УДК 669.715'28: 66.046.516

М. М. Ворон, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
e-mail: mihail.voron@gmail.com

М. А. Фон Прусс, аспірант, e-mail: m.fonpruss@gmail.com

Фізико–технологічний інститут металів та сплавів НАН України, (Київ, Україна)

ВПЛИВ МОЛІБДЕНУ НА СТРУКТУРУ СПЛАВУ AlSi9Cu3

Робота присвячена дослідженню впливу молібдену на структурні характеристики ливарного алюмінієвого сплаву AlSi9Cu3 (AK8M3). Серед великої кількості модифікаторів та мікролегуючих добавок, які використовуються для покращення структурно-фазових характеристик та механічних властивостей, впливу молібдену приділено недостатньо уваги. В роботі було проаналізовано відомі дані позитивного впливу молібдену на структуру та властивості деяких ливарних алюмінієвих сплавів. Встановлено, що дослідження стосувалися в основному будови виливків та їх якості, а також – механічних властивостей при підвищених температурах. Виходячи з цього, метою роботи було дослідити структурно-фазовий стан сплаву AlSi9Cu3 після легування молібденом. В якості модифікатора використовували лігатуру власного приготування з вмістом молібдену 3,65 %мас. Порівнювали вихідний сплав та модифікований. Модифікований молібденом розплав заливали в підігріту графітову форму та охолоджену мідну, щоб дослідити ефективність модифікатора при різних швидкостях охолодження та кристалізації розплаву. В ході досліджень виявлено, що модифікований сплав, порівняно з вихідним, залитий в графітову форму, має більш крупнозернисту будову та залізовмісні фази більших розмірів. При цьому, евтектика такого зразку розподілена більш рівномірно та містить більше складової Al_2Cu і молібдену. Швидка кристалізація модифікованого розплаву призвела до появи молібдену в складі твердого розчину на основі алюмінію та більш ефективного подрібненню залізовмісних фаз. Таким чином, встановлено, що модифікування силумінів системи Al-Si-Cu молібденом впливає більшим чином на зміну хімічного складу, форму та розміри окремих фаз та структурних складових та не має яскраво вираженої зародкоутворюючої дії.

Ключові слова: модифікування, силуміни, AlSi9Cu3 , молібден, структура.

Основними конструкційними матеріалами в сучасному світі були і залишаються залізобетон, титанові та алюмінієві сплави. В умовах інноваційного розвитку промисловості існують певні економічні передумови та екологічні проблеми, що впливають на скорочення динаміки виробництва сталі та чавуну. Натомість, у виробництві алюмінієвих сплавів передбачається інтенсивний підйом. За останні двадцять п'ять років виробництво алюмінієвих сплавів помітно збільшилося, а споживання алюмінієвих сплавів загалом, останні роки, зростає більше, ніж

споживання інших металів та сплавів [1]. Такі умови сприяють як інтенсивному розвитку вже існуючих сплавів і технологій їх одержання, так і розробці нових способів підвищення якості металу разом з покращенням експлуатаційних характеристик.

Алюміній та сплави на його основі володіють комплексом фізичних та механічних властивостей, які обумовлюють можливість їх широкого використання ледь не в усіх галузях промисловості. Ці матеріали широко застосовуються в авіації, машинобудуванні, судно- та приладобудуванні, космічній, енергетичній та харчовій промисловості, а також в багатьох побутових сферах. Одночасне поєднання низької густини, високої питомої міцності, корозійної стійкості, технологічності та можливості ефективного багаторазового рециклінгу, обумовлює значний економічний інтерес розробки нових алюмінієвих сплавів та покращення властивостей вже існуючих [2, 3].

Ливарні алюмінієві сплави складають суттєву частку загального об'єму алюмінієвої продукції. Одержання деталей та виробів з таких сплавів є простим та дешевим, проте більшість з них має невисокий рівень механічних властивостей. Підвищення міцності та пластичності ливарних алюмінієвих сплавів можливе одним з класичних для таких випадків методів – модифікуванням [4].

Одним з потенційно ефективних та водночас маловивчених модифікаторів для алюмінієвих сплавів є молибден. Відомо, що він здатен знижувати пористість виливків, зменшувати шкідливий вплив заліза та підвищувати механічні властивості деяких сплавів при високих температурах [4–6]. Так, наприклад, в роботі [7] повідомляється про утворення в сплавах системи Al–Si–Cu–Mg стабільних молибденовмісних дисперсоїдів, які є стабільними до температур вище 300 °C. В роботі [8] описано позитивний ефект від одночасного модифікування Al–Si–Cu сплаву A319.0 (AK5M₂) молибденом та марганцем, що призвело до помітного підвищення міцності на 19 % при температурі 300 °C.

