Залежність структури ливарних сплавів системи Al-Ni-La від їх хімічного складу

М. М. Ворон, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник mihail.voron@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0804-9496>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Проаналізовано особливості структуроутворення ливарних алюмінієвих сплавів системи Al-Ni-La залежно від вмісту і співвідношення основних компонентів. Показано, що до цього часу досліджувана система розглядалася здебільшого для створення аморфних матеріалів. Водночас із цим, системи Al-Ni та Al-La мають такі фазові діаграми стану, які дозволяють розглядати подвійні та потрійні сплави цих систем для створення перспективних жароміцних ливарних сплавів. При цьому, особливості їх структуроутворення в даному контексті не визначались. Досліджено зразки з різним вмістом нікелю та лантану та проаналізовано, яким чином кожен з елементів, їх кількість та співвідношення впливають на формування їх структурно-фазового стану сплавів. Показано, що при незначному вмісті нікелю близько 2 % мас. та лантану до 5 % мас. евтектика формується у вигляді тонких майже монолітних інтерметалідних пластин. Зі збільшенням кількості компонентів та, відповідно – збільшенні кількості евтектики, підвищується дисперсність її складових. Проведений аналіз залежності структури сплавів досліджуваної системи від їх хімічного складу показав, що, імовірно, під час утворення евтектики в першу чергу відбувається формування частинок $Al_{11}La_3$, які можуть мати вигляд нанорозмірних волокон. При заевтектичному вмісті лантану в сплавах не було знайдено первинних частинок $Al_{11}La_3$. Це може свідчити про те, що нікель зміщує евтектичну концентрацію лантану в сторону більших значень. В той же час, при доевтектичній концентрації лантану і заевтектичній концентрації нікелю окремі утворення $Al_{11}La_3$ знаходилися поза областями основної евтектики з алюмінієм нікелю. Це зумовлює необхідність подальших досліджень алюмінієвого кута потрійної діаграми стану системи Al-Ni-La.

Ключові слова: Система Al-Ni-La, жароміцні ливарні алюмінієві сплави, структура, евтектика.

Система Al-Ni-La все частіше розглядається як перспективна основа для створення аморфних та нанокристалічних матеріалів для роботи в екстремальних умовах. В роботах [1-6] показано, що в цих станах сплави системи Al-Ni-La можуть мати міцність на рівні ~1300-1500 МПа при збереженні досить високої пластичності близько 2-5 % та структурної стабільності до температур близько 220 °C.

Сплави систем Al-Ni, Al-La та Al-Ni-La мають евтектичне перетворення в алюмінієвому куті діаграм стану, що вказує на перспективу їх використання саме для створення ливарних алюмінієвих сплавів [7, 8]. Тип діаграм стану та нерозчинність нікелю і лантану в алюмінії зумовлюють особливості

структурно-фазових характеристики цих сплавів та забезпечують для них високу міцність та стабільність механічних властивостей за умов підвищених температур.

Створення ливарних жароміцних сплавів на основі системи Al-Ni-La є новою та перспективною задачею. Особливо актуальним є питання вивчення залежності структурно-фазових характеристик та механічних властивостей цих матеріалів від їх хімічного складу. Деякі особливості структур таких сплавів описано в роботах [9, 10], проте вони стосуються кількох окремих композицій. На разі, не існує робіт, в яких би досліджувались та наочно відображались особливості зміни структур сплавів системи Al-Ni-La від вмісту основних компонентів, тому дана робота присвячена саме цим питанням.

Для досліджень було виплавлено серію сплавів з різним вмістом нікелю та лантану. Приготування розплавів проводили в лабораторній печі опору з використанням алундових тиглів. В якості шихтових матеріалів використовували чистий алюміній марки А5 у вигляді прутків, нікель марки НП1 у вигляді фольги та лігатуру Al-40La власного виробництва. Розплави сплавів перегрівали до 850 °С, щоб забезпечити повне розчинення нікелю та відсутність у розплаві твердих частинок інтерметалідів. Заливка металу проводилась в сталевий кокіль, попередньо нагрітий до 200 °С.

Одержані дослідні зразки мали вигляд прутків діаметром 14 мм та висотою 120 мм. Структурно-фазовий стан досліджуваних сплавів досліджували на скануючому електронному мікроскопі Tescan Vega 3 з приставкою для локального EDX-аналізу «Bruker». Також вимірювалася твердість зразків за допомогою твердоміра ТШ-2М.

В таблиці 1 наведено хімічні склади і значення твердості одержаних сплавів, а на рисунках 1-2 – відповідні структури.

