

УДК 536.46

## ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КОБАЛЬТА И МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ГОРЕНИЕ В СИСТЕМЕ Ni + Al + Co

© 2024 г. Н. А. Кочетов\*, И. Д. Ковалев

*Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

\*E-mail: kolyan\_kochetov@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023

После доработки 14.06.2023

Принята к публикации 20.06.2023

В работе исследовано влияние механической активации (МА) и содержания кобальта на скорость и максимальную температуру горения, удлинение образцов в процессе синтеза, размер композитных частиц смеси после МА, фазовый состав и морфологию продуктов горения в системе Ni + Al + Co. Активация смеси Ni + Al + xCo позволила реализовать горение образцов при комнатной температуре и содержании кобальта до 50 мас. %. Увеличение содержания кобальта в смесях Ni + Al + xCo приводило к уменьшению размера композитных частиц после МА, удлинению образцов продуктов и максимальной температуры синтеза. После МА многократно возросли удлинение образцов продуктов и скорость горения, увеличилась максимальная температура синтеза. С увеличением содержания кобальта в смеси Ni + Al + Co скорость горения сначала возрастает (при содержании Co 10%), а затем убывает. Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза синтезированы твердые растворы на основе интерметаллидов NiAl и Ni<sub>3</sub>Al.

*Ключевые слова:* горение, механическая активация, интерметаллиды, алюминид никеля, система Ni + Al + Co, самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

DOI: 10.31857/S0207401X24040087 EDN: VEKQMH

### ВВЕДЕНИЕ

Система Ni + Al широко используется для получения композитных материалов [1]. Эти материалы характеризуются высокой коррозионной стойкостью и теплопроводностью, а также прочностью при повышенных температурах [2, 3].

Для получения композитных материалов часто применяют метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [4]. Интерметаллиды на основе алюминида никеля получают методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), порошковой металлургии, и механосинтеза [5–7]. Многие работы посвящены СВС в системе Ni + Al с дополнительным элементом или фазой в составе, которые добавляются для улучшения эксплуатационных характеристик получаемых материалов [7–14].

Кобальт является одним из возможных кандидатов среди металлов на использование в качестве добавки для улучшения свойств материала на основе NiAl. Система Ni + Al + Co привлекательна с точки зрения широкого выбора различных ком-

бинаций фаз ( $\gamma + \beta$ ,  $\gamma' + \beta$ ,  $\gamma + \gamma' + \beta$ ,  $\gamma + \gamma'$ ), где за счет интерметаллидов  $\beta$  (Ni, Co)Al и  $\gamma'$  (Ni, Co)·3Al можно получить сочетание низкой плотности, высокой жаростойкости и прочности, а  $\gamma$ -твердый раствор (Co, Ni) придает пластичность всей композиции. Исследования различных сплавов на основе системы Ni + Al + Co показали, что приемлемые пластичность и прочность можно получить в сплавах со структурой  $\beta/\gamma'/(Co, Ni)$ , модифицированных титаном и бором [15, 16]. В системе Ni + Al + Co получают сплавы с памятью формы [17–19], также сплавы Гейслера [13].

Популярным методом изменения реакционной способности порошковых смесей является механическая активация (МА) [7, 8, 11, 12, 20, 21]. Описаны случаи реализации процесса горения после МА в порошковых смесях, не горящих в обычных условиях [21].

Цели данной работы – исследование СВС в системе Ni + Al + Co и изучение влияния механической активации и содержания кобальта на процесс горения.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовался порошок алюминия марки АСД-4 (средний размер частиц – 10 мкм), карбонильный никель марки ПНК (средний размер частиц – 10 мкм) и порошок кобальта марки ПК-1у с размером частиц менее 71 мкм.

Смеси порошков  $Ni + Al + xCo$  готовились при перемешивании исходных компонентов в фарфоровой ступке в заданном количестве (значение  $x$  менялось от 0 до 60 мас. %).

Механическая активация смесей осуществлялась в механоактиваторе АГО-2 с водяным охлаждением при ускорении 90g в воздушной атмосфере. В качестве размольных тел использовали стальные шары диаметром 9 мм. Продолжительность МА составляла 5 мин, соотношение массы шаров к массе смеси в барабанах активатора – 20:1.