Легко помітити, що застосування молибдену частіше має відношення для сплавів, які застосовуються в автомобілебудуванні для виготовлення деталей двигунів. Іншою тенденцією небагато чисельних досліджень цього напрямку є поверхневий аналіз вихідного литого стану. Виходячи з цього, дослідження впливу молибдену на структурні параметри сплавів системи Al–Si–Cu є актуальним питанням.

На прикладі широкоживаного комерційного сплаву AlSi9Cu3 (AK8M3) було вивчено вплив додавання молибдену на структуру литого металу при різних швидкостях кристалізації. Базовий сплав хімічного складу Al–10Si–4,1Cu–0,6Fe–0,15Mn виплавлено в лабораторній шахтній печі опору в керамічному тиглі. Вихідними матеріалами слугували відходи сплаву AK12M2, чиста мідь марки M1 та алюміній марки A95. Для модифікування використовували лігатуру власного виробництва на основі алюмінію з вмістом молибдену 3,65 %мас. Вміст молибдену в сплаві після модифікування складав 0,17 %мас. Зразки базового та модифікованого сплавів заливали в підігріту циліндричну графітову форму для забезпечення повільної кристалізації зі швидкістю охолодження розплаву ~ 10 °C/с. Інший зразок модифікованого сплаву було залито в масивний мідний кокіл, що забезпечило швидку кристалізацію зі швидкістю охолодження розплаву ~ 250 °C.

Результати дослідження мікроструктури отриманих зразків та їх порівняння показано на рисунку. В таблиці, відповідно до мікроструктур, наведено хімічний склад деяких основних структурних складових.

Аналіз мікроструктур показує, що базовий сплав AlSi9Cu3 в литому стані та при повільному охолодженні розплаву у формі має більш дрібнозернисту будову, порівняно з модифікованим аналогом. При цьому, для не модифікованого зразка характерним є дещо нерівномірний розподіл евтектичної складової Al–Cu, що видно з розташування світлих ділянок, яким відповідають елементи з більшою атомною масою.

Будова модифікованого зразка відрізняється не лише більшими розмірами гілок дендритів твердого розчину на основі алюмінію, але й більш масивними евтектичними зонами, збагаченими міддю. Також спостерігається укрупнення залізовмісних фаз типу Al₅(FeMn)₃Si₂ після додавання молибдену.

Мікроструктура зразків базового сплаву (а) та модифікованого (б) при повільній кристалізації $\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ та модифікованого сплаву при швидкій кристалізації $\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (в)

Хімічний склад структурних складових одержаних зразків

Точка		Хімічний склад, %мас.						
		Al	Si	Cu	Fe	Ni	Mn	Mo
а	1	97,46	0,81	1,12	0,61	—	—	—
	2	11,47	0,26	87,76	0,51	0,8	—	—
	3	28,92	12,25	9,08	43,91	—	5,84	—
б	1	98,1	0,2	1,1	0,11	—	0,39	—
	2	14,99	0,4	82,8	0,35	1,1	0,1	0,26
	3	31,2	9,21	12,34	40,56	—	5,22	1,62
в	1	96,06	1,44	1,42	—	—	0,28	0,8
	2	16,94	1,05	81,51	0,35	—	—	0,15
	3	30	5,18	15,64	38,36	0,5	8,15	2,08

Очікувалося, що частинки $Al_{12}Mo$, які виявлено в модифікованих зразках методом рентгеноспектрального аналізу, слугуватимуть зародками кристалізації та спричинять подрібнення зерен твердого розчину на основі алюмінію. Натомість, як видно з таблиці, молібден знаходиться в складі залізовмісних включень та в евтектичних компонентах з високим вмістом міді, а в твердому розчині на основі алюмінію його не помітно.

Швидка кристалізація модифікованого розплаву показала наявність молібдену у складі твердого розчину на основі алюмінію в значній кількості, значно вищій за перитектичну концентрацію (0,25 %мас.). При цьому, вміст молібдену в евтектичних ділянках зменшився, порівняно з умовами більш повільного охолодження розплаву. Модифікування залізовмісних фаз також можна назвати більш ефективним, про що свідчить їх помітно дрібніший, порівняно з попередніми зразками, розмір та більший вміст молібдену в складі самої фази.

Таким чином, встановлено, що модифікування силумінів системи Al–Si–Cu молібденом впливає більшим чином на зміну хімічного складу, форму та розміри окремих фаз та структурних складових та не має ярко вираженої зародкоутворюючої дії.

