

УДК 669.245:629.7

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260319.44.300

ЗМІНА ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕФОРМОВАНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПІД ЧАС МОДИФІКУВАННЯ

КАЛІНІНА Н. Є.^{1*}, *д. т. н., професор*,
 ДАВИДЮК А. В.², *аспірант*,
 КАЛІНІН В. Т.³, *д. т. н., професор*,
 НОСЕНКО О. П.⁴, *д. т. н., професор*,
 НОСОВА Т. В.⁵, *к. т. н., доцент*,
 МАМЧУР С. І.⁶, *к. т. н., доцент*

^{1*} Кафедра технології виробництва, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0003-3810-6778

² Кафедра технології виробництва, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна

³ Кафедра ливарного виробництва, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49005, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0003-4490-0994

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0002-9945-260X

⁵ Кафедра технології виробництва, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0002-0855-568X

⁶ Кафедра технології виробництва, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0002-8146-8849

Анотація. Мета. Вивчення залежності механічних властивостей деформованих зварювальних алюмінієвих сплавів від модифікуючої обробки. **Методика.** Об'єктом дослідження є деформовані алюмінієві сплави системи Al–Mg, Al–Cu–Mn : AMg6, 1570, які використовують у зварних конструкціях авіаційних та космічних апаратів. Модифікатором обрано дисперсний порошок сполуки Mg₂Si, який отримано газофазним синтезом. Вивчено механічні властивості сплавів до та після модифікування, як в литому, так і в деформованому стані. **Результати.** Проведено промислові плавки сплавів AMg6 та 1570 в індукційній печі САТ–0,15 ємністю тигля 50 кг. Розроблено технологічний процес виплавки з введенням модифікатором, а саме: кількість модифікатора, механізм введення, температурно-часові умови його дії. Оптимальна кількість модифікатора складала 0,3 % від ваги розплаву. Модифікатор у вигляді брикетів діаметром 15 мм вводили під кінець плавки у роздавальний ковш. Після витримки 5..10 хв розливали метал у ливарні форми, а також у клиновидні форми для виготовлення зразків на механічні випробування. В модифікованих сплавах підвищено міцнісні показники без втрати пластичності. **Наукова новизна та практична цінність.** Встановлено механізм дії дисперсних часток модифікатора в розплаві, як центрів кристалізації, що сприяє зменшенню зерна сплавів та підвищенню міцнісних властивостей. Запропоновано механізм дії дисперсних часток у розплаві та технологічний процес модифікування алюмінієвих сплавів для промисловості. Отримані результати дозволили удосконалити технологічний процес виробництва алюмінієвих сплавів відповідального призначення.

Ключові слова: алюмінієвий сплав; структура; механічні властивості; дисперсний модифікатор

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ДЕФОРМИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ

КАЛИНИНА Н. Е.^{1*}, *д. т. н., профессор*,
 ДАВИДЮК А. В.², *аспирант*,
 КАЛИНИН В. Т.³, *д. т. н., профессор*,
 НОСЕНКО О. П.⁴, *д. т. н., профессор*,
 НОСОВА Т. В.⁵, *к. т. н., доцент*,
 МАМЧУР С. И.⁶, *к. т. н., доцент*

^{1*} Кафедра технологии производства, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, пр. Гагарина 72, 49010, Днепро, Украина, ORCID ID: 0000-0003-3810-6778

² Кафедра технологии производства, Днепровский национальный университет им. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепро, Украина

³ Кафедра литейного производства, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49005, Днепро, Украина, ORCID ID: 0000-0003-4490-0994

⁴ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, ORCID ID: 0000-0002-9945-260X

⁵ Кафедра технологии производства, Днепровский национальный университет им. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепро, Украина, ORCID ID: 0000-0002-0855-568X

⁶ Кафедра технологии производства, Днепровский национальный университет им. О. Гончара, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепро, Украина, ORCID ID: 0000-0002-8146-8849

