

Влияние углерода на удельное электросопротивление интерметаллидного сплава системы Ni – Al, синтезированного методом электротеплового взрыва под давлением

А. Е. Сычев, А. В. Карпов, А. В. Щербаков

Изучено влияние углерода (3 масс. %) на удельное электросопротивление сплавов на основе никелидов алюминия Ni–Al и Ni–Al–C, синтезированных методом электротеплового взрыва в диапазоне температур 300 – 1300 К в вакууме $2 \cdot 10^{-3}$ Па. В процессе электротеплового взрыва в порошковой реакционной среде формируется расплав на основе Ni–Al, в котором происходит растворение углерода. Показано, что в процессе кристаллизации конечного продукта углерод вследствие низкой растворимости в NiAl располагается на границах интерметаллидных зерен NiAl в виде многослойных графитовых нанопленок толщиной 50 – 80 нм, заполняя межзеренное пространство. Показано, что синтезированные сплавы имеют металлический характер проводимости, а удельное электросопротивление в измеренном диапазоне температур 300 – 1300 К монотонно возрастает для Ni–Al от 16 до 40 мкОм·см и для углеродсодержащего сплава Ni–Al–C — от 22 до 60 мкОм·см. При этом также наблюдается увеличение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) от $1,45 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ для NiAl до $1,77 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹ для сплава Ni–Al–C. Наклон кривых зависимости электросопротивления от температуры в исследованном интервале температур 300 – 1300 К остается постоянным и хорошо описывается линейной функцией.

Ключевые слова: электротепловой взрыв, углеродные пленки, интерметаллиды, удельное электросопротивление, температурный коэффициент сопротивления.

DOI: 10.30791/1028-978X-2021-5-58-64

Введение

Интерметаллические сплавы с субмикронными и нанокристаллическими структурными составляющими в настоящее время широко используют в конструкционных элементах и функциональных слоях в современной микроэлектронике, в узлах приборов в авиационной и космической технике, а также в качестве твердых износостойких покрытий в промышленности. Алюминид никеля NiAl представляет собой соединение Юма – Розери со структурой B2 [1]. Эта упорядоченная фаза является перспективным высокотемпературным конструкционным материалом, который мог бы заменить суперсплавы на основе никеля благодаря своей высокой температуре плавления, низкой плотности и стабильности при высоких температурах [2, 3].

Алюминид никеля NiAl образуется по перитектической реакции, сохраняя упорядоченную структуру вплоть до температуры плавления и плавится конгруэнтно при температуре 1638 °С [4].

Для исследования физических свойств металлов и сплавов при высоких температурах и фазовых переходов используют метод удельного электросопротивления, так как с его помощью можно определить тип проводимости и исследовать структурное упорядочение интерметаллидов [5, 6]. Так в работе [7] метод удельного электрического сопротивления использовали для контроля образования дислокаций в изначально свободных от дислокаций монокристаллах NiAl. Обнаружено, что электрическое сопротивление демонстрирует резкий скачок в начале пластической деформации. Это интерпретируется как результат резкого зарождения

плотности дислокаций выше предела текучести материала. Удельное сопротивление наноструктурированного NiAl при температурах от 77 до 300 К выше, чем у поликристаллического NiAl, и при этом оно увеличивается с уменьшением плотности [8]. Этот результат объясняется доминирующим зернограничным рассеянием носителей тока. Было также показано [9], что удельное электрическое сопротивление сплава Ni – 23 масс. % Al в диапазоне температур 100 – 900 °С линейно возрастает с температурой.

Сплавы системы Ni – Al [10, 11] представляют интерес, прежде всего с физико-химической точки зрения, так как в процессе концентрационных изменений образуются различные соединения, отличающиеся упорядочением при одном типе структуры. Изменение концентрации алюминия влияет на электросопротивление в сплавах Ni – Al [12]. Введение алюминия приводит к значительному искажению структур электронной и атомной подсистем никеля.

Методами измерения удельного электросопротивления и дифференциального термического анализа исследованы тройные сплавы Ni_3Al , легированные железом [13]. Показано, что растворение Ni_3Al (γ' -фазы) сопровождается падением удельного электросопротивления. Удельное электросопротивление ρ всех изученных сплавов системы Ni – Al – Fe с повышением температуры монотонно увеличивается, затем снижается, после чего снова возрастает. Аналогичный ход зависимости $\rho(t)$ интерметаллических сплавов на основе Ni_3Al получен в работе [13].

