

УДК 621.762.53

Брагина Я. Ю.  
Лаптев А. М.**МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРЯМЫМ НАГРЕВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ**

Производство изделий из металлических и керамических порошков занимает важное место в современном машиностроении, приборостроении и других отраслях промышленности [1, 2]. В связи с ростом спроса на изделия из порошковых материалов увеличился интерес к разработкам новых и усовершенствованию уже известных технологий для их изготовления. В настоящее время известно несколько таких технологий, одной из которых является горячее прессование порошковых материалов с нагревом электрическим током. Горячее прессование порошковых материалов с нагревом электрическим током является сложным технологическим процессом, при котором одновременно протекают нестационарные электрические, тепловые и механические процессы, которые оказывают существенное влияние друг на друга. Применение прямого нагрева порошковых заготовок и инструмента электрическим током позволяет существенно сократить время процесса горячего прессования, полностью устранить пористость и сохранить исходную мелкозернистую структуру в металлических и керамических порошковых материалах. Важной составляющей при разработке данного процесса являются теоретические исследования, в частности компьютерное моделирование, в результате которого прогнозируются и разрабатываются технологические режимы изготовления материалов и изделий, способствующие улучшению качества продукции без увеличения затрат [3]. Моделирование данного процесса является нестационарной задачей мультифизики с переменными, взаимно влияющими параметрами [4]. Поэтому комплексное моделирование является ключевым фактором дальнейшего развития и практического применения горячего прессования порошковых изделий с нагревом пульсирующим электрическим током [5].

Целью работы является разработать методику моделирования процессов горячего прессования порошковых материалов с прямым нагревом электрическим током, учитывающую взаимодействия механического, электрического и теплового полей при прессовании.

Теоретические исследования процесса горячего прессования порошковых материалов с прямым нагревом электрическим током выполнены с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе ABAQUS [6]. Данная программа позволяет решать задачи мультифизики с учетом разработанной нами математической модели (SIMULIA, Dassault Systemes, Провиденс, США), в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Однако данный комплекс не предусматривает решение связанной электро-термо-механической задачи. Вместе с тем, он позволяет решать связанные электротермические и термомеханические задачи. Поэтому были разработаны инновационные методики для моделирования процессов прессования керамических и тугоплавких порошков в матрице в установках горячего прессования с прямым нагревом электрическим током.

В настоящей работе рассмотрен осесимметричный случай, который соответствует геометрии изучаемых изделий и оснастки. Для расчета распределения температуры использовалось уравнение Фурье с учетом внутреннего источника тепла, возникающего при прохождении тока (закон Джоуля):

$$\rho_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q}_e,$$

где  $\dot{q}_e$  – мощность единицы объема внутреннего источника тепла.

Распределение тока определялось по закону Кирхгоффа:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r i_r)}{\partial r} + \frac{\partial i_z}{\partial z} = 0,$$

где  $i_r, i_z$  – плотность тока в направлениях  $r$  и  $z$ , соответственно.

Теплопередача излучением от свободных поверхностей в окружающую среду определялась по закону Стефана-Больцмана:

$$\dot{q}_r = \sigma_s \varepsilon (T_s^4 - T_a^4),$$

где  $\dot{q}_r$  – удельный тепловой поток при радиации;

$T_s, T_a$  – температура поверхности тела и окружающей среды;

$\sigma_s$  – постоянная Больцмана равная  $5,669 \cdot 10^{-14}$  Вт/(мм $\cdot$ К $^4$ );

$\varepsilon$  – коэффициент излучательной способности, изменяющийся в пределах от 0 до 1.

Отвод тепла вследствие контакта защитной проставки с охлаждаемым водной электродом моделировался как теплопередача конвекцией по формуле:

$$\dot{q}_{conv} = h \cdot (T_p - T_w),$$

где  $\dot{q}_{conv}, h$  – удельный тепловой поток и коэффициент конвекции;

$T_p, T_w$  – температура проставки и охлаждающей среды, соответственно.

Поток тепла через единицу контактной поверхности задавался формулой:

$$q_c = \lambda_c \cdot (T_1 - T_2),$$

где  $\Delta T = T_1 - T_2$  – перепад температуры на контактной поверхности;

$\lambda_c$  – теплопроводность единицы контактной поверхности.