Таблиця 1

Хімічний склад литих зразків досліджуваних сплавів, Al – основа

№ сплаву	Хімічний склад, % мас.		Твердість, HB	№ сплаву	Хімічний склад, % мас.		Твердість, HB
	Ni	La			Ni	La	
1	2,3	3	36,6	6	4,5	8,6	42
2	2	5,5	32	7	5,4	8,9	45
3	2	11	35,7	8	5,4	12,5	48
4	3,28	6,7	38,6	9	7,8	3	50
5	3,15	16,6	41,2	10	7,7	13,4	46

На представлених рисунках світлим фазам відповідають лантановмісні частинки $Al_{11}La_3$, світло-сірим – алюмінід нікелю Al_3Ni , а найбільш темним ділянкам – алюмінієва матриця. З аналізу мікроструктур видно, що при малих концентраціях нікелю та лантану виділення евтектики мають вигляд тонких смужок на межах зерен. Лантановмісна складова має осередки

Рис 1. Мікроструктури сплавів системи Al-Ni-La (1-5)

Рис 2. Мікроструктури сплавів системи Al-Ni-La (6-10)

волокнистої будови в найбільш широких ділянках евтектичних зон, що пов'язано з більшою тривалістю кристалізації (сплав 1). При збільшенні вмісту лантану (сплав 2) відбувається подрібнення Ni-вмісної складової за рахунок майже одночасного її формування з частинками $Al_{11}La_3$, які також є більш дрібними, ніж в попередньому випадку. Евтектика при даних концентраціях нікелю і лантану формується неоднорідно. При суттєвому збільшенні вмісту лантану (сплав 3) евтектика має рівномірну будову та волокнисту морфологію. Як видно при великих збільшеннях, нікелевмісні складові втілені у волокнисту нанорозмірну лантановмісну частину евтектики що вказує на першочергову кристалізацію алюмініду лантану.

Зі збільшенням вмісту нікелю до близько 3 % мас., а лантану до 6,7 % мас. (сплав 4), спостерігається укрупнення стрижнеподібних та пластинчастих складових евтектики. Зі збільшенням вмісту лантану до 16,6 % мас. (сплав 5) характер будови евтектики стає подібним до сплаву 3, проте сама структура є більш дрібнозернистою, проте має також поодинокі великі включення обох типів інтерметалідів. Згідно [7], евтектична концентрація лантану складає приблизно 12 % мас., проте в структурі сплаву алюмінідів лантану первинного походження немає. Це може свідчити про те, що нікель зміщує евтектичну концентрацію лантану в сторону більших значень і однозначно вказує на необхідність подальшого вивчення поверхонь ліквідус і солідус алюмінієвого кута потрібної діаграми системи Al-Ni-La.

Сплав 6 показує будову, схожу на сплав 4, проте з більшою кількістю евтектики. При підвищенні вмісту нікелю на один відсоток до майже евтектичної концентрації близько 5,8 % мас. [7], структура значно змінюється (сплав 7), що зводиться до утворення евтектики з дрібними складовими різної морфології та появи відносно крупних частинок Al_3Ni . При підвищенні вмісту лантану до біля евтектичної концентрації (сплав 8), спостерігається майже однорідна дисперсна структура евтектики, яка дуже нагадує потрібну.

При переході концентрації нікелю в заевтектичну область (сплав 9) з одночасним низьким вмістом лантану, відбувається формування складної структури з евтектики Al- Al_3Ni та первинно утворених зерен твердого розчину на основі алюмінію та алюмініду лантану. З підвищенням вмісту лантану також до заевтектичної концентрації (сплав 10), утворюється структура із багатьох складових – алюмінідів первинного походження, помітної кількості зерен твердого розчину на основі алюмінію та подвійної евтектики.

Вимірювання твердості сплавів показало, що на її зростання більшою мірою впливає концентрація нікелю, а вміст лантану впливає мало. Це пов'язано з тим, що в твердому розчині на основі алюмінію в досліджуваних сплавах знаходилось від 0,12 до 0,66 % мас. нікелю. Попередньо можна також сказати, що на твердість впливає також співвідношення структурних складових та кількість твердого розчину.

Проведений аналіз залежності структури сплавів досліджуваної системи від їх хімічного складу показав, що під час утворення евтектики в першу чергу відбувається формування частинок $Al_{11}La_3$ у вигляді

нанорозмірних волокон. Відзначимо, що при заевтектичному вмісті лантану в сплавах первинних частинок $Al_{11}La_3$ не спостерігається. В той же час, при доевтектичній концентрації лантану і заевтектичній концентрації нікелю окремі утворення $Al_{11}La_3$ знаходилися поза областями основної евтектики з алюмінідом нікелю. Це зумовлює необхідність проведення подальших досліджень алюмінієвого кута потрійної діаграми стану системи Al-Ni-La.

