

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ТИТАНСОДЕРЖАЮЩЕЙ ШИХТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2019 г. А.Г. Залазинский, А.В. Нестеренко, И.М. Березин

Институт машиноведения (ИМАШ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Уральский федеральный университет (УрФУ)

им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 14.01.19 г., доработана 11.04.19 г., подписана в печать 08.05.19 г.

Исследована зависимость пористости порошкового материала на основе губчатого титана от коэффициента напряженного состояния в процессе пластического деформирования с преобладающим действием всестороннего сжатия. На основе результатов, полученных в предшествующих работах, на плоскости  $\sigma-T$  построено семейство кривых текучести с варьируемой пористостью. Условие текучести порошкового материала основано на модели пластического течения *Modified Drucker-Prager Cap model*. На графике геометрической интерпретации принятого условия текучести нанесены прямые, соответствующие различным значениям коэффициента напряженного состояния  $k = \sigma/T$ , где  $\sigma$  – среднее гидростатическое напряжение,  $T$  – интенсивность касательных напряжений. Для формулировки связи пористости ( $\theta$ , %), среднего нормального напряжения ( $\bar{\sigma}$ ), выраженного в безразмерной форме, и коэффициента напряженного состояния ( $k$ ) использованы точки пересечения семейства кривых, соответствующих образующим поверхностям текучести на плоскости  $\sigma-T$ , и радиальных прямых. В результате получено уравнение вида  $\theta = \theta(\bar{\sigma}, k)$ . Для проверки адекватности указанного соотношения выполнена экспериментальная часть исследования. Предварительно спрессованные при давлении 1000 МПа и температуре 325 °С порошковые заготовки подвергались электроэрозионной резке вдоль осевого сечения для получения плоских образцов (темплетов). На поверхности темплетов выбрано несколько характерных участков для определения локальной поверхностной пористости методом количественной металлографии. Дополнительно определялось напряженно-деформированное состояние в представительных участках путем численного моделирования. В зонах осевого сечения, соответствующих исследуемым областям, рассчитаны значения объемной пластической деформации, интенсивности касательных напряжений и среднего нормального напряжения. Показано, что коэффициент напряженного состояния при его варьировании в достаточно широком диапазоне ( $k = -10 \dots -0,86$ ) несущественно влияет на величину пористости.

**Ключевые слова:** компактирование, уплотнение, пористость, порошок, моделирование, модель текучести, коэффициент напряженного состояния.

**Залазинский А.Г.** – докт. техн. наук, гл. науч. сотрудник лаборатории системного моделирования ИМАШ УрО РАН (620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34). E-mail: agz@imach.uran.ru.

**Нестеренко А.В.** – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории микромеханики материалов ИМАШ УрО РАН. E-mail: nav@imach.uran.ru.

**Березин И.М.** – канд. техн. наук, науч. сотрудник лаборатории системного моделирования ИМАШ УрО РАН; ст. науч. сотрудник УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: berezin@imach.uran.ru.

**Для цитирования:** Залазинский А.Г., Нестеренко А.В., Березин И.М. Исследование процесса уплотнения титаносодержащей шихты экспериментально-аналитическим методом. *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2019. No. 4. С. 16–22. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-4-16-22.

*Zalazinskii A.G., Nesterenko A.V., Berezin I.M.*

### Study of the process of titanium-containing furnace charging material compaction by an experimental-analytical method

