

Высокотемпературный синтез сложнолегированных никелидов алюминия

В. В. Гостищев, И. А. Астапов, Ри Хосен, С. Н. Химухин, А. В. Середюк

Алюминотермическим восстановлением оксидов металлов (NiO, TiO₂, Cr₂O₃, MoO₃, WO₃) получены никелиды алюминия NiAl легированные хромом, молибденом, вольфрамом. Дана термодинамическая оценка и выполнен термический анализ алюминотермических реакций восстановления. Определен состав исходной шихты, который обеспечивает максимальных выход металлов в сплав. По результатам элементного и фазового анализа в сплавах идентифицирован никелид NiAl, содержащий 1,5 – 6,5% титана, хрома, молибдена, вольфрама. Исследована микроструктура синтезированных сплавов и определена их микротвердость.

Ключевые слова: никелиды алюминия, хром, молибден, вольфрам, титан, металлотермия, синтез, микротвердость, фазовый и элементный состав.

Введение

Одним из приоритетных направлений современного материаловедения является создание материалов со специальными свойствами, в том числе разработка сплавов на основе интерметаллидов системы NiAl. Интерметаллиды, например, никелиды алюминия, занимают промежуточное положение между металлами и керамикой, как по типу химической связи, так и по свойствам. Это определяет их уникальные физико-механические свойства: высокую прочность, жаро- и коррозионную стойкость, антифрикционные свойства, относительно низкий удельный вес.

Для достижения высокого уровня физико-механических свойств интерметаллидных сплавов важную роль играет легирование тугоплавкими металлами. Например, сплавы, в которых часть атомов никеля и алюминия замещается хромом, молибденом, вольфрамом, титаном обладают повышенным сопротивлением к окислению при 1200 °С [1 – 7], и могут найти применение в качестве покрытий деталей машин, работающих в сложных условиях эксплуатации. В настоящее время проблема получения никелидов и их сплавов решается путем использования, главным образом традиционных технологий, которые отличаются большими энергозатратами, многостадийностью технологических циклов, малой производительностью и не всегда обеспечивают требуемое качество получаемого продукта. Отмечена общая

тенденция, направленная на повышение эффективности известных и поиск новых методов получения сплавов на основе интерметаллидов [8 – 14].

Одним из путей решения проблемы разработки прогрессивной, экономичной технологии — получение сплавов путем металлотермического совместного восстановления оксидов исходных металлов. Тепловые эффекты экзотермических реакций, характерные для этих процессов, позволяют в ряде случаев отказаться от печных установок для нагрева шихты. Это существенно упрощает технологию и снижает себестоимость продукции [15].

Вместе с тем, известны немногочисленные работы по получению двойных интерметаллидов металлотермией оксидов [16 – 18]. Однако имеющихся литературных данных недостаточно для адаптации метода металлотермии применительно к получению сложнолегированных интерметаллидов с тугоплавкими легирующими элементами.

Цель настоящей работы — получение никелидов алюминия и их сплавов с хромом, молибденом, вольфрамом, титаном путем металлотермического восстановления оксидов исходных металлов.

Методика и материалы

В качестве исходных веществ использовали, в масс. %: оксид никеля NiO — 98,9 %, оксид хрома Cr₂O₃ — 98,0 %, оксид молибдена MoO₃ — 98,5 %,

Таблица 1

Параметры алюминотермических реакций

Реакции восстановления оксидов металлов	$T_{ад}$, К	Q , кДж/моль	ΔG_{400K}° , кДж/моль	Расход алюминия, кг/(кг оксида)
$3NiO+2Al=3Ni+Al_2O_3$	3500	968	-944	0,241
$Cr_2O_3+2Al=2Cr+Al_2O_3$	3200	536	-524	0,335
$MoO_3+2Al=Mo+Al_2O_3$	3800	930	-914	0,375
$WO_3+2Al=W+Al_2O_3$	3900	835	-819	0,233
$1,5TiO+2Al=1,5Ti+Al_2O_3$	1800	262	-251	0,45

$T_{ад}$ — адиабатическая температура, Q — теплота реакции, ΔG_{400K}° — энергия Гиббса.

