

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 620.22:54-29:546.73
МРНТИ 53.49.05
<https://doi.org/10.31643/2018/445.10>

Комплексное использование
минерального сырья. № 2. 2018.

Г. М. ИБРАЕВА^{1,2*}, Б. М. СУКУРОВ¹, Р. К. АУБАКИРОВА¹, Ю. Н. МАНСУРОВ³

¹Металлургия және кен байыту институты, Алматы, Қазақстан *e-mail: guizira.83@mail.ru

²Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы, Қазақстан

³Мәскеулік болат және қорытпалар институты, Мәскеу, Ресей

АЛЮМИНИЙ–НИКЕЛЬ ЖҮЙЕСІНІҢ ДИФфуЗИЯЛЫҚ АЙМАҒЫНДАҒЫ КӨП ҚАБАТТЫ ҚҰРЫЛЫМЫН ЗЕРТТЕУ

Received: 28 March 2018 / Peer reviewed: 30 April 2018 / Accepted: 21 May 2018

Түйіндеме. Ыстыққа төзімділігі өте жоғары және тығыздығы төмен болып келетін конструкциялық материалдарды жасап шығару мәселелері өзекті болып табылады. Сонымен қатар интерметаллидтер негізінде жоғары температурада төзімді және тығыздығы төмен яғни жеңіл болып келетін Al-Ni интерметаллидтер қазіргі таңда үлкен қызығушылыққа ие. Осыған байланысты мақалада түйіспелі балқыту әдісімен алынған Al-Ni жүйесінің диффузиялық аймағы зерттелген. Түйіспелі балқыту әдісі арқылы бинарлы жаңа фазалардың интерметаллид коспалары түрінде алынатыны, оның температуралық-уақыттық шарттарын біле отырып интерметаллидтердің қолдану аймағын кеңейтуге мүмкіндік жасайтыны көрсетілген. Al-Ni жүйесінен алынған үлгілердің көлденең кимасы арқылы олардың микроқұрылымы, элементтік құрамы растрлық электрондық микроскопия мен рентгенспектралды микроталдау (РЭМ-РСМТ), және рентген дифрактометрдің көмегімен зерттелген. Зерттеу жұмыстарының нәтижелері бойынша 1000-1300 °С аралығында изотермиялық температурадан кейін интерметаллидтердің көп қабатты құрылымы қалыптасқаны көрсетілді. Түйіспелі аймақта фазалық құрамы әртүрлі және металдардың шоғырлану белгісіне қарай бірнеше қабаттары орнаған ені құрылады. Түйіспелі балқыту әдісі арқылы тұрақты құрамымен әйгілі Al_3Ni , Al_3Ni_2 , $AlNi(\beta)$, $AlNi_3(\alpha')$, Al_3Ni_5 интерметалдық қосылыстар анықталды. Сонымен қатар алынған үлгілердің көлденең кималарын салыстыру кезінде, диффузиялық аймақта элементтердің тереңдігі бойынша зерттеулерді өткізу өте тиімді екені көрсетілді. Зерттеулердің нәтижесінде Al-Ni диаграммасының 1300-1375 °С жоғарғы температура аймағында ауыспалы құрамды болатын $Al_{51}Ni_{49}$, $Al_{36}Ni_{64}$, $Al_{30}Ni_{70}$, $Al_{32}Ni_{68}$ жаңа төрт қосылыс анықталды. Анықталған қабаттар арасындағы көп кеуектер мен жарықшақтардың кездесуі кернеу әсерінен болуы мүмкін. Микроқұрылымын қабаттары дамыған жағдайда кеуектердің пайда болуы, Френкель әсерімен байланысты деп болжанған.

Түйін сөздер: түйіспелі балқыту әдісі, растрлық электрондық микроскопия, рентгенспектралды микроталдау, диффузиялық аймақ, көп қабатты құрылым, интерметаллид, диаграмма.

Кіріспе. Қазіргі кезде материалтанудағы ыстыққа төзімді материалдар арасында келешегі зор болып суперқорытпалар табылады. Бұл материалдар интерметаллидтер негізінде жоғары температурада төзімді және тығыздығы төмен яғни жеңіл болып келеді. Осындай материал ретінде Al-Ni интерметаллидтері үлкен қызығушылыққа ие [1]. Осыған байланысты зерттеуді қажет ететін Al-Ni жүйесінде диффузиялық аймақтың құрылымын қалыптастыратын негізгі заңдылықтарымен әртүрлі факторлардың әсерін анықтау, сонымен қатар диаграмма жағдайының құрылысын нақтылайтын қажет деректерді алуда түйіспелі балқыту әдісінің ерекше заңдылықтарын анықтау

өзекті болып табылады. Al-Ni диаграммасы кеңінен зерттелгеніне қарамастан ауыспалы құрамына ие жаңа фазалардың болатын анықтау әлі күнге дейін жалғасуда [1-4].