Для тройных сплавов на основе Ni – Al – X, где X = Nb, Ti, V, W, Cr, Fe, Co, изучено влияние легирования на параметры кристаллической решетки, температурную зависимость удельного электросопротивления и др. [14]. Термическая и термо-механическая стабильности структуры и свойств таких материалов могут быть увеличены путем дисперсионного упрочнения субмикронными и наноразмерными частицами вторичных фаз (карбидов, нитридов и других соединений) на основе тугоплавких и редкоземельных металлов [15, 16]. Повышенный интерес вызывает получение интерметаллидов на основе Ni – Al с добавками углерода (графит, сажа, нановолокон, графена). Сплавы на основе системы Ni – Al – C могут быть получены методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (CBC) [17, 18]. Следует упомянуть и новые перспективные методы синтеза сплавов, такие как ударно-волновое компактирование [19] и экструзию [20].

В данной работе синтез интерметаллидных сплавов проводили методом электротеплового взрыва (ЭТВ), основой которого является нагрев реакционноспособного образца прямым пропусканием через него электрического тока приводящего к взаимодействию исходных реагентов и последующей кристаллизации конечного продукта [21].

Цель работы — исследование влияния углерода на удельную электропроводность интерметаллидных сплавов на основе Ni – Al и Ni – Al – C в широком диапазоне температур (300 – 1300 К), полученных методом электротеплового взрыва под давлением.

Экспериментальная методика

Синтез интерметаллидного сплавов на основе Ni – Al и Ni – Al – C проведен методом ЭТВ в условиях квазизостатического сжатия реакционных образцов. Для этого, исходные порошки никеля (марка ПНК-1), алюминия (марка АСД-1) и технического углерода (сажа, марка П803-Т) перемешивали в фарфоровой ступке для получения реакционных смесей: (Ni + Al) и (Ni + Al + C) с содержанием сажи 3 масс. %. Образцы цилиндрической формы массой $m = 28$ г, диаметром $d = 20$ мм и высотой $h = 25$ мм прессовали под давлением $P = 80$ МПа. Затем образец помещали в пресс-форму, а пространство между боковой стенкой пресс-формы и образцом заполняли диэлектрическим порошком SiO_2 . При нагружении верхним пуансоном до давления $P = 96$ МПа образец нагревали прямым пропусканием электрического тока.

Синтезированные образцы Ni – Al и Ni – Al – C исследовали методами рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре ДРОН-3М и электронной микроскопии на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Ultra Plus на базе Ultra 55, с системой энерго-дисперсионного микроанализа INCA Energy 350 XT Oxford Instruments.

Для проведения электрофизических измерений из синтезированных сплавов вырезали образцы прямоугольного сечения размером $1,5 \times 1,5 \times 15,0$ мм³. Для снятия остаточных напряжений, перед проведением измерений исследуемые образцы подвергали термообработке в вакууме в течение 30 мин при температуре 1300 К. Измерения удельного электросопротивления проводили в диапазоне температур 300 – 1300 К в вакууме $2 \cdot 10^{-3}$ Па по стандартной четырех-точечной методике [22] при постоянном токе. Скорость изменения температуры при цикле нагрев/охлаждение составляла 6 К/мин.

Результаты и обсуждение

Пикнометрическая плотность синтезированных образцов составляет $5,3 \text{ г}/\text{см}^3$ для Ni – Al и $5,0 \text{ г}/\text{см}^3$ для Ni – Al – C. Пористость синтезированных образцов отличается незначительно: Ni – Al — 1,1 %, Ni – Al – C — 0,5 %. Результаты рентгенофазового анализа показали, что основной фазой синтезированных сплавов является мономалюминид никеля NiAl (β -фаза) с ОЦК кристаллической решеткой типа CsCl (B2). В случае сплава Ni – Al – C в области $26,4 - 26,6^\circ$ на рентгенограмме наблюдается слабый пик, соответствующий графиту. Микроструктура излома синтезированных сплавов имеет характерный вид хрупкого разрушения (рис. 1).