Плотность электрического тока, проходящего через поверхность контакта, описывается соотношением:

$$j_c = \sigma_c (U_1 - U_2),$$

где  $\Delta U = U_1 - U_2$  перепад напряжения на поверхности контакта;

$\sigma_c$  – электропроводность единицы площади контактной поверхности.

Соответственно, мощность выделения тепла на единице контактной поверхности определялась по формуле:

$$w_c = \sigma_c U^2.$$

Упругая деформация инструмента описывалась обобщенным законом Гука:

$$T_\varepsilon^e = T_{\sigma_0} / 3K + D_\sigma / 2G,$$

где  $T_\varepsilon^e$  – тензор упругих деформаций;

$T_{\sigma_0}$  и  $D_\sigma$  – гидростатическая часть тензора напряжений и девиатор тензора напряжений;

$K$  и  $G$  – величины модуля упругости и модуля сдвига, связанные с модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$  формулами:

$$K = E / 3(1 - 2\nu),$$

$$G = E / 2(1 + \nu).$$

На первом этапе расчета строится геометрическая модель инструмента и прессуемого образца. Затем вводятся свойства материалов, из которых они изготовлены. После этого задаются нагрузки, начальные и граничные условия, определяются контактные взаимодействия. Затем создается конечно-элементная модель системы, т. е. все составляющие, оснастка и заготовка разбиваются на четырехугольные конечные элементы. Следующим этапом является решение связанной электротермической задачи. В результате определяются

поля электрических напряжений, распределение плотности электрического тока и температуры. Полученное поле температуры может быть использовано для решения соответствующей термомеханической задачи. В результате, определяется распределение деформаций и напряжений в оснастке и изделии для исходной геометрии системы.

На рис. 1 представлена блок-схема процесса моделирования по данной методике.

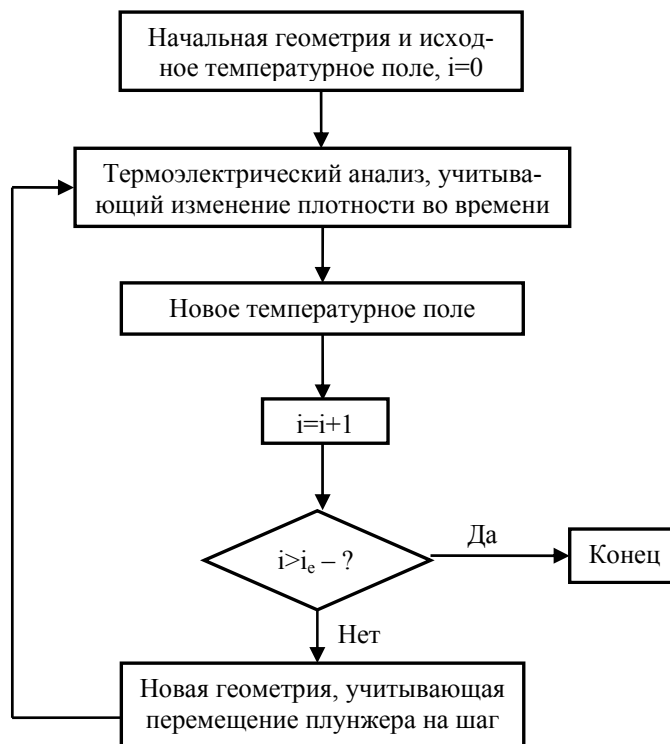


Рис. 1. Блок-схема моделирования горячего прессования с прямым нагревом электрическим током порошков в матрице

В случае моделирования горячего прессования порошка в матрице, после решения электротермической задачи полученное температурное поле экспортируется в новую геометрическую модель, в которой пуансоны смещены на некоторую заданную величину вглубь матрицы. Естественно, что при этом изменяется плотность порошкового материала. Поэтому в новой модели свойства проводимости порошкового тела переопределяются с учетом ее изменения и с помощью формулы [7]:

$$\frac{k_p}{k_s} = \left( \frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0} \right)^{3/2 \cdot (1 - \rho_0)},$$

где  $k_p$  – удельная проводимость (термическая или электрическая) пористого тела с относительной плотностью  $\rho$ ;

$k_s$  – удельная проводимость (термическая или электрическая) соответствующего беспористого тела ( $\rho=1$ );

$\rho_0$  – начальная плотность засыпки порошка.

