

УДК 621.797:621.664

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕТАНИЯ ПОРШНЯ ЗАРЯДОМ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Д. Л. Пирогов, О. Б. Марцинюк, В. В. Драгобецкий

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Г. Н. Маренко

Академия Внутренних Войск МВД Украины
пл. Восстания, 3, 61005, г. Харьков, Украина. E-mail: mail@uvv.kharkov.ukrtel.net

Проведен теоретический и экспериментальный анализ процесса метания поршня-ударника, зарядов взрывчатого вещества. Разработана методика расчета технологических параметров взрывного дробления утилизируемых изделий из твердых сплавов.

Ключевые слова: твердые сплавы, поршень-ударник, дробление, взрыв, детонация.

RESEARCH OF PROCESS OF THE THROWING OF THE PISTON BY THE EXPLOSIVE CHARGE

D. L. Pirogov, O. B. Martsinjuk, V. V. Dragobetsky

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@polytech.poltava.ua

G. N. Marenko

Academy of Internal Troops of the MIA of Ukraine
pl. Vostaniya, 3, Kharkiv, 61005, Ukraine. E-mail: mail@uvv.kharkov.ukrtel.net

The theoretical and experimental analysis of process of a throwing of the piston-drummer of charges of explosive is carried out. The design procedure of technological parameters of explosive crushing of the utilized products from firm alloys is developed.

Key words: firm alloys, the piston-drummer, crushing, explosion, detonation.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МЕТАНЬ ПОРШНЯ ЗАРЯДОМ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН

Д. Л. Пирогов, О. Б. Марцинюк, В. В. Драгобецкий

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Г. М. Маренко

Академія Внутрішніх Військ МВС України
пл. Повстання, 3, 61005, м. Харків, Україна. E-mail: mail@uvv.kharkov.ukrtel.net

Проведено теоретичний та експериментальний аналіз процесу метання поршня-ударника, зарядів вибухової речовини. Розроблено методику розрахунку технологічних параметрів вибухового дроблення утилізуваних виробів із твердих сплавів.

Ключові слова: тверді сплави, поршень-ударник, дроблення, вибух, детонація.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. При дроблении взрывом утилизируемых изделий критерием энергетической оценки условий разрушения материалов является скорость соударения поршня (ударника). Основными технологическими параметрами, определяющими скорость соударения элементов при дроблении, являются величина заряда ВВ и дистанция.

В настоящее время проблеме исследования процесса метания тел зарядом ВВ посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ.

На первом этапе большинство исследователей использовали одномерные модели движения тел под действием продуктов детонации [1–3].

В работе [4] одномерная задача движения жесткого поршня при падении на него детонационной волны решена конечно-разностным методом.

$$\frac{V}{D} = \sqrt{1 + \frac{32}{27R} - 1} / \sqrt{1 + \frac{32}{27R} + 1}, \quad (1)$$

$$R = (\rho_0 \delta_0) / (\rho_1 \delta_1) \quad (2)$$

где V – предельная скорость поршня;

D – скорость детонации (ВВ);

R – удельное отношение масс заряда поршня;

$\rho_0 \delta_0$ – плотность и толщина заряда ВВ;

$\rho_1 \delta_1$ – плотность и толщина метаемого поршня.

Скорость метания поршня полученная при использовании модели Гарни:

$$V = D \times R / (R + 2) \times \sqrt{3 / (K^2 - 1)}, \quad (3)$$

где $K=3$ – показатель адиабаты.

Однако, упрощенные представления о характере протекания процесса и свойствах продуктов детонации не позволяет учитывать специфику конкретного ВВ.