оксид вольфрама WO_3 — 98,5 %, оксид титана TiO_2 — 98,2 %, порошок алюминия — 99,5 %, средний размер частиц 50 мкм, кальций фтористый марки “С”. Фазовый состав сплавов определяли с помощью дифрактометра “ДРОН-7” (CuK_{α} -излучение). Элементный анализ полученных материалов исследовали на рентгенофлуоресцентном анализаторе “Спектроскан МАКС-GV”. Термический анализ металлотермических систем проводили с применением “Derivatograph Q-1500”. Микроструктуру исследовали с помощью электронного микроскопа “Hitachi SU-70”.

Металлотермическую плавку проводили в жаропрочных металлических тиглях, футерованных огнеупорным материалом. Исходные компоненты смешивали в определенных массовых соотношениях до получения однородной по составу шихты. Металлотермическая реакция, инициируемая электрозапалом, далее протекает на воздухе без внешнего подогрева. В результате плавки образуются продукты двух видов: металлическая фаза в форме компактного слитка и шлак, легко отделяющиеся друг от друга.

Результаты и обсуждение

Процесс металлотермического получения сплавов с определенной долей приближения может быть представлен в виде суммы восстановительных реакций оксидов металлов. Термодинамические характеристики этих реакций, лежащих в основе синтеза сплавов, представлены в табл. 1.

Оценка температурной зависимости изменения изобарного потенциала ΔG_{400K}° (кДж/моль) реакций алюминотермического восстановления оксидов никеля, хрома, молибдена, вольфрама, показывает, что значения величин потенциалов лежат в области благоприятной для образования сплавов этих металлов (табл. 1, рис. 1).

Из данных следует, что наиболее устойчив термодинамически оксид титана и оксид хрома.

Восстановление оксидов металлов алюминием исследовали методом дифференциального термического анализа (ДТА). Результаты по термографи-

рованию смесей оксидов металлов с порошкообразным алюминием при стехиометрическом соотношении представлены на рис. 2.

При нагревании в атмосфере воздуха на кривых ДТА наблюдается два эффекта: эндотермический при температуре плавления алюминия и экзотермический, отвечающий взаимодействию алюминия с оксидом металла. При этом восстановление оксидов вступает в активную фазу после расплавления алюминия при $\sim 659^{\circ}C$ и протекает по гетерогенному механизму в интервале $800 - 1100^{\circ}C$.

Состав исходной шихты для синтеза никелидов устанавливали с учетом стехиометрического соотношения основных компонентов в реакциях восстановления оксидов металлов и алюминиевого порошка (табл. 1). Очевидно, что для успешного протекания металлотермического синтеза интерметаллидов необходимо обеспечить определенный тепловой эффект, достаточный для расплавления шихты и формирования интерметаллидов. Температура процесса превышает температуру плавления интерметаллида (например, $NiAl - 1638^{\circ}C$) и составляет $2470^{\circ}C$ [19]. Кроме того, в нашем случае, алюминий в составе шихты берется с избытком относительно расчетного, тем самым создаются необходимые для синтеза условия. Эксперименты пока-

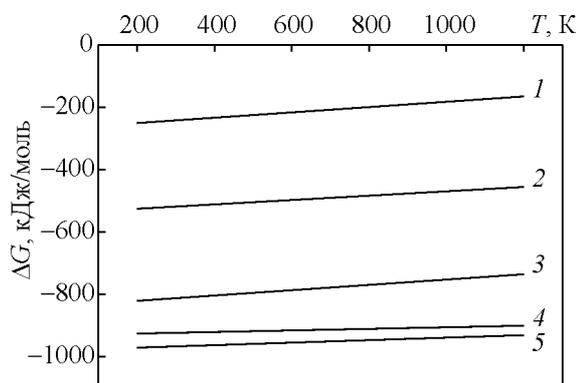


Рис. 1. Температурная зависимость изобарного потенциала ΔG реакций алюминотермического восстановления оксидов: 1 — TiO_2 , 2 — Cr_2O_3 , 3 — WO_3 , 4 — MoO_3 , 5 — NiO .