Аннотация. Цель. Изучение зависимости механических свойств, деформированных сварочных алюминиевых сплавов от модифицирующей обработки. **Методика.** Объектом исследования является деформированные алюминиевые сплавы системы Al–Mg, Al–Cu–Mn : AMg6, 1570, используемые в сварных конструкциях авиационных и космических аппаратов. Модификатором избран дисперсный порошок соединения Mg₂Si, полученный газофазным синтезом. Изучены механические свойства сплавов до и после модификации, как в литом, так и в деформированном состоянии. **Результаты.** Проведено промышленные плавки сплавов AMg6 и 1570 в индукционной печи САТ–0,15 емкостью тигля 50 кг. Разработан технологический процесс выплавки с введенным модификатором, а именно: количество модификатора, механизм введения, температурно-временные условия его действия. Оптимальное количество модификатора составляла 0,3 % от веса расплава. Модификатор в виде брикетов диаметром 15 мм вводили под конец плавки в раздаточный ковш. После выдержки 5...10 мин разливали металл в литейные формы, а также в клиновидные формы для изготовления образцов на механические испытания. В модифицированных сплавах повышены прочностные показатели без потери пластичности. **Научная новизна и практическая ценность.** Установлен механизм действия дисперсных частиц модификатора в расплаве, как центров кристаллизации, что способствует уменьшению зерна сплавов и повышению прочностных свойств. Предложен механизм действия дисперсных частиц в расплаве и технологический процесс модифицирования алюминиевых сплавов для промышленности. Полученные результаты позволили усовершенствовать технологический процесс производства алюминиевых сплавов ответственного назначения.

Ключевые слова: алюминиевый сплав; структура; механические свойства; дисперсный модификатор

CHANGE OF PROPERTIES OF THE DEFORMED ALUMINIUM ALLOYS AT RETROFITTING

KALININA N.E.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 DAVYDUK A.V.², *Postgraduate Student*,
 KALININ V.T.³, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 NOSENKO O.P.⁴, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 NOSOVA T.V.⁵, *Ph. D., Ass. Prof.*,
 MAMCHUR S.I.⁶, *Ph. D., Ass. Prof.*

^{1*} Department of Production Technology, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarina ave., 49010, Dnipro, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-3810-6778

² Department of Production Technology, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarina ave., 49010, Dnipro, Ukraine

³ Department of Foundry, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., 49005, Dnipro, Ukraine, ORCID ID: 0000-0003-4490-0994

⁴ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-9945-260X

⁵ Department of Production Technology, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarina ave., 49010, Dnipro, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-0855-568X

⁶ Department of Production Technology, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarina ave., 49010, Dnipro, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-8146-8849

Abstract. Purpose. Studying the dependence of mechanical properties of deformed welding aluminum alloys on the modifying treatment. **Method.** The object of the study is deformed aluminum alloys of Al–Mg, Al–Cu–Mn: AMg6, 1570 systems used in welded structures of aviation and spacecraft. The disperse powder of the Mg₂Si compound obtained by gas phase synthesis was selected as the modifier. The mechanical properties of alloys before and after modification, both in casting and in deformed state, were studied. **Results.** Industrial smelting of AMG6 and 1570 alloys in induction furnace САТ–0.15 with a capacity of 50 kg crucible was conducted. A technological process of melting with the introduced modifier is developed, namely: amount of modifier, mechanism of introduction, temperature-time conditions of its action. The optimum amount of the modifier was 0.3 % of the weight of the melt. Modifier in the form of briquettes with a diameter of 15 mm was introduced at the end of the melting into the ladle

bucket. After holding 5...10 minutes, the metal was poured into the molds, as well as wedge-shaped molds for the production of samples for mechanical tests. In modified alloys, strength parameters have been increased without loss of plasticity. **Scientific novelty and practical value.** The mechanism of action of the disperse particles of the modifier in the melt, as crystallization centers, has been established, which contributes to the reduction of the grain of alloys and the increase of strength properties. The mechanism of action of disperse particles in a melt and the technological process of modification of aluminum alloys for industry are proposed. The obtained results allowed to improve the technological process of production of aluminum alloys of responsible designation.