В работах [5, 6] с помощью ЭВМ и численных методов интегрирования дифференциальных уравнений проведены исследования более сложных двумерных нестационарных нелинейных уравнений газовой динамики, учитывающие реальные свойства твердых тел и продуктов детонации. Было установлено, что сжимаемости метаемого поршня не приводит к значительным изменениям характера нарастания скорости по сравнению с моделью несжимаемой жидкости. Это позволяет рассматривать более простую стационарную двумерную задачу без учета

прочности и сжимаемости поршня и использовать достаточно простые формулы для аппроксимации графиков. Минимально необходимая скорость удара определяется как

$$V_{\min} = \sqrt{\frac{2\sigma_b(\rho_1\delta_1 + \rho_2\delta_2)}{\rho_1\rho_2(\delta_1 + \delta_2)}}, \quad (4)$$

Высота заряда ВВ, дистанция между поршнем-ударником и объектом дробления, определяющие требуемые условия соударения. V_{\min} , определяются с использованием экспериментальной зависимости скорости детонации заряда ВВ

$$h = 1/5 \times \sqrt{RH}, \quad (5)$$

где σ_b – предел прочности дробимого материала;

ρ_1, ρ_2 – плотности материала поршня и дробимого материала;

δ_1, δ_2 – толщина поршня и дробимого материала;

h – дистанция между поршнем и объектом дробления;

H – высота заряда взрывчатого вещества.

Максимальная скорость метания поршня достаточно точно описываются формулой Гарни [4]:

$$\frac{V}{D} = \sqrt{\frac{3R^2}{(K^2 - 1)(R^2 + 5R + 4)}}, \quad (6)$$

Существенным недостатком существующих методик определения скорости полета поршня, метаемого зарядом ВВ, является не достаточно точное описание динамики полета поршня.

Максимальная скорость Гарни достигается при зазоре, стремящемся к бесконечности. Обычно, зазор принимают равным толщине метаемого поршня. Экспериментально установлено, что такая величина зазора обеспечивает от 50% до 100% максимально возможной скорости метания.

При анализе задачи динамики полета поршня очень важно также знать и его скорость на участке ускорения.

В связи с этим целью данной работы является разработка математической и аналоговой модели, а также методики расчета технологических параметров метания поршня взрывом ВВ при дроблении отходов твердых сплавов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. На основе теоретических и экспериментальных данных рассматривался процесс метания поршня с учетом его массы, толщины и физических свойств. При этом процесс разгона поршня рассматривается на двух стадиях: приобретение начальной скорости при прохождении взрывной волны по поршню и выходе ее на свободную границу поршня и дальнейшее ускорение поршня под действием давления процесса детонации ВВ на поршень. Считается, что метание элемента малых размеров, выделенного из общей поверхности поршня, является одномерным.

Уравнение движения элемента поршня под действием изменяющегося давления продуктов детонации может быть записано в виде:

$$m \frac{d^2h(t)}{dt^2} + \rho_1 c_1 \frac{dh(t)}{dt} = P(t), \quad (7)$$

где m – масса единицы площади поршня;

dh/dt – скорость поршня в направлении движения;

$\rho_1 c_1$ – плотность и скорость звука в среде за поршнем;

$P(t)$ – давление, определяющее воздействие продуктов детонации на поршень.

Анализ изменения давления над поршнем при его движении, выраженный решением двумерной задачи, показал, что давление конфигурируется экспоненциальной зависимостью с точностью 95÷97% вида

$$P(t) = P e^{-\Delta t}, \quad (8)$$

На основании полученных результатов можно предположить, что при движении фронта детонации вдоль поршня ускорение единичной зависимости происходит под действием давления, изменяющегося от бесконечности до нуля по экспоненциальному закону:

$$P(t) = P_x e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (9)$$

где P_x – давление продуктов детонации на поршне в момент выхода ударной волны на свободную поверхность поршня;

θ – постоянная времени спада давления продуктов детонации.

Тогда выражение (7) примет вид:

$$m \frac{d^2h(t)}{dt^2} + \rho_1 c_1 \frac{dh(t)}{dt} = P_x e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (10)$$

Так как акустические сопротивления среды за поршнем при метании поршня значительно меньше акустического сопротивления продуктов детонации ($\rho_1 c_1 / \rho_n c_n \ll 1$), то, пренебрегая вторым членом выражения (10) и решая дифференциальное уравнение, получаем зависимость:

$$V(t) = \frac{P_x \theta}{m} (1 - e^{-\frac{t}{\theta}}) + C, \quad (11)$$

где постоянная интегрирования $C = V_0$ – начальная скорость полета поршня в момент выхода ударной волны на свободную границу поршня.