Для исследования горения из активированных и исходных смесей прессовались цилиндрические образцы высотой 1.4–1.5 см и диаметром 1 см. Значение давления прессования образцов составляло 100 кг/см<sup>2</sup> для исходных смесей и 105–115 кг/см<sup>2</sup> для активированных. Масса образцов увеличивалась от 3.2 до 4.2 г с ростом содержания кобальта в составе смеси для поддержания относительной плотности образца в интервале 0.55–0.58.

Процесс СВС осуществлялся в камере постоянного давления в инертной среде аргона при давлении 760 Торр [7, 8, 11, 12, 21]. Процесс горения инициировался через поджигающую таблетку состава  $Ti + 2B$  с верхнего торца образца нагретой вольфрамовой спиралью для обеспечения стабильных условий зажигания. Максимальная температура синтеза измерялась вольфрам-рениевой термопарой ВР5/ВР20 с толщиной спая 0.2 мм. Термопара вводилась с нижнего торца образца по его оси на 4 мм. При покадровом просмотре видеозаписей определялась скорость горения образцов. За относительное удлинение сгоревших образцов принималось отношение их высоты к высоте исходных образцов.

Каждое значение максимальной температуры, скорости горения и относительного удлинения образцов определялось как среднее по результатам нескольких экспериментов и имело погрешность в пределах 10%. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили с использованием дифрактометра

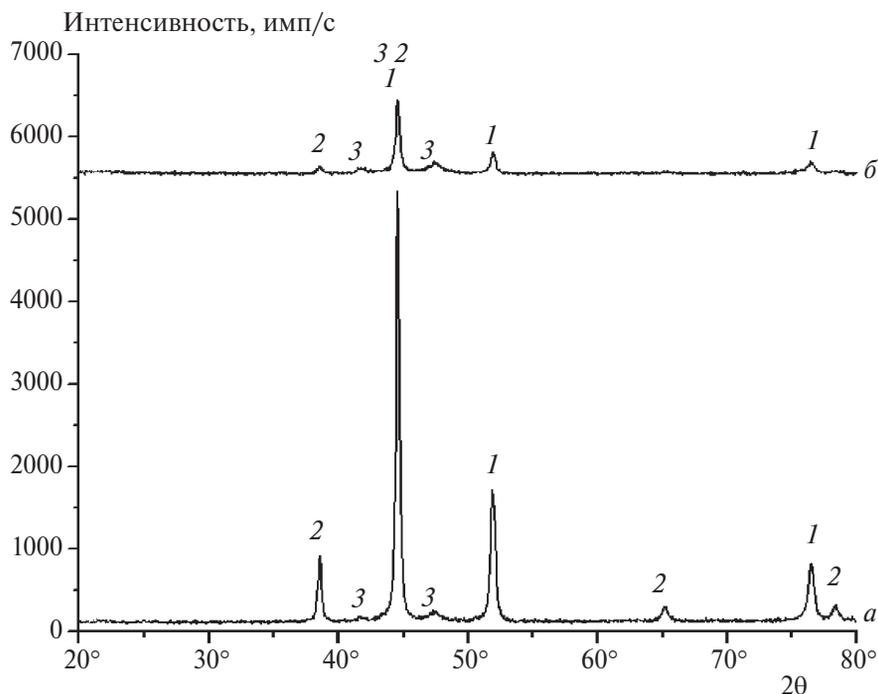
“Дрон-3” на  $CuK_{\alpha}$ -излучении. Фракционный состав и распределение частиц смеси по размеру определяли по стандартной методике на лазерном анализаторе “Микросайзер-201С”. Погрешность измерений не превышала 1.2 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

