ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ, 2026. Том 19. №2. С. 148–158

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ 2Ti–Al–C, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВОБОДНОГО САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА С ПОСЛЕДУЮЩИМ СЖАТИЕМ*

Л. С. Стельмах[1], А. М. Столин[2], П. А. Столин[3], П. М. Бажин[4]

Аннотация: Проведен теоретический анализ неизотермического деформирования сжимаемых порошковых композиционных материалов на основе MAX-фазы системы 2Ti–Al–C в процессе свободного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с последующим сжатием. Процесс свободного СВС-сжатия горячих порошковых материалов как объект моделирования представляет собой сложную систему. Адекватное описание процесса возможно при корректном задании параметров состояния материала, реологических свойств продуктов горения и материала оболочки и граничных условий деформирования, которое включает стадии горения исходной заготовки, выдержки, прессования горячих продуктов синтеза с последующим охлаждением. При этом следует отметить, что первые две стадии проходят без участия плунжера пресса. Последующие же стадии предполагают непосредственный контакт между плунжером пресса и синтезированным материалом. Для учета этих особенностей сформулирована неизотермическая реодинамическая модель свободного СВС-сжатия материалов на основе MAX-фазы системы 2Ti–Al–C. Рассмотрены уплотнение порошкового материала в режиме постоянного заданного усилия на плунжере пресса. Показано, что такие технологические приемы, как увеличение давления на плунжере пресса и повышение температуры горения, приводят к более равномерному распределению плотности в объеме синтезированного материала и позволяют получать практически беспористые образцы.

Ключевые слова: порошковые композиционные материалы; свободное СВС-сжатие; MAX-фазы; математическое моделирование; синтез; горение

DOI: 10.30826/CE26190212 **EDN:** HRVGRI

Литература

1. *Barsoum M., Radovic M.* The elastic and mechanical properties of the MAX phases // Ann. Rev. Mater. Res., 2011. Vol. 41. P. 195–227. doi: 10.1146/annurev-matsci-062910-100448.
2. *Истомина Е. И., Истомин П. В., Надуткин А. В., Грасс В. Э., Богданова А. С.* Оптимизация карбосиликотермического синтеза MAX-фазы Ti_4SiC_3. *Неорг. матер.*, 2018. Vol. 54. No. 6. P. 554–563. doi: 10.7868/S0002337X18060027.
3. *Kumar Yogesh, Kumar Devendra, Kumar Ashwani, Kumar Singh Amit, Kumar Deepak, Vir Sing Man, Prakash Verma Ved, Bhardwaj Aman, Sanger Amit, Singh Gurveen, Pal Singh Beer.* Exploring MXenes and MAX-phases: Advancements in properties, synthesis, and application // Inorg. Chem. Commun., 2024. Vol. 170. No. 3. P 113531. doi: 10.1016/j.inoche.2024.113531.
4. *Islam Md. Mozahidul, Anik Md. Farhet Hossain, Kawsar Md., Hossain Md. Sahadat.* A review on the synthesis methods and environmental applications of MAX-phase and MXenes // Materials Today Sustainability, 2025. Vol. 32. P. 101237. doi: 10.1016/j.mtsust.2025.101237.
5. *Теслина М. А., Ершова Т. Б., Власова Н. М., Астапов И. А.* Получение MAX-фазы системы Ti–Al–C методом порошковой металлургии // Перспект. матер., 2016. Т. 3. С. 75–80.
6. *Перевислов С. Н., Семенова В. В., Лысенков А. С.* Синтез, структура и свойства MAX-фаз TI_3SIC_2, полученных горячим прессованием // Ж. неорг. химии, 2021. Т. 66. №8. С. 987–993. doi: 10.31857/S0044457X21080213.
7. *Salvo C., Guerra C., Maril M., Sancy M.* Influence of

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-69-00056, https://rscf.ru/project/25-69-00056.

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

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

[3]Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова Российской академии наук, jam47@mail.ru

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

the mechanical activation process on the corrosion of Ti_2–AlN MAX-phase obtained by hot pressing // Ceram. Int., 2025. Vol. 51. No. 4. P. 5425–5433. doi: 10.1016/j.ceramint.2024.12.008.

8. *Вершинников В. И., Ковалев Д. Ю.* Получение MAX-фаз Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 в режиме СВС с восстановительной стадией // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2020. № 1. С. 36–40. doi: 10.17073/1997-308X-2020-36-40.
9. *Галышев С. Н., Бажин П. М., Столин А. М., Сычёв А. Е.* Синтез металлокерамики на основе Ti–Al–C в условиях свободного СВС-сжатия // Перспект. матер., 2010. Т. 2. С. 81–86.
10. *Бажин П. М., Столин А. М., Константинов А. С., Чижиков А. П., Прокопец А. Д., Алымов М. И.* Особенности строения слоистых композиционных материалов на основе боридов титана, полученных методом свободного СВС-сжатия // Докл. Акад. наук, 2019. Т. 488. № 3. С. 263–266.
11. *Скороход В. В.* Реологические основы теории спекания. — Наукова думка, 1972. 240 с.
12. *Ковальченко М. С.* Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением. — Киев: Наукова думка, 1980. 240 с.
13. *Френкель Я. И.* Вязкое течение в кристаллических телах // Собрание избранных трудов: в 3 т. — М.: Физматгиз, 1958. Т. 2. С. 412–423.
14. *Stolin A. M., Stel'makh L. S.* Mathematical modeling of SHS-compaction/extrusion: An autoreview // Int. J. Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 2008. Vol. 17. No. 2. P. 93–100.
15. *Стельмах Л. С., Столин А. М.* Макрореологическая теория СВС-компактирования // Докл. Акад. наук, 1995. Т. 344. № 1. С. 72–77.
16. *Стельмах Л. С., Столин А. М.* Тепловые режимы уплотнения при горении порошкового материала // Докл. Акад. наук, 2000. Т. 373. № 2. С. 206–209.
17. *Stolin A. M., Stel'makh L. S.* Features of compaction kinetics for powder materials under nonisothermal conditions. I. Compaction kinetics in regular and fiber regimes // Powder Metall. Met. C., 2001. Vol. 40. No. 11-12. P. 556–561.
18. *Stolin A. M., Stel'makh L. S.* Features of compaction kinetics for powder materials under nonisothermal conditions. II. Existence of critical Specimen dimensions during the preparation of highly compacted materials // Powder Metall. Met. C., 2002. Vol. 41. No. 1-2. P. 13–16.
19. *Худяев С. И.* Пороговые явления в нелинейных уравнениях. — Физматлит, 2003. 272 с.
20. *Самарский А. А.* Теория разностных схем. — 3-е изд. — М.: Наука, 1989. 616 с.

Поступила в редакцию 27.11.2025
После доработки 17.02.2026
Принята к публикации 20.02.2026