Согласно условию Чепмена-Буге давление на фронте детонации равно:

$$P_H = \frac{\rho_0 D^2}{k + 1}, \quad (12)$$

где ρ_0 – начальная плотность ВВ.

Согласно [2] отношение давления на поршне к давлению продуктов детонации равно:

$$P_x / P_H = \left(\frac{3k - 1}{2k} \right)^{\frac{2k}{k-1}}, \quad (13)$$

Таким образом, давление на поршне определяется выражением:

$$P_x = \left(\frac{3k - 1}{2k} \right)^{\frac{2k}{k-1}} P_H, \quad (14)$$

Давление продуктов детонации у жесткой стенки определяется как:

$$P_X = \left(\frac{3k-1}{2k}\right)^{k-1} P_H \left(\frac{H}{D_i}\right)^k, \quad (15)$$

где t – время действия давления на стенку.

С учетом акустической жесткости поршня в момент выхода ударной волны на свободную поверхность, давление продуктов детонации ВВ на поршень будет определяться выражением:

$$P_X = \left(\frac{3k-1}{2k}\right)^{k-1} P_H \left[H/(D(H/D+t_0))\right], \quad (16)$$

где $t_0 = \delta_M / D_M$ – время прохождения ударной волны по поршню;

D_M – скорость ударной волны в поршне;

δ_M – толщина поршня.

$$D_M = \alpha + \lambda U_X, \quad (17)$$

U_X – массовая скорость поршня;

α, λ – коэффициенты ударного сжатия металла.

Следовательно, с учетом (17):

$$t_0 = \delta_M / \alpha + \lambda U_X, \quad (18)$$

В то же время скорость ударной волны в момент выхода на свободную поверхность поршня определяется соотношением:

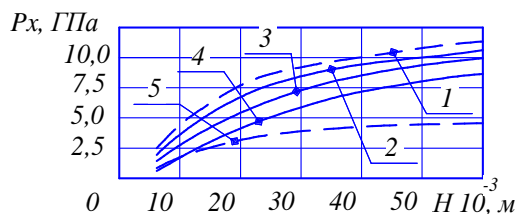
$$D_M = P_X / \rho_M U_X, \quad (19)$$

Таким образом, имеем систему четырех уравнений

$$\left. \begin{aligned} P_X &= \left(\frac{3k-1}{2k}\right)^{k-1} P_H \left[H/(D(H/D+t_0))\right]^k \\ D_M &= \alpha + \lambda U_X \\ t_0 &= \delta_M / \alpha + \lambda U_X \\ P_X &= \rho_M U_X (\alpha + \lambda U_X) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Значения P_X , U_X и D_M определяются в момент выхода ударной волны на свободную поверхность поршня.

Характерные зависимости P_X и U_X от высоты заряда для метания поршней разной толщины приведены на рис. 1 и 2.



1 - давление на абсолютно жесткой преграде;
2 - преграда 1мм (нержавеющая сталь);
3 - преграда 3мм (нержавеющая сталь);
4 - преграда 6мм (нержавеющая сталь);
5 - давление продуктов детонации.

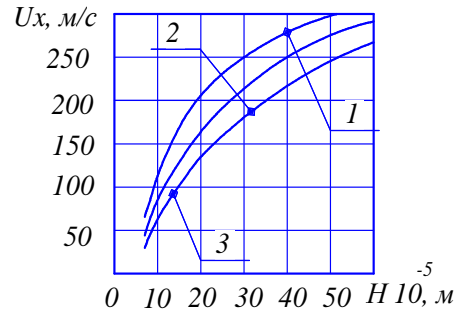
Рисунок 1 – Зависимость давления продуктов детонации ВВ на преграде в момент выхода ударной волны на свободную поверхность преграды от высоты заряда

При контакте свободной поверхности метаемого поршня с воздухом в момент выхода ударной волны на ее поверхность, эта поверхность вовлекается в движение со скоростью:

$$U_{zp} = 2U_X, \quad (21)$$

Поскольку в этот момент времени скорость поверхности поршня, находящегося в контакте с ВВ равна нулю, то, следовательно, начальная скорость поршня равна массовой скорости:

$$V_0 = U_X, \quad (22)$$



1 - преграда 1мм (нержавеющая сталь);
2 - преграда 3мм (нержавеющая сталь);
3 - преграда 6мм (нержавеющая сталь).