The study covers the dependence of spongy titanium-based powder material porosity on the stress state coefficient during plastic deformation with the prevailing effect of all-round compression. Based on the results obtained in previous papers, an assemblage of yield curves with varying porosity is constructed on the  $\sigma-T$  plane. The yielding condition of the powder material is based on the *Modified Drucker-Prager Cap model*. The graph of geometrical interpretation of the accepted yielding condition contains straight lines corresponding to different values of the stress state coefficient  $k = \sigma/T$  where  $\sigma$  is the average hydrostatic stress, and  $T$  is the shear stress

intensity. In order to formulate the relationship of porosity ( $\theta$ , %), average normal stress ( $\bar{\sigma}$ ) expressed in the nondimensional form, and the stress state coefficient ( $k$ ), intersection points of the yield curve assemblage corresponding to yield surface generatrices on the  $\sigma$ – $T$  plane and radial straight lines were used. As a result, an equation of the  $\theta = \theta(\bar{\sigma}, k)$  form was obtained. The experimental part of the study was performed in order to test the adequacy of this ratio. Powder blanks pre-compacted at a pressure of 1000 MPa and a temperature of 325 °C were subjected to electrical discharge sawing along the axial section to obtain flat samples (templates). Several characteristic areas were selected on the surface of templates to determine local surface porosity using quantitative metallography. The stress-strain state in representative areas was additionally determined by numerical simulation. The calculated values of the volumetric plastic strain, shear stress intensity and average normal stress were determined in axial section zones corresponding to the studied areas. It is shown that the stress state coefficient varying within a sufficiently wide range ( $k = -10 \dots -0.86$ ) does not affect significantly the porosity value.

**Keywords:** compaction, compression, porosity, powder, simulation, yield model, stress state coefficient.

**Zalazinskii A.G.** – Dr. Sci. (Tech.), Leading researcher, Laboratory of system simulation, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS) (620049, Russia, Ekaterinburg, Komsomolskaya str., 34). E-mail: agz@imach.uran.ru

**Nesterenko A.V.** – Cand. Sci. (Tech.), Senior researcher, Laboratory of material micromechanics, IES UB RAS. E-mail: nav@imach.uran.ru.

**Berezin I.M.** – Cand. Sci. (Tech.), Researcher, Laboratory of system simulation, IES UB RAS; Senior researcher, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. E-mail: berezin@imach.uran.ru.

**Citation:** Zalazinskii A.G., Nesterenko A.V., Berezin I.M. Study of the process of titanium-containing furnace charging material compaction by an experimental-analytical method. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 4. P. 16–22 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-4-16-22.

## Введение

Процессы уплотнения порошкообразных металлических материалов характеризуются не только неравномерным распределением пор в объеме деформируемой заготовки, но и направленным характером строения пористого пространства. В результате технологической наследственности процессов пластической обработки физико-механические и эксплуатационные свойства заготовок существенно зависят от истории нагружения и схемы напряженно-деформированного состояния уплотняемого материала. При этом механизм закрытия макроскопических дефектов в виде пор может быть основан, в том числе, на технологии обработки давлением, включающей многоступенчатую пластическую деформацию порошкового материала с рациональным уровнем нормальных и сдвигающих напряжений.

В связи с этим решение проблемы повышения плотности и равномерности распределения свойств заготовок из некомпактных материалов следует ожидать на основе комплексного анализа влияния напряженно-деформированного состояния на структуру и физико-механические свойства полученных заготовок. Научное обоснование и поиск рациональных технологических параметров пластического деформирования порошковых заготовок являются актуальными задачами.

Цель работы — исследование уплотняемости порошкового материала на основе губчатого титана в зависимости от условий напряженного состояния в процессе пластического деформирования.

## Материал и метод исследования

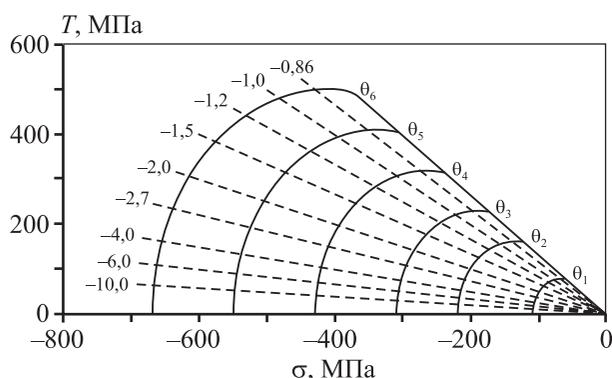
В качестве материала для исследования использован отсев губчатого титана марки ТГ-ОП-1 фракцией –5+2 мм после обратимой термоводородной обработки [1]. Частицы губчатого титана не подвергались дополнительной механической обработке (просеиванию, вторичному дроблению, очистке и др.).