Диффузиялық жұптасу әдісі тәжірибелік қолданысқа ие, суперникель қорытпасын тотығуға төзімділігін күшейту үшін практикалық мақсатта пайдаланылады, яғни AlNi интерметаллидтері түзіледі. [1]. Түйіспелі балқыту әдісі арқылы диффузиялық аймақ құрылысының заңдылықтары мен элементтердің бөліну сипаты, сондай-ақ, интерметаллидтердің түзілетін қабаттардың шарттары айқындалады [2]. Әдістің принципі, ол екі элементтен тұратын түйістірілген жұпты диффузия кезінде едәуір

элементтердің қайта бөлінуі үшін тиісті температурада жеткілікті уақытта ұстап тұруы. Диффузия, жүйені тепе-теңдік жағдайға немесе еркін энергиясын ең төменгі жағдайына әкеледі [3]. Сонымен қатар диаграммадағы тиісті температурада барлық аралық фазалар қандай ретпен орналасса, диффузиялық аймақта да, дәл сондай-ақ ретпен фазалардың пайда болуы күтілуде. Осылайша, әр қабаттағы компоненттердің концентрациясындағы өзгерістерді зерттеу арқылы диаграмманың фрагменттерін бағалау мүмкіндігі туындайды. AlNi диаграмма құрамының өзгеруі, шекаралары бір фазалы аймақтарға сәйкес келуі мүмкін. Қабаттардағы шекаралас орналасқан фазалар, бір-бірімен тепе-теңдік күйде болады [2].

Көптеген бинарлы жүйелердің өзара диффузиясы жаңа фазалардың туындауымен байланысты жүреді: қолданыстағы шектелген аралықтағы қатты ерітінділер, интерметаллидті фазалардың концентрациясы не қатаң белгіленген құрамымен (дальтонид), не айнымалы, белгілі бір шектеулі құрамнан тұрады (бертоллид) [2]. Концентрациялық окшаулау тұрғысынан бертоллидтер қатты ерітінділермен дальтонидтер арасындағы аралық ережеде орналасқан [1-3].

Айта кету керек, аддитивті технологиялардың қарқынды дамуымен қатар ұнтақты металлургияның тұтыну қолданысы өсуде [5-7]. Түрлі өнім түрлерін жасауда шығындарды азайту жағынан аддитивті технологиялардың ісінде зор мүмкіндігі бар, мысалы, бұйымдардың күрделі геометриялы және металлды бөлшектерін "өсіруді" қажет ететін барлық жерде аспап жасауда, авиациялық өнеркәсіпте энергомашинаны құрылысында беделді. Бұл тұрғыда интерметаллидтер өзінің бірегей қасиеттерінің арқасында аддитивті технологиялар саласында да міндетті түрде қолдануда өз орнын табатына сенім мол.

Интерметаллидті материалдар негізінде Ni₃Al фазасына қызығушылық артуда, өйткені оның жоғары температура жағдайында және тотығуға шыдамдылығы, жұмыс температурасының 1300 °C дейін қолдануға мүмкіншілігі өте зор. Осындай материалдар жану камераларының турбина ретінде, қорғау жүйелері, салқындату, қалақша, т.б. жоғары температурада жұмыс істейтін бөлшектерде қолданады. Қазіргі таңда бұл интерметаллидтердің ең оңай алу тәсілі түйіспелі балқыту әдісі болып табылады. Жаңа фазалардың интерметаллид қоспалары түрінде алынуы, оның

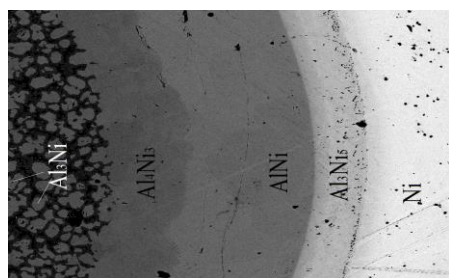
температуралық-уақыттық шарттарын біле отырып жаңа ұнтақты металлургия әдісінің негізі ретінде пайдаланып интерметаллидтердің қолдану аймағын кеңейтуге мүмкіндік бар. Осыған байланысты **жұмыстың мақсаты** – алюминий мен никель арасындағы диффузиялық аймақтың қалыптасуын және оның көпқабатты құрылымдарын зерттеу болып табылады.

Эксперименталдық бөлім. Al-Ni жүйесін зерттеу үшін түйіспелі балқыту әдісі пайдаланылды. Бастапқы материал ретінде тазалығы жоғары алюминий Al 99,99 %, және никель Ni 99,80 % қолданды. Алынған тілімдердің массасы шамамен 30 г. болатындай пластиналары вакуумды кварцты ампуланың ішіне салынды. Осындай түрде үлгілердің термоөңдеуі камералық пеште (НТС 08/16) жүргізілді. Үлгілердің уақыт ұзақтығы 1-4 сағат аралығында изотермиялық температура 1000 °C - 1375 °C ұстап тұрып алынған.