Рисунок 2 – Зависимость массовой скорости преграды в момент выхода ударной волны на свободную поверхность преграды от высоты заряда

Подставляя (22) в выражение (11) получим:

$$V(t) = \frac{P_X \theta}{m} (1 - e^{-t/\theta}) + U_X, \quad (23)$$

Значение t находится из экспериментального определения времени разгона поршня $t = t_{ИМП}$ до максимальной скорости, приняв, что $\theta = 1/3 t_{ИМП}$.

Для определения скорости полета поршня использовались электроконтактные датчики и частотомеры с точностью отсчета интервала времени 0,1 мкс. Производится одновременный запуск двух измерителей интервала времени. Остановка частотомера происходит независимо друг от друга в момент соприкосновения поршня с боковыми контактами. Измеряются два временных интервала t_1 и t_2 , определяющие среднюю скорость поршня на пути, равном базе датчика. Это исключает погрешность, вызываемую искривлением фронта детонации. Асбоцементное основание датчика и контакты, изготовленные из изолированных проводников, предотвращают преждевременное срабатывание датчиков из-за ионизации воздуха при скоростях полета свыше 1000 м/с и отсутствия кумулятивных струй между асбоцементным основанием и метаемой заготовкой. Скорость полета поршня в зависимости от пройденного пути определялась при установке заряда ВВ на высоте $0,5 \div 20$ мм от основания датчика. База датчиков при измерении скоростей от 1000 м/с до 2000 м/с – 2 мм, а свыше 2000 м/с – 4 мм. Одновременно измерялась скорость детонации ВВ.

По экспериментальным значениям средних скоростей, определенных на расстоянии равном базе датчика, устанавливаемых на различном удалении от метаемого поршня, построены зависимости ско-

рости в функции пути. Характерные зависимости $V(h)$ для поршня из стали, приведены на рис. 3.

По полученным зависимостям определялось время действия давления на пластину $t_{ИМП.} = \frac{h_{max}}{V_{cp.}}$.

Непосредственно $t_{ИМП.}$ и θ удобнее определять, построив зависимость $V(t)$ (рис. 4).

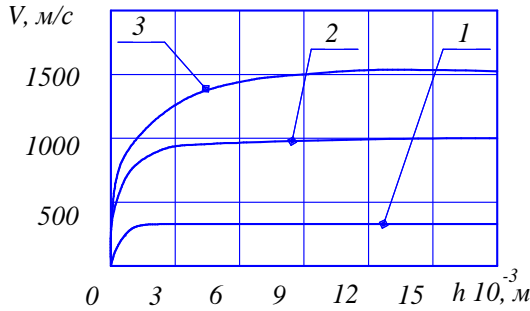


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости скорости полета пластин от пути

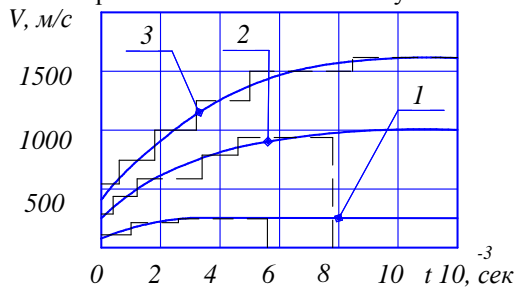
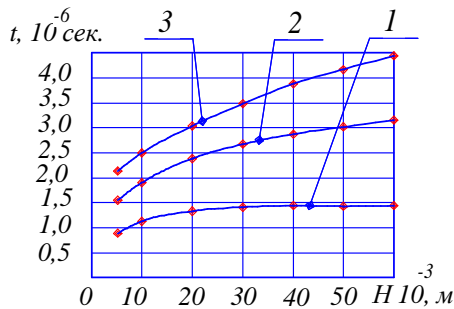


Рисунок 4 – Динамика полета пластин во времени

Построенные по экспериментальным данным кривые $V(t)$ аппроксимируются выражением:

$$V(t) = \frac{P_x \theta}{m} (1 - e^{-\frac{t}{\theta}}) + V_0, \quad (24)$$

Значение θ определялись по экспериментальным значениям $t_{ИМП.}$. На рис. 5 приведены постоянные времена спада давления стальных пластин разных толщин.