Для моделирования процессов пластического деформирования порошкообразных материалов применяют два основных подхода. Дискретный подход базируется на модельных представлениях о внутреннем строении порошкового материала [2–16]. В частности, авторами [16] рассматривается контактное взаимодействие массива сферических частиц друг с другом. Изучение механики деформации предложенных моделей позволяет определить связь между давлением прессования, величиной контактных площадок между частицами и пористостью материала. Использование дискретного подхода требует предположения о стати-

стической однородности распределения свойств в материале, а полученные соотношения не учитывают многих особенностей пластического течения и малоприспособны для описания процессов уплотнения в условиях сложного напряженно-деформированного состояния.

Второй подход для изучения процессов пластического деформирования порошковых и пористых материалов основан на континуальных представлениях [17, 18]. Материал рассматривается на макроуровне как сплошная, пластически-сжимаемая среда. Для оценки перехода материала из упругого состояния к предельному напряженному (текучести) необходимо знать определяющие такой переход условия. С этой целью используются условия пластического течения, многие из которых являются развитием механики грунтов. Под действием гидростатического давления уплотняемые материалы приобретают необратимые деформации объема. Формулировку различных моделей пластического нагружения можно найти в работах [19–28].

В данной работе для описания пластического течения порошкового материала использовано условие текучести *Modified Drucker–Prager Cap model* [29–31]. На рис. 1 показана геометрическая интерпретация принятого условия пластического течения в виде семейства кривых текучести порошкового материала с различной пористостью ( $\theta$ ) на плоскости  $\sigma$ – $T$  ( $\sigma$  — среднее нормальное напряжение,  $T$  — интенсивность касательных напряжений). Прямые соответствуют конкретным значениям коэффициента напряженного состоя-



**Рис. 1.** Кривые текучести модели *Modified Drucker–Prager Cap model* для титановой губки на плоскости  $\sigma$ – $T$

$\theta_1 = 14,4 \%$ ,  $\theta_2 = 5,6 \%$ ,  $\theta_3 = 2,9 \%$ ,  $\theta_4 = 1,3 \%$ ,  $\theta_5 = 0,4 \%$ ,  $\theta_6 = 0,1 \%$   
Радиальные прямые соответствуют значениям  $k$ , изменяющимся в диапазоне  $-10 \dots -0,86$

ния  $k = \sigma/T$  при уплотнении порошка. Диапазон изменения коэффициента  $k$  варьировался от  $-10$  до  $-0,86$  (при  $k > 0$  преобладают растягивающие напряжения, а при  $k < 0$  — сжимающие).

### Определение зависимости пористости порошкового материала от напряженного состояния при деформации сжатия

Для формулировки связи пористости ( $\theta$ , %), среднего нормального напряжения и коэффициента напряженного состояния использовали точки пересечения семейства кривых, соответствующих образующим поверхностям текучести на плоскости  $\sigma$ – $T$  (сплошные линии на рис. 1), и радиальных прямых (штриховые линии). В результате получено уравнение

$$\theta = 52 \exp(1,9\bar{\sigma}) + 1/k, \quad (1)$$

где среднее нормальное напряжение в порошkovом материале представлено в безразмерной форме  $\bar{\sigma} = \sigma/q_s$ ;  $q_s$  — предел текучести материала основы частиц губчатого титана, принятый равным пределу текучести технически чистого титана.

