

УДК 621.762.4

Савелов Д. В.  
Пузырь Р. Г.  
Чебенко Ю. Н.  
Федорак И. И.

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОРОШКОВОЙ ЗАГОТОВКИ АНИЗОТРОПНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВИБРОУПЛОТНЕНИИ

При осуществлении технологического процесса прессования на вибрационных прессах происходит взаимодействие вибрирующего пуансона с обрабатываемым металлическим порошком, находящимся в толстостенной пресс-форме и представляемым в виде дисперсной порошковой среды анизотропной структуры.

Одним из наиболее важных вопросов процесса вибрационного прессования дисперсных порошковых сред анизотропной структуры является выявление закономерностей между линейной скоростью деформации, плотностью металлического порошка и динамическим давлением, временем приложения динамического давления. Эти закономерности представляют собой математическое отображение динамики процесса вибропрессования и неразрывно связаны с таким важным фактором, как прессуемость. Поэтому разработка теории прессования начинается именно с установления этих закономерностей.

Традиционно в теории обработки материалов давлением, теории пластичности неоднородных сред рассматривается связь между напряжением и деформацией при линейной схеме напряженного состояния [1–4]. 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 [5–7]. 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 виброоборудования. Общеизвестным также является исследование продольных и поперечных деформаций, когда свойства деформируемого материала моделируются модулем упругости Юнга [8].

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

Цель работы – моделирование процесса вибрационного прессования дисперсной порошковой среды, наделенной упруго-вязкими свойствами, для установления зависимости плотности порошковой заготовки от динамического давления прессования.

Данная работа является попыткой дополнить существующие исследования процесса вибрационного прессования порошковых заготовок.

Для решения поставленной задачи рассмотрим механизм деформирования порошковой заготовки в жесткой пресс-форме (рис. 1). 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 [4].

Для определения величины динамического давления, которое бы позволило получать порошковую заготовку с требуемой плотностью, запишем уравнение движения пуансона 1 без учета статической нагрузки от нажимной плиты 3 [4]:

$$-m\left(d^2u/dt^2\right) - b_1(du/dt) - k_1u = ((S \cdot H_H \cdot Y)/H_k) \cdot \dot{\epsilon}^n, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения прессуемой порошковой заготовки;  $Y_0$  и  $n$  – постоянные [4];  $\sigma$  – напряжение, возникающее в уплотняемом слое дисперсной порошковой среды;  $\dot{\epsilon}$  – линейная скорость деформации;  $t$  – время.