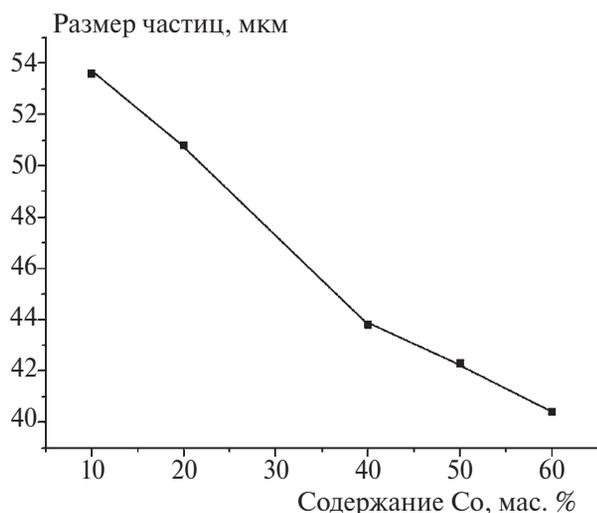
Рентгенофазовый анализ активированных смесей  $Ni + Al + xCo$  показал, что в процессе МА продолжительностью 5 мин формирование новых фаз не происходит. Во всем исследованном диапазоне значений  $x$  на рентгенограммах активированных смесей наблюдались пики, соответствующие всем исходным компонентам – Ni, Al и Co (рис. 1).

Предыдущие исследования показали, что в процессе активации порошковых смесей металлов исходные частицы деформируются, разрушаются и агломерируются [7, 11, 12, 20–22]. С увеличением содержания кобальта в смеси  $Ni + Al + xCo$  уменьшается количество пластичного алюминия, что ухудшает агломерирование частиц исходных компонентов в процессе МА. В результате можно видеть, что средний размер композитных частиц, образовавшихся в процессе активации смеси  $Ni + Al + xCo$ , уменьшается с увеличением содержания кобальта в смеси (рис. 2).

Образец из исходной смеси  $Ni + Al$  сгорел полностью. При этом скорость горения составила 0.5 см/с, максимальная температура горения – 1500 °С, относительное удлинение образца продуктов – 7%. Образцы из исходной смеси горят в нестационарном режиме, когда стадия депрессии сменяется быстрым сгоранием прогретого слоя вещества, образовавшегося на стадии депрессии. При сгорании прогретого слоя температура горения превышает адиабатическую температуру горения [23]. При внимательном рассмотрении внешнего вида сгоревшего образца из исходной смеси  $Ni + Al$ , видно, что он состоит из чередующихся слоев продукта, разделенных поперечными трещинами, которые образовались в момент вспышки за счет выхода примесных газов (рис. 3а). При добавлении в исходную смесь 10 мас. % кобальта образец не догорал до конца, сгорал лишь небольшой его фрагмент, после чего горение прекращалось. Фотографии образцов продуктов горения исходной смеси  $Ni + Al$  и частично сгоревшего образца из смеси  $Ni + Al + 10\%Co$  представлены на рис. 3.



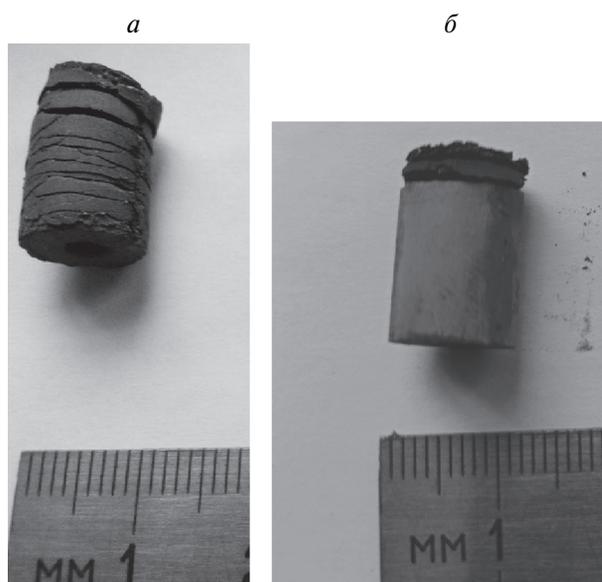
**Рис. 1.** Результаты РФА активированных смесей Ni + Al + xCo при x = 10 (а) и 50 мас. % (б). Цифрами обозначены рефлексы пики следующих фаз: 1 – Ni, 2 – Al, 3 – Co.