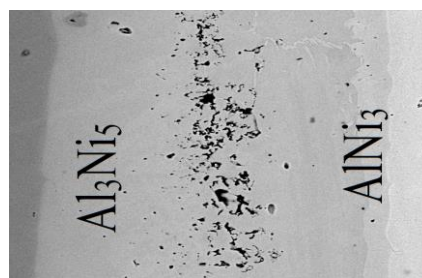
Осы үлгілер растрлық электрондық микроскопия және рентгенспектралды микроталдау (РЭМ-РСМТ) арқылы зерттелді. РЭМ-РСМТ талдаулары үшін JXA-8230 JEOL фирмасының микроанализаторы ×850 дейін ұлғайтуда EPMA бағдарламасы пайдаланылды. Диффузиялық аймақта түзілетін фазалардың элементтік құрамын анықтау үшін энергиялық-дисперсті спектрометр (ЭДС) және толқынды дисперсті спектрометрлері (ТДС) қолданылды [8, 9, 10]. Рентгенді талдау D8 Advance (Bruker) аппаратында жүргізілген, түсірілім α-Cu, кернеу тұтқасы 40 кВ ток 40 мА. Алынған мәліметтерді өңдеу дифрактограмма және EVA бағдарлама көмегімен жүргізілді. Толық сынамалар мен фазаларды іздеу Search/Match бағдарламасымен жүргізілді, PDF-2 базасын пайдалана отырып, ұнтақты дифрактометрлік деректер бойынша анықталды.

Түйіспелі балқыту әдісі арқылы алынған фазаларын анықтамалық деректермен салыстыру үшін Thermo-Calc бағдарламасының көмегімен диаграмманың фазалық жеке бөліктері және изотермиялық қималары салынды.

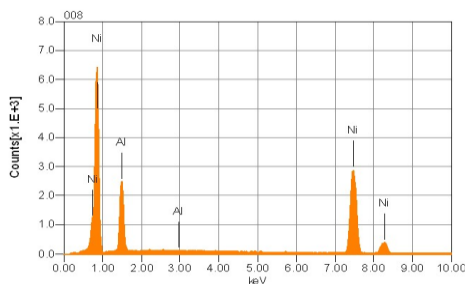
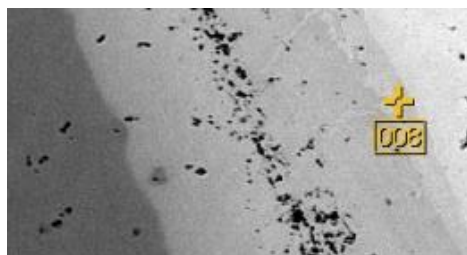
Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Диффузиялық аймақ үлгілердің көлденең қимасы бойынша зерттелді және мынадай ерекшеліктері анықталды: диффузиялық аймақтың құрылымы мен концентрациялық құрамында элементтері әртүрлі орналасқан қабаттар көрінді. Олар төрт фазадан құрылған. Қабаттардың, құрылымдық элементтері мен концентрациялық құрамы әртүрлі болып шықты. .



