

УДК 621.746.6:669.046.516.4:669.715

<https://doi.org/10.34185/tpm.3.2024.10>

Селівьорстов В.Ю., Доценко Ю.В., Селівьорстова Т.В.

## Перспективи використання комплексного впливу на формування властивостей литого сплаву системи Al-Si в процесі затвердіння

Selivorstov V.Yu., Dotsenko Yu.V., Selivorstova T.V.

### Prospects for the development of complex injection molding of the cast alloy of the Al-Si system during the hardening process

Наведено результати аналітичних досліджень ефективності спільного використання процесів впливу тиску та модифікування на кристалізацію сплавів системи Al-Si. Представлено комплексну технологію газодинамічного впливу та модифікування на розплаве у ливарній формі, що дозволяє подрібнити структурні складові та підвищити механічні та експлуатаційні властивості литих виробів. Теоретично обґрунтовано доцільність та можливість комплексного впливу модифікуванням та газовим тиском на процес структуроутворення ливарного сплаву АК5М. Виливок «Опорний наконечник стійки конвеєра» із сплаву АК5М (ДСТУ2839-94) масою 1,1 кг заливали при температурі  $710 \pm 10$  °С в підігрітій і пофарбованій чавунній кокіль з мінімальною товщиною стінки 40 мм. Вміст модифікатора (EUTEKTAL T200) у розплаві складає від 0,1 до 0,3 мас.%. Механічні властивості металу виливків визначали за стандартною методикою. Аналіз макроструктури виливків проводили з використанням шкали шпаристості BIAM. Газову шпаристість темплетів виливків визначали на трьох квадратах площиною  $1 \text{ см}^2$  кожний. Кількість пор та їхній розмір визначали як середнє арифметичне трьох вимірів. Ступінь шпаристості макрошліфів в балах встановлювали порівнянням їх з еталонами шкали. Проведений аналіз літературних джерел по темі роботи показав, що комплексний вплив на метал, що кристалізується, включає процеси модифікування та накладання тиску є перспективними з точки зору підвищення механічних властивостей сплавів системи Al-Si.

Приведені дані свідчать про перспективність розробки та використання комплексних технологій обробки сплавів системи Al-Si як на етапі підготовки розплаву до заливки, так і на етапі формування виливка безпосередньо в ливарній формі. Внаслідок впровадження зазначеної технології скоротилася кількість браку виливків по рихлотах та газових раковинах на 28 %, збільшилися на 25 % пластичні властивості литого металу, на 15-20 % вдалося знизити кількість модифікатора, а також знизити температуру та час обробки.

Ключові слова: кристалізація сплавів, тиск, модифікування, комплексна технологія, газодинамічний вплив, розплаве, ливарна форма, структурні складові, механічні властивості.

The results of analytical studies of the effectiveness of the joint use of the processes of pressure influence and modification on the crystallization of alloys of the Al-Si system are presented. A complex technology of gas-dynamic influence and modification on the melt in the casting mold is presented, which allows to grind the structural components and increase the mechanical and operational properties of the cast products. The expediency and possibility of a complex effect of modification and gas pressure on the structure formation process of the AK5M cast alloy is theoretically substantiated. Casting "Conveyor rack support tip" made of AK5M alloy (DSTU 2839-94) weighing 1.1 kg was poured at a temperature of  $710 \pm 10$  °C into a heated and painted cast iron mold with a minimum wall thickness of 40 mm. The content of the modifier (EUTEKTAL T200) in the melt was from 0.1 to 0.3 wt.%. The mechanical properties of the metal of the castings were determined according to the standard method. Analysis of the macrostructure of castings was performed using the BIAM sparring scale. The gas sparsity of casting templates was determined on three squares with a plane of  $1 \text{ cm}^2$  each. The number of pores and their size were determined as the arithmetic mean of three measurements. The degree of roughness of the macrocuts in points was established by comparing them with the standards of the scale. The analysis of literary sources on the topic of the work showed that the complex impact on the crystallizing metal, including the processes of modification and pressure application, is promising from the point of view of improving the mechanical properties of alloys of the Al-Si system.

The given data show the prospects of development and use of complex technologies for processing alloys of the Al-Si system both at the stage of preparing the melt for pouring and at the stage of forming the casting directly in the foundry mold. As a result of the implementation of the mentioned technology, the number of defective castings on the bulkheads and gas sinks was reduced by 28%, the plastic properties of the cast metal increased by 25%, it was possible to reduce the amount of modifier by 15-20%, as well as reduce the temperature and processing time.