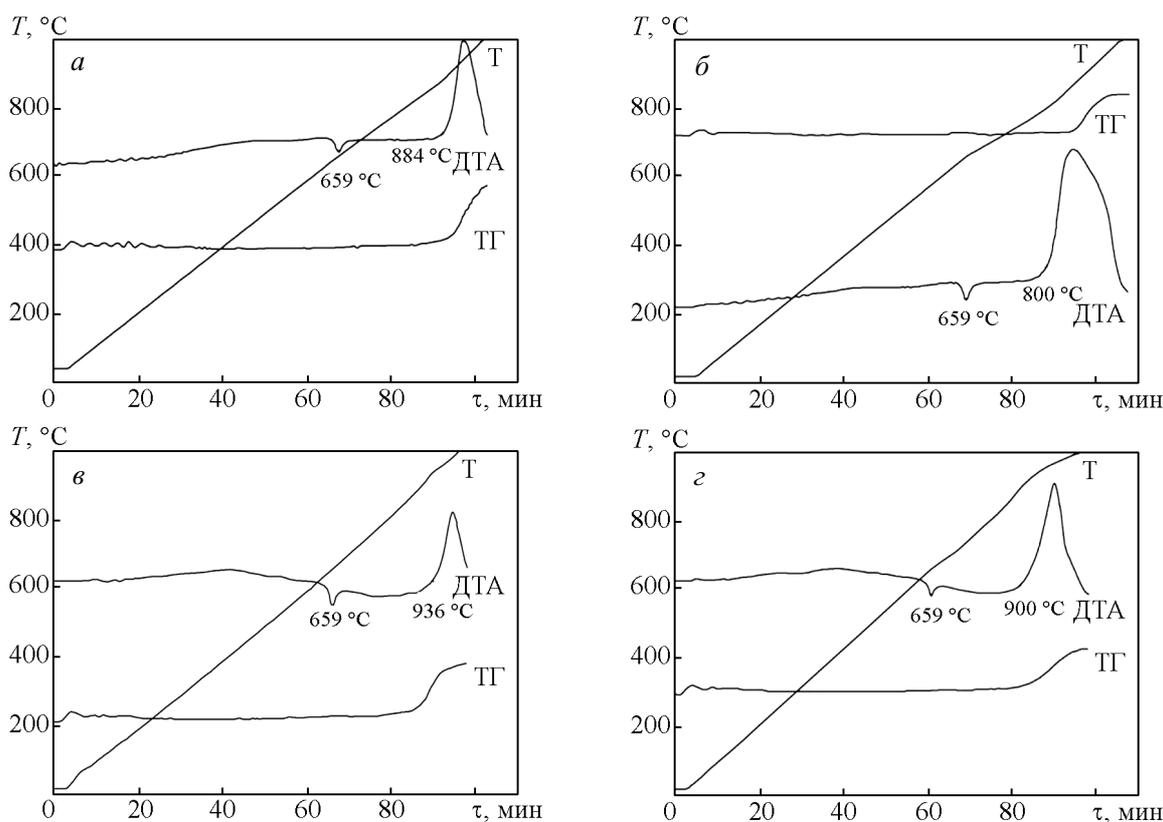


Рис. 2. Термограммы смесей оксидов металлов с порошкообразным алюминием в стехиометрическом соотношении: а – NiO – Al; б – Cr₂O₃ – Al; в – TiO₂ – Al; з – NiO – MoO₃ – WO₃ – TiO₂ – Al.

зали, что по мере увеличения избытка восстановителя в составе шихты значительная его часть переходит в сплав, не участвуя в восстановлении. При этом

скорость горения металлотермической смеси прогрессивно ускоряется, процесс протекает с выносом вещества из тигля. Это снижает выход целевого

Таблица 2

Условия получения, состав и микротвердость никелидов алюминия

№ п/п	Состав исходной шихты (соотношение компонентов)	Содержание элементов в сплаве, масс. %							Фазовый состав	Микротвердость, МПа
		Ni	Al	Cr	Mo	W	Fe	Ti		
1	NiO – Al – CaF ₂ 1:0,45:0,5 (в атмосфере воздуха)	64,5	33,6	—	—	—	0,7	—	NiAl Шлаковая фаза	3546 7500
2	NiO – Al – CaF ₂ 1:0,45:0,5 (в атмосфере аргона)	68,1	31,7	—	—	—	0,2	—	NiAl	3562
3	NiO – Cr ₂ O ₃ – Al – CaF ₂ 1:0,1:0,55:0,6	63,4	30,7	3,7	—	—	0,6	—	NiAl	4672
4	NiO – Cr ₂ O ₃ – MoO ₃ – WO ₃ – Al – CaF ₂ 1:0,04:0,04:0,04:0,55:0,6	60,1	30,7	2,04	1,61	1,8	0,5	—	NiAl	6200
5	NiO – Cr ₂ O ₃ – MoO ₃ – WO ₃ – Al – CaF ₂ 1:0,07:0,07:0,07:0,6:0,6	56,0	32,3	3,55	3,21	3,20	0,8	—	NiAl	7386
6	NiO – Cr ₂ O ₃ – MoO ₃ – WO ₃ – Al – CaF ₂ 1:0,14:0,14:0,14:0,65:0,65	57,3	22,0	6,60	6,49	5,64	0,4	—	NiAl, Cr, Mo, W	7436
7	NiO – TiO ₂ – Al – CaF ₂ 1:0,14:0,55:0,6	60,3	35,1	—	—	—	0,5	4,1	NiAl	6908
8	NiO – Cr ₂ O ₃ – MoO ₃ – WO ₃ – TiO ₂ – Al – CaF ₂ 1:0,14:0,14:0,14:0,14:0,65:0,65	55,4	28,5	2,31	3,46	2,88	0,5	4,86	NiAl	5584