Для проверки возможности применения уравнения (1) выполнено экспериментальное исследование процесса компактирования отсева губчатого титана в закрытой пресс-форме. Выбор схемы компактирования обусловлен возможностью получения существенно неоднородного поля напряжений за счет действия сил контактного трения между деформируемым материалом и элементами пресс-формы [17, 18]. Это позволило обеспечить представительный разброс пористости в различных частях заготовки при относительной простоте экспериментального исследования.

Недостатком применения процесса прессования в закрытой пресс-форме для апробирования зависимости (1) явился узкий диапазон изменения коэффициента напряженного состояния по сечению заготовки [32]. Компактирование отсева титановой губки осуществлялось при давлении прессования  $1000$  МПа и температуре  $325$  °С. Размеры полученных брикетов были следующими: высота  $H = 30$  мм, диаметр  $D = 20$  мм. После компактирования водород удалялся путем отжига в вакууме. Методом электроэрозионной резки спрессованных брикетов вдоль осевого сечения получены плоские образцы (темплеты) толщиной  $1$  мм.

В левой части рис. 2, б показана схема располо-

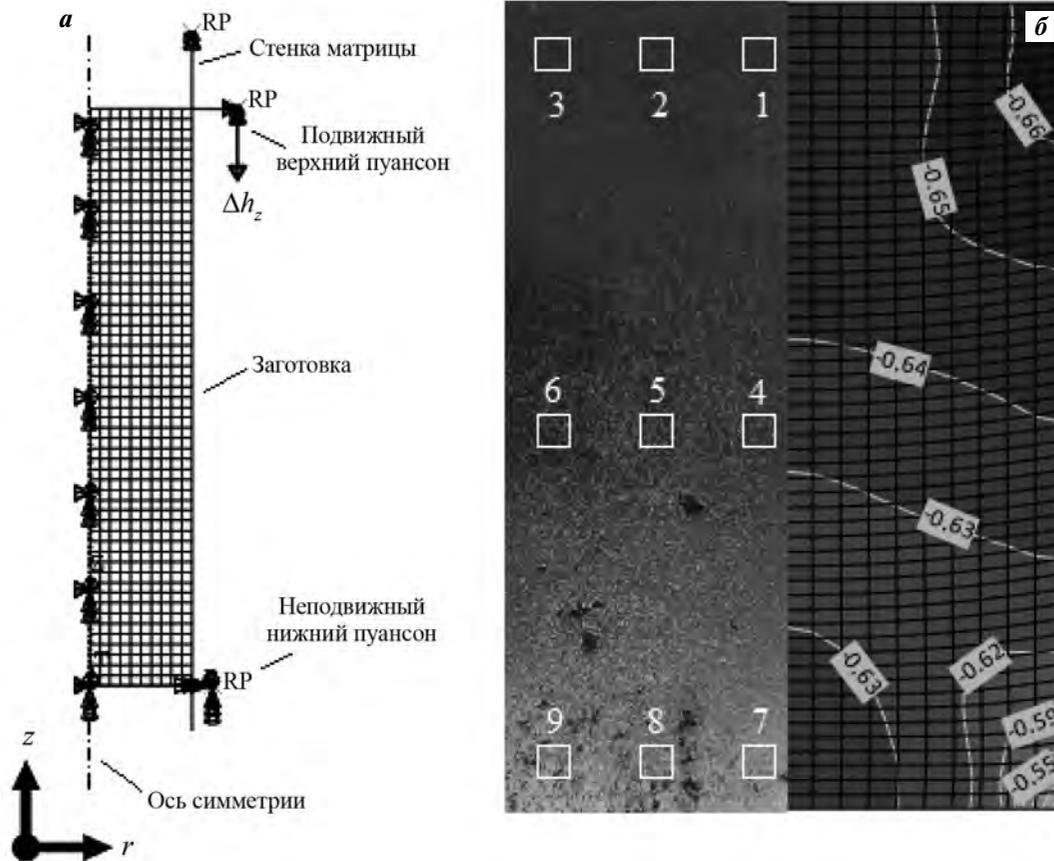


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса компактирования (а) и схема расположения участков поверхности осевого сечения заготовок для измерения параметров напряженно-деформированного состояния (б)

жения участков поверхности осевого сечения заготовок для определения локальной поверхностной пористости методом количественной металлографии. Фактические размеры (высота и ширина) представительных участков (1–9) составили по 1 мм.