Key words: crystallization of alloys, pressure, modification, complex technology, gas dynamic influence, melt, casting form, structural components, mechanical properties.

**Вступ.** Створення нових технологій та підвищення механічних та експлуатаційних характеристик литих виробів є актуальною проблемою ливарного виробництва. При безперервно зростаючих вимогах до підвищення якості виливків та необхідності економії матеріалів традиційні технології стають дедалі менш ефективними. В теперішній час набувають більшої актуальності комплексні

технології, що поєднують процеси рафінування, модифікування та зовнішніх впливів на метал виливка, що кристалізується в ливарній формі.

Ефективним способом підвищення механічних властивостей сплавів є зміна морфології фаз, що формуються, за рахунок затвердіння і модифікування їх у різко нерівноважних умовах [1, 2]. При цьому створюються умови подрібнення

© Селівьорстов В.Ю. – д.т.н., проф. УДУНТ  
Доценко Ю.В. – к.т.н., доц. УДУНТ  
Селівьорстова Т.В. – к.т.н., доц. УДУНТ

Selivorstov V. – d.t.s., profssor, USUST  
Dotsenko Yu. – c.t.s., docent USUST  
Selivorstova T. – c.t.s., docent USUST

структурних складових, значного підвищення розчинності у твердому стані, пригнічення зростання грубих включень первинних інтерметалідів.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Сплави системи Al-Si використовують, переважно, як конструкційні матеріали, тому саме механічні властивості є основними показниками якості [3]. Одним із способів підвищення механічних властивостей сплавів системи Al-Si є модифікування. Теоретичні засади модифікування кольорових сплавів викладено у роботах М.В. Мальцева, В.І. Напалкова, Г.Б. Строганова, Б.Б. Гуляєва та інших. При цьому розрізняють 2 роду модифікаторів (за П.А. Ребиндером) – модифікування тугоплавкими частинками (інокуляція) і зміна поверхнево-активними елементами (лімітація). У першому випадку використовують правило Данилова-Конобаєвського (принцип розмірно-структурної відповідності) та електронну теорію Ламіхова-Самсонова (акцептуючий критерій  $1/Nn$ ) [3-6]. До модифікаторів алюмінію 1-го роду відносять Ti, Zr, V, TiC, TiB<sub>2</sub> та ін; до модифікаторів алюмінію 2-го роду – B, Sr, Sb, Ba та ін. Вибір модифікаторів для Al-Si сплавів є складнішим завданням, оскільки необхідно подрібнити одночасно дендрити Al і Si. Відповідно до теорії синтезу сплавів (по Б.Б. Гуляєву) одним із критеріїв, що характеризують модифікуючу здатність елементів, є критерій розподілу в кремнії ряду елементів ( $\omega_{Si} = 10^{-3} \div 10^{-4}$ ) [7]. Відповідно, до модифікаторів Si відносять ряд наступних елементів: Na-K-Ca-Sr-Ba-Cd-Sb-Bi-B-S-P. Розроблено ефективні комплексні модифікатори сплавів системи Al-Si, що включають модифікатори 1 та 2 родів. Врахування природи сплаву та використання фізико-хімічних критеріїв дозволяє в даний час отримувати високий ефект модифікування при малих та гранично малих добавках елементів (0,1÷0,001% за мас.) [4].

Існують і фізичні методи впливу, що мають модифікуючий ефект, такі як ультразвукова обробка, температурно-часова обробка, накладення на розплав електромагнітного поля та ін. Великий інтерес викликають процеси, що пов'язані із застосуванням

тиску на метал виливків, що кристалізується. Зокрема, у технологічних схемах лиття з кристалізацією сплавів під тиском (ЛКД) тиск, що прикладається на розплав у процесі затвердіння, значно впливає на характер кристалізації [9]. Збільшення швидкості охолодження призводить до відповідного зростання швидкості кристалізації, яка змінюється внаслідок впливу тиску при кристалізації на число центрів та швидкість зростання зародків. Швидкості охолодження зростають залежно від габаритів виливків, температурних умов лиття, методу пресування від 2-3 до 10 і більше разів. Підвищення швидкості охолодження кольорових сплавів, що являють собою системи з обмеженою розчинністю, призводить до зміни структури та легування твердого розчину, пов'язаного з дендритною ліквідацією та утворенням квазіевтектики. На сьогоднішній день мало відомостей про використання комбінованих технологій, що впливають на структурні складові металу, і тим самим підвищують його службові властивості.

**Метою роботи** є теоретичне обґрунтування доцільності та можливості комплексного впливу модифікування та газовим тиском на процес структуроутворення ливарного сплаву системи Al-Si.