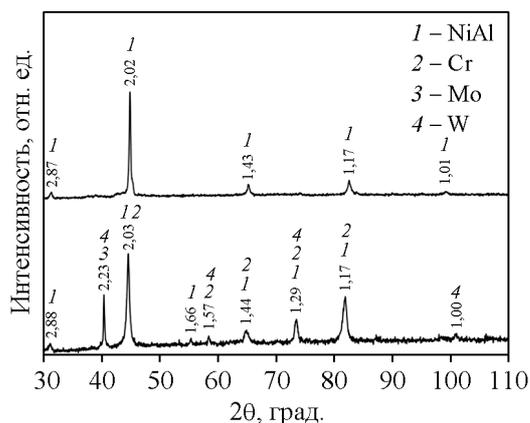


Рис. 3. Дифрактограммы сплавов NiAl: а – № 2, б – № 6. Приведены значения межплоскостных расстояний *d*. № сплавов по табл. 2.

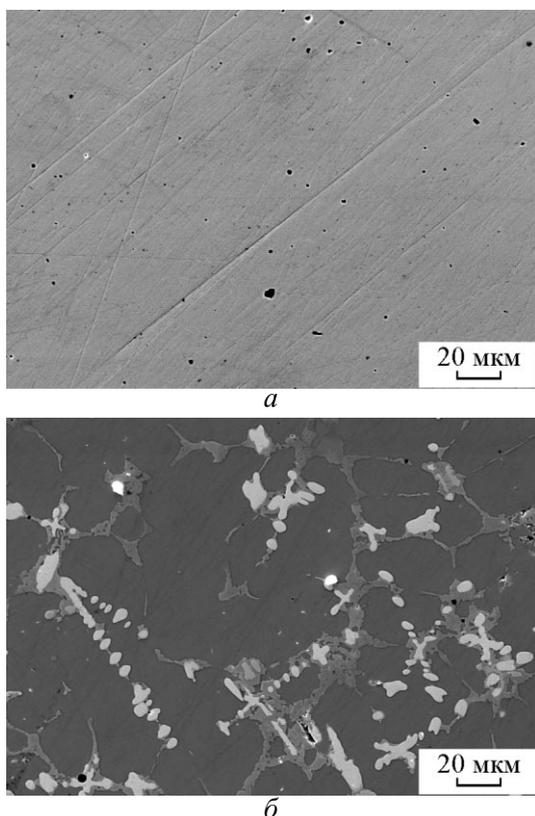


Рис. 4. Микроструктура сплавов: а – № 1 (NiAl); б – № 6 (NiAl, Cr, Mo, W).

продукта. Для снижения скорости горения и обеспечения полноты выхода металла в состав шихты вводят балластную добавку, которая одновременно выполняет роль флюса, улучшающего условия формирования компактных слитков металлов. В качестве добавки используют фтористый кальций. Выход

металлов в сплав составляет 85 – 92 масс. %. Результаты получения сплавов приведены в табл. 2.

Результаты элементного и рентгенофазового анализов показали, что в синтезированных сплавах образуется фаза NiAl с различным содержанием легирующих металлов (табл. 2, рис. 3). В сплаве №6 идентифицированы фазы Cr, Mo, W (рис. 3б). При этом не исключено формирование твердых растворов NiAl с Cr, Mo, W, что не противоречит известным данным [20, 21].

Микроструктура сплавов никель-алюминия представлена основной фазой интерметаллида (сплав №1), а так же сплавом сложнолегированного интерметаллида с включениями Cr, Mo, W (сплав №6) по границам зерен основной фазы (рис. 4).