Keywords: aluminum alloy; structure; mechanical properties; disperse modifier

Вступ

Процес створення зварювальних алюмінієвих конструкцій безперервно пов'язаний з розвитком авіаційної і космічної галузей, промислового громадянського будівництва. Основою для використання алюмінієвих сплавів в цих галузях є достатня міцність, мала щільність, висока пластичність і опір корозії [1]. Враховуючи перспективність використання алюмінієвих сплавів і підвищені вимоги до їх якості і властивостям, актуальні розробки модифікування алюмінієвих

сплавів не тільки легкоплавкими солями, але й тугоплавкими композиціями в цілях економії легуючих компонентів.

Мета. Встановити вплив модифікування дисперсними композиціями на зеренну структуру та механічні властивості алюмінієвих сплавів.

Методика досліджень і аналіз отриманих результатів

Матеріалом дослідження є алюмінієві сплави систем Al-Mg, Al-Mg-Si, 1570.

Таблиця 1

Хімічний склад сплавів систем Al-Mg, Al-Mg-Si / Chemical composition of system Al-Mg, Al-Mg-Si

Марка сплаву	Масова частка хімічних елементів, %								
	Al	Mg	Mn	Cu	Si	Zn	Be	Zr	Sc
АМг6	Осн	5,8...6,8	0,5...0,8	0,1	0,4	0,2	0,0002 ... 0,0050	—	—
1570	Осн	5,8...6,8	0,15...0,35	0,05...0,15	0,4	0,2	< 0,001	0,05...0,15	0,20...0,45

Ливарні відливки сплавів АМг6, 1570 піддавали деформуванню на лист.

Запропоновано модифікування алюмінієвих сплавів дисперсним порошком розміром часток до 20...30 Å. Дисперсний Mg₂Si отримано методом газозафазного синтезу. Проведені дослідно-промислові плавки алюмінієвих сплавів. Досліджено структуру, механічні та технологічні властивості сплавів у литому та деформованому стані.

З урахуванням принципу про кристаліграфічну і розмірну відповідність ізоморфності кристалічних решіток алюмінію і тугоплавких сполук [7; 8] встановили, що модифікаторами алюмінієвих сплавів можуть бути карбіди кремнію, ніобію і танталу, а також силіциди магнію. Як ефективний модифікатор алюмінієвих сплавів запропоновано дисперсний порошок силіциду магнію Mg₂Si розміром часток до 20...30 Å, який отримано методом високотемпературного газозафазного синтезу [4].

Кристали Mg₂Si мають гранецентровану решітку з параметром 6,337 Å [9]. Кристали Mg₂Si у широких межах проявляють політипізм. В основі їх будови існує кубічна і ромбодрична решітки. Хімічний склад дисперсного Mg₂Si має %: 65 % Mg; 35% Si.

Дисперсні частинки силіциду магнію розмірами до 30 Å є хорошими гетерами, матеріалами з розвинутою вільною поверхнею [6; 7].

Високі фізико-механічні характеристики Mg₂Si пояснюють міжатомним зв'язком. Атоми силіциду магнію пов'язані між собою ковалентним зв'язком, який є найбільш сильним у природі і обумовлює в кристалах високу температуру плавлення, твердість і хімічну тривкість. Поряд з ковалентним зв'язком у сполуки є деяка частка гетерополярного зв'язку [8].

Дія нерозчинних додатків, ізоморфних до алюмінію, аналогічність впливу розчинних елементів дотримується лише тоді, коли кількість нерозчинного додатку перевищує кількість кристалів, що утворилися довільно за тих самих умов [3; 5]. Таким чином, зі збільшенням кількості нерозчинного додатку, зокрема частинок силіциду магнію, розмір зерна спочатку зменшується, а потім буде постійним.

