

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2022-8-3-56-64>

УДК 620.178.7; 621.893

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ПОРИСТОСТИ ПРЕССОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

В. Г. БАРСУКОВ, Е. Т. ВОРОПАЕВА, В. В. ВОРОПАЕВ⁺

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

Для процессов прессования порошковых термопластов и их композиций с наполнителями характерно существование пористости отпрессованных заготовок, которая при последующем спекании увеличивается. Методы управления остаточной пористостью находятся в стадии становления и исследования во многих научных и инженерных центрах.

Цель работы — разработка и апробация методики расчетной оценки пористости формованных заготовок из термопластичных пресс-материалов на основе микромеханической модели компактирования материала.

Выполнен критический анализ методик прогнозирования пористости формованных заготовок из порошковых материалов, применяемых в химической технологии, порошковой металлургии и при производстве технической керамики. Предложена микромеханическая модель формирования пористости, основанная на анализе силовых условий пластического деформирования элементарной сферической ячейки, окружающей единичную микропору в форме сферической полости. Пористость материала оценивали как отношение объема единичной сферической микропоры к объему элементарного кубика, описанного вокруг модельной микросферы. В качестве расчетного давления, изменяющего пористость материала, принято гидростатическое давление, вычисляемое как среднее из рабочего осевого и возникающих ответных боковых давлений. Взаимосвязь осевого и бокового давлений описана при помощи линейной зависимости с коэффициентом пропорциональности в форме коэффициента бокового давления. Учтена взаимосвязь коэффициента бокового давления с коэффициентами внутреннего и внешнего трения деформируемого материала. Получена аналитическая зависимость, связывающая остаточную пористость формуемой заготовки с пределом текучести и коэффициентом бокового давления пресс-материала, а также величиной прикладываемого рабочего давления. На примере пресс-композиций на основе порошкового политетрафторэтилена подтверждена возможность применения полученной зависимости при расчетной оценке остаточной пористости материала. Сравнение с результатами расчетов по формуле Конопицкого – Торре показало более высокую точность предложенной расчетной модели. Результаты исследований могут быть использованы в инженерной и исследовательской практике, а также в учебном процессе при подготовке специалистов химико-технологического профиля.

Ключевые слова: моделирование, прессование, порошковый термопласт, пористость, заготовка, предел текучести, коэффициент бокового давления.

METHOD FOR CALCULATING THE POROSITY OF PRESSED BLANKS OF POWDER THERMOPLASTICS

V. G. BARSUKOV, E. T. VOROPAIEVA, V. V. VOROPAIEV⁺

Yanka Kupala State University of Grodno, Ozsheshko St., 22, 230023, Grodno, Belarus

⁺Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: voropaev_vv@grsu.by

The processes of pressing powder thermoplastics and their compositions with fillers are accompanied by the occurrence of porosity of pressed blanks, which subsequently increases with sintering. Methods for control of residual porosity are in the process of development and research in many scientific and engineering centers.

The aim of the work is to develop and test method for calculating the porosity of pressed blanks of powder thermoplastics.

The method is based on a micromechanical model of compaction of the material. The article provides a critical analysis of methods for predicting the porosity of sintered blanks made of powder materials, which are used in chemical technology, powder metallurgy and in the production of technical ceramics. This study provides a micromechanical model of porosity emergence, which is based on the analysis of the force conditions of plastic deformation of an elementary spherical cell surrounding a single spherical pore. The porosity of the material was estimated as the ratio of the volume of a single spherical pore to the volume of an elementary cube circumscribed around a model microsphere. To take into account the influence of pressing pressure on the porosity of the blanks the authors used hydrostatic pressure, which was calculated as the average of the specific axial and the resulting response lateral pressures. The relationship between axial and lateral pressures was described using a linear relationship with a proportionality coefficient in the form of a lateral pressure coefficient. The calculations take into account the relationship of the lateral pressure coefficient with the coefficients of internal and external friction of the deformable material. The study generates an analytical dependence that links the residual porosity of the sintered blank with the yield strength and the coefficient of lateral pressure of the deformable material, as well as the value of specific pressing pressure. The possibility of applying the derived dependence in the calculation of the residual porosity of the pressed powder thermoplastics is confirmed on the example of polytetrafluoroethylene and powdered compounds on its base. Comparison of the study results with the calculations using the Konopitsky – Torre formula showed a higher accuracy of the proposed calculation model. The results of the study can be used in engineering and research practice, as well as in the educational process during the training of specialists in chemical and technological field.

