

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-1-23-32>

УДК 66.011

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

О. К. КРИВОНОС¹⁺, А. Ф. ИЛЮЩЕНКО¹, Е. Е. ПЕТЮШИК¹, В. М. БУЛОЙЧИК²

¹Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, ул. Платонова, 41, 220005, г. Минск, Беларусь

²Военная академия Республики Беларусь, пр-т Независимости, 220, 220057, г. Минск, Беларусь

Структура энергонасыщенного композиционного материала (ЭКМ) формируется в процессе смешивания порошковых компонентов в среде полимерного связующего и определяет основные его эксплуатационные свойства: плотность; удельное значение импульса на единицу объема; прочностные характеристики изделия, изготовленного из ЭКМ; скорость горения и др. Эмпирическое получение технологических режимов смешивания, обеспечивающих требуемую структуру материала, приводит к существенным временным и материальным затратам. Менее затратным является моделирование этих процессов. Цель исследования — разработка модели структурообразования ЭКМ, основанной на формализации процесса смешивания на примере условно принятой элементарной ячейки, которая усредненно характеризует структуру получаемого материала.

При разработке модели использовали эвристический алгоритм, метод «отжига металла». Модель формализована с условием усреднения размеров частиц внутри каждой фракции, а также морфологии их поверхности. В качестве представительного элемента модели принята элементарная ячейка в виде гексагонально плотно упакованных частиц вокруг одной более крупной, введенной в состав композиционного материала в небольших количествах, до 5%. Пустоты в ячейке заполнены жидкой фазой — полимерным связующим. За основу принята целевая функция, которая предполагает получение равномерного распределения компонентов с требуемой плотностью их укладки, стремящейся к максимально возможной, и заполнение пустот полимерным связующим при минимизации длительности перемешивания.

Результаты моделирования могут быть использованы при подборе технологического оборудования, определении режимов его работы для получения заданных характеристик ЭКМ еще на этапе разработки технологии ЭКМ. В том числе, при разработке аддитивных технологий (3D-печати) изготовления изделий из ЭКМ.

Ключевые слова: энергонасыщенный композиционный материал, моделирование, структурообразование, полимерное связующее, полидисперсные порошковые компоненты.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE STRUCTURE FORMATION OF ENERGY-SATURATED COMPOSITE MATERIAL

A. K. KRYVANOS¹⁺, A. PH. ILYUSHCHANKA¹, YA. YA. PIATSIUSHYK¹, V. M. BULOYCHIK²

¹State Research and Production Powder Metallurgy Association, Platonov St., 41, 220005, Minsk, Belarus

²Military Academy of the Republic of Belarus, Nezavisimosti Ave, 220, 220057, Minsk, Belarus

One of the main stages of producing an energy-saturated composite material (ESCM) is mixing of pow-

⁺Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: Krivonos_ok@tut.by

der components in a polymer binder medium. In the process of mixing, an ESCM structure is formed, which determines its main operational properties. These properties are the density of the material and, accordingly, the specific value of the pulse per unit volume; strength properties of a product made of ESCM; burning rate, and etc. The empirical obtaining of technological mixing modes that provide the required structure formation of the material leads to significant time and material costs. A less costly method will be to determine the technological modes of mixing using the ESCM structure formation model.

The purpose of the study is to develop a model of the ESCM structure formation based on the formalization of the mixing process using the example of a conventionally accepted elementary cell, which characterizes the structure of the material.

To develop a model of the structure formation process of ESCM in the process of mixing its components, represented by liquid and solid phases, one of the heuristic algorithms was used: the "metal annealing" method. The model is formalized with the condition of averaging the particle sizes within each fraction, as well as the morphology of their surface. As a representative element of the model, an elementary cell in the form of hexagonally densely packed particles around one larger particle introduced into the composition of the composite material (in small amounts, up to 5%) is adopted. The voids in the cell are filled with a liquid phase represented by a polymer binder.

The objective function is taken as the basis for modeling the ESCM structure formation, which involves obtaining a uniform distribution of components with the required packing density (tending to the maximum possible one) and filling the voids with a liquid phase while minimizing the duration of mixing.

The results of the study obtained in the course of modeling can be used in the selection of technological equipment and in determining the modes of its operation to obtain the specified properties of the ESCM, as well as in predicting the possibility of obtaining the required properties in the process of mixing its components.

Keywords: energy-saturated composite material, modeling, structure formation, a polymer binder, polydisperse powder components.

Поступила в редакцию 28.05.2020

© О. К. Кривонос, А. Ф. Ильющенко, Е. Е. Петюшик, В. М. Булойчик, 2021

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:

Кривонос О. К., Ильющенко А. Ф., Петюшик Е. Е., Булойчик В. М. Разработка математической модели структурообразования энергонасыщенного композиционного материала // Полимерные материалы и технологии. 2021. Т. 7, № 1. С. 23–32. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-1-23-32>

Citation sample:

Krivosnos O. K., Il'yushchenko A. F., Petyushik E. E., Buloychik V. M. Razrabotka matematicheskoy modeli strukturoobrazovaniya energonasyshchennogo kompozitsionnogo materiala [Development of a mathematical model of the structure formation of energy-saturated composite material]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2021, vol. 7, no. 1, pp. 23–32. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-1-23-32>

Литература

1. Agrawal J. P. High Energy Materials. Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2010. 498 p.
2. Ильющенко А. Ф., Кривонос О. К., Петюшик Е. Е., Смирнов Г. В. Энергонасыщенные гетерогенные композиционные мате-