Для состава Ni – Al интерметаллидные зерна NiAl имеют размер 50 – 150 мкм (рис. 1a). Наблюдаются также межзеренные трещины, образовавшиеся в процессе хрупкого разрушения. Для состава Ni – Al – C характерный размер зерен NiAl на порядок ниже и составляет 5 – 10 мкм

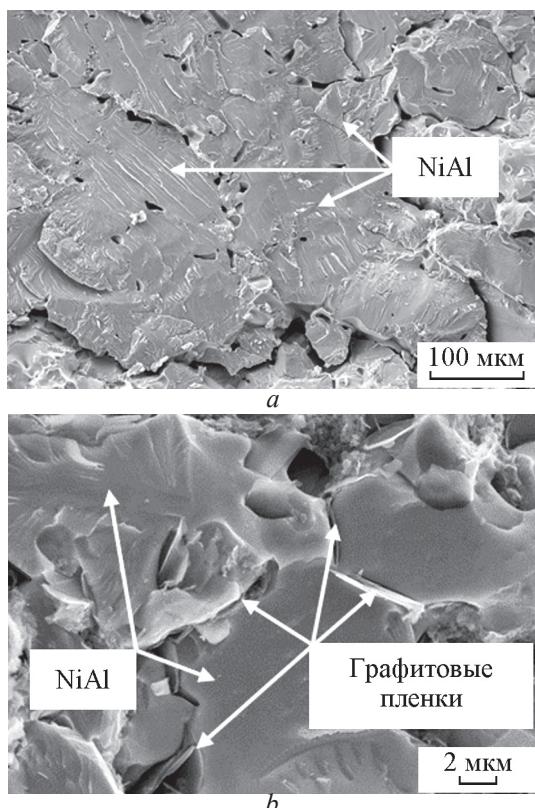


Рис. 1. Микроструктура излома синтезированных сплавов на основе: а — Ni – Al, б — Ni – Al – C.

Fig. 1. Microstructure of the fracture surface of synthesized materials based on: а — Ni – Al, б — Ni – Al – C.

(рис. 1b). Этот результат можно объяснить препятствием углерода росту зерен NiAl из расплава в процессе остывания продукта синтеза. На изломе образцов наблюдаются характерные образования на основе многослойных пленок графита толщиной 50 – 80 нм [17, 18], расположенные на границах интерметаллидных зерен NiAl. Интерметаллидные зерна NiAl имеют окружную форму. В обоих случаях поверхность излома имеет четко выраженный характер внутризеренного хрупкого разрушения. Присутствуют характерные поверхности ручистого излома образцов в виде сходящихся “ступенек”, образующихся в плоскости скола. Направление слияния “ступенек” скола соответствует направлению распространения трещин.

В процессе синтеза и образования расплава Ni – Al происходит диспергирование и растворение сажи на атомарном уровне, при дальнейшей кристаллизации в процессе остывания резко снижается растворимость углерода, что приводит к формированию многослойных графитовых пленок на границах зерен NiAl [17].

На рис. 2 представлены температурные зависимости удельного электросопротивления ρ продуктов синтеза. Интерметаллиды, синтезированные на основе Ni – Al и Ni – Al – C, обладают металлической проводимостью во всем измеренном диапазоне температур 300 – 1300 К, а их удельное электросопротивление монотонно возрастает с ростом температуры и не имеет каких-либо особенностей. Полученные зависимости сохраняют свой характер и после нескольких проведенных измерений в процессе нагрева – охлаждения. Этот

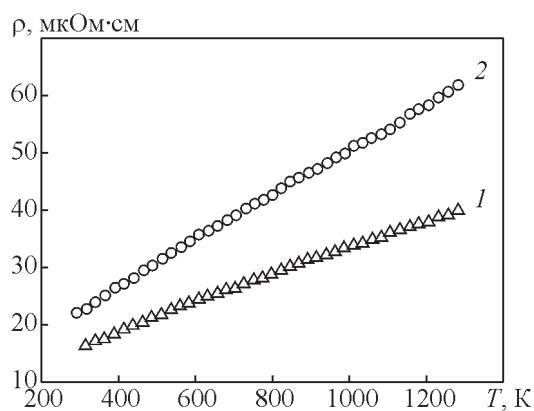


Рис. 2. Температурная зависимость удельного электросопротивления ρ синтезированного сплава на основе: 1 — Ni – Al, 2 — Ni – Al – C.