**Рис. 2.** Зависимость среднего размера частиц активированной смеси Ni + Al + xCo от содержания кобальта.

Механическая активация смесей Ni + Al + xCo позволила реализовать горение прессованных образцов. Предельное содержание кобальта, при котором образцы из активированных смесей Ni + Al + xCo сгорали полностью при комнатной температуре, составило 50 мас. %. При содержании кобальта в МА-смеси 60 мас. % образцы не горели при заданных условиях.

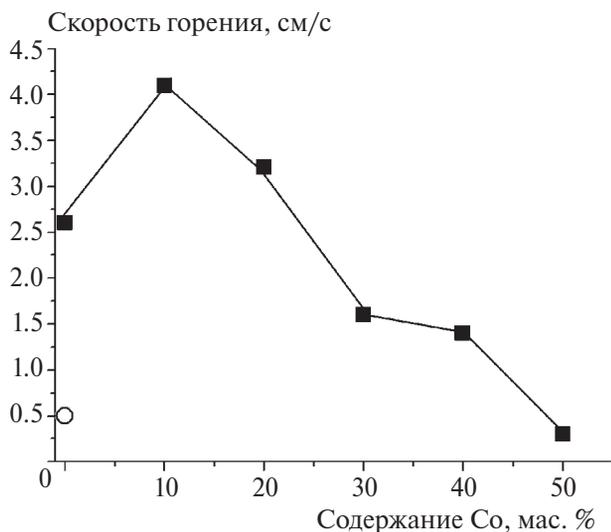
После МА многократно возросли скорость горения и удлинение образцов продуктов (рис. 4, 5).



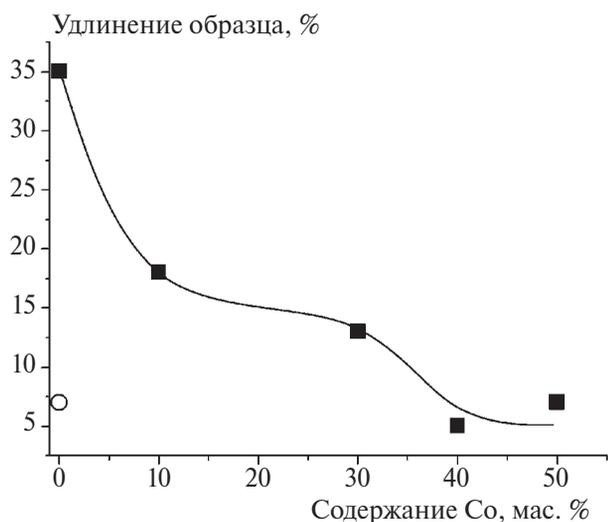
**Рис. 3.** Фотографии образцов продуктов горения исходной смеси Ni + Al (а) и частично сгоревшего образца из смеси Ni + Al + 10%Co (б).

Кроме того, увеличилась максимальная температура горения образцов (рис. 6).

Удаление диффузионных затруднений и возрастание площади контакта между компонентами активированной смеси приводят к увеличению скорости горения после МА. Это факт отмечался ранее при горении системы Ni + Al с добавками различных металлов [11, 12].



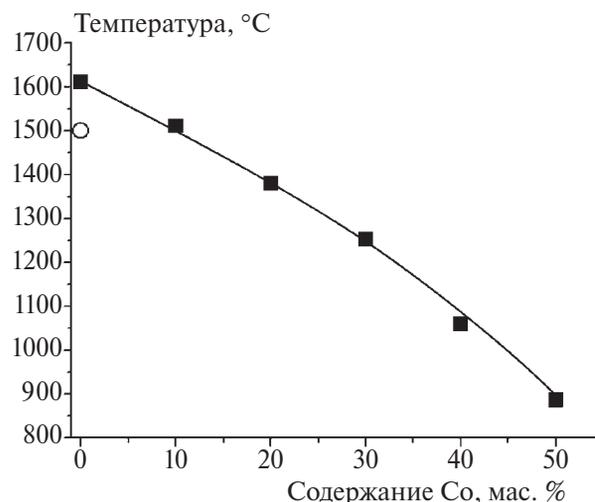
**Рис. 4.** Зависимость скорости горения образцов из исходной (O) и активированной (■) смеси Ni + Al + xCo от содержания кобальта.