Заключение

Получены никелиды алюминия NiAl легированные титаном, хромом, молибденом, вольфрамом при алюмотермическом восстановлении оксидов металлов. Установлен оптимальный состав исходной шихты для обеспечения максимального выхода целевого продукта.

Результаты термодинамической оценки и термического анализа алюмотермических систем указывают на высокую вероятность восстановления оксидов металлов в интервале 800 – 1100 °С и согласуются с экспериментальными данными по получению сплавов. Полученные сплавы по результатам рентгенофазового и элементного анализов идентифицируются как никелиды состава NiAl, содержащие 1,5 – 6,5% титана, хрома, молибдена, вольфрама. Микротвердость сложнолегированных сплавов (7436 МПа) выше, чем исходного никелида алюминия (3546 МПа).

Литература

1. Колобов Ю.Р. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением. Под науч. ред. Е.Н. Каблова и Ю.Р. Колобова; Центр наноструктурных материалов и нанотехнологий Белгородского гос.ун-та. М.: Тип.ИД МИСиС, 2008, 326 с.
2. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды Ni₃Al и TiAl: микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург: Росс.акад.наук. Урал.отд.ние. Ин-т физики металлов, 2002, 358 с.
3. Поварова К.Б. Физико-химические принципы создания термически стабильных сплавов на основе алюминидов переходных металлов. Материаловедение, 2007, № 12, с. 20 – 27.
4. Фаткулин О.Х., Офицеров А.А. Модифицирование жаропрочных никелевых сплавов дисперсными

- частичами тугоплавких соединений. Литейное производство, 1993, № 4, с. 13 – 14.
5. Uchkov S.S., Film Yu.A., Amosova L.I. Titanium-nikelide Casting Superalloys. Proc. of the Ninth World Conference on Titanium, 1999, 7 – 11 June, St-Petersburg, Russia, p. 1668 – 1674.
 6. Рафальский И.В., Арабей А.В. Термодинамический анализ реакций взаимодействия фаз компонентов литейных сплавов, полученных из алюмоматричных композиций. Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, Ползуновский альманах – 2011, с. 29 – 32.
 7. Morris D.G., Naka S., Caron P. (Editors). Intermetallics and Superalloys. EUROMAT 99, 2000, v. 10, p. 398.
 8. Итин В.И., Найбороденко Ю.С. Под ред. А.Д. Коротаева. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. Сиб. физ. техн. ин-т им. В.Д. Кузнецова при Том. гос. ун-те, НИИ прикл. Математики и механики при Том. гос. ун-те. Томск, 1989, 209 с.
 9. Овчаренко В.Е., Лапшин О.В., Боянгин Е.Н., Рамазанов И.С., Чудинов В.А. Высокотемпературный синтез интерметаллического соединения Ni₃Al под давлением. Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия, 2007, № 4, с. 63 – 69.
 10. Анциферов В.Н. и др. Новые материалы. Под науч. ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС, 2002, 736 с.
 11. Berdovsky Y.N. Intermetallics research progress. NY: Nova Science Publishers, Inc., 2008, 290 p.
 12. Westbrook J.H., Fleischer R.L. Intermetallic Compounds. V.3. Progress.-John Willey and Sons, 2002, 1041 p.
 13. Prokoshkin S.D., Pushin V.G., Ryklina E.P., Khmelevskaya I.Yu. Application of titanium nickelidebased alloys in medicine. Phys. Met. Metal., 2004, v. 97, Sup-pi. 1, p. 856 – 896.
 14. Ferro R., Saccone A. Intermetallic Chemistry. Department of Chemistry, University of Genoa, Italy. Series Editor: Robert W. Cahn FRS Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Cambridge, UK, 2008, p. 786.
 15. Соколов И.П., Пономарев Н.Л. Введение в металлургию. Под ред. А.М. Чекмарева. М.: Металлургия, 1990, 132 с.
 16. Красиков С.А., Ильиных С.А., Ситникова О.А. и др. Металлотермическое получение сплавов алюминий-титан-никель для технологии плазменных покрытий. Перспективные материалы, 2011, с. 448 – 451.
 17. Parsa M.R., Soltanieh M. On the formation of Al₃Ni₂ intermetallic compound by aluminothermic reduction of nickel oxide. Materials characterization, 2011, v. 62, p. 691 – 696.
 18. Hosseinpouri M., Mirmonsef S.A., Soltanieh M. Production of Al-Ti master alloy by aluminothermic reduction technique. Canadian metallurgical quarterly, 2007, v. 46, no. 2, p. 139 – 143.
 19. Рипан Р., Четьяну И. Неорганическая химия. Т. 1, М.: Мир, 1971, 560 с.
 20. Поварова К.Б., Казанская Н.К. и др. Физико-химические закономерности взаимодействия алюминидов никеля с легирующими элементами. Металлы, 2006, № 5, с. 58 – 71.
 21. Prajitto D., Gleeson B., Young D. J. The cyclic oxidation behaviour of α-Cr + βNiAl alloys with and without trace Zr addition. Corrosion Science, 1997, v. 39, no. 4, p. 639 – 654.