Keywords: modeling, pressing, powder thermoplastics, porosity, blank, yield strength, lateral pressure coefficient.

Поступила в редакцию 18.08.2022

© В. Г. Барсуков, Е. Т. Воропаева, В. В. Воропаев, 2022

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)
Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь
Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus
Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: polmattex@gmail.com
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

Образец цитирования:

Барсуков В. Г., Воропаева Е. Т., Воропаев В. В. Методика расчетной оценки пористости прессованных заготовок из порошковых термопластов // Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8, № 3. С. 56–64. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2022-8-3-56-64>

Citation sample:

Barsukov V. G., Voropaeva E. T., Voropaev V. V. Metodika raschetnoy otsenki poristosti pressovannykh zagotovok iz poroshkovykh termoplastov [Method for calculating the porosity of pressed blanks of powder thermoplastics]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2022, vol. 8, no. 3, pp. 56–64. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2022-8-3-56-64>

Литература

1. Гвоздев А. Е., Журавлев А. М., Сапожников С. В. К теоретическому анализу процесса компактирования порошковых материалов прессованием // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. № 4. С. 273–283.
2. Дьяконов О. М. Деформационное уплотнение пористых тел с осевой симметрией нагружения // Порошковая металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск : Белорусская наука, 2019. С. 19–26.
3. Горяинова А. В., Божков Г. К., Тихонова М. С. Фторопласты в машиностроении. М. : Машиностроение, 1971. 233 с.
4. Ebnesajjad S. Filled fluoropolymer compounds // *Fluoroplastics. Vol. 1: Non-Melt Processible Fluoropolymers—The Definitive User's Guide and Data Book* / ed. Ebnesajjad S. 2nd ed. USA : William Andrew Publ., 2015, pp. 336–381.
5. Ebnesajjad S. *Introduction to Fluoropolymers: Materials, Technology, and Applications*. 2nd ed. USA : William Andrew Publ., 2020. 418 p.
6. Panda A., Dyadyura K., Valiček J., Harničárová M., Zajac J., Modrák V., Pandová I., Vrábel P., Nováková-Marcinčinová E., Pavelek Z. Manufacturing technology of composite materials-principles of modification of polymer composite materials technology based on polytetrafluoroethylene // *Materials*, 2017, vol. 10, no. 4. doi: 10.3390/ma10040377
7. Varapayev V. V., Barsukou V. G., Varapayeva E. T. Evaluation of Influence of Method for Preparing on Microporosity of Sintered Polytetrafluoroethylene-Based Compositions // *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізика-тэхнічных навук*. 2021. Т. 66, № 2, С. 180–185. doi: 10.29235/1561-8358-2021-66-2-180-185
8. Voropaev V. V., Skaskevich A. A., Lesun A. N., Sorokin V. G., Yankov E. On the effect of intermediate pressing of preforms on the formation of a defect-free structure of finished products from carbon fiber-filled polytetrafluoroethylene // *Machines. Technologies. Materials*, 2019, vol. 13, is. 11, pp. 511–514.
9. Дьяконов О. М. Силовой расчет процесса брикетирования порошковых, стружковых и других сыпучих материалов // *Литье и металлургия*. 2019. № 3. С. 118–125. doi: 10.21122/1683-6065-2019-3-118-125
10. Коликов А. П., Полухин П. И., Крупин А. В., Потапов И. Н., Ларин Э. Н. Новые процессы деформации металлов и сплавов. М. : Высшая школа, 1986. 351 с.
11. Клячко Л. И., Уманский А. М., Бобров В. Н. Оборудование и оснастка для формования порошковых материалов. М. : Металлургия, 1986. 336 с.
12. Худяков А. Ю., Ващенко С. В. Анализ известных зависимостей и разработка новых уравнений прессования мелкофракционных материалов горно-металлургического комплекса // *Новые огнеупоры*. 2019. № 12. С. 37–46. doi: 10.17073/1683-4518-2019-12-37-46
13. Петюшик Е. Е. Тенденции развития механики деформации уплотняемых материалов и основные расчетные программные средства // *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 14-й Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию порошковой металлургии Беларуси, Минск, 09–11 сентября 2020 г.* / редкол.: Ильющенко А. Ф. [и др.]. Минск : Белорусская наука, 2020. С. 28–34.
14. Семенова Т. В., Шилько С. В., Ковтун В. А. Мезомеханический анализ гранулированных материалов при контактном нагружении // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2001. Т. 7, № 2. С. 189–205.
15. Shi'ko S. V., Chernous D. A., Qiang Zhang, Yingfeij Lin, Heeman Choe. Uniaxial compression model for a metal-matrix/hollow microsphere composite synthesized by pressure infiltration // *Mechanics of Materials*, 2020, vol. 144. doi: 10.1016/j.mechmat.2020.103349
16. Барсуков В. В., Крупиц Б., Барсуков В. Г. Трибомеханический метод расчета коэффициента бокового давления в хрупких дисперсных материалах // *Трение и износ*. 2011. Т. 32, № 6. С. 562–570.
17. Барсуков В. В., Крупиц Б. Влияние межчастичного трения на условия сдвигового деформирования пресс-порошков и пресс-волоконитов // *Материалы, технологии, инструменты*. 2003. № 4. С. 16–19.
18. Барсуков В. В., Тарасюк В., Гракович П. Н., Барсуков В. Г. Оценка параметров трения и перепадов давления при прессовании композитов на основе политетрафторэтилена // *Вестник Гродненского государственного университета имени Я. Купалы. Серия 6. Техника*. 2015. № 1 (198). С. 74–82.