**Рис. 5.** Зависимость относительного удлинения сгоревшего образца от содержания кобальта из исходной (O) и активированной (■) смеси Ni + Al + xCo.

Удлинение образца продуктов в ходе синтеза происходит из-за выделения примесных газов за фронтом горения [11, 12, 21, 24, 25]. В процессе МА в активируемую смесь вносятся дополнительные примесные газы, что приводит к возрастанию удлинения образцов продуктов синтеза смесей [26–28].

Зависимость скорости горения образцов из активированной смеси Ni + Al + xCo от содержания кобальта имеет максимум при  $x = 10$  мас. % (рис. 4). Вероятно, при добавлении в смесь Ni + Al 10 мас. % кобальта преобладающим над уменьшением теплового эффекта реакции факто-



**Рис. 6.** Зависимость максимальной температуры горения образцов из исходной (O) и активированной (■) смеси Ni + Al + xCo от содержания кобальта.

ром является сокращение количества выделяющихся при горении примесных газов. При возрастании содержания кобальта в смеси уменьшается температура горения (рис. 6) и, соответственно, количество выделяющихся при синтезе примесных газов. В соответствии с конвективно-кондуктивной моделью горения уменьшение давления примесных газов, выделяющихся перед фронтом горения, приводит к увеличению скорости горения [29]. Другим возможным объяснением уменьшения скорости горения при увеличении количества примесных газов, выделяющихся перед фронтом горения, является уменьшение теплопроводности образца в зоне прогрева за счет разрыхляющего действия примесных газов [30].

При дальнейшем возрастании содержания кобальта в смеси Ni + Al (более 10 мас. %) доминирующим фактором является уменьшение теплового эффекта реакции из-за уменьшения максимальной температуры горения (рис. 6), что приводит к снижению скорости горения образцов (рис. 4). Удлинение образцов продуктов синтеза активированных смесей Ni + Al + xCo уменьшается из-за снижения количества выделяющихся при синтезе примесных газов с увеличением содержания кобальта (рис. 5).

Согласно результатам РФА на рентгенограммах продуктов горения активированных смесей Ni + Al + xCo наблюдаются пики твердого раствора на основе интерметаллида NiAl, в котором часть атомов никеля замещено атомами кобальта. При содержании в смесях кобальта 30 мас. % и более