Література

1. Si P., Bian Xi., Li W., Zhang J., Yang Zh. Relationship between intermetallic compound formation and glass forming ability of Al-Ni-La alloy // *Physics letters A*. – 2003. – Vol. 319. – P. 424-428. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2003.10.060>
2. Sahu R., Chatterjee S., Sahoo K.L. Mechanical properties and nanocrystallization behavior of Al-Ni-La alloys // *Metallurgical and materials transactions A*. – 2010. Vol. 41. – P. 861-869. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0160-3>
3. Mu J. et al. Synthesis of high strength aluminum alloys in the Al-Ni-La system // *Materials research society*. – 2014. Vol. 29, № 5. – P. 708-717. <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.35>
4. Kawamura Y., Mano H., Inoue A. Nanocrystalline aluminum bulk alloys with a high strength of 1420 MPa produced by the consolidation of amorphous powders // *Scr. Mater.* – 2001. – № 44. – P. 1599-1604. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)00781-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)00781-3)
5. Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys // *Acta Mater.* – 2000. – № 48. – P. 279-306. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00300-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00300-6)
6. Bakhteeva N. D. Nanocrystallization in Al-based amorphous Al-Ni-Fe-La alloys // *Nanotechnologies in Russia*. – 2010. Vol. 5, № 3-4. – P. 235-249. <https://doi.org/10.1134/S1995078010030122>
7. Mondolfo L. F. Aluminum alloys: Structure and properties. – London; Boston: Butterworths, 1979. – 971 p.
8. Kakitani R., Reyes R. V., Garcia A., Spinelli J. E., Cheung N. Relationship between spacing of eutectic colonies and tensile properties of transient directionally solidified Al-Ni eutectic alloy // *J. Alloy Compound*. – 2018. Vol. 733. – P. 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.288>
9. Akopyan T.K., Belov N.A., Naumova E.A., Letyagin N.V. New in-situ Al matrix composites based on Al-Ni-La eutectic // *Materials Letters*. – 2019. – Vol. 245. – pp. 110-113. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.02.112>
10. Ворон М.М. Вплив магнію на високотемпературну структурно-фазову стабільність сплавів системи Al-Ni-La // *Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів»*. – 2021. – № 2. – с. 38-46. <https://doi.org/10.15407/mom2021.02.038>

References

1. Si P., Bian Xi., Li W., Zhang J., Yang Zh., *Physics letters A*, 2003, Vol. 319, pp. 424-428 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2003.10.060>.
2. Sahu R., Chatterjee S., Sahoo K.L., *Metallurgical and materials transactions A*, 2010. Vol. 41, pp. 861-869 [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0160-3>.

3. Mu J. et al., *Materials research society*, 2014. Vol. 29, No. 5, pp. 708-717 [in English]. <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.35>.
4. Kawamura Y., Mano H., Inoue A., *Scr. Mater.*, 2001, No. 44, pp. 1599-1604 [in English]. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)00781-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)00781-3).
5. Inoue A., *Acta Mater.*, 2000, No. 48, pp. 279-306 [in English]. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00300-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00300-6).
6. Bakhteeva N. D., *Nanotechnologies in Russia*, 2010, Vol. 5, No. 3-4, pp. 235-249 [in English]. <https://doi.org/10.1134/S1995078010030122>.
7. Mondolfo L. F. *Aluminum alloys: Structure and properties*. London; Boston: Butterworths, 1979, 971 p. [in English].
8. Kakitani R., Reyes R. V., Garcia A., Spinelli J. E., Cheung N., J. *Alloy Compound*, 2018. Vol. 733, pp. 59-68 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.288>.
9. Akopyan T.K., Belov N.A., Naumova E.A., Letyagin N.V., *Materials Letters*. 2019. Vol. 245. pp. 110-113. [in English] <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.02.112>
10. Voron M.M. *Metal science and treatment of metals*. 2021. Vol. 27 (98). pp. 38-46. [In Ukrainian] <https://doi.org/10.15407/mom2021.02.038>.

Одержано 06.12.21

M. M. Voron

Dependence between structure of cast Al-Ni-La alloys and their chemical composition

Summary

The peculiarities of cast Al-Ni-La alloys structure formation depending on the content and ratio of the main components are analyzed in the work. It is shown, that so far the studied system has been considered mainly for the creation of amorphous materials. At the same time, Al-Ni and Al-La systems have phase diagrams that allow us to consider double and triple alloys of these systems to create promising creep-resistant alloys for casting. At the same time, the peculiarities of their structure formation in this context were not determined. Samples with different contents of nickel and lanthanum were prepared for research and analyzed how each of the elements, their number and ratio affect the formation of their structural-phase state. It is shown, that low nickel content of about 2 wt. % and lanthanum up to 5 wt. % eutectic is formed like thin almost monolithic intermetallic plates. As the number of components increases and, accordingly, the number of eutectics increases, the dispersion of its components increases. The analysis of the alloy structure dependence due to studied system on their chemical composition showed that, most likely, during the formation of the eutectic, Al₁₁La₃ particles, which may have the form of nanosized fibers, are formed first of all. It should be noted that at the eutectic content of lanthanum in the alloys no primary-formed Al₁₁La₃ particles were found. This may indicate that nickel shifts the eutectic concentration of lanthanum toward higher values. At the same time, at the hypoeutectic concentration of lanthanum and the hypereutectic concentration of nickel, some Al₁₁La₃ formations were outside the regions of the main eutectic with nickel aluminide. Such questions necessitate further studies of the aluminum angle of the triple state diagram of the Al-Ni-La system.

Keywords: Al-Ni-La system, creep-resistant cast aluminum alloys, structure, eutectic.