

# МЕХАНИЗМ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОРИСТЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ ПРИ ГОРЕНИИ ПСЕВДООЖИЖЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ Ni И Al\*

А. И. Кирдяшкин<sup>1</sup>, В. Д. Китлер<sup>2</sup>, Р. М. Габбасов<sup>3</sup>, А. С. Мазной<sup>4</sup>

**Аннотация:** Исследован механизм структурирования газопроницаемых Ni–Al сплавов при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС) в порошковых смесях Ni + Al с добавкой CaCO<sub>3</sub>, которая позволяет формировать псевдоожигенное состояние реакционной смеси в зоне волны горения. С использованием методов скоростной видеосъемки, динамической термометрии и закалки реакции показано, что трансформация реакционной среды в зоне волны горения происходит с участием высокоподвижных микрокапель реагирующих расплавов Ni и Al (диаметром ~ 0,1–0,2 мм) и сопровождается широким комплексом капиллярных процессов: (1) формирование капель в процессе реакционной коалесценции расплавов; (2) поглощение частиц порошковой смеси движущимися каплями; (3) движение расплавов на поверхности формирующихся капель; (4) термокапиллярный дрейф капель в псевдоожигенной порошковой среде. Проведен анализ причин псевдоожигения реакционной смеси при горении и их влияние на структуру конечного продукта реакции.

**Ключевые слова:** СВС; интерметаллиды; Ni–Al; псевдоожигение; структурирование

DOI: 10.30826/CE23160311

EDN: OWXBDN

## Литература

1. Jiao X., Liu Y., Cai X., Wang J., Feng P. Progress of porous Al-containing intermetallics fabricated by combustion synthesis reactions: A review // *J. Mater. Sci.*, 2021. Vol. 56. P. 11605–11630. doi: 10.1007/s10853-021-06035-5.
2. Thiers L., Mukasyan A. S., Varma A. Thermal explosion in Ni–Al system: Influence of reaction medium microstructure // *Combust. Flame*, 2002. Vol. 131. P. 198–209. doi: 10.1016/S0010-2180(02)00402-9.
3. Biswas A., Roy S. K. Comparison between the microstructural evolutions of two modes of SHS of NiAl: Key to a common reaction mechanism // *Acta Mater.*, 2004. Vol. 52. P. 257–270. doi: 10.1016/j.actamat.2003.08.018.
4. Rogachev A. S., Vadchenko S. G., Baras F., Politano O., Rouvimov S., Sachkova N. V., Grapes M. D., Weihs T. P., Mukasyan A. S. Combustion in reactive multilayer Ni/Al nanofoils: Experiments and molecular dynamic simulation // *Combust. Flame*, 2016. Vol. 166. P. 158–169. doi: 10.1016/j.combustflame.2016.01.014.
5. Shabouei M., Subber W., Williams C. W., Matous K., Powers J. M. Chemo-thermal model and Gaussian process emulator for combustion synthesis of Ni/Al composites // *Combust. Flame*, 2019. Vol. 207. P. 153–170. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.05.038.
6. Fan Q., Chai H., Jin Z. Dissolution–precipitation mechanism of self-propagating high-temperature synthesis of mononickel aluminide // *Intermetallics*, 2001. Vol. 9. P. 609–619. doi: 10.1016/S0966-9795(01)00046-2.
7. Zhu P., Li J. C. M., Liu C. T. Reaction mechanism of combustion synthesis of NiAl // *Mat. Sci. Eng. A — Struct.*, 2002. Vol. 329–331. P. 57–68. doi: 10.1016/S0921-5093(01)01549-0.
8. Morsi K. Review: Reaction synthesis processing of Ni–Al intermetallic materials // *Mat. Sci. Eng. A — Struct.*, 2001. Vol. 299. P. 1–15. doi: 10.1016/S0921-5093(00)01407-6.
9. Jiang Y., He Y., Gao H. Recent progress in porous intermetallics: Synthesis mechanism, pore structure, and material properties // *J. Mater. Sci. Technol.*, 2021. Vol. 74. P. 89–104. doi: 10.1016/j.jmst.2020.10.007.
10. Miura S., Ohashi T., Mishima Y. Amount of liquid phase during reaction synthesis of nickel aluminides // *Intermetallics*, 1997. Vol. 5. P. 45–59. doi: 10.1016/S0966-9795(96)00065-9.
11. Plazanet L., Nardou F. Reaction process during relative sintering of NiAl // *J. Mater. Sci.*, 1998. Vol. 33. P. 2129–2136. doi: 10.1023/A:1004375304423.
12. Hibino A., Matsuoka S., Kiuchi M. Synthesis and sintering of Ni<sub>3</sub>Al intermetallic compound by combustion synthe-

\* Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 18-48-700037).