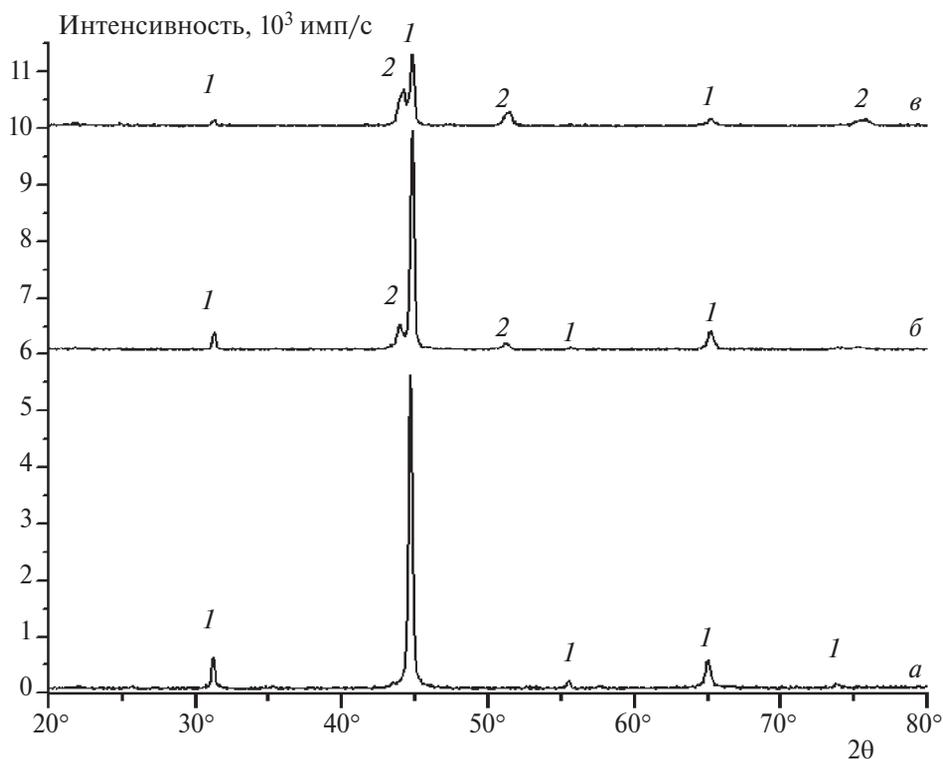


Рис. 7. Результаты РФА продуктов горения активированных смесей Ni + Al + xCo при x = 10 (а), 30 (б) и 50 мас. % (в). Цифрами обозначены пики следующих фаз: 1 – твердый раствор NiAl(Co), 2 – твердый раствор Ni<sub>3</sub>Al(Co).



Рис. 8. Фотографии образцов продуктов горения активированных смесей Ni + Al + xCo при x = 10 (а), 20 (б), 30 (в), 40 (г), 50 мас. % (д).

на рентгенограммах продуктов синтеза наблюдаются пики еще одной фазы – твердого раствора на основе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al (рис. 7).

После МА образцы из смесей Ni + Al + xCo сгорали в стационарном режиме значительно

быстрее, чем образцы из неактивированной смеси. Поперечные трещины на образцах продуктов МА-смесей не наблюдались (рис. 8). В процессе активации в обрабатываемую реакцию смесь вносятся дополнительные примесные газы. Выделение

этих газов при горении образцов из активированных смесей приводит к образованию высокопористых и непрочных продуктов реакции из слабоспеченных сохранившихся частиц [11, 12, 22].

Результаты данной работы могут быть использованы при получении интерметаллидов в системе Ni + Al + Co.

## ВЫВОДЫ

1. Механическая активация смесей Ni + Al + xCo позволила реализовать горение образцов без предварительного подогрева.

2. С увеличением содержания кобальта уменьшаются размер композитных частиц, максимальная температура и удлинение образцов продуктов горения МА-смесей Ni + Al + xCo.

3. После активации многократно увеличиваются скорость горения и удлинение образцов продуктов, а также возрастает температура горения.

4. Зависимость скорости горения МА-смесей от содержания кобальта немонотонна: имеет максимум при содержании кобальта 10 мас. %.

5. Синтезированы твердые растворы на основе интерметаллидов NiAl и Ni<sub>3</sub>Al.