**Завдання дослідження.** Аналіз ефективності технології модифікування та газодинамічного впливу на сплав АК5М, що твердіє в металевій формі.

**Матеріали та методи дослідження.** Виливок «Опорний наконечник стійки конвеєра» із сплаву АК5М (ДСТУ2839-94) масою 1,1 кг заливали при температурі  $710 \pm 10$  °С в підігрітій і пофарбований чавунний кокіл з мінімальною товщиною стінки 40 мм. Схема виливка представлена на рисунку 1. Вміст модифікатора (EUTEKTAL T200) у розплаві складав від 0,1 до 0,3 мас.%. Механічні властивості металу виливків визначали за стандартною методикою. Аналіз макроструктури виливків проводили з використанням шкали шпаристості ВІАМ (рис. 2): бал 1 – дрібна шпаристість; бал 2 – знижена шпаристість; бал 3 – середня шпаристість; бал 4 – підвищена шпаристість; бал 5 – висока шпаристість.

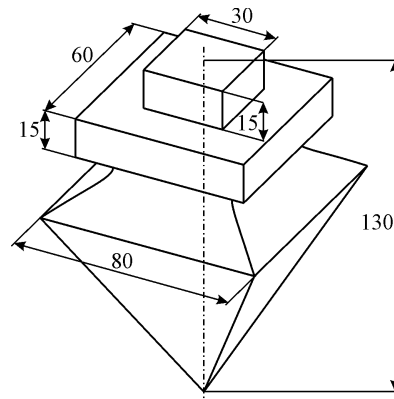


Рисунок 1 – Схема виливка «Опорний наконечник стійки конвеєра»

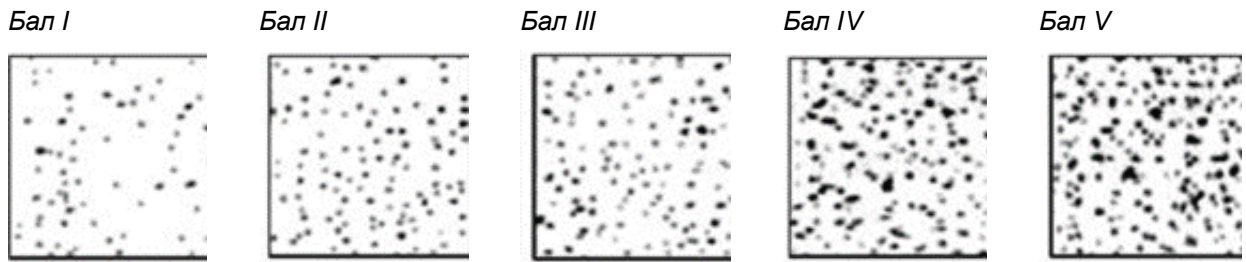


Рисунок 2 – Шкала шпаристості BIAM

Газову шпаристість темплетів виливків визначали на трьох квадратах площиною 1 см<sup>2</sup> кожний (рис. 3).

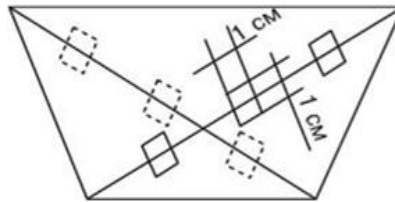


Рисунок 3 – Схема розташування квадратів на макрошліфах

Кількість пор та їхній розмір визначали як середнє арифметичне трьох вимірів. Ступінь шпаристості макрошліфів в балах встановлювали порівнянням їх з еталонами шкали.

**Результати досліджень.** Дія тиску на кристалізацію сплавів системи Al-Si проявляється у подрібненні структурних складових. Тиск сприяє збільшенню взаємної розчинності компонентів сплавів, а також змінює евтектичну концентрацію сплавів.

Збільшення розчинності компонентів пояснюється загальмовуванням первинної дифузії, яка має місце при переході сплаву з рідкого стану в твердий. Для розуміння ж усунення евтектичної точки необхідно розглянути зміну діаграми стану під впливом тиску.

На рисунку 4 представлено частину діаграми стану Al-Si. Штриховими лініями нанесено діаграму, яка виходить при дії тиску. Діаграма побудована на підставі розрахунків, виконаних за рівнянням логарифміки розчинності Шредера для бінарних систем [10]:

$$\ln X = \frac{Q_a}{2} \left( \frac{1}{T_a} - \frac{1}{T} \right); \quad (1)$$

$$\ln(1 - X) = \frac{Q_b}{2} \left( \frac{1}{T_b} - \frac{1}{T} \right); \quad (2)$$

де X – мольна концентрація компонента А;  
 (1-X) – мольна концентрація компонента В;  
 Q<sub>a</sub> – прихована теплота плавлення компонента А;  
 Q<sub>b</sub> – прихована теплота плавлення компонента В;  
 T<sub>a</sub> – температура плавлення компонента А;  
 T<sub>b</sub> – температура плавлення компонента В;  
 T – поточна температура плавлення.