Напряженно-деформированное состояние этих областей определяли путем моделирования в системе конечно-элементного анализа *Simulia/Abaqus SE* [33]. Задачу решали в осесимметричной постановке. Уплотняемый порошковый материал рассматривали как деформируемое тело с упругопластическими свойствами. Описание методики идентификации принятого условия текучести приведено в работе [34]. В зонах осевого сечения, соответствующих областям экспериментального определения пористости, вычислили значения объемной пластической деформации ( $\epsilon_v^p$ ) (см. рис. 2, б, справа), интенсивности касательных напряжений ( $T$ ) и среднего нормального напряжения ( $\sigma$ ).

## Обсуждение результатов

На рис. 3 показаны результаты определения величины пористости исследуемого материала для случая компактирования в закрытой пресс-форме с усредненным значением коэффициента напряженного состояния ( $k = -1,15$ ).

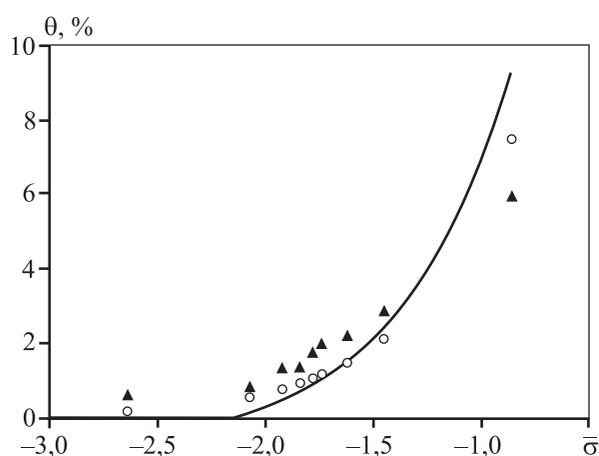
Для оценки адекватности уравнения регрессии (1), полученного на основе использования точек пересечения семейства кривых, соответствующих образующим поверхностям текучести на плоскости  $\sigma-T$ , и радиальных прямых, отвечающих постоянным значениям коэффициента напряженного состояния  $k$  (см. рис. 1), определили коэффициент детерминации модели ( $k = -1,15$ ), значение которого составило  $R^2 = 0,9$ , следовательно, используемая математическая модель приемлема.

Сравнение абсолютных значений величины пористости ( $\theta$ , %) для представительных участков 1–9 (см. рис. 2, б), вычисленных по формуле

**Параметры напряженно-деформированного состояния в представительных участках поверхности осевого сечения заготовок, полученных компактированием в закрытой пресс-форме**

№ участка на рис. 2, б	$k$	$\bar{\sigma}$	$\theta_{\text{см}}, \%$	$\theta_{\text{exp}}, \%$	$\theta, \%$
1	-1,15	-1,92	0,80	1,32	0,48
2	-1,16	-2,07	0,59	0,82	0,15
3	-1,15	-2,63	0,18	0,60	0
4	-1,16	-1,74	1,18	1,96	1,04
5	-1,14	-1,78	1,08	1,73	0,90
6	-1,13	-1,84	0,95	1,34	0,71
7	-1,14	-1,62	1,50	2,18	1,53
8	-1,13	-1,45	2,14	2,84	2,44
9	-1,16	-0,86	7,47	5,90	9,28

Обозначения:  $\theta_{\text{exp}}$  – пористость, определенная методом количественной металлографии;  $\theta_{\text{см}}$  – пористость, вычисленная в результате компьютерного моделирования,  $\theta$  – пористость, полученная по уравнению (1).