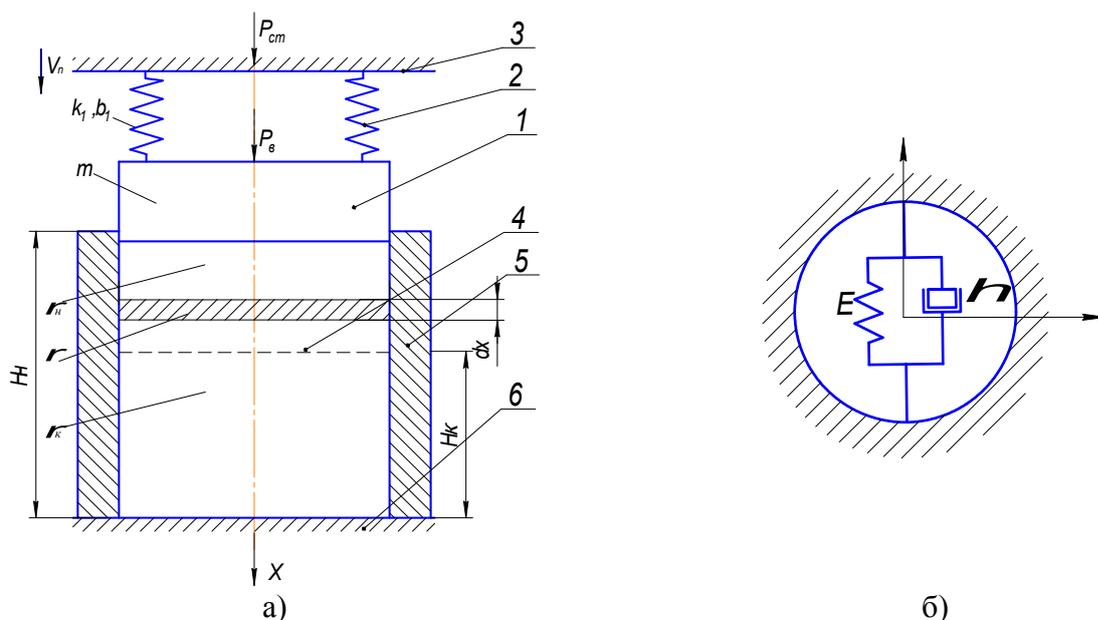


Рис. 1. Схема процесса деформирования порошковой заготовки (1 – пуансон; 2 – пружина; 3 – нажимная плита; 4 – порошковая заготовка; 5 – пресс-форма; 6 – основание пресс-формы):

а – для определения деформации при вибрационном прессовании; б – реологическая модель слоя порошковой среды

Линейная скорость деформации, в первом приближении, может быть определена из следующей зависимости [4]:

$$\dot{\varepsilon} = V/H_H, \tag{2}$$

тогда

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

Подставляя  $dV/dt$  из выражения (3) в уравнение движения (1) и, проведя преобразования, получим:

$$-m \cdot \frac{H_H}{S \cdot Y_0} \cdot \frac{d\dot{\varepsilon}}{dt} - b_1 \cdot \frac{H_H}{S \cdot Y_0} \cdot \dot{\varepsilon} - k_1 \cdot \frac{H_H}{S \cdot Y_0} \cdot \dot{\varepsilon} \cdot t = \frac{\dot{\varepsilon}^n}{1 - \varepsilon}. \tag{4}$$

Поскольку  $(H/H_H) = 1 - \varepsilon$  [3, 4] и учитывая, что  $d\varepsilon/\dot{\varepsilon} = dt$ , выражение (4) примет следующий вид:

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

где коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  определяются из выражений:

$$\alpha = m \cdot \frac{H_H}{S \cdot Y_0}; \quad \beta = b_1 \cdot \frac{H_H}{S \cdot Y_0}; \quad \gamma = k_1 \cdot \frac{H_H}{S \cdot Y_0}. \tag{6}$$

Интегрируя полученное выражение (6) в границах от  $\dot{\varepsilon}_0$  до  $\dot{\varepsilon}$ , получим:

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

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  $\varepsilon_k$  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 [4], 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) [4]:

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

Статическое пригружение от силы  $P_{ст}$  порошковой заготовке передается наряду с вибрацией от пуансона 1 посредством нажимной плиты 3 и амортизаторов 2 (рис. 1, а). В этом случае суммарное усилие  $P_c$  формообразования порошковой заготовки при вибрационно-статическом способе нагружения может быть определено из зависимости [9]:

$$P_c = P_g \cdot \sin \omega \cdot t + P_{ст}, \quad (11)$$

где  $P_g$  – амплитуда возмущающей силы, определяемой из (1).

При анализе изменения кинематических параметров в процессе прессования полезно знать, как уменьшается скорость пуансона 1 в зависимости от его перемещения после соударения.

