

## Модифікування заевтектичного силуміну лігатурами з підготовленою дисперсною структурою

В. М. Бондаревський, кандидат технічних наук

А. В. Нарівський, доктор технічних наук

К. В. Гаврилюк, В. Д. Бабюк, Є. А. Жидков

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Представлено результати дослідження щодо впливу модифікування розплаву дрібнокристалічними Си-Р лігатурами і висококремнистим (Si 37,8 %) сплавом на процеси формування  $b_{Si}$ -фази в заевтектичних силумінах. Показано, що середній розмір і морфологія кристалів первинного кремнію в литій структурі залежить від інтенсивності тверднення лігатур і виливків з модифікованого сплаву.*

У немодифікованих заевтектичних алюмінієвих сплавах кристали кремнію мають форму пластин, які на шліфах спостерігаються у вигляді голок. Це обумовлено тим, що кремній має подібну до алмазу кристалічну решітку з ковалентним зв'язком між атомами [1]. Такий зв'язок реалізується здебільшого по площинах (гранях) кристалів в напрямку {111}. Тому в зростаючому кристалі кремнію навіть при малому переохолодженні розплаву ці площини отримують найбільший розвиток і утворюють в структурі силумінів пластинчасті включення.

Для подрібнення структурних складових в заевтектичних силумінах зазвичай застосовують добавки фосфористої міді. Модифікування силумінів цим сплавом дозволяє диспергувати структуру в виливках і підвищити їх фізико-механічні властивості. Однак обробка розплаву такою лігатурою, яка має більш високу температуру плавлення і щільність порівняно з алюмінієвими сплавами, не завжди забезпечує рівномірний розподіл модифікатора у виливках. Більш ефективно модифікувати сплави мікрокристалічними лігатурами, які виготовляють у вигляді прутків, стрічок, гранул і ін.

У статті наведено результати дослідження впливу структурного стану лігатур на морфологію і розмірні параметри кристалів первинного кремнію в заевтектичному силуміні AlSi19Cu3. Сплави і лігатури масою 0,6 кг плавляли в алуновому тиглі печі опору. При виготовленні лігатур змінювали швидкість їх тверднення шляхом виготовлення тонких (5 мм) виливків в масивному кокілі або заливки металу на диск, що обертається. Досліджуваний сплав нагрівали до 880 °С, витримували при цій температурі 30 хвилин, модифікували і одержували з нього 3-х ступінчасті виливки в

## Плавлення і кристалізація

чавунному кокілі. Товщина ступенів у виливку становила 6, 12 і 20 мм, що дозволило кристалізувати модифікований сплав за різних температурно-часових умов. Хімічний склад матеріалів, які використовували при проведенні досліджень, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сплавів і лігатур для його модифікування

Номер	Вміст елементів, % по масі				Сплави, лігатури і умови їх кристалізації
	Al	Si	Cu	P	
1	78	19	3	–	Сплав AlSi19Cu3
2	–	–	94,3	5,7	Стандартна Cu-P лігатура
3	–	–	94,3	5,7	Мілкокристалічна Cu-P лігатура (на диску)
4	66,2	–	33,4	1,4	Сплав AlCu34P2 (у кокілі)
5	59,41	37,8	2,79	0,05	Сплав AlSi38Cu3 (у кокілі)

Кількісну оцінку мікроструктури в сплавах здійснювали за допомогою програми Image Pro Plus 6. Визначали довжину, ширину, периметр та площу кристалів первинного кремнію в виливках сплавів.

На рис. 1 наведено залежність кількості кристалів первинного кремнію (КПК) різної дисперсності в виливках після модифікування сплаву. Ефективність способів модифікування сплаву оцінили за вмістом КПК, розмір яких не перевищує 30 мкм. Встановлено, що після кожної обробки рідкого металу дрібнокристалічними лігатурами в структурі виливків товщиною 6 – 12 мкм кількість КПК такої дисперсності становить 86 – 100 %. У виливку товщиною 20 мм концентрація кристалів кремнію розміром до 30 мкм складає 65 – 70 %. При модифікуванні розплаву стандартною Cu-P лігатурою зі збільшенням товщини виливка від 6 до 12 мм вміст дисперсних КПК із середнім розміром  $d \approx 30$  мкм зменшується до 67 %, а у виливку товщиною 20 мм – до 50 %. При цьому змінюються і інші параметри кристалів кремнію в сплаві (табл. 2).

При модифікуванні Cu-P лігатурами в розплаві утворюються дисперсні частинки фосфористого алюмінію AlP, які інтенсифікують процес зародкоутворення кристалів кремнію в сплавах [2]. Крім цього, частки AlP вибірково адсорбуються на гранях кристалів кремнію і уповільнюють їх зростання. При уповільненні росту граней зменшується поверхнева енергія на межі розділу «кристал – метал», що знижує термічну стійкість будови Al – Si розплавів. В результаті цього підвищуються гомогенність розплаву і його переохолодження на фронті кристалізації, які сприяють подрібненню структури в сплавах.