Для новой модели решается новая электротермическая задача с возможным изменением граничных условий и определяется новое распределение температуры. Процесс моделирования повторяется пошагово до тех пор, пока не будет достигнута заданная конечная плотность  $\rho$ , обычно равная 1.

## ВЫВОДЫ

В настоящей работе разработана новая математическая модель для электрического, термического и механического анализа процесса горячего прессования порошковых материалов с прямым нагревом электрическим током, учитывающая уменьшение пористости порошковых заготовок и увеличение проводимости порошка при прессовании. Создана новая методика моделирования процесса горячего прессования порошковых материалов с прямым нагревом электрическим током, учитывающая взаимодействие трех основных полей: механического, электрического и теплового. В частности, было учтено изменение конфигурации системы инструмент-заготовка при прессовании, уменьшение пористости заготовки и увеличение её проводимости. Также разработана методика теоретического анализа и составлен алгоритм для моделирования процесса горячего прессования порошковых материалов с прямым нагревом электрическим током в среде программного комплекса ABAQUS путем последовательного решения связанных термоэлектрических и термомеханических задач.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков С. С. *Металлокерамические детали в машиностроении*. / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников – Л. : Машиностроение, 1975. – 232 с.
2. Вязников Н. Ф. *Применение порошковой металлургии в промышленности*. / Н. Ф. Вязников, С. С. Ермаков – М. : Гос. научно-технич. издат. машиностроит. литературы, 1960. – 188 с.
3. Лаптев А. М. *Моделирование горячего прессования порошковых материалов с нагревом электрическим током. Современное состояние и пути развития* / А. М. Лаптев, Я. Ю. Ткаченко // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні* : зб. наук. праць : ВНУ ім. В. Даля : Луганск, 2010. – С. 54–60.
4. *Моделирование температурного поля при прямом электрическом нагреве порошковых материалов*. / А. В. Пилипченко, В. Я. Белоусов, А. И. Цитрин, А. Н. Хомченко // *Порошковая металлургия*, 1987. – № 3. – С. 26–29.
5. Kessel H. U. *Sintered materials on the way to production by means of modern SPS technologies* / H. U. Kessel // *Beichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*. – 2009. – Vol. 86. – N 10. – P. 145–152.
6. *ABAQUS 6.9 Theory manual* // Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, Rhode Island : Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, 2009. – 1168 p.
7. Argento C. *Modeling the effective thermal conductivity of random packing of spheres through densification*. / C. Argento, D. Bouvard // *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1996. – Vol. 9. – N 7. – P. 1343–1350.

## REFERENCES

1. Ermakov S. S. *Metallokeramicheskie detali v mashinostroenii* / S. S. Ermakov, N. F. Vjaznikov – L. : Mashinostroenie, 1975. – 232 s.
2. Vjaznikov N. F. *Primenenie poroshkovej metallurgii v promyshlennosti* / N. F. Vjaznikov, S. S. Ermakov – M. : Gos. nauchno-tehnich. izdat. mashinostroit. literatury, 1960. – 188 s.
3. Laptev A. M. *Modelirovanie gorjachego pressovaniya poroshkovykh materialov s nagrevom elektricheskim tokom. Sovremennoe sostojanie i puti razvitija* / A. M. Laptev, I. Ju. Tkachenko // *Resursozberigajuchi tehnologii virobnictva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni* : zb. nauk. prac : VNU im. V. Dalja : Lu-gansk, 2010. – S. 54–60.
4. *Modelirovanie temperaturnogo polja pri prjatom jelektricheskom nagreve poroshkovykh materialov*. / A. V. Pilipchenko, V. Ja. Belousov, A. I. Citrin, A. N. Homchenko // *Poroshkovaja metallurgija*, 1987. – № 3. – S. 26–29.
5. Kessel H. U. *Sintered materials on the way to production by means of modern SPS technologies* / H. U. Kessel // *Beichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*. – 2009. – Vol. 86, N 10. – P. 145–152.
6. *ABAQUS 6.9 Theory manual* // Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, Rhode Island : Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, 2009. – 1168 p.
7. Argento C. *Modeling the effective thermal conductivity of random packing of spheres through densification*. / C. Argento, D. Bouvard // *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1996. – Vol. 9. – N 7. – P. 1343–1350.

Брагина Я. Ю. – ассистент каф. МПФ ДГМА

Лаптев А. М. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. МПФ ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: [tkachenko1110@mail.ru](mailto:tkachenko1110@mail.ru)