Объединяя уравнения (1) и (4) в соответствии с работой [4], получим:

$$-m(dv/dt) - b_1 v - k_1 u = (S \cdot H_H \cdot Y_0 / H_k) \cdot (v / H_H)^n, \quad (12)$$

но при  $v = -(dH_k/dt)$  формула (12) принимает вид  $m \cdot (v_H^{1-n}) dv - b_1 \cdot (v_H^{1-n}) dH_H - k_1 \cdot t \cdot (v_H^{1-n}) dH_H = S \cdot Y_H \cdot H_H^{(1-n)} \cdot (dH / H_K)$ , и если  $v = v_0$  при  $H = H_H$ , то после интегрирования получим:

$$m \cdot \left( \left( v_H^{2-n} - v^{2-n} \right) / (2-n) \right) - H \cdot (b_1 + k_1 \cdot t) \cdot (v_H^{1-n} - v^{1-n}) = S \cdot Y_H \cdot H_H^{(1-n)} \cdot \ln(H_H / H). \quad (13)$$

Полагая  $n = 0$ , как это рассмотрено в работе [4], получим:

$$0,5m \cdot (v_H^2 - v^2) - H \cdot (b_1 + k_1 \cdot t) \cdot (v_H - v) = S \cdot Y_H \cdot H_H \cdot \ln(H_H / H). \quad (14)$$

Следуя рассуждениям [4], выражение (13) можно было записать из рассмотрения расхода энергии, предполагая при этом, что вся накопившаяся кинетическая энергия пуансона идет на работу деформации. Если вместо выражения  $Y = Y_0 \cdot e^n$  использовать выражение, содержащее скорость логарифмической деформации  $Y = Y_0 \cdot \dot{\varepsilon}^n$  [4], то вместо (13) получим:

$$-m(dv/dt) - b_1 v - k_1 u = (S \cdot H_H \cdot Y_0 / H_k) \cdot (v_K / H_K)^n, \quad (15)$$

тогда вместо (14) получим:

$$m \left( \left( v_H^{2-n} - v^{2-n} \right) / (2-n) \right) - H (b_1 + k_1 \cdot t) (v_H^{1-n} - v^{1-n}) = (S \cdot Y_H \cdot H_H / n) \left( \left( 1 / H_K^n \right) - \left( 1 / H_H^n \right) \right), \quad (16)$$

полагая, что  $n \neq 0$ . Если  $n = 0$ , то выражение (15) преобразуется в (14).

Для рассматриваемого случая прессования слоя порошковой смеси, свойства которой представлены комбинацией упруго-вязкой ячейки (рис. 2, б), малую относительную линейную деформацию  $\varepsilon_x$  можно представить в вид:

$$\varepsilon_x = \frac{P_\partial}{E + \eta \cdot \dot{\varepsilon}}, \quad (17)$$

где  $P_\partial$  – динамическое давление, при котором происходит деформирование порошковой заготовки.

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

$$P_{\partial H} = \rho_H \cdot V_H^2; \quad (18)$$

$$P_{\partial K} = \rho_K \cdot V_K^2, \quad (19)$$

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

На основании уравнений (18) и (19) выражение (17) можно представить в виде:

$$\varepsilon_{xH} = \frac{\rho_H \cdot V_H^2}{E_H + \eta_H \cdot \dot{\varepsilon}}; \quad (20)$$

$$\varepsilon_{xK} = \frac{\rho_K \cdot V_K^2}{E_K + \eta_K \cdot \dot{\varepsilon}}, \quad (21)$$

где  $E_H$ ,  $E_K$ ,  $\eta_H$  и  $\eta_K$  – начальные и конечные значения модуля упругости Юнга и коэффициента вязкости, соответствующие началу и концу процесса прессования порошковой заготовки.

Усилие прессования с учетом уравнения (1) и выражений (20) и (21) можно представить следующим образом:

– для начала процесса прессования

$$F_H = \frac{S_H \cdot Y_0}{1 - \varepsilon_{xH}} \cdot \dot{\varepsilon}^n; \quad (22)$$

– для конечной стадии процесса прессования

$$F_K = \frac{S_K \cdot Y_0}{1 - \varepsilon_{xK}} \cdot \dot{\varepsilon}^n. \quad (23)$$

Разделив выражение (22) на (23), можно получить выражение для определения значения конечной плотности порошковой заготовки в виде:

$$\rho_K = \frac{(E_K + \eta_K \cdot \dot{\varepsilon}) \cdot \left[ 1 - \frac{P_{\partial H}}{P_{\partial K}} \cdot \left( \frac{\dot{\varepsilon}_K}{\dot{\varepsilon}_H} \right)^n \cdot \left[ 1 - \frac{\rho_H \cdot V_H^2}{E_H + \eta_H \cdot \dot{\varepsilon}} \right] \right]}{V_K^2}. \quad (24)$$

Полученное выражение (24) наряду с кинематическими и нагрузочными параметрами, геометрическими размерами заготовки учитывает и реологические характеристики порошковой заготовки.