а) x 400

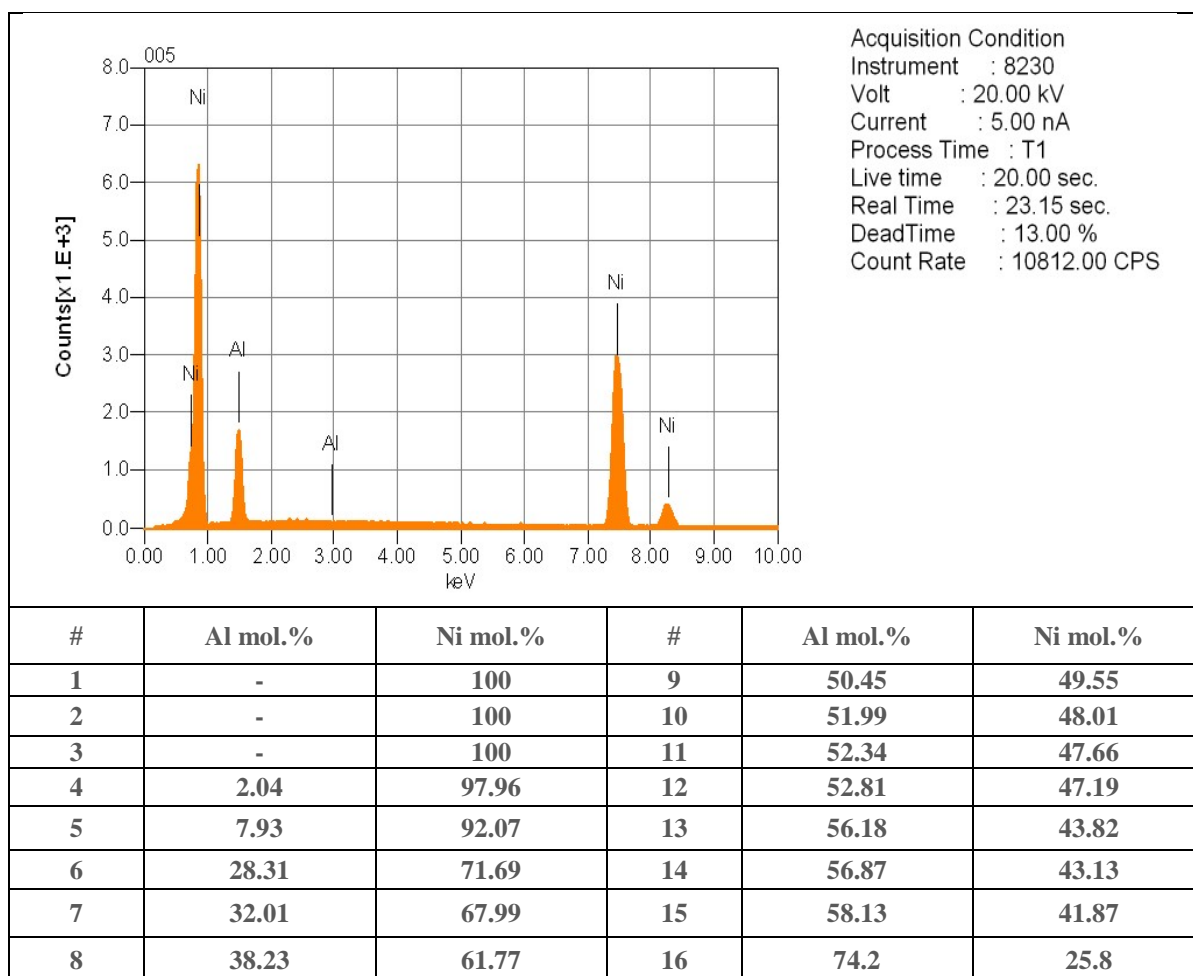


б) x 850



в) 26,00% ат Al, 74,00% ат Ni

1 Сурет – Диффузиялық аймақ қабаттары



2 Сурет – Диффузиялық аймақтың ЭДС-талдауы (1300°C, 1 сағ)

1-ші суретте көрсетілген микроқұрылым 1300 °С, 1 сағаттан кейін пайда болған. Ол анық шекараларымен және өзіне тән контрасты құрылымы бар төрт қабаттан құрылған.

Әр қабаттың концентрациялық құрамын анықтау үшін бірнеше спектрден жүргізіліп, орташа деректер алынды. Бұл мәліметтер 2-ші суретте көрсетілген.

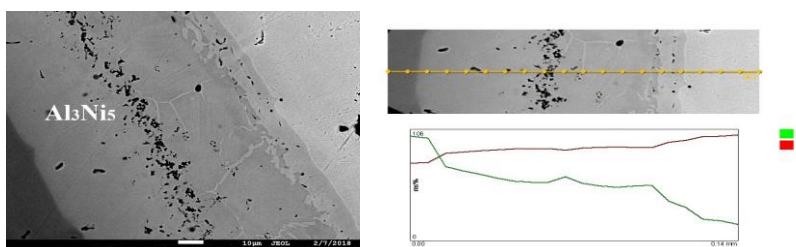
Спектрлерде құрамы бойынша дальтонидтерге ұқсас Al_3Ni , Al_3Ni_2 , Al_3Ni_5 , Al_4Ni_3 , $AlNi$, $AlNi_3$; және бертолидтерге сай $Al_{51}Ni_{49}$ (49,07 ат.% Ni), $Al_{36}Ni_{64}$ (64,06 ат.% Ni), $Al_{30}Ni_{70}$ (69,62 ат.% Ni), $Al_{32}Ni_{68}$ (67,86 ат.% Ni) фазалар тіркелген. Никель тарапынан қабаттар гомогенді және шекаралары біртегіс болып сипатталады. Ал алюминий тарапынан қабаттардың құрылымы фестондардың пайда

болуымен шекаралары айқын емес, шекара пішіні толқынды келген.

Айта кету керек, жалпы құрылымдық ерекшелігі үшін диаграммада белгілі бірқабатта кеуектілік жақсы дамыған (сурет 3). Анықталған қабаттар арасындағы көп кеуектер мен жарықшақтардың кездесуі кернеу әсерінен болуы мүмкін. Микроқұрылымың қабаттары дамыған жағдайда кеуектердің пайда болуы Френкель әсерімен байланысады.

Al-Ni диаграммасы бойынша құрамы тұрақты болып келетін, және формуласы: Al_3Ni , Al_3Ni_2 , $AlNi(\beta)$, $AlNi_3(\alpha')$, Al_3Ni_5 болатын бес интерметалидті қосылыстар бар [10].

Өткізілген тәжірибеде Al-Ni жүйесінің белгілі интерметалдық фазаларының барлығы анықталып, 1-ші кестеде келтірілген.