1 - преграда 1мм (нержавеющая сталь);
2 - преграда 3мм (нержавеющая сталь);
3 - преграда 6мм (нержавеющая сталь).

Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости постоянной спада давления продуктов ВВ от высоты заряда

Введем безмерную переменную – коэффициент спада давления φ :

$$\varphi = \theta \frac{\lambda_M D_M}{H_{BB}} \left(\frac{D_M}{d} \right)^{\frac{R-4K^2}{K^2}} K^{R+K} \sqrt{\frac{\delta_M}{\delta_1}}, \quad (25)$$

где λ_M – коэффициент ударной адиабаты метаемого поршня;

δ_M – толщина метаемого поршня;

δ_1 – толщина передающего элемента.



Рисунок 6 – Коэффициент спада давления продуктов детонации ВВ в функции от отношения массы ВВ к массе поршня (точки - экспериментальные значения)

Значение коэффициентов спада давления для различных зарядов и металлов в безразмерных координатах аппроксимируются с точностью 95 % следующим выражением (рис. 6):

$$\varphi = \frac{K-1}{K} R^{\frac{3}{K+1}},$$

тогда

$$\theta = \frac{H}{\lambda D_M} \frac{K-1}{K} R^{\frac{3}{K+1}} \left(\frac{d}{D_M} \right)^{\frac{R-4K^2}{K^2}} \left(\frac{\delta_1}{\delta_M} \right)^{\frac{1}{R+K}}, \quad (26)$$

Таким образом, скорость полета поршня под действием изменяющегося давления можно определить следующим выражением:

$$V(t) = \frac{dh}{dt} = \frac{P_x \theta}{m} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right) + U_x, \quad (27)$$

где θ – определяется выражением (26).

Проинтегрировав выражение (27), имеем перемещение поршня под действием изменяющегося давления:

$$h(t) = \frac{P_x \theta_{(R)}}{m} \left[\theta_{(R)} \left(e^{-\frac{t}{\theta_{(R)}}} - 1 \right) + t \right] + U_x t, \quad (28)$$

Характерные зависимости максимальной скорости полета стальных поршней в зависимости от высоты заряда ВВ, рассчитанные по выражению (28), представлены на рис. 7 (точки – экспериментальные значения). Из рисунка видно, что точность определения V_{max} в области $0,1 < R < 9$ не ниже 92%.

В таблиці 1 приведені значення максимальної швидкості польоту 3-х мм сталюгого поршня в залежності від висоти заряду аммоніта 6ЖВ: розраховані за рівнянням Гарні (6), за виразом (27) і експериментальні значення.

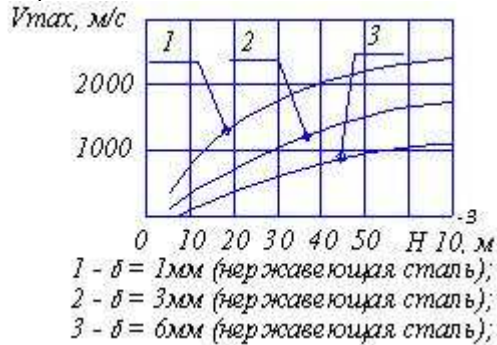


Рисунок 7 – Залежність максимальної швидкості поршня від висоти заряду ВВ

Таблиця 1 – Максимальна швидкість польоту поршня від висоти заряду ВВ

Н _{ВВ}	Виразення (6), м/с	Виразення (27), м/с	Експеримент, м/с
Нержавеюча сталь			
$\delta = 3 \text{ мм}, H = 30 \text{ мм}, R = 1,1$			
6	140,6	127,0	130,0
10	315,6	304,4	300,0
20	719,0	720,6	715,0
30	1048,0	1023,0	1030,0
40	1314,0	1256,6	1260,0
50	1529,0	1461,8	1460,0
60	1721,0	1630,7	1640,0

Из таблиці видно, що розраховані максимальні швидкості метання поршня добре співпадають з граничною швидкістю Гарні і експериментом.