References

1. Kolobov Ju.R. et al. *Struktura i svojstva intermetallidnyh materialov s nanofaznym uprochneniem* [The structure and properties of intermetallic materials with nanophase hardening]. Moscow, MISiS Publ., 2008, 326 p.
2. Grinberg B.A., Ivanov M.A.. *Intermetallidy Ni₃Al i TiAl: mikrostruktura, deformacionnoe povedenie* [Intermetallic Ni₃Al and TiAl: microstructure, deformation behavior]. Russian Academy of Science, Ural Branch, Yekaterinburg, Institute of Metal Physics Publ., 2002, 358 p.
3. Povarova K.B. Fiziko-himicheskie principy sozdaniya termicheski stabil'nyh spлавov na osnove aljuminidov perehodnyh metallov [Physico-chemical principles of thermally stable aluminide alloys creation on base of transition metals]. *Materialovedenie — Inorganic Materials: Applied Research*, 2007, no. 12, pp. 20 – 27.
4. Fatkulin O.H., Oficerov A.A. Modificirovanie zharo-prochnykh nikelovykh spлавov dispersnymi chasticami tugoplavkih soedinenij [Modification of heat-resistant nickel alloys by dispersed particles of refractory compounds]. *Litejnoe proizvodstvo — Foundry*, 1993, no. 4, pp. 13 – 14.
5. Uchkov S.S., Film Yu.A., Amosova L.I. Titanium-nikelide casting super-alloys. Proc. of the Ninth World Conference on Titanium, 1999, 7 – 11 June, St-Petersburg, Russia., pp. 1668 – 1674.
6. Rafal'skij I.V., Arabej A.V. Termodinamicheskij analiz reakcij vzaimodejstvija faz komponentov litejnykh spлавov, poluchennykh iz aljумomатричных композиций [Thermodynamic analysis of reactions of phase interaction of casting alloys obtained from aluminum matrix compositions]. Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, Polzunovskij almanah – Almanac n. Polzunova, 2011, pp. 29 – 32.
7. Morris D.G., Naka S., Caron P. Intermetallics and Superalloys. EUROMAT 99, 2000, vol. 10, p. 398.
8. Korotaev A.D. *Vysokotemperaturnyj sintez intermetallicheskikh soedinenij* [High-temperature synthesis of intermetallic compounds]. Tomsk State University Publ., 1989, 209 p.
9. Ovcharenko V.E., Lapshin O.V., Bojangan E.N., Ramazanov I.S., Chudinov V.A. Vysokotemperaturnyj sintez intermetallicheskogo soedinenija Ni₃Al pod davleniem [High-temperature synthesis of intermetallic Ni₃Al compound under pressure]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Cvetnaja metallurgija — Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2007, no. 4, pp. 63 – 69.
10. Karabasov Yu.S. *Novye materialy* [New materials]. Moscow, MISiS Publ., 2002, 736 p.
11. Berdovsky Y.N. Intermetallics research progress. Nova Science Publishers, Inc. NY, 2008, 290 p.