**Рис. 3.** Зависимость пористости материала от величины среднего нормального напряжения в безразмерном виде

Сплошная кривая – расчет по уравнению (1);  $\circ$  – результаты компьютерного моделирования;  $\blacktriangle$  – экспериментальные точки, полученные методом количественной металлографии

(1), с аналогичными данными ( $\theta_{\text{exp}}, \%$ ), полученными методом количественной металлографии (см. табл. 1), показывает удовлетворительную степень точности. Так, в диапазоне  $\bar{\sigma}$  от  $-2,63$  до  $-1,45$  максимальное отклонение абсолютного значения пористости составило менее 1 %, а при  $\bar{\sigma} = -0,86$  – 3,4 %, что является приемлемым для технологических расчетов в инженерной практике.

В таблице приведены параметры напряженно-деформированного состояния представительных участков поверхности осевого сечения заготовок (1–9 на рис. 2, б), полученных компактирова-

нием в закрытой пресс-форме. На основании этих результатов сделаны следующие выводы:

– распределение пористости в осевом сечении спрессованных заготовок, полученное в ходе компьютерного моделирования и методом количественной металлографии, подчиняется общим закономерностям;

– минимальная пористость наблюдается в слоях порошкового материала (1–3 на рис. 2, б), прилегающих к поверхности пуансона; при этом увеличение значений пористости наблюдается от периферии (обл. 3) к центру (обл. 1) заготовки;

– максимальная пористость обнаружена в слоях порошкового материала, расположенных в донной части пресс-формы (7–9 на рис. 2, б); при этом увеличение значений  $\theta$  зафиксировано от центра (обл. 7) к периферии (обл. 9) заготовки;

– в центральных слоях заготовки (4–6 на рис. 2, б) имеем результат, который можно рассматривать как средний относительно приведенных выше.

## Заключение

Получено уравнение связи пористости, среднего нормального напряжения и коэффициента напряженного состояния для порошкового материала на основе губчатого титана. Показано, что изменение коэффициента напряженного состояния в рассматриваемом диапазоне значений ( $k = -10 \dots -0,86$ ) слабо влияет на механизм уплотнения деформируемого материала.

Результаты экспериментальных исследований

и компьютерного моделирования показывают возможность применения предлагаемого подхода для оценки пористости заготовок в процессах уплотнения некомпактных металлических материалов при пластическом деформировании.