References

1. Gvozdev A. E., Zhuravlev A. M., Sapozhnikov S. V. K teoreticheskomu analizu protsessu kompaktirovaniya poroshkovykh materialov pressovaniem [To the theoretical analysis of the process of compacting powder materials by pressing]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Izvestiya Tula State University. Earth Sciences], 2017, no. 4, pp. 273–283.
2. D'yakonov O. M. Deformatsionnoe uplotnenie poristykh tel s osevoy simmetriey nagruzheniya [Deformation compaction of porous bodies with axial loading symmetry]. *Poroshkovaya metallurgiya*. Minsk: Belorusskaya nauka Publ., 2019, pp. 19–26.
3. Goryainova A. V., Bozhkov G. K., Tikhonova M. S. *Ftoroplasty v mashinostroenii* [Fluoroplastics in mechanical engineering]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1971. 233 p.
4. Ebnesajjad S. Filled fluoropolymer compounds. *Fluoroplastics. Vol. 1: Non-Melt Processible Fluoropolymers—The Definitive User's Guide and Data Book*. Ed. Ebnesajjad S. 2nd ed. USA : William Andrew Publ., 2015, pp. 336–381.
5. Ebnesajjad S. *Introduction to Fluoropolymers: Materials, Technology, and Applications*. 2nd ed. USA : William Andrew Publ., 2020. 418 p.
6. Panda A., Dyadyura K., Valiček J., Harničárová M., Zajac J., Modrák V., Pandová I., Vrábel P., Nováková-Marcinčinová E., Pavelek Z. Manufacturing technology of composite materials-principles of modification of polymer composite materials technology based on polytetrafluoroethylene. *Materials*, 2017, vol. 10, no. 4, app. 377. doi: 10.3390/ma10040377
7. Varapayev V. V., Barsukou V. G., Varapayeva E. T. Evaluation of Influence of Method for Preparing on Microporosity of Sintered Polytetrafluoroethylene-Based Compositions. *Vesti Natsyonal'nay akademii navuk Belarusi. Seriya fizika- tekhnich-nykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Physical-Technical Series], 2021, vol. 66, no. 2, pp. 180–185. doi: 10.29235/1561-8358-2021-66-2-180-185.
8. Voropaev V. V., Skaskevich A. A., Lesun A. N., Sorokin V. G., Yankov E. On the effect of intermediate pressing of preforms on the formation of a defect-free structure of finished products from carbon fiber-filled polytetrafluoroethylene. *Machines. Technologies. Materials*, 2019, vol. 13, no. 11, pp. 511–514.
9. D'yakonov O. M. Silovoy raschet protsessu briketirovaniya poroshkovykh, struzhkovykh i drugikh sypuchikh materialov [Force calculation of the process of briquetting powder, chip and other bulk materials]. *Lit'e i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy], 2019, no. 3, pp. 118–125. doi: 10.21122/1683-6065-2019-3-118-125
10. Kolikov A. P., Polukhin P. I., Krupin A. V., Potapov I. N., Larin E. N. *Novye protsessy deformatsii metallov i splavov* [New processes of deformation of metals and alloys]. Moscow : Vysshaya shkola Publ., 1986. 351 p.
11. Klyachko L. I., Umanskiy A. M., Bobrov V. N. *Oborudovanie i osnastka dlya formovaniya poroshkovykh materialov* [Equipment and tooling for forming powder materials]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1986. 336 p.
12. Khudyakov A. Yu., Vashchenko S. V. Analiz izvestnykh zavisimostey i razrabotka novykh uravneniy pressovaniya melkofraktsionnykh materialov gorno- metallurgicheskogo kompleksa [Analysis of known dependencies and development of new equations for pressing fine-grained materials of the mining and metallurgical complex]. *Novye огнеупоры* [Refractories and Industri-