- риалы на полимерной основе. Некоторые проблемы разработки и пути их решения // Порошковая металлургия: сборник научных трудов / редкол.: А. Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. Минск : Беларуская навука, 2016. Вып. 39. С. 12–16.
3. Бойко В. П. Кинетические особенности реакции уретанообразования гидроксилсодержащих олигодиенов // Полімерний журнал. 2015. Т. 37, № 2. С. 115–130.
 4. Chaturvedi S., Dave Pragnesh N. Solid propellants: AP/HTPB composite propellants // *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, vol. 12, is. 8, pp. 2061–2068. doi: 10.1016/j.arabjc.2014.12.033
 5. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / пер. с польск. под ред. Щупляка И. А. Л. : Химия, 1975. 384 с.
 6. Дементьева Д. И., Кононов И. С., Мамашев Р. Г., Харитонов В. А. Введение в технологию энергонасыщенных материалов: учебное пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. Бийск : Алтайский государственный технический университет, 2009. 254 с.
 7. Bai Y., Wagner G., Williams Ch. B. Effect of Particle Size Distribution on Powder Packing and Sintering in Binder Jetting Additive Manufacturing of Metals // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, vol. 139, is. 8. doi: 10.1115/1.4036640
 8. Ильюшенко А. Ф., Кривонос О. К., Петюшик Е. Е., Смирнов Г. В. Повышение плотности упаковки твердой фазы гетерогенного композиционного материала. Основные проблемы и пути их решения // Порошковая металлургия: сборник научных трудов / редкол.: А. Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. Минск : Беларуская навука, 2017. Вып. 40. С. 42–47.
 9. Кривонос О. К., Ильюшенко А. Ф., Петюшик Е. Е., Прохоров О. А. Выбор критериев оценки качества смешивания компонентов энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала // Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. трудов / редкол.: А. Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. Минск : Беларуская навука, 2019. Вып. 42. С. 146–152.
 10. Богдан Т. В. Описание кристаллических структур металлов в терминах шаровых упаковок и кладок. Москва, 2015. 29 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chem.msu.ru/cryst/crychem/liter/bogdan/bogdan05.pdf> (дата обращения: 23.06.2019).
 11. Kirkpatrick S., Gelatt C. D. Jr., Vecchi M. P. Optimization by Simulated Annealing // *Science*, 1983, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680. doi: 10.1126/science.220.4598.671

References

1. Agrawal J. P. High Energy Materials. Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2010. 498 p.
2. Il'yushchenko A. F., Krivonos O. K., Piatsiushyk E. E., Smimov G. V. Energonasyshchennyye geterogennyye kompozitsionnyye materialy na polimernoy osnove. Nekotorye problemy razrabotki i puti ikh resheniya [Saturated by energy heterogeneous composite materials on polymeric base. Some problems of development and methods of their resolution]. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy]. Minsk : Belaruskaya navuka Publ., 2016, is. 39, pp. 12–16.
3. Boyko V. P. Kineticheskie osobennosti reaksii uretanoobrazovaniya gidroksilsoderzhashchikh oligodienov [Kinetic features of the urethane formation reaction of hydroxyl-containing oligodienes]. *Polimerniy zhurnal* [Polymer Journal], 2015, vol. 37, no. 2, pp. 115–130.
4. Chaturvedi S., Dave Pragnesh N. Solid propellants: AP/HTPB composite propellants. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, vol. 12, is. 8, pp. 2061–2068. doi: 10.1016/j.arabjc.2014.12.033
5. Strenk F. *Peremeshivanie i apparaty s meshalkami* [Stirring and machines with mixers]. Leningrad : Khimiya Publ., 1975. 384 p.
6. Dement'eva D. I., Kononov I. S., Mamashev R. G., Kharitonov V. A. *Vvedenie v tekhnologiyu energonasyshchennykh materialov* [Introduction to energy-saturated materials technology]. Ed. 2. Biysk : Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet Publ., 2009. 254 p.
7. Bai Y., Wagner G., Williams Ch. B. Effect of Particle Size Distribution on Powder Packing and Sintering in Binder Jetting Additive Manufacturing of Metals. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, vol. 139, is. 8. doi: 10.1115/1.4036640
8. Il'yushchenko A. F., Krivonos O. K., Piatsiushyk E. E., Smirnov G. V. Povyshenie plotnosti upakovki tverдой fazy ge-terogennogo kompozitsionnogo materiala. Osnovnye pro-blemy i puti ikh resheniya [Packing density improvement of heterogeneous composite material. Main problems and the ways of their solutions]. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy]. Minsk : Belaruskaya navuka Publ., 2017, is. 40, pp. 42–47.
9. Krivonos O. K., Il'yushchenko A. F., Piatsiushyk E. E., Prokhorov O. A. Vybór kriteriev otsenki kachestva smeshivaniya komponentov energonasyshchennogo geterogennogo kompozitsionnogo materiala [Choice of criteria for assessing the quality of mixing components of energy saturated heterogeneous composite material]. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy]. Minsk : Belaruskaya navuka Publ., 2019, is. 42, pp. 146–152.
10. Bogdan T. V. Opisanie kristallicheskiikh struktur metallov v terminakh sharovykh upakovok i kladok [Description of the crystal structures of metals in terms of ball packing and laying]. Moscow, 2015. 29 p. Available at: <http://www.chem.msu.ru/cryst/crychem/liter/bogdan/bogdan05.pdf> (accessed 23.06.2019).
11. Kirkpatrick S., Gelatt C. D. Jr., Vecchi M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 1983, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680. doi: 10.1126/science.220.4598.671
- 12.