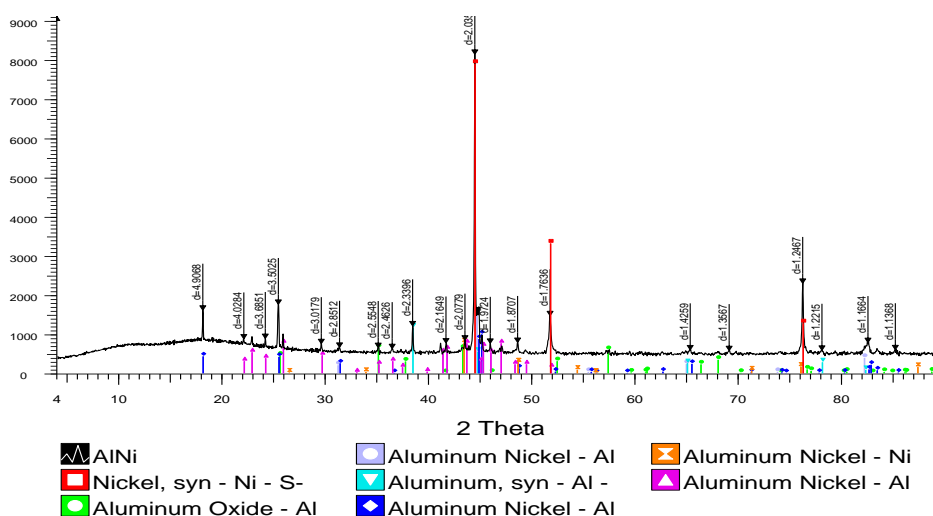


3 Сурет – Қабаттағы кеуектілік

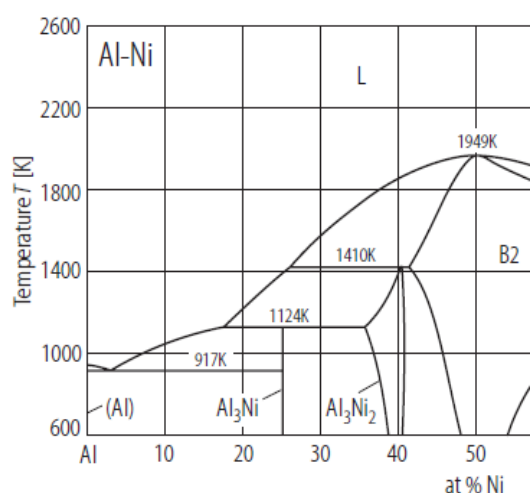
1 кесте – Al-Ni диаграммасының интерметалидтері

Интерметалидтер	Анықтама [10]	Температура, °С
Al_3Ni	25,78 ат.% Ni	1300*
Al_3Ni_2	40,00 ат.% Ni	1300
Al_4Ni_3	41,39-45,04 ат.% Ni	1300*, 1350*
$AlNi$	50,00 ат.% Ni	1250,1350
Al_3Ni_5	63,51-68,07 ат.% Ni	1250*, 1300*, 1350*
$AlNi_3$	74,00 ат.% Ni	1250, 1350

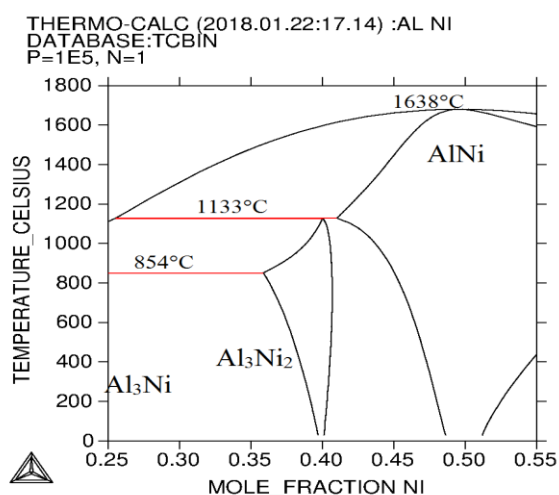
Ескертпе: * осы температурада бұл фаза диаграммада көрсетілмеген



4 Сурет – Рентгенқұрылымдық талдау Al-Ni 1300 °С, 1 сағ.



а) Landolt-Bornstein



б) THERMO-CALC

5 Сурет – Al-Ni диаграммасының изотермиялық қималары, 1000 °С

Әдістемелік тұрғыдан бұл ЭДС-талдаулармен Landolt-Börnstein деректер базасының арасындағы айырмашылық тәжірибеде көрсетілгендей болжау қателігі 0,5 ат. %-дан аспайды.

Дифрактометриялық деректер диффузиялық аймақта тұрақты құрамды интерметаллидтердің сәйкестендіру дәлдігін растады.

Концентрациялық бағыттық өзгерулердің бірқалыпты немесе үйлесімді болмауы зерттелген интерметаллидтердің жергілікті тығыздығының өзгеру қабілетімен байланысады.