## Литература/References

1. *Нестеренко А.В., Новожионов В.И., Залазинский А.Г., Скрипов А.В.* Влияние температуры на компактируемость брикетов из титановой губки, легированной водородом. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2015. No. 2. С. 52—57.  
*Nesterenko A.V., Novozhonov V.I., Zalazinskii A.G., Skripov A.V.* Influence of temperature on compactibility of briquettes of titanium sponge alloyed with hydrogen. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 3. P. 287—292.
2. *Helle A.S., Easterling K.E., Ashby M.F.* Hot-isostatic pressing diagrams: New developments. *Acta Metal.* 1985. Vol. 33. No. 12. P. 2163—2174.
3. *Swinklers F.B., Wilkinson D.S., Arzt E., Ashby M.F.* Mechanisms of hot isostatic pressing. *Acta Metal.* 1983. Vol. 31. No. 11. P. 1829—1840.
4. *Nissel C.* HIP diffusion bonding. *Powder Metal. Inter.* 1984. Vol. 16. No. 3. P. 113—116.
5. *Hartong B., Jerier J.F., Doremus P., Imbault D., Donze F.V.* Modeling of high-density compaction of granular materials by the discrete element method. *Int. J. Sol. Struct.* 2009. Vol. 46. No. 18-19. P. 3357—3364.
6. *Максименко А.Л.* Моделирование деформационного упрочнения пористых и порошковых материалов в процессах прессования. *Порошк. металлургия*. 2014. No. 11/12. С. 3—14.  
*Maksimenko A.L.* Simulation of strain hardening of porous and powder materials in the extrusion processes. *Poroshk. metallurgiya*. 2014. No. 11/12. P. 3—14 (In Russ.).
7. *Мартынова И.Ф., Штерн М.Б.* Уравнения пластичности пористого тела, учитывающие истинные деформации материала основы. *Порошк. металлургия*. 1978. No. 1. С. 23—29.  
*Martynova I.F., Shtern M.B.* Porous solids plasticity equations considering true strain of the base material. *Poroshk. metallurgiya*. 1978. No. 1. P. 23—29 (In Russ.).
8. *Xin X.J., Jayaraman P., Daehn G.S., Wagoner R.H.* Investigation of yield surface of monolithic and composite powders by explicit finite element simulation. *Int. J. Mech. Sci.* 2003. Vol. 45. No. 4. P. 707—723.
9. *Loginov Yu.N., Stepanov S.I., Khanykova E.V.* Effect of pore architecture of titanium implants on stress-strain state upon compression. *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. P. 606—610.
10. *Maksimenko A.L., Mikhailov O.V., Shtern M.B.* Effect of the morphology of pores on the regularities of plastic deformation of porous bodies. 2. Evolution of the shape of pores in the process of plastic deformation. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1992. Vol. 31. No. 5. P. 381—385.
11. *Орлова Е.В., Панова И.М.* Анализ уплотнения дискретных материалов при всестороннем давлении. *Кузн.-штамп. пр-во. Обrab. матер. давлением*. 2016. No. 6. С. 10—15.  
*Orlova E.V., Panova I.M.* Analysis of the discrete materials densification process under hydrostatic pressure. *Кузн.-штамп. пр-во. Обработка материалов давлением*. 2016. No. 6. P. 10—15 (In Russ.).
12. *Залазинский А.Г., Поляков А.П.* Модель пластически-сжимаемого материала и ее применение к исследованию процесса прессования пористой заготовки. *Прикл. механика и техн. физика*. 2002. No. 3. С. 140—151.  
*Zalazinskii A.G., Polyakov A.P.* Model of plastically compressed material and its application to the study of the process of a porous billet extrusion. *Prikl. mekhanika i tekhn. fizika*. 2002. No. 3. P. 140—151 (In Russ.).
13. *Kushch V.I., Podoba Ya. O., Shtern M.B.* Effect of microstructure on yield strength of porous solid: A comparative study of two simple cell models. *Comput. Mater. Sci.* 2008. Vol. 42. No. 1. P. 113—121.
14. *Григорьев А.К., Рудской А.И., Колесников А.В.* Математическая модель упругопластического механизма деформирования пористых спеченных материалов. *Порошк. металлургия*. 1992. No. 12. С. 1—10.  
*Grigor'ev A.K., Rudskoi A.I., Kolesnikov A.V.* Mathematical model of the elastoplastic deformation process of porous sintered materials. *Poroshk. metallurgiya*. 1992. No. 12. P. 1—10 (In Russ.).
15. *Перельман В.Е.* Анализ уплотнения порошковых материалов в условиях всестороннего равномерного нагружения. *Порошк. металлургия*. 1977. No. 9. С. 15—21.  
*Perel'man V.E.* Analysis of powder materials compaction under hydrostatic loading. *Poroshk. metallurgiya*. 1977. No. 9. P. 15—21 (In Russ.).
16. *Ogbonna N., Fleck N.A.* Compaction of an array of spherical particles. *Acta Metal. Mater.* 1995. Vol. 43. No. 2. P. 603—620.
17. *Логонов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Первухина Д.Н.* Моделирование в программном комплексе Abaqus процесса компактирования пористого материала. *Кузн.-штамп. пр-во. Обrab. матер. давлением*. 2015. No. 6. С. 45—48.  
*Loginov Yu.N., Babailov N.A., Pervuhina D.N.* Simulation