Fig. 2. Temperature dependence of the resistivity (ρ) of the synthesized materials based on: 1 — Ni – Al, 2 — Ni – Al – C.

результат свидетельствует о стабильности структуры и фазового состава, что является в свою очередь очень важным условием эксплуатации жаропрочных сплавов. Повышение стабильности определяет долговечность и надежность работы изделий из жаропрочных сплавов. Экспериментально полученные результаты по удельному электросопротивлению NiAl при комнатной температуре ($\rho_{\text{NiAl}} = 16 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$) согласуются с результатами исследований [23, 24] ($\rho_{\text{NiAl}} = 8 - 16 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$), в измеренном диапазоне температур.

Кроме того, сплав стехиометрического состава Ni_3Al после 24 часов отжига при 1200°C имеет удельное электросопротивление $37,4 \cdot \text{мкОм}\cdot\text{см}$ и температурный коэффициент электросопротивления $25,7 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ [25], что находится на уровне моноалюминида никеля NiAl [12].

Как видно из рис. 2 присутствие в NiAl даже малых добавок углерода (3 масс. %) приводит к значительному увеличению электросопротивления, связанному с появлением в сплаве дополнительной структурной составляющей в виде многослойных графитовых пленок между зернами интерметаллида NiAl. При этом также наблюдается увеличение ТКС от $1,45 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ для NiAl до $1,77 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ для NiAl/C. Наклон кривых электросопротивления в исследованном интервале температур $300 - 1300 \text{ K}$ остается постоянным и хорошо описывается линейной функцией.

Согласно существующим представлениям, удельное сопротивление поликристаллических материалов определяется удельным сопротивлением зерен и границ зерен. Введение в состав Ni – Al небольшого количества углерода (3 масс. %) приводит к увеличению электросопротивления вследствие уменьшения размеров зерен Ni – Al, образования многослойных графитовых пленок, повышения площади межфазных границ и, как следствие, большим потерям электрического тока из-за рассеяния проводящих электронов [8, 26].

Выводы

Методом электротеплового взрыва под давлением синтезированы интерметаллические сплавы на основе Ni – Al и Ni – Al – C.

Показано, что в процессе синтеза углерод в виде многослойных графитовых нанопленок толщиной 50 – 80 нм располагается на границах интерметаллических зерен NiAl, заполняя межзеренное пространство.

Определено, что синтезированные сплавы имеют металлический характер проводимости, а

удельное электросопротивление в измеренном диапазоне температур монотонно возрастает для сплава на основе Ni – Al от 16 до $40 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$ и для углеродсодержащего материала Ni – Al – C — от 22 до $60 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$. Введение даже небольшого количества углерода (3 масс. %) приводит к значительному увеличению электросопротивления.

Результаты данного исследования могут быть использованы для решения проблемы стабильности структуры материалов в условиях высокотемпературного нагрева в твердом состоянии.