При розрахунках приймалося, що температура плавлення чистого алюмінію підвищується на 6,3×10<sup>-3</sup> °C на кожен атмосферу тиску, а

температура плавлення чистого кремнію відповідно знижується на 5,8×10<sup>-3</sup> °C.

Виконані виходячи з цього розрахунки показали, що зміщення евтектичної точки для діаграми Al-Si становить 0,003% на кожен атмосферу тиску. Зміщення відбувається у бік кремнію.

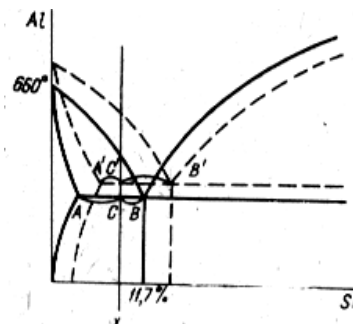


Рисунок 4 – Зміна діаграми стану Al-Si при дії тиску [10]

На рисунку 5 показано зміну положення прикордонних ліній діаграми стану системи Al-Si при модифікуванні натрієм. Під впливом модифікатора склад евтектики зрушується у бік підвищеної концентрації кремнію [11].

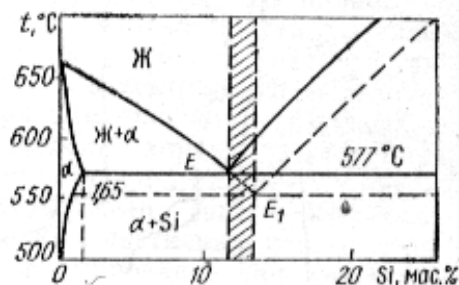


Рисунок 5 – Зміна положення прикордонних ліній діаграми стану системи Al-Si при зміні натрієм. Суцільні лінії – рівноважна діаграма стану [11]

Наведені дані показують, що проведення процесу кристалізації при впливі модифікування або тиску призводить до зсуву в область більш високих концентрацій другого компонента нерівноважних ліквідусу і солідусу з одночасним підвищенням температури евтектики, що дає підстави для використання комбінованих способів впливу на процес структуроутворення.

На кафедрі ливарного виробництва Українського державного університету науки і технологій розроблена технологія газодинамічного впливу на рідкий метал та метал, що кристалізується в ливарній формі [12, 13]. Результати лабораторних досліджень та промислових випробувань показали підвищення механічних властивостей литого металу та зниження браку за шпаристістю при виробництві виливків.

Зокрема, при виробництві виливків деталей «Опорний наконечник стійки конвеєра», що виготовляються зі сплаву АК5М способом лиття в кокіль, в порядок технологічних операцій виготовлення

Таблиця 1 – Механічні властивості сплаву АК5М

№ зразка	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа		НВ		$\delta$ , %	
	ТТ	ГДВ	ТТ	ГДВ	ТТ	ГДВ
1	162,2	185,2	70	73	1,0	1,27
2	161,8	184,8	68	72	0,9	1,26
3	162,1	185,3	68	73	0,9	1,27

**Обговорення результатів.** Приведені дані свідчать про перспективність розробки та використання комплексних технологій обробки сплавів системи Al-Si як на етапі підготовки розплаву до заливки, так і на етапі формування виливка безпосередньо в ливарній формі. Внаслідок впровадження зазначеної технології скоротилася кількість браку виливків по рихлотах та газових раковинах на 28 %, збільшилися на 25 % пластичні властивості литого металу, на 15-20 % вдалося знизити кількість модифікатора, а також знизити температуру та час обробки.

**Висновки:**

1. Проведений аналіз літературних джерел по темі роботи показав, що комплексний вплив на метал, що кристалізується, включає процеси модифікування та накладання тиску є перспективними з точки зору підвищення механічних властивостей сплавів системи Al-Si.

вилівка були включені наступні етапи: проведення рафінування (препарат DEGASAL T 200) і введення модифікатора EUTEKTAL T 200), введення в робочу порожнину форми пристрою для подачі газу оригінальної конструкції, витримка виливки з пристроєм протягом заданого проміжку часу, подача газу (аргону) з початковими показниками тиску 0,15 - 0,2 МПа, наступне нарощування тиску до 1 - 1,1 МПа та витримка під тиском до повного затвердіння виливка.

