

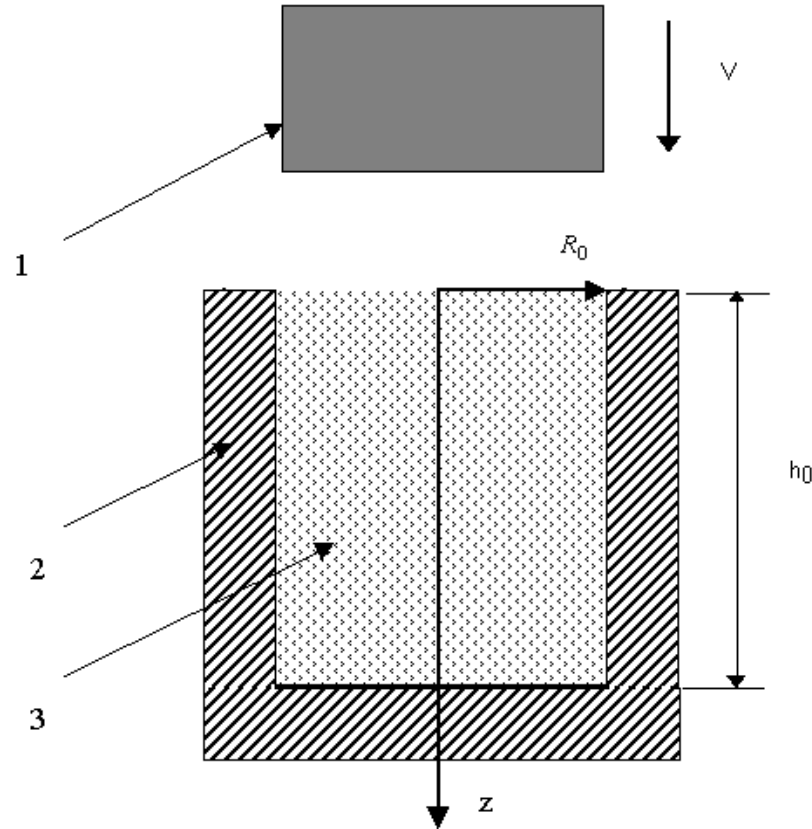
# **Модель процесса динамического прессования порошка**

**Поляков А. П.**

**ИМАШ УрО РАН**

Процессы динамического прессования позволяют отказаться от использования крупногабаритного оборудования, повысить производительность процесса прессования. При разработке технологических параметров указанных процессов следует обеспечить режим нагружения, позволяющий получить заготовку с заданными свойствами. Для этого необходимо исследовать влияние на процесс нагружения размеров и исходной плотности заготовки, давления на фронте ударной волны, скорости инструмента, повышения предела текучести материала в процессе деформации, трения заготовки об инструмент и т.д. Динамическое прессование порошков исследовано многими авторами. Однако известные решения не дают ответа на вопрос о распределении остаточной пористости по высоте заготовки, оно полагается равномерным. Это предположение может существенно повлиять на результат если необходимо получить заготовку с остаточной пористостью порядка 0,1...0,15 и выше. Не рассматривается влияние трения на процесс уплотнения.

# Ударное прессование пористой заготовки



## Основные допущения

- В исходном состоянии среда однородна, имеет постоянную плотность
- Пластические деформации локализованы на фронте ударной волны
- Время протекания процесса считаем малым, термодинамические эффекты не учитываются

$$\rho \{v - \dot{\varphi}(t)\} = -\rho_0 \dot{\varphi}(t)$$

$$\sigma_{zz} - \sigma_{zz}(\rho_0) = \rho \{v - \dot{\varphi}(t)\} v = -\rho_0 \dot{\varphi}(t) v$$

$$\sigma_{ji,j} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v_{i,j} v_j \quad \sigma_{zz} = \rho_0 \frac{\partial v_z}{\partial t} z - p(t)$$

$$\sigma_{zz} - \sigma_{zz}(\rho_0) = -v^2 \frac{\rho_0}{(1 - \rho_0 / \rho)}$$

$z = \varphi(t)$  - координаты точек, принадлежащих ударной волне

$$\left[ \frac{M_u}{(1 - \theta_0) S \rho_\kappa} + \varphi(t) \right] v' = -\dot{\varphi}(t) v + \frac{\sigma_{zz}(\theta_0)}{(1 - \theta_0) \rho_\kappa} \quad \frac{M_u}{(1 - \theta_0) \rho_\kappa S} v' = -\dot{\varphi}(t) v - \varphi(t) v' + \frac{\sigma_{zz}(\theta_0)}{(1 - \theta_0) \rho_\kappa} = -\{\varphi(t) v\}' + \frac{\sigma_{zz}(\theta_0)}{(1 - \theta_0) \rho_\kappa}$$

обозначим  $A = \frac{M_u}{(1 - \theta_0) \rho_\kappa S}$   $B = \frac{\sigma_{zz}(\theta_0)}{(1 - \theta_0) \rho_\kappa}$  тогда  $v = \frac{Av_0 + Bt}{A + \varphi(t)}$