- of porous material compaction process using Abaqus software. *Kuzn.-shtamp. pr-vo. Obrabotka materialov davleniem*. 2015. No. 6., P. 45—48 (In Russ.).
18. Zhou M., Huang S., Hu J., Lei Y., Zou F., Yan S., Yang M. Experiment and finite element analysis of compaction densification mechanism of Ag—Cu—Sn—In mixed metal powder. *Powder Technology*. 2017. Vol. 313. P. 68—81.
  19. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. М.: Машиностроение, 1989. Друянов Б.А. Applicable theory of porous solids plasticity. Moscow: Mashinostroenie, 1989 (In Russ.).
  20. Лантев А.М. Критерии пластичности пористых материалов. *Порошк. металлургия*. 1982. No. 7. С. 12—17. Laptsev A.M. Criteria for porous materials plasticity. *Poroshk. metallurgiya*. 1982. No. 7. P. 12—17 (In Russ.).
  21. DorMohammedi H., Khoei A.R. A three-invariant cap model with isotropic-kinematic hardening rule and associated plasticity for granular materials. *Int. J. Sol. Struct.* 2008. Vol. 45. No. 2. P. 631—656.
  22. DiMaggio F.L., Sandler I.S. Material model for granular soils. *J. Eng. Mechan. Division*. 1971. Vol. 97. No. 3. P. 935—950.
  23. Gurson A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1. Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*. 1977. Vol. 99. No. 1. P. 2—15.
  24. Shima S., Oyane M. Plasticity theory for porous metals. *Int. J. Mech. Sci.* 1976. Vol. 18. No. 6. P. 285—291.
  25. Doraivelu S.M., Gegel H.L., Gunasekera J.S., Malas J.C., Morgan J.T., Thomas J.F. A new yield function for compressible P/M materials. *Int. J. Mech. Sci.* 1984. Vol. 26. No. 9-10. P. 527—535.
  26. Lee D.N., Kim H.S. Plastic yield behavior of porous metals. *Powder Metal*. 1999. Vol. 41. No. 2. P. 121—141.
  27. Park S.J., Han H.N., Oh K.H., Lee D.N. Model for compaction of metal powders. *Int. J. Mech. Sci.* 1976. Vol. 18. No. 6. P. 285—291.
  28. Biswas K. Comparison of various plasticity models for metal powder compaction processes. *J. Mater. Proc. Technol.* 2005. Vol. 166. No. 1. P. 107—115.
  29. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design. *Quart. Appl. Math.* 1952. Vol. 10. No. 2. P. 157—165.
  30. Resende L., Martin J.B. Formulation of Drucker—Prager Cap Model. *J. Eng. Mech. ASCE*. 1985. Vol. 111. No. 7. P. 855—881.
  31. Dassult Systemes Simulia Corp., Abaqus Theory Manual 6.13, 2013.
  32. Колмогоров В.Л., Логинов Ю.Н., Паршаков С.И., Шиллов С.В. О гипотезе единой кривой для некомпактных сред. В сб.: *Обработка металлов давлением*. Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1981. С. 47—50. Kolmogorov V.L., Loginov Yu.N., Parshakov S.I., Shilov S.V. On the hypothesis of a single curve for powder materials. In: *Obrabotka metallov davleniem*. Sverdlovsk: UPI named after the S.M. Kirov, 1981. P. 47—50 (In Russ.).
  33. Berezin I., Nesterenko A., Zalazinskii A., Kovacs G. Influence of stress state conditions on densification behavior of titanium sponge. *Acta Polytech. Hungar.* 2017. Vol. 14. No. 6. P. 153—168.
  34. Березин И.М., Нестеренко А.В., Залазинский А.Г. Идентификация модифицированного условия текучести Друкера—Прагера и моделирование процесса уплотнения пластифицированного титансодержащего сырья. *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия*. 2016. No. 2. С. 22—29. Berezin I.M., Nesterenko A.V., Zalazinskii A.G. Identification of the modified Drucker—Prager yield condition and modelling of compaction of the plasticized titanium feedstock. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. No. 3. P. 297—302.