Литература

- Miracle D.B., Darolia R. NiAl and its Alloys. In “Intermetallic Compounds: Principles and Practice, V. 1: Principles”, Edited by J.H. Westbrook and R.L. Fleischer. John Wiley & Sons, Ltd., London, 1995, pp. 55 – 74.
- Noebe R.D., Bowman R.R., Nathal M.V. The physical and mechanical metallurgy of NiAl. In “Physical Metallurgy and Processing of Intermetallic Compounds”, Edited by N.S. Stoloff, V.K. Sikka. Chapman & Hall, New York, 1996, pp. 212 – 296. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1215-4>
- Darolia R., Lahrman D.F., Field R.D., Dobbs J.R., Chang K.M., Goldman E.H., Konitzer D.G. Overview of NiAl alloys for high temperature structural applications. In: Ordered Intermetallics — Physical Metallurgy and Mechanical Behaviour. Liu C.T., Cahn R.W., Sauthoff G. (eds). NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences), Springer, Dordrecht, 1992, vol. 213, pp. 679 – 698. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2534-5_43.
- Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3 т. Т. 1. Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996, 992 с.
- Corey C.L., Lisowsky E. Electrical Resistivity of Ni_3Al Alloys. Trans. Met. Soc. AIME, 1967, vol. 239A, pp. 239 – 245.
- Николаев Б.В., Тягунов Г.В. Исследование удельного электросопротивления сплавов системы Ni – Al. Расплавы, 1995, № 4, с. 22 – 30.
- Sun Y.Q., Hazzledine P.M., Dimiduk D.M. Formation of dislocations in NiAl single crystals studied by in situ electrical resistivity measurement. Symposium EE – Electrically Based Microstructural Characterization II, 1997, v. 500, article no. 49. DOI: <https://doi.org/10.1557/PROC-500-49>
- Qin X.Y., Zhang L.D., Wu B.M., Tian M.L. Resistivity and its temperature dependence of nanostructured NiAl at temperatures from 77 to 300 K. Journal of Applied Physics, 1996, v. 80, article no. 4776. <https://doi.org/10.1063/1.363417>
- Karaköse E., Keskin M. Influences of high temperature on the microstructural, electrical and mechanical properties of Ni – 23 wt.% Al alloy. The International Journal

- of Materials Research (IJMR), 2015, v. 106, iss. 1, pp. 29 – 42. <https://doi.org/10.3139/146.111145>
10. Косицын С.В. Сплавы и покрытия на основе мономагнидного никеля. Екатеринбург: УрО РАН, 2008, 377 с.
11. Митрохин Ю.С., Белаш В.П., Степанова Н.Н., Ринкевич А.Б., Климова И.Н., Акшенцев Ю.Н. Влияние легирования на межатомное взаимодействие в интерметаллическом соединении Ni_3Al . Физика металлов и металловедение, 2005, т. 99, № 3, с. 47 – 53.
12. Тягунов А.Г., Вьюхин В.В., Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Савин О.В. Влияние алюминия на электросопротивление никель-алюминиевых сплавов. Вестник ЮУрГУ, Серия “Металлургия”, 2015, т. 15, № 4, с. 51 – 56.
13. Лепихин С.В., Степанова Н.Н. Исследование сплавов Ni_3Al – Fe методами измерения удельного электросопротивления и дифференциального термического анализа. Известия вузов, Цветная металлургия, № 5, 2013, с. 53 – 58.
14. Степанова Н.Н., Ринкевич А.Б., Митрохин Ю.С. Физические свойства Ni_3Al , легированного третьим элементом: эксперимент и моделирование. Под ред. Е.П. Романова. Екатеринбург: УрО РАН, 2010, 175 с.
15. Honjo K., Shindo A. Influence of carbide formation on the strength of carbon fibers on which silicon and titanium have been deposited. J. Mater. Sci., 1986, v. 21, pp. 2043 – 2048. <https://doi.org/10.1007/BF00547945>
16. Chou T.W., Kelly A., Okura A. Fibre-reinforced metal-matrix composites. Composites. 1985, v. 16, pp. 187 – 206. [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4361\(85\)90603-2](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4361(85)90603-2)
17. Sytschev A.E., Vadchenko S.G., Boyarchenko O.D., Shchukin A.S. Ni_3Al/C Composites by thermal explosion. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2018, v. 27, no. 1, pp. 64 – 65. DOI: 10.3103/S1061386218010090
18. Sytschev A.E., Kochetov N.A., Vadchenko S.G., Kovalev D.Yu, Shchukin A.S. Processing of Ni – Al intermetallic with 2D carbon components. Materials Chemistry and Physics. 2019, v. 238, article no. 121898. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121898>
19. Saikov I.V., Alymov M.I., Vadchenko S.G., Kovalev I.D. Investigation of shock-wave initiation in metal-teflon powder mixtures. Letters on materials, 2017, v. 7, no. 4, pp. 465 – 468. DOI: 10.22226 / 2410-3535-2017-4-465-468
20. Galiev F.F., Saikov I.V., Berbentsev V.D., Guluytin A.V., Bugakov V.I., Sachkova N.V., Konovalikhin S.V., Alymov M.I. High-Temperature Gas Extrusion of a Reactive Ni + Al powder mixture. Doklady Physics, 2019, v. 64, no. 12, pp. 446 – 448. DOI: 10.1134/S1028335819120024
21. Shcherbakov A.V., Shcherbakov V.A., Barinov V.Yu., Vadchenko S.G., Linde A.V. Influence of the mechanical activation of reaction mixture on the formation of microstructure of ZrB_2 –CrB composites obtained by electrothermal explosions under pressure. Refractories and Industrial Ceramics, 2019, v. 60, no. 2, pp. 223 – 226. DOI: 10.1007/s11148-019-00340-y
22. Карпов А.В., Морозов Ю.Г., Бунин В.А., Боровинская И.П. Влияние оксида иттрия на электропроводность нитридной СВС-керамики. Неорганические материалы, 2002, т. 38, № 6, с. 762 – 766.
23. Talaş S. Nickel aluminides. In Intermetallic Matrix Composites, Intermetallic Matrix Composites, Published: 1 January 2018 by Elsevier BV, pp. 37 – 69. doi:10.1016/b978-0-85709-346-2.00003-0.
24. Terada Y., Ohkubo K., Mohri T., Suzuki T. Thermal Conductivity of intermetallic compounds with metallic bonding. Materials Transactions, 2002, v. 43, no. 12, pp. 3167 – 3176.
25. Минц Р.С., Беляева Г.Ф., Малков Ю.С. Взаимодействие между металлическими соединениями Ni_3Al и Ni_3Nb . Докл. АН СССР, 1962, т. 143, № 4, с. 871 – 874.
26. Ванюхин К.Д., Кобелева С.П., Концевой Ю.А., Курмачев В.А., Сейдман Л.А. Исследование однородности поверхностного сопротивления металлических пленок Ti, Al, Ni, Cr и Au на кремнии. Материалы электронной техники, 2012, № 4, с. 33 – 37.