<sup>1</sup>Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, kirdyashkin\_a@mail.ru

<sup>2</sup>Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, vladimir-kitler1@mail.ru

<sup>3</sup>Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, ramilus@yandex.ru

<sup>4</sup>Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, maznoy\_a@mail.ru

- sis process // *J. Mater. Process. Tech.*, 2001. Vol. 112. P. 127–135. doi: 10.1016/s0924-0136(01)00558-1.
13. *Мазной А., Кирдяшкин А., Китлер В., Соловьев А.* Combustion synthesis and characterization of porous Ni–Al materials for metal-supported solid oxide fuel cells application // *J. Alloy. Compd.*, 2017. Vol. 697. P. 114–123. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.11.350.
  14. *Cai X., Li Z., Jiao X., Wang J., Kang X., Feng P., Akhtar F., Wang X.* Preparation of porous NiAl Intermetallic with controllable shape and pore structure by rapid thermal explosion with space holder // *Met. Mater. Int.*, 2021. Vol. 27. P. 4216–4224. doi: 10.1007/s12540-020-00904-5.
  15. *Мазной А. С., Кирдяшкин А. И.* Влияние исходных параметров реагирующей системы на структуру пористости продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // *Физика горения и взрыва*, 2014. Т. 50. С. 69–77.
  16. *Кирдяшкин А. И., Кутлер В. Д., Саламатов В. Г., Юсупов Р. А., Максимов Ю. М.* Капиллярные гидродинамические явления в процессе безгазового горения // *Физика горения и взрыва*, 2007. Т. 43. С. 31–39.
  17. *Rogachev A. S., Varma A., Merzhanov A. G.* The mechanism of self-propagating high-temperature synthesis of nickel aluminides. Part I: Formation of the product microstructure in a combustion wave // *Int. J. Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 1993. Vol. 2. P. 25–38.
  18. *Mukasyan A. S., Rogachev A. S.* Discrete reaction waves: Gasless combustion of solid powder mixtures // *Prog. Energ. Combust.*, 2008. Vol. 34. P. 377–416. doi: 10.1016/j.pecc.2007.09.002.
  19. *Рогачев А. С., Кочетов Н. А., Курбаткина В. В., Левашов Е. А., Гричук П. С., Рабинович О. С., Сачкова Н. В., Бернер Ф.* Микроструктурные аспекты безгазового горения механически активированных смесей. I. Высокоскоростная микровидеосъемка состава Ni + Al // *Физика горения и взрыва*, 2006. Т. 42. С. 61–70.
  20. *Rogachev A. S., Mukasyan A. S.* Combustion for material synthesis. — CRC Press, 2014. 424 p. doi: 10.1201/b17842.
  21. *Manukyan K., Amirkhanyan N., Aydinyan S., Danghyan V., Grigoryan R., Sarkisyan N., Gasparyan G., Aroutiounian R., Kharatyan S.* Novel NiZr-based porous biomaterials: Synthesis and in vitro testing // *Chem. Eng. J.*, 2010. Vol. 162. P. 406–414. doi: 10.1016/j.cej.2010.05.042.
  22. *Cui H., Cao L., Chen Y., Wu J.* Unique microstructure of porous NiAl intermetallic compound prepared by combustion synthesis // *J. Porous Mat.*, 2012. Vol. 19. P. 415–422. doi: 10.1007/s10934-011-9489-2.
  23. *Bassani P., Bassani E., Coduri M., Giuliani P., Tuissi A., Zanotti C.* 2015. Influence of TiH<sub>x</sub> addition on SHS porous shape memory alloy // *Mater Today — Proc.*, 2015. Vol. 2. P. S715–S718. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.382.
  24. *Yeh C. L., Sun W. E.* Use of TiH<sub>2</sub> as a reactant in combustion synthesis of porous Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> and Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>/TiAl intermetallics // *J. Alloy. Compd.*, 2016. Vol. 669. P. 66–71. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.01.236.