Список літератури

1. International Aluminium Institute. URL: <http://www.world-aluminium.org>.
2. Белов Н. А., Аксенов А.А. Металловедение цветных металлов. Алюминиевые, магниевые и титановые сплавы: учеб пособие для студ. высш. уч. завед. – М.: МИСиС, 2005. – 149с.
3. 2019 Recycling Industry Yearbook. Institute of Scrap Recycling Industries. USA. 2019. 80 p.
4. Золотаревский В.С., Белов Н.А., Металловедение литейных алюминиевых сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 376 с.
5. Hurtalova L., Tillova E., Chalupova M. 2013. The Structure Analysis of Secondary (Recycled) AlSi9Cu3 Cast Alloy with and without Heat Treatment. Engineering Transactions, vol. 61, 3, pp. 197-213.
6. Morri A., Cescini L., Messieri S., Cerri E., Toschi S. 2018, Mo Addition to the A354 (Al–Si–Cu–Mg) Casting Alloy: Effects on Microstructure and Mechanical Properties at Room and High Temperature. Metls. Vol 8., 393, pp. 1-18.
7. Farkoosh, A.R.; Chen, X.G.; Pekguleryuz, M. Dispersoid strengthening of a high temperature Al–Si–Cu–Mg alloy via Mo addition. Mater. Sci. Eng. A 2015, 620, 181–189.
8. Jin L., Liu K., Chen G. Evolution of dispersoids and their effects on elevated-temperature strength and creep resistance in Al–Si–Cu 319 cast alloys with Mn and Mo additions. 2020. Materials science and engineering: A, vol. 770, 138554

Надійшла 21.08.2020

References

1. International Aluminium Institute. URL: <http://www.world-aluminium.org>.
2. Belov N.A., Aksionov A.A. (2005) Metalscience of non-ferrous metals. Aluminum, magnesium and titanium alloys: "MISiS". 149 p. [In Russian].
3. 2019 Recycling Industry Yearbook. Institute of Scrap Recycling Industries. USA. 2019. 80 p.
4. Zolotarevskyi V.S., Belov N.A. (2005) Metalscience of cast aluminum alloys "MISiS". 376 p. [In Russian].
5. Hurtalova L., Tillova E., Chalupova M. 2013. The Structure Analysis of Secondary (Recycled) AlSi9Cu3 Cast Alloy with and without Heat Treatment. Engineering Transactions, vol. 61, 3, pp. 197–213.
6. Morri A., Cescini L., Messieri S., Cerri E., Toschi S. 2018, Mo Addition to the A354 (Al–Si–Cu–Mg) Casting Alloy: Effects on Microstructure and Mechanical Properties at Room and High Temperature. Metls. Vol 8., 393, pp. 1-18.
7. Farkoosh, A.R.; Chen, X.G.; Pekguleryuz, M. Dispersoid strengthening of a high temperature Al–Si–Cu–Mg alloy via Mo addition. Mater. Sci. Eng. A 2015, 620, 181–189.
8. Jin L., Liu K., Chen G. Evolution of dispersoids and their effects on elevated-temperature strength and creep resistance in Al–Si–Cu 319 cast alloys with Mn and Mo additions. 2020. Materials science and engineering: A, vol. 770, 138554

Received 21.08.2020

M. Voron PhD, Senior Researcher, e-mail: mihail.voron@gmail.com

M. Fon Pruss, postgraduate, senior engineer

Physical Technological Institute of Metals and Alloys, National Academy of Science of Ukraine
(Kyiv, Ukraine)

INFLUENCE OF MOLYBDENUM ON STRUCTURE OF AlSi9Cu3 ALLOY

The work is devoted to the study of the influence of molybdenum on the structural characteristics of the cast aluminum alloy AlSi9Cu3 (AK8M3). Among the large number of modifiers and microalloying additives used to improve the structural-phase characteristics and mechanical properties, the effect of molybdenum is still insufficiently investigated. The known data of the positive effect of molybdenum addition on the structure and properties of some cast aluminum alloys was analyzed. It was found that the studies concerned mainly on the castings quality and defects, as well as mechanical properties at elevated temperatures. Based on this, the aim of the work was to investigate the structural-phase state of the AlSi9Cu3 alloy after doping with molybdenum. As a modifier, a Al-Mo master alloy with a molybdenum content of 3.65% mass was used. The original alloy and the modified alloy were compared. The molybdenum-modified melt was poured into a heated graphite mold and cooled copper mold to investigate the effectiveness of the modifier at different rates of cooling and crystallization of the melt. In the course of research it was found that the modified alloy, compared to the original, pured in graphite form, has a coarser-grained structure and iron-containing phases of larger sizes. In this case, the eutectic of such a sample is more evenly distributed and contains more components of Al_2Cu and molybdenum. The rapid crystallization of the modified melt led to the appearance of molybdenum in the solid solution based on aluminum and more efficient grinding of iron-containing phases. Thus, it was found that the modification of the Al-Si-Cu cast alloy system with molybdenum has a greater effect on the change of chemical composition, shape and size of individual phases and structural components and has no pronounced nucleating effect.

Keywords: Modification, silumins, AlSi9Cu3, molybdenum, structure.