References

1. Miracle D.B., Darolia R. NiAl and its Alloys. In “Intermetallic Compounds: Principles and Practice, Vol. 1: Principles”, Edited by J.H. Westbrook and R.L. Fleischer. John Wiley & Sons, Ltd., London, 1995, pp. 55 – 74.
2. Noebe R.D., Bowman R.R., Nathal M.V. The physical and mechanical metallurgy of NiAl. In book: Physical metallurgy and processing of intermetallic compounds, eds. N.S. Stoloff, V.K. Sikka. Springer, Boston, MA, 1996, pp. 212 – 296, <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1215-4>.
3. Darolia R., Lahrman D.F., Field R.D., Dobbs J.R., Chang K.M., Goldman E.H., Konitzer D.G. Overview of NiAl alloys for high temperature structural applications. In: Ordered Intermetallics — Physical Metallurgy and Mechanical Behaviour, eds. Liu C.T., Cahn R.W., Sauthoff G., NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences), Springer, Dordrecht, 1992, vol. 213, pp. 679 – 698, https://doi.org/10.1007/978-94-011-2534-5_43.
4. Lyakishev N.P. *Phazovye diagrammy binarnykh system* [Phase diagrams of binary metallic systems]. Handbook. Vols. 1 – 3. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996 – 2000.
5. Corey C.L., Lisowsky E. Electrical resistivity of Ni_3Al alloys. Trans. Met. Soc. AIME, 1967, vol. 239A, pp. 239 – 245.
6. Nikolaev B., Tjagunov G. Investigation into the electrical resistivity of Ni – Al alloys. J. Phys.: Condens. Matter, 1994, vol. 6, pp. 9301 – 9309.
7. Sun Y.Q., Hazzledine P.M., Dimiduk D.M. Formation of dislocations in NiAl single crystals studied by in situ electrical resistivity measurement, 1997, vol. 500, Symposium EE — Electrically Based Microstructural