5-ші суретте көрсетілгендей, фазалық диаграмманың изотермиялық қимасында 50 ат % дейінгі аралықта Al_3Ni , Al_3Ni_2 және $AlNi(\beta)$ белгілі интерметалдық фазаларының шоғырлануын Landolt-Börnstein анықтамалық дерегінде көрсетілгендей Thermo-Calc бағдарламасының көмегімен де тұрғызылған. Алғашқы интерметалдық фазасының кристалдануы осы Al-Ni жүйесінде компоненттердің тұрақты концентрация шекарасында температураның әсері 5-ші суретте көрсетілген. Есептеу кезінде бастапқы параметрлер болып Al-Ni жүйесіндегі

Компоненттердің концентрациясы мен температура болды. Бастапқы күй ретінде жүйенің базадағы химиялық құрамы тандап алынды. Сандық модельдеу мақсаты теория түрінде қорытпадағы фазалық құрамын әртүрлі температурада түрлендіру жолымен алу болды [12].

Жоғарыда көрсетілгендей температураның 1300 °С дейінгі изотермиялық қимасында алюминий және никель жүйесіндегі фазалардың құрамына қарай орналасқан аймағы суреттелген.

Қорытпаның осындай құрамында тепе-тең күйдегі есептеу нәтижелері бойынша мынадай:

Al_3Ni , Al_3Ni_2 , $AlNi$ фазалардың қатысуы байқалады. Ең төменгі температуралық аймақта 250 °С фазалық қосылыс Al_3Ni , ал 300 °С-та фазалық қосылыстың түрі $Al_3Ni+Al_3Ni_2$ және 400 °С-та $AlNi$ орналасқан [13].

$AlNi$ фазалық қосылысын 1000 °С температурада ұстап тұрып, 5,6-7,7 ГПа дейінгі аралықтағы қысыммен механикалық қорыту жолымен де алуға болады [14]. Al_3Ni , Al_3Ni_2 фазалары алюминийге бай саналады және олардың пайда болуы әрекеттесіп үлгермеген никельмен бірге жүреді [15].

Қорытынды. Алюминий-никель жүйесіндегі үлгінің көлденең қимасында диффузиялық аймақтың көп қабатты фазаларының сипатын анықтайтын түйіспелі балқыту әдісінің басқа классикалық әдіспен салыстырғанда әлдеқайда тиімділігі көрсетілді. Белгілі интерметаллидті фазалардың тұрақты құрамы анықталды және жаңа төрт қосылыс табылды. Олар: $Al_{51}Ni_{49}$ (49,07 ат.% Ni), $Al_{36}Ni_{64}$ (64,06 ат.% Ni), $Al_{30}Ni_{70}$ (69,62 ат.% Ni) және $Al_{32}Ni_{68}$ (67,86 ат.% Ni). Сондай-ақ, Al_3Ni_5 фазаның ішіндегі кеуектіліктің анықталғаны, аддитивті технологияда жоспарлау кезінде қарастырылуы мүмкін, ал $AlNi_3$ фазасының кеуекті қабаты Al_3Ni_5 фазадан кейін орналасуы, оның бөлінуі үшін тиісті температурасы мен жеткілікті ұстап тұру уақытын анықтау аддитивті технология үшін өте маңызды.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Бокий Г. Б. Кристаллохимия. М: Наука, 1971. – 400 б.
- 2 Oskaya C., Rudolphia M., Affeldt E. E., Schützea M., Galetz M. C. Evolution of microstructure and mechanical

properties of NiAl-Diffusion coatings after thermocyclic exposure // *Intermetallics*. – 2017. – № 89. – P. 22–31. DOI.org/10.1016/j.intermet.2017.05.012

3 Гегузин Я. Е. Диффузионная зона. – М.: Наука, 1979. – 344 б.

4 Шморгунов В. Г., Трыков Ю. П., Богданов А. И., Таубе А. О., Евстропов Д. А. Кинетика взаимодействия алюминия и никеля при жидкофазном формировании диффузионной зоны // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. – 2014. – № 2 (8). – Б. 3–6.

5 Murr L. E., Johnson W. L. 3D metal droplet printing development and advanced materials additive manufacturing // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2017. – N 6(1). – P. 77–89. DOI.org/10.1016/j.jmrt.2016.11.002

6 Sharman A.R.C., Huges J. I., Ridgway. Characterisation of titanium components manufactured by laser metal deposition // *Intermetallics*. – 2018. – № 93. – P. 89–92. DOI.org/10.1016/j.intermet.2017.11.013

7 Сентюрин Ж.А. Получение сферических порошков из сплавов на основе алюминидов никеля Ni-Al для аддитивных технологий: дис. Спец.: 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы / МИСиС. – Москва, 2016. – 168 б.

8 Ибраева Г. М., Сукуров Б. М. Исследование диффузионной зоны жаропрочных сплавов системы Al-Co, формирующейся в изотермических условиях // *Инновационное развитие и востребованность науки в современном Казахстане: сб. тр. V междунар. науч. конф. – Алматы, Казахстан, 2011. – Ч. 4. – Б. 175–178.*

9 Аубакирова Р. К., Мансуров Ю. Н., Сукуров Б. М., Ибраева Г. М. Многослойная структура интерметаллидов в диффузионной зоне системы Al-Co. // *Комплексное использование минерального сырья*. – 2018. – № 1. – Б. 59–70.