На рис. 8 приведені характерні криві динаміки польоту сталюгого, побудовані за виразами (6), (27) і експериментальними даними.

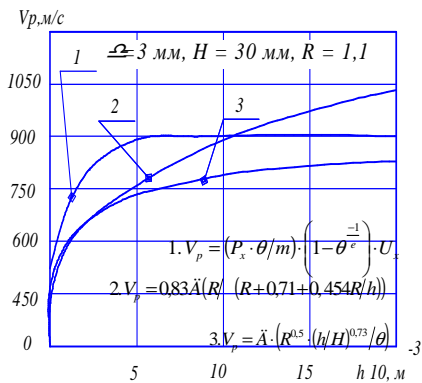


Рисунок 8 – Теоретичні і експериментальні залежності швидкості польоту пластин від шляху

На рисунку видно, що вирази, побудовані за першими двома залежностями, хоча і точно визначають максимальну швидкість метання пластин, дають значительні погрешности на ділянках розгону пластин. На зазорі, рівному товщині метаемого поршня, звичайно застосовується при сварці вибухом, погрешність становить 15÷30% і 30÷35% відповідно. При зменшенні зазору погрешність збільшується до 50%.

Таким чином, при визначенні швидкості польоту поршня необхідно враховувати стиснення метаемого поршня, що дозволяє, використовуючи вираз (27), визначити швидкість польоту поршня на ділянці його прискорення.

Для більш точного визначення зазору, на якому набирається максимальна швидкість польоту поршня, можна використовувати залежність відносного зазору h' від відношення маси ВВ до маси метаемого поршня.

При цьому зазорі, на якому поршень отримує максимальну швидкість, визначається виразом:

$$h = h' \lambda_M \frac{\delta_M}{\delta_I} \quad (29)$$

де δ_M – товщина метаемого поршня;
 δ_I – товщина передаючого елемента.

ВИВОДИ. Розроблена математична і аналітична моделі, а також методика розрахунку технологічних параметрів метання поршня вибухом ВВ при дробленні відходів твердих сплавів, що дозволить вовлечати відходи в повторний технологічний процес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Годунов С.К., Дерибас А.А., Захаренко И.Д., Мали В.И. Исследование вязкости металлов при высокоскоростных соударениях // Физика горения и взрыва. – 1971. – № 1. – С. 135 – 141.
2. Высокоскоростная деформация металлов / В.И. Беляев, В.Н. Ковалевский, Г.В. Смирнов и др. – М.: Наука и техника, 1976. – 224 с.
3. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Мтанюкович и др. – М.: Наука, 1965. – 179 с.
4. Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Иностранная литература. 1955. – 444 с.
5. Пашков П.О. Пластичность и разрушение металлов. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 260 с.
6. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1972. – 190 с.

REFERENCE

1. Godunov S.K., Deribas A.A., Zaharenko I.D., Mali V.I. Research of viscosity of metals at high-speed impacts // Physics of burning and explosion. – 1971. – № 1. – P. 135 – 141 [in Russian].
2. High-speed deformation of metals / V.I. Beljaev, V.N. Kovalevsky, G.V. Smirnov, etc. – M.: The Science and technics. – 1976. – 224 p. [in Russian].
3. Physics of explosion / F.A. Baum, L.P. Orlenko, K.P. Mtanjukovich, etc. – M.: Science, 1965. – 179 p. [in Russian].
4. Bridjmen P.V. Research of the big plastic deformations and rupture. – M.: The foreign literature. 1955. – 444 p. [in Russian].
5. Pashkov P.O. Plasticity and destruction of metals. – L.: Sudpromgiz, 1960. – 260 p. [in Russian].
6. Deribas A.A. Physics of hardening and welding by explosion. – Novosibirsk: Science, 1972. – 190 p. [in Russian].

Стаття надійшла 10.12.10

Рекомендована до друку д.т.н., проф. Воробйовим В.В.