$\varphi(t) = A \frac{\beta \tilde{t}}{v_0 - \beta \tilde{t}}$   $\varphi'(t) = -B \frac{\beta}{(v_0 - \beta \tilde{t})^2}$  - закон движения ударной волны

$\rho = \rho_0 \frac{\varphi'(0)(v_0)^2}{\varphi'(0)(v_0)^2 - \left(1 + B \frac{\varphi(t)}{(A + \varphi(t))\varphi'(0)v_0}\right) \left(\frac{Av_0}{A + \varphi(t)}\right)^3}$  - распределение плотности

Отраженная волна

Учет сил трения

Неравномерная начальная пористость

$\sigma_{zz}(\rho_{om}) = 2\sigma_{zz}(\rho_{y0}) - \sigma_{zz}(\rho_0)$

$\sigma_{rz} = -f\tau_s^*(r/R)$

$\sigma_{zz} - \frac{2f}{R} \int_0^z \tau_s^* dz = \frac{\partial v_z}{\partial t} \int_0^z \rho dz - p(t)$

$\frac{\Delta v_0}{\Delta h_0} \langle \varphi_0'(t) \rangle = \frac{\Delta v_1}{\Delta h_1} \langle \varphi_1'(t) \rangle$

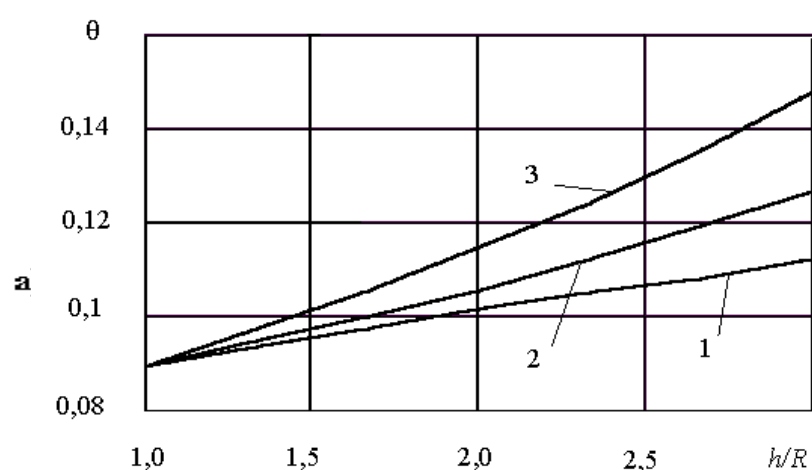
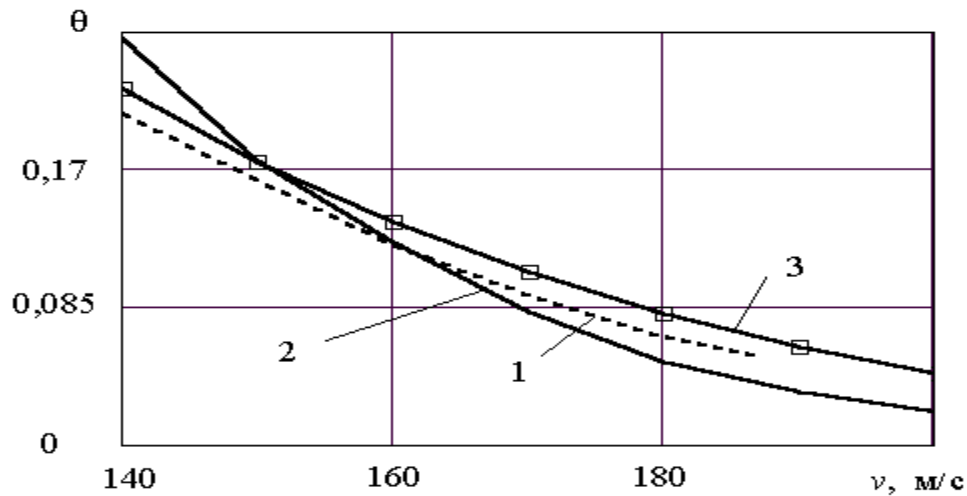
$\sigma_{zz} - \frac{2f}{R} \int_0^z \tau_s^* dz = \rho_0 \frac{\partial v_z}{\partial t} z - p(t)$

$A^* v' = -\{\varphi(t)v\}' + B^*$

$\sigma_{zz} - \sigma_{zz}(\rho_0^*) = -\rho \varphi'(t)v = -\rho_0^* \{v + \varphi'(t)\}v$