10 Predel B. (1991) Madelung O. (ed.). Springer Materials Al-Ni (Aluminum-Nickel) Landolt-Börnstein - Group IV Physical Chemistry 5A (Ac-Au – Au-Zr) http://materials.springer.com/lb/docs/sm_lbs_978-3-540-39444-0_125 10.1007/10000866_125 (Springer-Verlag Berlin Heidelberg © 1991) Accessed: 12-02-2018

11 Ибраева Г.М., Шамельханова Н.А. Исследование зон диффузионного взаимодействия компонентов сплава Al-Co в процессе изотермической выдержки. // *Комплексное использование минерального сырья*. – 2011. – № 6. – Б. 68–72.

12 Thermo-Calc Software. Thermocalc State Variables and State Variables. Stockholm: Sweden, 2006. – P.748

13 Simões S., Viana F., Ramos A. S., Vieira M. T., Vieira M. F. Anisothermal solid-state reactions of Ni/Al nanometric multilayers // *Intermetallics*. – 2011. – № 19. – P. 350–356.

14 Krasnowski M., Gierlotka S., Kulik T. Nanocrystalline Al₃Ni₂ alloy with high hardness produced by mechanical alloying and high-pressure hot-pressing consolidation // *Intermetallics*. – 2013. – № 42. – P. 35–40.

15 Andasmas M., Chauveau T., Fagnon N., Vrel D. Synthesis of NiAl intermetallics from cold-extruded samples // *Intermetallics*. – 2013. – № 32. – P. 137–144. DOI: 10.1016/j.intermet.2012.08.019.

REFERENCES

1 Bokiy G.B. *Kristalloghimiya* (Crystal chemistry) Moscow: Science. **1971**, 400. (in Russ.).

2 Oskaya C., Rudolphia M., Affeldt E.E., Schützea M., Galetza M.C. Evolution of microstructure and mechanical properties of NiAl - Diffusion coatings after thermocyclic exposure. *Intermetallics*. **2017**. 89, 22–31. (in Eng.)

3 Geguzin Ya. E. *Diffuzionnaya zona*. (Diffusion zone). Moscow. Science. **1979**. 344. (in Russ.).

4 Shmorgun V.G., Trykov Yu. P., Bogdanov A.I., Taube A.O., Evstropov D.A. *Kinetika vzaimodeystviya alyuminiya i nikelya pri zhidkofaznom formirovanii diffuzionnoy zony*. (Kinetics of the interaction of aluminum and nickel in the liquid-phase formation of the diffusion zone). *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Industrial University*. **2014**. 2 (8), 5–6. (in Russ.).

5 Murr L.E., Johnson W.L. 3D metal droplet printing development and advanced materials additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*. **2017**. 6(1), 77–89. doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.11.002 (in Eng.).

6 Sharman A.R.C., Huges J.I., Ridgway. Characterisation of titanium components manufactured by laser metal deposition. *Intermetallics*. **2018**. 93, 89–92. (in Eng.).

7 Sentyurina Zh. A. *Poluchenie sfericheskikh poroshkov iz splavov na osnove alyuminida nikelya Ni-Al dlya additivnykh tekhnologiy*. (Production of spherical powders from alloys based on nickel aluminide Ni-Al for additive technologies) *Dissertatsiya. Spec.: 05.16.06 - Poroshkovaya metallurgiya i kompozitsionnye materialy*. (Thesis. Special: 05.16.06 - Powder metallurgy and composite materials). MISiS. Moscow **2016**. 168. (in Russ.).

8 Ibraeva G.M., Sukurov B.M. *Issledovanie diffuzionnoy zony zharoprochnykh splavov sistemy Al-Co, formiruyushejsya v izotermicheskikh usloviyah*. (Investigation of the diffusion zone of high-temperature alloys of the Al-Co system, which forms under isothermal conditions). *Innovatsionnoye razvitiye i vostrebovannost nauki v sovremennom Kazakhstane: sb. tr. V mezhdunar. nauch. konf* (Innovative development and demand for science in modern Kazakhstan: Sat. tr. In the Intern. sci. conf). Almaty, Kazakhstan, **2011**. 4. 175–178. (in Russ.).

9 Aubakirova R. K., Mansurov Yu. N., Sukurov B. M., Ibraeva G. M. *Mnogoslojnaya struktura intermetallidov v diffuzionnoj zone sistemy Al-Co*. (Multilayer structure of intermetallics in the diffusion zone of the Al-Co system) *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya = Complex use of mineral resources*. **2018**. 1, 59–70. (in Russ.).

10 Predel B. (1991) Madelung O. (ed.) Springer Materials Al-Ni (Aluminum-Nickel) Landolt-Börnstein - Group IV Physical Chemistry 5A (Ac-Au – Au-Zr) http://materials.springer.com/lb/docs/sm_lbs_978-3-540-39444-0_125 10.1007/10000866_125 (Springer-Verlag Berlin Heidelberg © 1991) Accessed: 12-02-2018. (in Eng.)