В оборудовании, работающем 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  $P_\partial$ , действующее на дисперсную порошковую заготовку в жесткой пресс-форме, можно представить в некотором измененном виде [5–7]:

$$P_\partial = p \cdot \omega \cdot t, \quad (25)$$

где  $p$  – интенсивность динамической силы  $F$ , распределенной по площади сечения  $S$  дисперсной порошковой заготовки [8];  $\omega$  – угловая частота вынужденных колебаний.

Пользуясь основными положениями [8], 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:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = Z_1 - K \cdot Z_3 \leq [\sigma]_P. \quad (26)$$

При одноосном сжатии порошкового материала  $Z_1 = 0$ ,  $Z_3 = -\sigma_{T_{\text{СЖ}}}$  [8], значит:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = K \cdot (-\sigma_{T_{\text{СЖ}}}) = \sigma_{T_P}, \quad (27)$$

где для порошков пластичных металлов  $K = \sigma_T^P / \sigma_T^{\text{СЖ}} = [\sigma]_P / [\sigma]_{\text{СЖ}}$ , для порошков хрупких металлов  $K = \sigma_B^P / \sigma_B^{\text{СЖ}} = \sigma_P / \sigma_{\text{СЖ}}$ .

С другой стороны, рассматривая одноосное сжатие порошковой заготовки как частный случай прессования, получим выражение для определения эквивалентных напряжений в виде [8]:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \frac{b-1}{2} \cdot \sigma_x + \frac{1+b}{2} \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + 4 \cdot \tau^2}, \quad (28)$$

где  $b = \sigma_T^{\text{СЖ}} / \sigma_T$ .

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

$$p_H = (F_H / A_H) = \sigma_{\text{эКВ}}. \quad (29)$$

На основании (25), (28), (29) и выражения (24) 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:

$$t = P_{\text{дК}} \cdot \left[ 1 - \frac{\rho_K \cdot V_K^2}{E_K + \eta_K \cdot \dot{\epsilon}} \right] / \sigma_{\text{эКВ}} \cdot \omega \cdot [1 - (E_H + \eta_H \cdot \dot{\epsilon})]. \quad (30)$$

Анализ зависимости (30) свидетельствует о том, что с ростом интенсивности давления уменьшается длительность вибрационного нагружения слоя металлического порошка. Интенсивность динамического давления нужно выбирать так, чтобы его общая продолжительность не превышала 16–30 с [11].

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований получил дальнейшее развитие процесс моделирования вибрационного уплотнения порошковой заготовки, наделенной определенными реологическими характеристиками. Выявлены закономерности между линейной скоростью деформации, усилием и деформацией дисперсной порошковой среды при ее вибрационно-статическом прессовании. Данные выражения увязывают кинематические параметры процесса и геометрические размеры порошковой заготовки.

