одноосного сжатия могут быть достаточно точно определены по теории прочности Мора:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = Z_1 - K \cdot Z_3 \leq [\sigma]_p. \quad (20)$$

При одноосном сжатии порошкового материала $Z_1 = 0$, $Z_3 = -\sigma_{T_{сж}}$ [7], значит:

$$\sigma_{эқв} = K \cdot (-\sigma_{T_{сж}}) = \sigma_{T_p}, \quad (21)$$

где для порошков пластичных металлов $K = \sigma_T^p / \sigma_T^{сж} = [\sigma]_p / [\sigma]_{сж}$, для порошков хрупких металлов $K = \sigma_B^p / \sigma_B^{сж} = \sigma_p / \sigma_{сж}$.

С другой стороны, рассматривая одноосное сжатие порошковой заготовки как частный случай прессования, получим выражение для определения эквивалентных напряжений в виде [7]:

$$\sigma_{эқв} = \frac{b-1}{2} \cdot \sigma_x + \frac{1+b}{2} \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + 4 \cdot \tau^2}, \quad (22)$$

где $b = \sigma_T^{сж} / \sigma_T$.

Тогда динамическое давление для начальной стадии процесса прессования порошковой заготовки будет равно:

$$p_H = \frac{F_H}{A_H} = \sigma_{эқв}. \quad (23)$$

На основании (19), (22), (23) и выражения (18) получим теоретическую зависимость, которая позволит определить время, необходимое для достижения конечной плотности прессуемой порошковой заготовки в зависимости от ее реологических характеристик, динамического давления и угловой частоты вынужденных колебаний, реализуемой вибратором:

$$t = \frac{P_{ок} \cdot \left[1 - \frac{\rho_K \cdot V_K^2}{E_K \cdot (1 + \mu) + \frac{2}{3} \cdot \frac{V_K}{H_K} \cdot \eta_K} \right]}{\sigma_{эқв} \cdot \omega \cdot \left[1 - \left(E_H \cdot (1 + \mu) + \frac{2}{3} \cdot \frac{V_H}{H_H} \cdot \eta_H \right) \right]}. \quad (24)$$

Анализ зависимости (24) свидетельствует о том, что с ростом интенсивности давления уменьшается длительность вибрационного нагружения слоя металлического порошка. Интенсивность динамического нагружения нужно выбирать так, чтобы его общая продолжительность не превышала 16–30 с [12].

Одновременно с вибрационным воздействием на порошковую заготовку в пресс-форме должно оказываться небольшое статическое пригружение. Для порошков различных металлов статическое давление, прикладываемое одновременно с вибрацией, составляет 0,3–5 МПа [11, 12]. Это объясняется тем, что вибрация, придавая металлическим частицам порошка большую подвижность, способствует их наиболее плотной укладке, а одновременно реализуемое статическое пригружение обеспечивает заклинивание металлических частиц в этом положении без пластических деформаций и хрупкого разрушения. Отсутствие в процессе прессования такого ста-

тического пригружения может привести не к уплотнению, а к разрыхлению порошковой заготовки.

Статическое пригружение с усилием $P_{ст}$ порошковой заготовке передается наряду с вибрацией от пуансона 1 посредством нажимной плиты 3 и амортизаторов 2 (рис. 1,а). В этом случае суммарное усилие формообразования порошковой заготовки при вибрационно-статическом способе нагружения может быть определено из зависимости [13]:

$$P_c = P_g \cdot \sin \omega \cdot t + P_{ст}, \quad (25)$$

где $P_g = F$ – амплитуда возмущающей силы.

ВЫВОДЫ. В результате проведенных теоретических исследований получил дальнейшее развитие процесс моделирования вибрационно-статического прессования порошковой заготовки, наделенной упруго-вязко-пластическими свойствами. Выведены новые теоретические выражения для определения плотности порошковой заготовки в зависимости от давления прессования, кинематических параметров, геометрических размеров и её реологических характеристик.

Таким образом, показано что, наделая деформируемое физическое тело соответствующими реологическими характеристиками, можно определять требуемые параметры его нагружения для получения качественных показателей готового изделия и выбора технологического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.
2. Теория пластичности // Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
3. Высокоскоростная деформация металлов // Беляев В.И., Ковалевский В.Н., Смирнов Г.В. – Минск.: Наука и техника, 1987. – 352 с.
4. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве / А.Г. Маслов, В.М. Пономарь. – К.: Будівельник, 1985. – 128 с.
5. Теоретические основы вибрационного уплотнения цементобетонных смесей / А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин // Вісник Кременчуцького національного політехнічного університету. 2004. – Вип. 5/2004 (28). – С. 45–49.
6. Определение энергоемкости процесса вибрационного уплотнения цементобетонных смесей / А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин // Вісник Кременчуцького національного політехнічного університету. 2006. – Вип. 2/2006 (37), част. 1. – С. 34–36.
7. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. – М.: Высшая школа, 1989. – 624 с.
8. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П.Б. Меллор; пер. с англ. А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
9. Определение соотношений между скоростью объёмного уплотнения, динамическим усилием, плотностью и временем прессования при вибрационном уплотнении металлических порошков / А.Я. Мовшович, Д.В. Савелов, В.В. Драгобецкий // Науч-

но-технический и производственный журнал «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением». – Вып. № 12 – 2013. – С. 6–8.

10. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н.; под ред. В.А. Григоряна. – М.: РадиоСофт, 2008. – 406 с.

11. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – М.: Металлургия, 1980. – 496 с.

12. Виброимпульсное формование конических изделий / О.В. Чмых, В.В. Иващенко // Порошковая металлургия, – 1982. – № 7. – С. 18–22.

13. Миронюк А.Ф. Определение перемещений ползуна гидравлического пресса при вибрационном прессовании // Материалы постоянно действующего научного семинара «Проблемы вибрационной техники». – К.: Наукова думка, 1970. – С. 2–11.

MODELLING OF A POWDER-LIKE WORK-PIECE COMPACTION IN A STIFF DIE BY A VIBRO-STATIC METHOD

D. Savelov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: savelov@vizit-net.com

A mathematical model of the process of the unilateral vibro-static compaction of a powder-like work-piece in a stiff die without the account of a lateral pressure from the walls of the die is considered. The process of deformation of a powder-like work-piece was modeled coming from that a powder-like work-piece, being in a stiff die, is provided with rheological descriptions. Small relative linear deformations were examined. Certain relations between the initial and final velocity of deformation; the dynamic pressure and density of the powder-like work-piece taking into account the initial and final (reseivedt) values of rheological descriptions are found. An expression is found for determination of the time of the compaction process, necessary for achievement of the prescribed density of the powder-like work-piece.

Key words: model, compaction, purveyance, deformation, press-form.

REFERENCES

1. Gromov, N.P. (1978) *Teorija obrabotki metallov davleniem* [Theory of treatment of metals pressure], Metallurgija, Moscow, Russia.

2. Arkulis, G. (1987) *Teorija plastichnosti* [Theory of plasticity], Mashinostroenie, Moscow, Russia.

3. Beljaev, V.I., Kovalevskij, V.N., and Smirnov, G.V. (1987) *Vysokoskorostnaja deformacija metallov* [High-speed deformation of metals], Nauka i tehnika, Minsk, Byelorussia.

4. Maslov, A.G. and Ponomar', V.M. (1985) *Vibracionnye mashiny i processy v dorozhnom stroitel'stve* [Vibration Machines and Processes in Road Building], Budivel'nik, Kiev, Ukraine.

5. Maslov, A.G. and Itkin, A.F. (2004) "Theoretical bases of oscillation compression of cement and concrete mixtures", *Transactions of Kremenchuk State Polytechnic University*, vol. 5, no. 28, pp. 45–49.

6. Maslov, A.G. and Itkin, A.F. (2006) "Determination of power-hungryness of process of oscillation compression of cement and concrete mixtures", *Transactions of Kremenchuk State Polytechnic University*, vol. 2, no. 37, pp. 34–36.

7. Darkov, A.V. and Shpiro, G.S. (1989) *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials], Vysshaja. Shkola, Kiev, Ukraine.

8. Dzhonson, U. and Mellor, P.B. (1979) *Teorija plastichnosti dlja inzhenerov* [Theory of plasticity for engineers], ed. English by Ovchinnikov A.G., Mashinostroenie, Moscow, Russia.

9. Movshovich, A.Ja., Savelov, D.V. and Drago-beckij, V.V. (2013) "Determination of between's by speed of by volume compression, dynamic effort, closeness and time of pressing at the vibration compression of metallic powders", *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, no. 12, pp. 6–8.

10. Grigorjan, V.A., Kobylykin, I.F., Marinin, V.M., and Chistjakov, E.N. (2008) *Materialy i zashhitnye struktury dlja lokal'nogo i individual'nogo bronirovani-ja* [Materials and protective structures for the local and individual reserving], RadioSoft, Moscow, Russia.

11. Kiparisov, S.S., and Libenson, G.A. (1980) *Poroshkovaja metallurgija* [Powder-like metallurgy], Metallurgija, Moscow, Russia.

12. Chmyh, O.V. and Ivashhenko, V.V. (1982) "Impulsive vibroforming of conical wares", *Poroshkovaja metallurgija*, no. 7, pp. 18–22.

13. Mironjuk, A.F. (1970) "Determination of moving of slide-block hydraulic the press at the oscillation pressing", *Materials of constantly operating scientific seminar of «Problem of oscillation technique»*, pp. 2–11, Ukraine

Стаття надійшла 12.01.15.