11 Ibraeva G.M., Shamelkhanova N.A. *Issledovanie zon diffuzionnogo vzaimodeystviya komponentov splava Al-Co v protsesse izotermicheskoy vyderzhki* (Investigation of the zones of diffusion interaction of the components of the Al-Co alloy in the process of isothermal aging) *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya = Complex use of mineral resources*. **2011**. 6, 68–72. (in Russ.).

12 Thermo-Calc Software. Thermocalc State Variables and State Variables. Stockholm: Sweden. **2006**, 748. (in Eng.).

13 Simões S., Viana F., Ramos A.S., Vieira M.T., Vieira M.F. Anisothermal solid-state reactions of Ni/Al nanometric multilayers. *Intermetallics*. **2011**. 19. 350–356. doi.org/10.1016/j.intermet.2010.10.021. (in Eng.).

14 Krasnowski M, Gierlotka S.,Kulik T. Nanocrystalline Al₃Ni₂ alloy with high hardness produced by mechanical alloying and high-pressure hot-pressing consolidation. *Intermetallics*, **2013** 42. 35–40. doi.org/10.1016/j.intermet.2013.05.017. (in Eng.)

15 Andasmas M., Chauveau T., Fagnon N., Vrel D. Synthesis of NiAl intermetallics from cold-extruded samples. *Intermetallics*. **2013**. 32. 137–144 doi.org/10.1016/j.intermet.2012.08.019. (in Eng.).

ABSTRACT

The diffusion zone of Al-Ni system has been studied using the contact melting method. The microstructure and element composition in cross section of samples have been studied by means of scanning electron microscopy and electron probe microanalysis (SEM-EPMA). The multilayer structure of intermetallics of Al- Ni system has been formed after isothermal treatment in range of 1000-1300 °C. Due to interaction between Al and Ni the width of diffusion zone is growing along with duration of isothermal treatment. Few layers having different phase compositions and widths are formed in contact zone depending on established concentration of metals. Each of the observed layers has its own clear boundaries and structure pattern. Four compounds with the variable compositions $Al_{51}Ni_{49}$, $Al_{36}Ni_{64}$, $Al_{30}Ni_{70}$ and $Al_{32}Ni_{68}$ have been revealed at 1000-1300°C due to comparison of element distribution in the depth of diffusion zone with its microstructure. The layers are seemed as homogenous and having more smooth boundaries from Ni side. Meanwhile from Al side the layer structure acquires the island-type form, and boundaries become more irregular with dendrite appearance. The intermetallic compounds have been obtained at various temperatures; they correspond pre-established phases with registered compositions (daltonides): Al_3Ni , Al_3Ni_2 , $AlNi(\beta)$, $AlNi_3(\alpha')$, Al_3Ni_5 . The agglomerates of pores and cracks could be caused by stresses between the layers are detected. The formation of pores in case of the developed layer microstructure is related to Frenkel effect.

Keywords: contact melting, scanning electron microscopy and electron probe microanalysis, diffusion zone, multilayer structure, intermetallics, Al- Ni diagram.

РЕЗЮМЕ

На сегодняшний день разработка конструкционных материалов с пониженной плотностью и высокими эксплуатационными свойствами при высоких температурах являются актуальными. Особый интерес представляют материалы на основе интерметаллидов Al-Ni благодаря своим прочностным свойствам при высоких температурах. В статье представлены результаты работ по исследованию диффузионной зоны системы Al-Ni методом контактного плавления. Методом контактного плавления исследована диффузионная зона системы Al-Ni. Микроструктура и элементный состав образцов изучены в поперечном сечении с помощью растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа (РЭМ-РСМА), а также с помощью рентгеновской дифрактометрии (РД). После изотермической выдержки от 1000 °C до 1300 °C сформировалась многослойная структура интерметаллидов. В зависимости от установившейся концентрации компонентов в ДЗ образуются несколько слоев различного фазового состава. Установлено образование известных интерметаллидов постоянного состава в ДЗ системы, сплавленных методом контактного плавления Al_3Ni_5 , Al_4Ni_3 , $AlNi$, $AlNi_3$. Показано, что метод контактного плавления эффективен в сравнительных экспериментах в геометрии поперечного сечения. Выявлены новые соединения переменного состава. В системе Al-Ni в области высоких температур 1300-1375 °C выявлены четыре таких слоя: $Al_{51}Ni_{49}$ (49.07% ат. Ni), $Al_{36}Ni_{64}$ (64.06% ат. Ni), $Al_{30}Ni_{70}$ (69.62% ат. Ni), $Al_{32}Ni_{68}$ (67.86% ат. Ni). Выявлены скопления пор и трещин, которые могут быть обусловлены напряжениями между слоями. Порообразование в случае развитой слоистой микроструктуры связывается с эффектом Френкеля.

Ключевые слова: метод контактного плавления, растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, диффузионная зона, многослойная структура, интерметаллид, диаграмма.

Поступила 28.03.2018