Механізм впливу дисперсних частинок Mg₂Si на формування структури доевтектичних алюмінієвих сплавів під час кристалізації полягає в тому, що основна їх маса виштовхується фронтом кристалізації в рідку фазу і бере участь у подрібненні структурних складників сплавів. Частинки силіциду магнію сприяють також дисперсному зміцненню

сплаву, так як дисперсні фази є додатковими бар'єрами для переміщення дислокацій, а отже, підвищують характеристики міцності деформованих алюмінієвих сплавів.

На механічні властивості алюмінієвих сплавів суттєво впливають розміри частинок зміцнювальної фази. Промислові експерименти з застосуванням дисперсного модифікатора Mg_2Si у широкому

діапазоні розмірів 5...10 Å; 10...20 Å; 30...40 Å; 50...70 Å. Виявили, що зі зменшенням розмірів частинок Mg_2Si до 20 Å межа міцності сплаву 1570 зростає з 400 до 458 МПа, а межа плинності зростає з 280 до 344 МПа без втрати пластичності (табл. 2). В таблиці 2 наведено механічні властивості сплаву 1570.

Таблиця 2

**Механічні властивості листів зі сплаву 1570 до та після модифікації /
Mechanical properties of alloy 1570 before and after modification**

Стан сплаву	Товщина листа, мм	σ_E , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
Початковий	2,5	400	280	13,0
Модифікований	2,5	458	344	13,7

Для визначення оптимальної кількості модифікатора Mg_2Si виконали промислові плавки та випробування зразків, що пройшли термічну обробку за режимом Т6 (гартування і штучне старіння).

Для комп'ютерної обробки даних складу сплавів і вмісту модифікаторів використали програму Microsoft Excel. Аналіз результатів засвідчив, що модифікування порошком Mg_2Si в кількості 0,3 мас. % максимально підвищує межу плинності сплаву 1570 за стабільної пластичності.

Подальше збільшення кількості модифікатора Mg_2Si від 0,3 до 0,4 % в сплаві АМг6 і 1570 суттєво не впливає на механічні властивості, а за вмісту більше 0,4 % Mg_2Si знижується параметр σ_B .

Таким чином, механічні характеристики алюмінієвих сплавів АМг6 і 1570 значно підвищуються з введенням у розплав 0,3 мас. % дисперсних часток Mg_2Si . Якість деформованих алюмінієвих сплавів під час модифікування залежить від багатьох чинників: природи дисперсної фази, температури розплаву, температурно-часових режимів.

Наукова новизна та практична значимість

Встановлено механізм дії дисперсних часток модифікатора в розплаві, як великої кількості центрів кристалізації, що сприяє зменшенню зерна сплавів та підвищенню міцнісних властивостей. Запропоновано технологічний процес модифікування алюмінієвих сплавів для промислового виробництва.

Висновки

Вивчено фізико-хімічні властивості дисперсного модифікатора – Mg_2Si . Проведено промислові плавки сплавів АМг6, 1570 у вихідному стані та з обробкою розплавів порошковим модифікатором. Встановлено механізм взаємодії дисперсного модифікатора з алюмінієвим розплавом під час кристалізації. В результаті дослідження досягнуто значне подрібнення зеренної структури модифікованих сплавів. Встановлено залежності розміру часток та кількості модифікатора на механічні властивості деформованих алюмінієвих сплавів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов : монография / [А. Я. Ищенко, Т. М. Лабур]. – Киев : Наукова думка, 2013. – 419 с.
2. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів : монография / [Н. Є. Калініна, Г. М. Никифорчин, О. В. Калінін та ін.]. – Львів : Простір–М, 2017. – 304 с.
3. Сутугин А. Г. Кинетика образования малых частиц при объемной конденсации / А. Г. Сутугин // Физикохимия нанодисперсных систем : сб. тр. ин-та металлургии им. А. А. Юайкова. – Москва : Наука, 1987. – С. 15–21.
4. Наноматеріали і нанотехнології / [В. І. Большаков, В. З. Куцова, Т. В. Котова]. – Дніпропетровськ : ДВНЗ ПДАБА, 2016. – 220 с.
5. Металознавство та термічна обробка металів : підручник / [О. А. Кузін, Р. А. Яцюк]. – Львів : Афіша, 2002. – 304 с.
6. Алюміній та сплави на його основі : монография / [В. З. Куцова, Н. Е. Погребна, Т. С. Хохлова та ін.]. – Дніпропетровськ : Пороги, 2004. – 136 с.