Авторы работы признательны М.Л. Бусуриной за определение среднего размера композитных частиц активированных смесей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kelly S.C., Thadhani N.N. // J. Appl. Phys. 2016. V. 119. P. 95903. <https://doi.org/10.1063/1.4942931>
- Pogozhev Yu.S., Sanin V.N., Ikornikov D.M. et al. // Intern. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2016. V. 25. № 3. P. 186. <https://doi.org/10.3103/S1061386216030092>
- Sanin V.N., Ikornikov D.M., Andreev D.E. et al. // Ibid. 2014. V. 23. № 4. P. 232. <https://doi.org/10.3103/S1061386214040098>
- Сеплярский Б.С., Абзалов Н.И., Кочетков Р.А. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 3. С. 23. <https://doi.org/10.31857/S0207401X2103010925>
- Suryanarayana C. // Prog. Mater. Sci. 2001. V. 46. P. 1.
- Wang J. // J. Alloys and Comp. 2008. V. 456. P. 139.
- Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 1. С. 42. <https://doi.org/10.31857/S0207401X22010071>
- Кочетов Н.А., Сычев А.Е. // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 5. С. 32. <https://doi.org/10.15372/FGV20200502>
- Zoz H., Ren H. // InterCeram: Intern. Ceramic Rev. 2000. V. 49. № 1. P. 24.
- Lin Ch-K., Hong Sh-Sh., Lee P-Y. // Intermetallics. 2000. V. 8. № 9–11. P. 1043. [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(00\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00039-X)
- Кочетов Н.А. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 7. С. 39. <https://doi.org/10.31857/S0207401X2207007X>
- Кочетов Н.А. // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 6. С. 41. <https://doi.org/10.15372/FGV20220604>
- Graf T., Felsler C., Parkin S.S.P. // Prog. Solid State Chem. 2011. V. 39. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2011.02.001>
- Lin W., Freeman A.J. // Phys. Rev. B. 1992. V. 45. № 1. P. 61. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.45.61>
- Kimura Y., Miura S., Suzuki T. et al. // Materials Transactions. 1994. V. 35. № 11. P. 800. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.35.800>
- Kimura Y., Elmer H. Lee, Liu C.T. // Ibid. 1995. V. 36. № 8. P. 1031. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.36.1031>
- Tanaka Y., Ohmori T., Oikawa K. et al. // Mater. Trans. JIM. 2004. V. 45. № 2. P. 427. <https://doi.org/10.2320/matertrans.45.427>
- Oikawa K., Ota T., Gejima F. et al. // Ibid. 2001. V. 42. № 11. P. 2472. <https://doi.org/10.2320/matertrans.42.2472>
- Liu J., Li J.G. // Mater. Sci. Eng. A. 2007. V. 454–455. P. 423. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.085>
- Корчагин М.А. // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 5. С. 77. <https://doi.org/10.15372/FGV20150509>
- Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С. // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 3. С. 69. <https://doi.org/10.15372/FGV20200307>
- Кочетов Н.А., Сеплярский Б.С. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 3. С. 23. <https://doi.org/10.31857/S0207401X23030081>
- Рогачев А.С., Мукасян А.С. Горение для синтеза материалов. М: Физматлит, 2012.
- Kamynina O.K., Rogachev A.S., Sytshev A.E. et al. // Intern. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2004. V. 13. № 3. P. 193.
- Камынина О.К., Рогачев А.С., Умаров Л.М. // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 5. С. 69.
- Кочетов Н.А. // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57. № 6. С. 32. <https://doi.org/10.15372/FGV20210604>
- Vadchenko S.G. // Intern. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2016. V. 25. № 4. P. 210. <https://doi.org/10.3103/S1061386216040105>
- Vadchenko S.G. // Ibid. 2015. V. 24. № 2. P. 90. <https://doi.org/10.3103/S1061386215020107>
- Сеплярский Б.С. // Докл. РАН. 2004. Т. 396. № 5. С. 640.
- Рогачев А.С. // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 2. С. 38.

# THE EFFECT OF COBALT CONTENT AND MECHANICAL ACTIVATION ON COMBUSTION IN THE Ni + Al + Co SYSTEM

N. A. Kochetov\*, I. D. Kovalev

<sup>1</sup>*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science,  
Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

\*E-mail: kolyan\_kochetov@mail.ru

The effect of mechanical activation (MA) and cobalt content on the combustion velocity and maximum combustion temperature, elongation of samples during synthesis, the size of composite particles of the mixture after MA, phase composition and morphology of combustion products in the Ni + Al + Co system is investigated in this work. Activation of the Ni + Al +  $x$ Co mixture allowed the samples to burn at room temperature, with a cobalt content of up to 50 wt. %. An increase in the cobalt content in Ni + Al +  $x$ Co mixtures led to a decrease in the size of composite particles after MA, elongation of product samples and the maximum synthesis temperature. After MA, the elongation of the product samples and combustion velocity increased many times, the maximum synthesis temperature increased. With an increase in the cobalt content in the Ni + Al + Co mixture, combustion velocity first increases (at 10% Co), then decreases. Solid solutions based on NiAl and Ni<sub>3</sub>Al intermetallics were synthesized by the SHS method.

*Keywords:* combustion, mechanical activation, intermetallics, nickel aluminide, Ni + Al + Co, SHS.