- al Ceramics], no. 12, 2019, pp. 37–46. doi: 10.17073/1683-4518-2019-12-37-46
13. Petyushik E. E. Tendentsii razvitiya mekhaniki deformatsii uplotnyaemykh materialov i osnovnye raschetnye programmnye sredstva [Development tendencies of deformation mechanics of the compactible materials and basic calculated software]. *Materialy 14-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, «Novye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnye materialy, zashchitnye pokrytiya, svarka»* [Proc. 14th Int. Conf. “New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding”]. Minsk : Belorusskaya nauka Publ., 2020, pp. 28–34.
 14. Semenova T. V., Shi'ko S. V., Kovtun V. A. Mezomekhanicheskiy analiz granulirovannykh materialov pri kontaktnom nagruzhении [Mesomechanical analysis of granular materials by contact loading]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktivnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials and Structures], 2001, vol. 7, no. 2, pp.189–205.
 15. Shi'ko S. V., Chernous D. A., Qiang Zhang, Yingfej Lin, Heeman Choe. Uniaxial compression model for a metal-matrix/hollow microsphere composite synthesized by pressure infiltration. *Mechanics of Materials*, 2020, vol. 144. doi: 10.1016/j.mechmat.2020.103349
 16. Barsukov V. V., Krupich B., Barsukov V. G. Tribomekhanicheskiy metod rascheta koeffitsienta bokovogo davleniya v khrupkikh dispersnykh materialakh [Tribomechanical method of computing coefficient of lateral pressure at fragile dispersed materials]. *Trenie i iznos* [Journal of friction and wear], 2011, vol. 32, no. 6, pp. 562–570.
 17. Barsukov V. V., Krupich B. Vliyanie mezhchastichnogo treniya na usloviya sdvigovogo deformirovaniya press-poroshkov i press-voлокнитов [The effect of interparticle friction on the conditions of shear deformation of press-powders and press-fibrites]. *Materialy, tekhnologii, instrumenty* [Materials. Technologies. Tools], 2003, no. 4, pp. 16–19.
 18. Barsukov V. V., Tarasyuk V., Grakovich P. N., Barsukov V. G. Otsenka parametrov treniya i perepadov davleniya pri pressovanii kompozitov na osnove politetrafluoretilena [Assessment of friction parameters and differential pressure during the compression of composite materials based on polytetrafluoroethylene]. *Vesnik Hrodzenskaha Dziarzhavnaha Universiteta Imia Ianki Kupaly. Seryia 6. Tekhnika* [Vesnik of Y. Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science], 2015, no. 1 (198), pp. 74–82.
-