$B^* = B - \frac{2f}{R} \int_0^z \tau_s^* dz / \{(1 - \theta_0) \rho_\kappa\}$

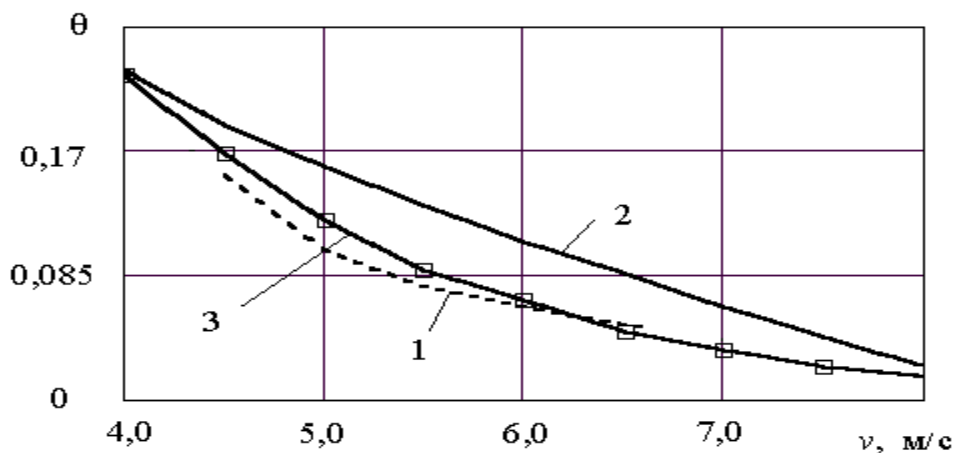
$A^* = A - (\Delta\rho / \rho_0) \varphi(t), \quad \Delta\rho = \langle \rho \rangle - \rho_0$



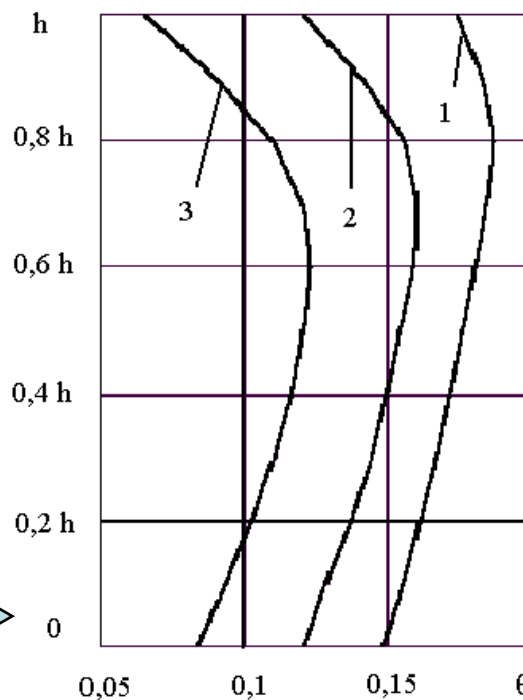
Остаточная пористость заготовки в зависимости от отношения  $h_0/R$  и коэффициента трения.



1 -  $f = 0$  ; 2 -  $f = 0,1$ ; 3 -  $f = 0,2$



б)



$v_0 = 180 \text{ м/с}$


$v_0 = 210 \text{ м/с}$

$v_0 = 240 \text{ м/с}$

Сравнение результатов расчета и эксперимента при средней (а) и малой (б) начальной скорости удара.

Кривые 1,2 – данные Г.М. Ждановича (а) и Г.Г. Сердюка (б).

1 - эксперимент; 2 – расчет; 3 – расчет автора.

распределение остаточной пористости по высоте 

## Выводы

Построена математическая модель динамического прессования порошковой заготовки в цилиндрическом контейнере, позволяющая в зависимости от начальной пористости, размеров заготовки, массы и скорости инструмента, сил трения определять величину и характер распределения остаточной пористости. При динамическом прессовании массивным бойком силы трения слабо меняют характер изменения плотности по высоте, приводя только к увеличению остаточной пористости. Различие в величине остаточной пористости зависит от соотношения размеров заготовки и трения. При прессовании с высокими скоростями пористость распределяется по высоте неравномерно. С увеличением начальной скорости инструмента зона достижения минимальной остаточной пористости из области контакта заготовки с донной частью контейнера “смещается” в область контакта с инструментом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. B. M. Butcher, M. M. Carroll and A. C. Holt, *J. Appl. Phys.* **45**, 3864-3875 (1974).
2. G. M. Zhdanovich, *Theory of Pressing of Metal Powders* (Foreign Technology Division, Wright-Patterson Air Force, OH, 1971), p. 262.
3. J. Rojek, S. Nosewicz, K. Jurczak, M. Chmielewski, K. Bochenek, K. Pietrzak, *Comp. Part. Mech.* **3**, 513–524 (2016).
4. V. V. Ivanov and A. A. Nozdrin, *Technical Physics Letters*, **23**, 527-528 (1997).
5. S. Hørlück and P. Dimon, *Physical Review E* **60**, 671-686 (1999).
6. A. D. Resnyansky and N. K. Bourne, *J. Appl. Phys.* **95**, 1760-1769 (2004).
7. G. Sh. Boltachev, A. S. Kaygorodov and N. B. Volkov, *Acta Mechanica* **207**, 223-234 (2009).
8. O. V. Roman, V. T. Shmuradko and G. D. Tarasov, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, **79**, 817-823 (2006).
9. W. K. Nowacki, *Stress Waves in Non-Elastic Solids* (Pergamon Press, Oxford, U.K, 1978), p. 182.
10. A. P. Polyakov, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals* **46**, 18-25 (2005).