12. Westbrook J.H., Fleischer R.L. Intermetallic Compounds. Vol. 3, Structural Applications of Intermetallic Compounds, John Willey and Sons, 2000, 346 p.
13. Prokoshkin S.D., Pushin V.G., Ryklina E.P., Khmelevskaya I.Yu. Application of titanium nickelidebased alloys in medicine. Phys. Met. Metal., 2004, vol. 97, pp. 856-896.
14. Ferro R., Saccone A. Intermetallic Chemistry. Department of Chemistry, University of Genoa, Italy. Series Editor: Robert W. Cahn FRS Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Cambridge, UK, 2008, p. 786.
15. Sokolov I.P., Ponomarev N.L. Vvedenie v metallotermiju [Introduction to metallotherapy]. Ed. by Chekmarev A.M. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 132 p.
16. Krasikov S.A., Il'inyh S.A., Sitnikova O.A. et al. Metallotermicheskoe poluchenie splavov aljuminij-titan-nikel dlja tehnologii plazmennyh pokrytij [Metallothermal receiving aluminum-titanium alloy, nickel technology for plasma coatings]. *Perspektivnye materialy – Advanced material*, 2011, pp. 448 – 451.
17. Parsa M.R., Soltanieh M. On the formation of Al_3Ni_2 intermetallic compound by aluminothermic reduction of nickel oxide. Materials characterization, 2011, vol. 62, pp. 691 – 696.
18. Hosseinpouri M., Mirmonsef S.A., Soltanieh M. Production of Al – Ti master alloy by aluminothermic reduction technique. Canadian metallurgical quarterly, 2007, vol. 46, no 2, pp. 139 – 143.
19. Ripan R., Chetyanu I. *Neorganicheskaya khimiya* [Inorganic chemistry]. Vol 1, Moscow, Mir Publ., 1971, 560 p.
20. Povarova K.B., Kazanskaya N.K. et al. Fiziko-khimicheskiye zakonomernosti vzaimodeystviya alyuminidov nikelya s legiruyushchimi elementami [Physico-chemical interaction of nickel aluminides with alloying elements]. *Metally – Russian metallurgy*, 2006, no. 5, pp. 58 – 71.
21. Prajitno D., Gleeson B., Young D.J. The cyclic oxidation behaviour of α -Cr+ β NiAl alloys with and without trace Zr addition. Corrosion Science, 1997, vol. 39, no. 4, pp. 639 – 654.

Статья поступила в редакцию 19.08.2014 г.

Гостищев Виктор Владимирович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, кандидат технических наук (г. Хабаровск), старший научный сотрудник, специалист в области синтеза неорганических материалов. E-mail: v-gostishev@mail.ru.

Астапов Иван Александрович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Хабаровск), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области получения функциональных покрытий. E-mail: immaterial_khv@mail.ru

Ри Хосен — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Тихоокеанский государственный университет” (г. Хабаровск), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, специалист в области литейного производства и металлургии.

Химухин Сергей Николаевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, доктор технических наук (г. Хабаровск), заведующий лабораторией, специалист в области конструкционных и функциональных материалов.

Середюк Анастасия Витальевна — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Тихоокеанский государственный университет” (г. Хабаровск), аспирант, специалист в области литейного производства. E-mail: Anasta-91@mail.ru.

High-temperature synthesis of multiple-doped aluminium nickelide

V. V. Gostishchev, I. A. Astapov, Ri Hosen, S. N. Khimukhin, A. V. Seredyuk

The aluminum nickelide NiAl, doped with chromium, molybdenum, tungsten were obtained by the aluminothermic reduction of metal oxides (NiO, TiO₂, Cr₂O₃, MoO₃, WO₃). The thermodynamic probability an aluminothermic reduction reactions is calculated. Results of a thermal analysis are displayed. The composition of initial mix material which ensures maximum extraction of metals in an alloy is defined. By results of the element and phase analysis in alloys it is identified phase NiAl, containing 1,5 – 6,5 % of the titanium, chrome, molybdenum, tungsten. The microstructure of the synthesised alloys is displayed and their microhardness is defined.

Keywords: aluminium nickelide, chromium, molybdenum, tungsten, titanium, metallotherapy synthesis, microhardness, phase and elemental composition.

Gostishchev Viktor — Far Eastern Branch of RAS, Khabarovsk Scientific Center, Institute for Materials Studies, Pacific National University, PhD. E-mail: v-gostishev@mail.ru.

Astapov Ivan — Far Eastern Branch of RAS, Khabarovsk Scientific Center, Institute for Materials Studies, Pacific National University, PhD. E-mail: immaterial_khv@mail.ru

Khosen Ri — Pacific National University, DrSci (Eng).

Khimukhin Sergey — Far Eastern Branch of RAS, Khabarovsk Scientific Center, Institute for Materials Studies, Pacific National University.

Seredyuk Anastasiya — Pacific National University, post graduate student. E-mail: Anasta-91@mail.ru.