Выведены новые математические выражения для определения плотности дисперсной порошковой заготовки в зависимости от давления прессования, кинематических параметров, геометрических размеров и её реологических характеристик. 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аргулис Г.Э. Теория пластичности // Г.Э. Аргулис, В.Г. Дорогобид. – Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
2. Беляев В.И. Высокоскоростная деформация металлов // В.И. Беляев, В.Н. Ковалевский, Г.В. Смирнов. – Минск.: Наука и техника, 1987. – 352 с.
3. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. – М.: Metallurgija, 1978. – 360 с.
4. Джонсон У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П.Б. Меллор. Пер. с англ. А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с., ил.
5. Маслов А.Г. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве / А.Г. Маслов, В.М. Пономарь. – Київ : Будівельник, 1985. – 128 с.
6. Маслов А.Г. 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.
7. Маслов А.Г. Определение энергоёмкости 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.
8. Дарков А.В. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. – М.: Высшая школа, 1989. – 624 с.
9. МIRONЮК А. Ф. Определение перемещений ползуна гидравлического пресса при вибрационном прессовании / МIRONЮК А. Ф. Материалы постоянно действующего научного семинара [«Проблемы вибрационной техники»]. – К.: «Наукова думка», 1970. – С. 2–11.
10. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В. А. Григорян, И. Ф. Кобылкин, В. М. Маринин, Е. Н. Чистяков; под ред. В.А. Григоряна. – М.: РадиоСофт, 2008. – 406 с.
11. Кипарисов С.С. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – Москва, Металлургия, 1980. – 496 с.

## REFERENCES

1. Argulis G.Je. Teorija plastichnosti // G.Je. Arkulis, V.G. Dorogobid. – Svarka vzryvom. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 216 s.
2. Beljaev V.I. Vysokoskorostnaja deformacija metallov // V.I. Beljaev, V.N. Kovalevskij, G.V. Smirnov. – Minsk.: Nauka i tehnika, 1987. – 352 s.
3. Gromov N.P. Teorija obrabotki metallov davleniem. – M.: Metallurgija, 1978. – 360 s.
4. Dzhonson U. Teorija plastichnosti dlja inzhenerov / U. Dzhonson, P.B. Mellor. Per. s angl. A.G. Ovchinnikov. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 567 s., il.
5. Maslov A.G. Vibracionnye mashiny i processy v dorozhnom stroitel'stve / A.G. Maslov, V.M. Ponomar'. – Kiiv : Budivel'nik, 1985. – 128 s.
6. Maslov A.G. Teoreticheskie osnovy vibracionnogo uplotnenija cementobetonnyh smesej / A.G. Maslov, A.F. Itkin // Visnik Kremenchuc'kogo nacional'nogo politehnicnogo universitetu. 2004. – Vip. 5/2004 (28). – S. 45–49.
7. Maslov A.G. Opredelenie jenergoemkosti processa vibracionnogo uplotnenija cementobetonnyh smesej / A.G. Maslov, A.F. Itkin // Visnik Kremenchuc'kogo nacional'nogo politehnicnogo universitetu. – 2006. – Vip. 2/2006 (37), chast. 1. – S. 34–36.
8. Darkov A.V. Soprotivlenie materialov / A.V. Darkov, G.S. Shpiro. – M.: Vysshaja shkola, 1989. – 624 s.
9. Mironjuk A. F. Opredelenie peremeshhenij polzuna gidravlicheskogo pressa pri vibracionnom pressovanii / Mironjuk A. F. Materialy postojanno dejstvujushhego nauchnogo seminaru [«Problemy vibracionnoj tehniki»]. – K.: «Naukova dumka», 1970. – S. 2–11.
10. Materialy i zashhitnye struktury dlja lokal'nogo i individual'nogo bronirovanija / V. A. Grigorjan, I. F. Kobylkin, V. M. Marinin, E. N. Chistjakov; pod red. V.A. Grigorjana. – M.: RadioSoft, 2008. – 406 s.
11. Kiparisov S.S. Poroshkovaja metallurgija / S.S. Kiparisov, G.A. Libenson. – Moskva, Metallurgija, 1980. – 496 s.

Савелов Д. В. – канд. техн. наук, доц. КрНУ

Пузырь Р. Г. – канд. техн. наук, доц. КрНУ

Чебенко Ю. Н. – канд. техн. наук, доц. КрНУ

Федорак И. И. – аспирант КрНУ

КрНУ – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

E-mail: savelov@vizit-net.com, puzyruslan@gmail.com, bgd@kdu.edu.ua, dmi33407503@yandex.ua

Статья поступила в редакцию 27.07.2016 г.