ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ, 2026. Том 19. №3. С. 122–130

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ ПРИ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕМСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СИНТЕЗЕ КЕРАМИКО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ*

С. А. Рогачев[1], А. С. Рогачев[2]

Аннотация: Разработана трехмерная математическая модель и проведено численное моделирование процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в режиме безгазового горения для систем, содержащих как активные реакционные ячейки, так и инертные частицы. Эта модель соответствует процессам СВС керамико-металлических материалов, в которых зерна керамической фазы образуются в процессе экзотермической химической реакции, а металлическое связующее добавляется в виде химически инертных частиц. Результаты численного исследования выявили сильную зависимость средней и мгновенной скорости горения, а также температурных неоднородностей реагирующей среды от размера частиц инертной добавки. Волна горения способна проскакивать между инертными частицами, размер которых в несколько раз превышает размер активных реакционных ячеек. Это показывает возможности получения керамико-металлических материалов с высоким содержанием металлического связующего.

Ключевые слова: безгазовое горение; СВС; керамико-металлические композиты; дискретная модель горения

DOI: 10.30826/CE26190312 **EDN:** JQSESF

Литература

1. *Tsuda K.* History of development of cemented carbides and cermet // SEI Technical Review, 2016. Vol. 82. P. 16–20.
2. *García J., Ciprés V. C., Blomqvist A., Kaplan B.* Cemented carbide microstructures: A review // Int. J. Refract. Met. H., 2019. Vol. 80. P. 40–68. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2018.12.004.
3. *Мержанов А. Г., Мукасьян А. С.* Твердопламенное горение. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. 336 с.
4. *Рогачев А. С., Мукасьян А. С.* Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику. — М.: Физматлит, 2012. 400 с.
5. *Мержанов А. Г.* Термически сопряженные процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Докл. Акад. наук, 2010. Т. 434. № 4. С. 489–492.
6. *Амосов А. П., Боровинская И. П., Мержанов А. Г.* Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов. — М.: Машиностроение-1, 2007. 567 с.
7. *Levashov E. A., Mukasyan A. S., Rogachev A. S., Shtansky D. V.* Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings // Int. Mater. Rev., 2017. Vol. 62. No. 4. P. 203–239. doi: 10.1080/09506608.2016.1243291.
8. *Rogachev A. S., Vadchenko S. G., Kochetov N. A., Kovalev D. Yu., Kovalev I. D., Shchukin A. S., Gryadunov A. N., Baras F., Politano O.* Combustion synthesis of TiC-based ceramic–metal composites with high entropy alloy binder // J. Eur. Ceram. Soc., 2020. Vol. 40. P. 2527–2532. doi: 10.1016/j.jeurceramicsos.2019.11.059.
9. *Obra A. G., Aviles M. A., Torres Y., Chicardi E., Gotor F. J.* A new family of cermets: Chemically complex but microstructurally simple // Int. J. Refract. Met. H., 2017. Vol. 63. P. 17–25. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2016.04.011.
10. *Luo S. C., Guo W. M., Lin H. T.* High-entropy carbide-based ceramic cutting tools // J. Am. Ceram. Soc., 2023. Vol. 106. P. 933–940. doi: 10.1111/jace.18852.
11. *Шкадинский К. Г., Кришеник П. М.* Стационарный фронт горения в смеси горючего с инертом // Физика горения и взрыва, 1985. Т. 21. С. 52–57.
12. *Маслов В. М. Воюев С. И, Боровинская И. П. Мержанов А. Г.* О роли дисперсности инертных разбавителей в процессах безгазового горения // Физика горения и взрыва, 1990. Т. 26. С. 74–80.
13. *Рогачев А. С., Бобожанов А. Р., Кочетов Н. А., Ковалев Д. Ю., Вадченко С. Г., Боярченко О. Д., Кочетков Р. А.* Самораспространяющийся высокотемпературный синтез кермета TiC–CoCrNi: закономерности горения и структурообразования //

*Работа выполнена благодаря поддержке Российского научного фонда, проект № 25-13-00040.

[1]Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова Российской академии наук, rogachevsa@gmail.com

[2]Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова Российской академии наук, rogachev@ism.ac.ru

Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2025. Т. 19. № 6. С. 5–15. doi: 10.17073/1997-308X-2025-6-5-15.

14. *Рогачев А. С.* О микрогетерогенном механизме безгазового горения // Физика горения и взрыва, 2003. Т. 39. № 2. С. 38–47.
15. *Coumans E.* Bullet physics simulation // ACM SIGGRAPH Courses, 2015. Art. 7. 13 p. doi: 10.1145/2776880.2792704.
16. *Lubachevsky B. D., Stillinger F. H., Pinson E. N.* Disks vs. spheres: Contrasting properties of random packings // J. Stat. Phys., 1991. Vol. 64. No. 3. P. 501–524.
17. *Jackson T. L., Najjar F., Buckmaster J.* New aluminum agglomeration models and their use in solid-propellant-rocket simularions // J. Propul. Power, 2005. Vol. 21. No. 5. P. 925–936.
18. *Рашковский С. А.* Роль структуры гетерогенных конденсированных смесей в формировании агломератов // Физика горения и взрыва, 2002. Т. 38. № 4. С. 65–76.
19. *Rashkovskiy S. A.* Direct numerical simulation of boron particle agglomeration in combustion of boron-containing solid propellants // Combust. Sci. Technol., 2017. Vol. 189. No. 8. P. 1277–1293. doi: 10.1080/00102202.2017.1294586.
20. *Рашковский С. А.* Структура гетерогенных конденсированных смесей // Физика горения и взрыва, 1999. Т. 35. № 5. С. 65–74.
21. *Rashkovskiy S. A., Dolgoborodov A. Yu.* Structure and behavior of gasless combustion waves in powders // Combust. Sci. Technol., 2017. Vol. 189. No. 12. P. 2220–2241. doi: 10.1080/00102202.2017.1369054.
22. *Зельдович Я. Б., Баренблат Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М.* Математическая теория горения и взрыва. — М.: Изд-во Наука, 1980. 480 с.

Поступила в редакцию 06.04.2026
После доработки 28.04.2026
Принята к публикации 12.05.2026