## REFERENCES

1. S. C. Kelly, N.N. Thadhani, *J. Appl. Phys.* **119**, 95903 (2016).  
<https://doi.org/10.1063/1.4942931>
2. Yu. S. Pogozhev, V. N. Sanin, D. M. Ikornikov, et al., *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* **25** (3), 186 (2016).  
<https://doi.org/10.3103/S1061386216030092>
3. V. N. Sanin, D. M. Ikornikov, D.E. Andreev, et al., *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* **23** (4), 232 (2014).  
<https://doi.org/10.3103/S1061386214040098>
4. B. S. Septyarskii, N. I. Abzalov, R. A. Kochetkov, et al., *Russ. J. Phys. Chem. B* **15** (2), 242 (2021).  
<https://doi.org/10.1134/S199079312102010X>
5. C. Suryanarayana, *Prog. Mater. Sci.* **46**, 1 (2001).
6. J. Wang, *J. Alloys Compd.* **456**, 139 (2008).
7. N. A. Kochetov, B. S. Septyarskii, *Russ. J. Phys. Chem. B* **16** (1), 66 (2022).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793122010079>
8. N. A. Kochetov, A. E. Sychev, *Combust. Explos. Shock Waves* **56** (5), 520 (2020).  
<https://doi.org/10.1134/S0010508220050020>
9. H. Zoz, H. Ren, *InterCeram: Int. Ceram. Rev.* **49** (1), 24 (2000).
10. Ch-K. Lin, Sh-Sh. Hong, P-Y. Lee, *Intermetallics* **8** (9–11), 1043 (2000).  
[https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(00\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(00)00039-X)
11. N. A. Kochetov, *Russ. J. Phys. Chem. B* **16** (4), 621 (2022).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793122040078>
12. N. A. Kochetov, *Combust. Explos. Shock Waves* **58** (6), 665 (2022).  
<https://doi.org/10.1134/S0010508222060041>
13. T. Graf, C. Felser, S. S. P. Parkin, *Prog. Solid State Chem.* **39** (1), 1 (2011).  
<https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2011.02.001>
14. W. Lin, A. J. Freeman, *Phys. Rev. B.* **45** (1), 61 (1992).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.45.611992>
15. Y. Kimura, S. Miura, T. Suzuki, et al., *Mater. Transact.* **35** (11), 800 (1994).  
<https://doi.org/10.2320/matertrans1989.35.800>
16. Y. Kimura, E. H. Lee, C.T. Liu, *Mater. Transact.* **36** (8), 1031 (1995).  
<https://doi.org/10.2320/matertrans1989.36.1031>
17. Y. Tanaka, T. Ohmori, K. Oikawa, et al., *Mater. Transact.* **45** (2), 427 (2004).  
<https://doi.org/10.2320/matertrans.45.427>
18. K. Oikawa, T. Ota, F. Gejima, et al., *Mater. Transact.* **42** (11), 2472 (2001).  
<https://doi.org/10.2320/matertrans.42.2472>
19. J. Liu and J. G. Li, *Mater. Sci. Eng. A.* **454-455**, 423 (2007).  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.085>
20. M. A. Korchagin, *Combust. Explos. Shock Waves* **51** (5), 578 (2015).  
<https://doi.org/10.1134/S0010508215050093>
21. N. A. Kochetov, B. S. Septyarskii, *Combust. Explos. Shock Waves* **56** (3), 308 (2020).  
<https://doi.org/10.1134/S0010508220030077>
22. N. A. Kochetov, B. S. Septyarskii, *Russ. J. Phys. Chem. B* **17** (2), 381 (2023).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793123020082>
23. A. S. Rogachev, A. S. Mukas'yan *Combustion for the Synthesis of Materials: An Introduction to Structural Macrokinetics.* Moscow: Fizmatlit (2012). [in Russian].
24. O. K. Kamynina, A. S. Rogachev, A. E. Sytschev, et al., *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* **13** (3), 193 (2004).

25. O. K. Kamynina, A. S. Rogachev, L. M. Umarov, et al., *Combust. Explos. Shock Waves*, **39** (5), 548 (2003), <https://doi.org/10.1023/A:1026161818701>
26. N. A. Kochetov, *Combust. Explos. Shock Waves* **57** (6), 663 (2021). <https://doi.org/10.1134/S0010508222060041>
27. S. G. Vadchenko, *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* **25** (4), 210 (2016). <https://doi.org/10.3103/S1061386216040105>
28. S. G. Vadchenko, *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* **24** (2), 90 (2015). <https://doi.org/10.3103/S1061386215020107>
29. B. S. Seplyarskii, *Dokl. Phys. Chem.* **396** (4–6), 130 (2004).
30. A. S. Rogachev, *Combust. Explos. Shock Waves* **39** (2), 150 (2003). <https://doi.org/10.1023/A:1022956915794>