  25. *Мазной А., Кирдяшкин А., Китлер В., Пичугин Н., Саламатов В., Тсой К.* Self-propagating high-temperature synthesis of macroporous B2+L12 Ni–Al intermetallics used in cylindrical radiant burners // *J. Alloy. Compd.*, 2019. Vol. 792. P. 561–573. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.04.023.
  26. *Мазной А. С., Кирдяшкин А. И., Пичугин Н. С.* Радиационные горелки цилиндрической формы с максимальной эффективностью преобразования энергии горения в излучение // *Горение и взрыв*, 2018. Т. 11. С. 56–65. doi: 10.30826/CE18110208.
  27. *Мазной А. С., Яковлев И. А., Пичугин Н. С., Замбалов С. Д., Цой К. А.* Влияние стратегии ввода топливно-воздушной смеси на характеристики цилиндрических радиационных горелок с тонкослойным пористым излучателем // *Горение и взрыв*, 2019. Т. 14. С. 35–42. doi: 10.30826/CE21140305.
  28. *Мазной А., Пичугин Н., Кирдяшкин А., Яковлев Е., Яковлев И., Замбалов С., Гусчин А.* Predicting oxidation-limited lifetime of Ni–Al–Cr porous radiant burners made by combustion synthesis // *J. Alloy. Compd.*, 2023. Vol. 934. P. 167885. doi: 10.1016/j.jallcom.2022.167885.
  29. *Кирдяшкин А. И., Габбасов Р. М., Кутлер В. Д., Мазной А. С.* Экспериментальное исследование обжиговой печи на принципе фильтрационного горения газов // *Горение и взрыв*, 2020. Т. 13. С. 49–61. doi: 10.30826/ce20130406.
  30. *Okamoto H., Massalski T. B.* Binary alloy phase diagrams. — Materials Park, OH, USA: ASM International, 1990. 3 vols. 3611 p.
  31. *Lewis A. E., Seckler M. M., Kramer H., Van Rosmalen G.* Industrial crystallization: Fundamentals and applications. — Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2015. 323 p. doi: 10.1017/cbo9781107280427.
  32. *Subramanian R. S.* The Stokes force on a droplet in an unbounded fluid medium due to capillary effects // *J. Fluid Mech.*, 1985. Vol. 153. P. 389–400. doi: 10.1017/s0022112085001306.
  33. *Rednikov A. Y., Ryzantsev Y. S., Velarde M. G.* Drop motion with surfactant transfer in a homogeneous surrounding // *Phys. Fluids*, 1998. Vol. 6. P. 451. doi: 10.1063/1.868343.
  34. *Кирдяшкин А. И., Кутлер В. Д., Саламатов В. Г., Юсупов Р. А.* Особенности структурной динамики высокотемпературных металлотермических процессов на примере системы FeO–Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Физика горения и взрыва*, 2008. Т. 44. С. 80–84.
  35. *Kupiec K., Komorowicz T.* Simplified model of transient radiative cooling of spherical body // *Int. J. Therm. Sci.*, 2010. Vol. 49. P. 1175–1182. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2010.01.009.
  36. *Halikia I., Zoumpoulakis L., Christodoulou E., Pratis D.* Kinetic study of the thermal decomposition of calcium carbonate by isothermal methods of analysis // *Eur. J. Mineral Processing Environmental Protection*, 2001. Vol. 1. P. 89–102.
  37. *Gergely V., Curran D. C., Clyne T. W.* The FOAMCARP process: Foaming of aluminium MMCs by the chalk–aluminium reaction in precursors // *Compos. Sci. Technol.*, 2003. Vol. 63. P. 2301–2310. doi: 10.1016/S0266-3538(03)00263-X.

38. *Jacob K. T., Srikanth S.* Physical chemistry of the reduction of calcium oxide with aluminum in vacuum // High Temp. Mater. Proc., 1990. Vol. 9. P. 77–92. doi: 10.1515/HTMP.1990.9.2-4.77/machinereadablecitation/ris.
39. *El-Sadek M. H., El-Barawy K., Morsi I. M.* Production of calcium metal by aluminothermic reduction of Egyptian limestone ore // Can. Metall. Quart., 2018. Vol. 58. P. 213–222. doi: 10.1080/00084433.2018.1544343.

*Поступила в редакцию 29.11.2022*