- Characterization II, article no. 49, doi: <https://doi.org/10.1557/PROC-500-49>.
8. Qin X.Y., Zhang L.D., Wu B.M., Tian M.L. Resistivity and its temperature dependence of nanostructured NiAl at temperatures from 77 to 300 K. *J. of Applied Physics*, 1996, vol. 80, article no. 4776, <https://doi.org/10.1063/1.363417>.
9. Karaköse E., Keskin M. Influences of high temperature on the microstructural, electrical and mechanical properties of Ni-23 wt.% Al alloy. *The International Journal of Materials Research (IJMR)*, vol. 106, issue 1, January 2015, pp. 29 – 42, <https://doi.org/10.3139/146.111145>.
10. Kositsyn S.V. *Splavy i pokryтия на основе мономагниево-никелевых сплавов* [Alloys and coatings based on nickel monoaluminates]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008, 377 p.
11. Mitrokhin Yu.S., Belash V.P., Stepanova N.N., Rinkevich A.B., Klimova I.N., Akshentsev Yu.N. Effect of alloying on interatomic interaction in the intermetallic compound Ni₃Al. *Fizika metallov i metallovedeniye — The Physics of Metals and Metallography*, 2005, vol. 99, pp. 265 – 271.
12. Tyagunov A.G., Vyukhin V.V., Baryshev E.E., Tyagunov G.V., Savin O.V. Influence of aluminium on electric resistivity of nickel-aluminium alloys. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Metallurgiya — Bulletin of the South Ural State University. Series Metallurgy, metallurgy series*, 2015, vol. 15, no. 4. pp. 51 – 56.
13. Lepikhin S.V., Stepanova N.N. Investigation of Ni₃Al–Fe alloys by electrical resistivity measurements and differential thermal analysis. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya Metallurgiya — Proceedings of Higher Schools Nonferrous Metallurgy*, 2013, 5, pp. 53 – 58, (in Russ.), <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2013-5-53-58>.
14. Stepanova N.N., Rinkevich A.B., Mitrokhin Yu.S. *Phizicheskie svoistva Ni₃Al dopitovannogo tritiumom: eksperiment i modelirovanie* [Physical properties of Ni₃Al doped with the third element: experiment and modeling]. Ed. E.P. Romanova, Yekaterinburg, Uro RAS, 2010, 175 p.
15. Honjo K., Shindo A. Influence of carbide formation on the strength of carbon fibers on which silicon and titanium have been deposited. *J Mater Sci.*, 1986, vol. 21, pp. 2043 – 2048, doi.org/10.1007/BF00547945.
16. Chou T.W., Kelly A., Okura A. Fibre-reinforced metal-matrix composites. *Composites*, 1985, vol. 16, pp. 187 – 206, [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4361\(85\)90603-2](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4361(85)90603-2).
17. Sytschev A.E., Vadchenko S.G., Boyarchenko O.D., Shchukin A.S. Ni₃Al/C composites by thermal explosion. *Int. J. of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 64 – 65, doi: 10.3103/S1061386218010090.
18. Sytschev A.E., Kochetov N.A., Vadchenko S.G., Kovalev D.Yu., Shchukin A.S. Processing of Ni – Al Intermetallic with 2D carbon components. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, vol. 238, article no. 121898, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121898>.
19. Saikov I.V., Alymov M.I., Vadchenko S.G., Kovalev I.D. Investigation of shock-wave initiation in metal-teflon powder mixtures. *Letters on materials*, 2017, vol. 7, no. 4, pp. 465 – 468, doi: 10.22226/2410-3535-2017-4-465-468.
20. Galiev F.F., Saikov I.V., Berbentsev V.D., Guluytin A.V., Bugakov V.I., Sachkova N.V., Konovalikhin S.V., Alymov M.I. High-temperature gas extrusion of a reactive Ni+Al powder mixture. *Doklady Physics*, 2019, vol. 64, no. 12, pp. 446 – 448, doi: 10.1134/S1028335819120024.
21. Shcherbakov A.V., Shcherbakov V.A., Barinov V.Yu., Vadchenko S.G., Linde A.V. Influence of the mechanical activation of reaction mixture on the formation of microstructure of ZrB₂–CrB composites obtained by electrothermal explosions under pressure. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2019, vol. 60, no. 2, pp. 223 – 226, doi: 10.1007/s11148-019-00340-y.
22. Karpov A.V., Konovalikhin S.V., Borovinskaya I.P., Sachkova N.V., Kovalev D.Yu., Sytschev A.E. Conductive TiB₂–AlN–BN-based composite SHS ceramics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya — Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2018, no. 2, pp. 61 – 68. (in Russ.), <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-61-68>.
23. Talaş Ş. Nickel aluminides. In *Intermetallic matrix composites, intermetallic matrix composites*. Published: 1 January 2018 by Elsevier BV, pp. 37 – 69, doi:10.1016/b978-0-85709-346-2.00003-0.
24. Yoshihiro Terada, Kenji Ohkubo, Tetsuo Mohri, Tomoo Suzuki. Thermal conductivity of intermetallic compounds with metallic bonding. *Materials Transactions*, 2002, vol. 43, no. 12, pp. 3167 – 3176.
25. Mints R.S., Belyaeva G.F., Malkov Yu.S. Interaction between Ni₃Al and Ni₃Nb. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1962, vol. 143, no. 4, pp. 871 – 874.
26. Vanyukhin K.D., Kobeleva S.P., Kontsevoi Y.A., Kurmachev V.A., Seidman L.A. Issledovaniye odnorodnosti poverkhnostnogo soprotivleniya metallicheskikh plenok Ti, Al, Ni, Cr i Au na kremnii [Studying the uniformity of the surface resistance of Ti, Al, Ni, Cr, and Au metal films on silicon. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy Elektronnoi Tekhniki — Materials of Electronics Engineering*, 2013, vol. 42, pp. 483 – 487, <https://doi.org/10.1134/S1063739713080143>.