В результаті газодинамічної дії унеможливується повне перемерзання живильника-надливу до затвердіння теплового вузла та відбувається примусове переміщення розплаву із верхньої частини виливка, забезпечуючи більш сприятливий процес живлення. При комбінованому впливі на процес кристалізації в результаті модифікування та газодинамічного впливу (ГДВ) підвищуються механічні властивості сплаву в порівнянні з металом, що отриманий за традиційною технологією (ТТ) (табл. 1).

2. Проведення процесу кристалізації при впливі модифікування або тиску призводить до зсуву в область більш високих концентрацій другого компонента нерівноважних ліквідусу та солідусу. Варіювання величини тиску при кристалізації та кількості модифікатора призводить до зміни співвідношення фаз у структурі евтектичних сплавів, що впливає на механічні та експлуатаційні властивості виливків.

3. Розроблена комплексна технологія газодинамічного впливу на розплав у ливарній формі та модифікування дозволяє досягти стійкого ефекту подібнення кристалічної структури, зниження макрота мікродфектів та підвищення механічних властивостей сплаву АК5М, що твердіє в неохолоджуваному кокіль у порівнянні з традиційною технологією: тимчасовий опір збільшується з 161-162 МПа до 184-185 МПа (11 – 12%), твердість – з 68-70 НВ до 184-185 НВ, відносно подовження з 0,9 – 1% до 1,26 – 1,27% (26 – 27%).

**Література**

1. Nemenenok B.M. Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov. - Mn. Tekhnoprint, 1999. – 272 s.
2. Effect of Additions of Ceramic Nanoparticles and Gas-Dynamic Treatment on Al Casting Alloys / K. Borodianskiy, V. Selivorstov, Y. Dotsenko, M. Zinigrad // Metals. - Basel, Switzerland, 2015. - Volume 5, Issue 4 (December 2015). – P. 2277-2288 <https://www.mdpi.com/2075-4701/5/4/2277>.
3. Siluminy. Atlas mikrostruktur i fraktogramm promyshlennykh splavov: Sprav. Izd. / Prigunova A.G., Belov N.A., Taran Yu.N. i dr. – M.: MISIS, 1996. – 175 s.
4. Nikitin V.I., Nikitin K.V. Nasledstvennost' v litykh splavakh. Izd. 2-ye, pererab. i dop. M.: Mashinostroyeniye – 1, 2005. – 476.
5. Taran Yu.N., Mazur V.I. Struktura evtekticheskikh splavov. M.: Metallurgiya, 1978. 312 s.
6. Kimstach G.M., Mukhovetskiy YU.P., Borisov V.D. i dr. O modifitsirovani Al-Si splavov. – Liteynoye proizvodstvo, 1981, №10, s. 7-8.
7. Gavrilin I.V. Plavleniye i kristallizatsiya metallov i splavov. Vladimir: VGU, 2000, 260 s.

8. Gulâev B.B. Sintez splavov. M.: Metallurgîa, 1984. – 160 s.
9. Borisov G.P. Davleniye v upravlenii liteynymi protsessami. – K.: Naukova dumka, 1988.– 271 s.
10. V.V. Markov, A.A. Ryzhikov. Voprosy kristallizatsii splavov pod vysokim davleniyem // Teploobmen mezhdru otlivkoy i formoy. – Minsk: «Vysheyshaya shkola», 1967. – S. 71-74.
11. Modifitsirovaniye siluminov strontsiyem / I.N. Ganiyev, P.A. Parkhutik, A.V. Vakhobov, I.Yu. Kupriyanova; Pod red. K.V. Gorelova. – Mn.: Nauka i tekhnika, 1985. – 143 s.
12. Deklaratsiynnyy patent, Ukrayina MPK (2006) V22D 18/00 Sposib otrymannya vylyvkiv/ Seliv'orstov V.Yu., Khrychikov V.YE., Dotsenko Yu.V. № 28858 zayavl. 03.08.2007, opubl. 25.12.2007 Byul. № 21.
13. Deklaratsiynnyy patent, Ukrayina MPK (2006) V22D 18/00 Prystriy dlya otrymannya vylyvkiv/ Seliv'orstov V.Yu., Khrychikov V.YE., Dotsenko Yu.V. № 28859 zayavl. 03.08.2007, opubl. 25.12.2007 Byul. № 21.

*Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 01.10.2024*  
*Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.10.2024*