7. Костин В. А. Модифицирование структуры сварных швов высокопрочных низколегированных сталей наночастицами тугоплавких металлов / В. А. Костин, Г. М. Григоренко, В. В. Жуков // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2016. – Вып. 89. – С. 93–98.

8. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами / В. П. Сабуров, Е. Н. Еремин, А. Н. Черепанов, Г. Н. Миннеланов. – Омск : изд-во ОмГТУ, 2002. – 257 с.

9. Young-Domd K. The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of AL–4,5Cu–0,6Mn and A356 alloys / K. Young-Domd, L. Zin-Hyoung // Material Science and Engineering. – 2003. – № 12. – Pp. 372–376.

REFERENCES

1. Ischenko A.Ya. and Labur T.M. *Svarka sovremennykh konstrukcij iz alyuminievykh splavov* [Welding modern aluminum alloy construction]. Kyiv : Naukova dumka Publ., 2013, 419 p. (in Russian).

2. Kalinina N.E., Nikiforhin G.M., Kalinin O.V. and oth. *Struktura, vlastivosti ta vikoristannya konstrukciynih nanomaterialiv* [Structure, power and perfection of construction nanomaterials]. Lviv : Prostir-M, 2017, 304 p. (in Ukrainian).

3. Sutugin A.G. *Kinetika obrazovaniya mal'nykh chastic pri ob`mnoj kondensacii* [The kinetics of the formation of small particles in the bulk condensation]. *Fizikohimiya nanodispersnykh sistem* [Physical chemistry of nanodispersed systems]. Moscow : Nauka Publ., 1987, pp. 15–21. (in Russian).

4. Bolshakov V.I., Kutsova V.Z. and Kotova T.V. *Nanomateriali i nanotehnologii* [Nanomaterials and Nanotechnologies]. Dnipropetrovsk : PSACEA PDABA, 2016, 220 p. (in Russian).

5. Kuzin O.A. and Yatsyuk R.A. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and thermal processing of metals]. Lviv : Afisha Publ., 2002, 304 p. (in Russian).

6. Kutsova V.Z., Pogrebna N.E., Khokhlova T.S. and oth. *Alyuminij ta splavi na jogo osnovi* [Alumina and splavi on your basis]. Dnipropetrovsk : Porogy, 2004, 136 p. (in Ukrainian).

7. Kostin V.A., Grigorenko G.M. and Zhukov V.V. *Modificirovanie struktury svarynykh shvov vysokoprochnykh nizkolegirovannykh stalej nanochasticami tugoplavki metallov* [Modification of the structure of welds of high-strength low-alloyed steels by nanoparticles of refractory metals]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2016, vol. 89, pp. 93–98. (in Russian).

8. Saburov V.P., Eremin E.N., Cherepanov A.N. and Minnелanov G.N. *Modificirovanie stalej i splavov dispersnyimi inokulyatorami* [Modification of steels and alloys with dispersed inoculators]. Omsk : publishing house of OmSTU, 2002, 257 p. (in Russian).

9. Young-Domd K. and Zin-Hyoung L. The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of AL–4,5Cu–0,6Mn and A356 alloys. *Material Science and Engineering*, 2003, no. 12, pp. 372–376.

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. Є. О. Джуром (Україна), д-ром техн. наук, проф. А. Ф. Саніним (Україна).

Надійшла до редакції 13.03.2019

Прийнята до друку 17.03.2019