*Статья поступила в редакцию — 19.10.2020 г.
после доработки — 9.11.2020 г.
принята к публикации — 10.11.2020 г.*

Сычев Александр Евгеньевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерзанова Российской академии наук (ИСМАН) (142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 8), кандидат технических наук, заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, специалист в области самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. E-mail: sytschev@ism.ac.ru.

Карпов Андрей Владиславович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерзанова Российской академии наук (ИСМАН) (142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 8), научный сотрудник, специалист в области электро-физических измерений. E-mail: karpov_av@ism.ac.ru

Щербаков Андрей Владимирович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерзанова Российской академии наук (ИСМАН) (142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 8), научный сотрудник, специалист в области самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. E-mail: ismandrew@ism.ac.ru.

Effect of carbon on the electrical resistivity of Ni – Al intermetallic alloy synthesized by an electrothermal explosion under pressure

A. E. Sytschev, A. V. Karpov, A. V. Shcherbakov

In this paper, we studied the effect of carbon (3 wt. %) on the electrical resistivity of materials based on Ni – Al and Ni – Al – C synthesized by the electrothermal explosion in the temperature range 300 – 1300 K in a vacuum of $2 \cdot 10^{-3}$ Pa. During an electrothermal explosion, a Ni – Al-based melt is formed in a powder reactive medium, in which carbon is dissolved. It is shown that during the crystallization of the final product, due to its low solubility in NiAl, carbon is located on the surface of intermetallic NiAl grains in the form of multilayer graphite nanofilms 50 – 80 nm thick, filling the intergranular space. It is shown that the synthesized materials have a metallic conductivity, and the electrical resistivity in the measured temperature range of 300 – 1300 K increases monotonically for the Ni – Al-based alloy from 16 to 40 mW·cm and for the carbon-containing Ni – Al – C material from 22 to 60 mW·cm. The temperature coefficient of resistance (TCS) also increases from $1.45 \cdot 10^{-3}$ K $^{-1}$ for NiAl to $1.77 \cdot 10^{-3}$ K $^{-1}$ for NiAl/C. The slope of the resistivity curves in the studied temperature range of 300 – 1300 K remains constant and is well described by a linear function.

Keywords: electrothermal explosion, structure formation, carbon films, intermetallides, electrical resistivity.

Sytschev Alexander — Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences (ISMAN, Academician Osipyan str., 8, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia), PhD, head of laboratory, leading scientific scientist, specialist in the field of self-propagating high-temperature synthesis, structural macrokinetics. E-mail: sytschev@ism.ac.ru.

Karpov Andrey — Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences (ISMAN, Academician Osipyan str., 8, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia), scientific researcher, specialist in the field of electro-physical research. E-mail: karpov_av@ism.ac.ru.

Shcherbakov Andrey — Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science Russian Academy of Sciences (ISMAN, Academician Osipyan str., 8, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia), scientific researcher, specialist in the field of self-propagating high-temperature synthesis. E-mail: ismandrew@ism.ac.ru.