Обробка розплаву дрібнокристалічною Cu-P лігатурою або сплавом AlSi38Cu3 дозволяє значно зменшити розміри структурних складових в литому металі. Після модифікування сплаву кількість  $\beta_{Si}$ -фази розміром  $\leq 30$  мкм у всіх виливках перевищує 90 %. При модифікуванні металу

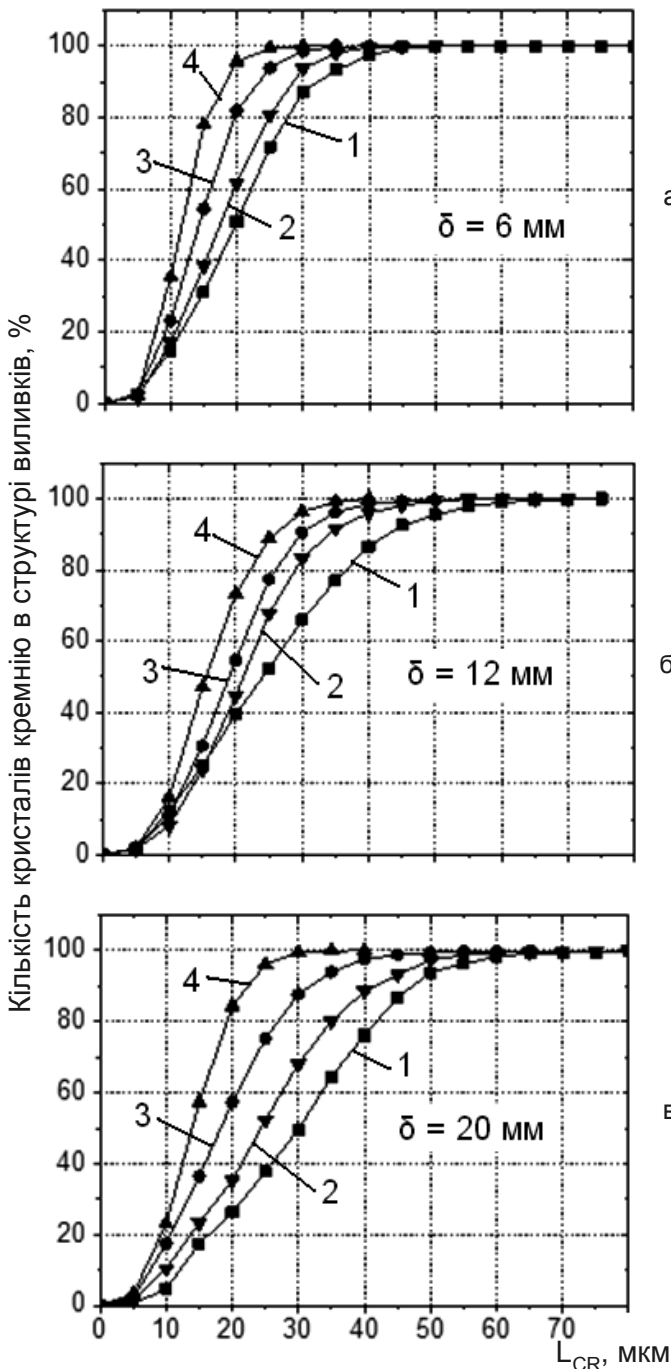


Рис. 1. Вміст КПК різної довжини у виливках товщиною 6 (а), 12 (б) і 20 (в) мм після модифікування розплаву. 1 – стандартною Cu-P лігатурою; 2 – дрібнокристалічною Cu-P лігатурою; 3 – сплавом AlCu34P2; 4 – сплавом AlSi38Cu3.

сплавом AlCu34P2 з більш грубою структурою по мірі зростання товщини виливків від 6 до 20 мм, концентрація в них КПК зазначених розмірів зменшується від 80 до 50 %. Невисока ефективність такого модифікування розплаву зумовлена меншим вмістом в легуючому сплаві фосфору порівняно з Cu-P лігатурами. В процесі обробки в сплаві утворюється недостатньо частинок фосфористого алюмінію для уповільнення росту граней в КПК.

При застосуванні дисперсноструктурованої Cu-P лігатури в розплаві утворюється значна кількість частинок AlP з розвиненою міжфазною поверхнею, що дозволяє уповільнити або блокувати ріст граней практично у всіх кристалах кремнію.

Найбільше подібнення структури сплаву спостерігається при обробці розплаву дрібнокристалічним модифікатором АК38МЗ (рис. 2). Висока ефективність такої технології досягається за рахунок надходження в розплав разом з модифікатором додаткових центрів кристалізації і «підкладок», які інтенсифікують про-

цеси зародкоутворення і зростання кристалів в сплаві. Також на структуру, особливо на евтектичну складову в литому металі, позитивно впливає

Таблиця 2  
 Параметри кристалів первинного кремнію у виливках різної товщини з модифікованого силуміну

Но- мер	Товщина вливка, мм	Кількість кристалів у сплаві, шт/см <sup>2</sup>	Відносна площа кристалів у структурі сплаву, %	Середні значення розмірних параметрів кристалів кремнію					Модифікатор
				Периметр, мкм	Довжина, мкм	Ширина, мкм	Площа, мкм <sup>2</sup>	Відношення головних осей	
1	20	175	8,31	91,81	29,99	19,86	475,1	1,78	Стандартна Cu-P лігатура
2	12	224	7,58	73,95	25,14	16,23	339	1,88	
3	6	365	7,93	58,72	20,13	13,33	217,1	1,78	Дрібнокристалічна Cu-P лігатура
4	20	342	11,75	72,08	25,32	16,05	343,8	1,87	
5	12	435	8,86	55,3	19,21	12,45	203,8	1,87	Сплав AlCu34P2
6	6	755	8,78	41,79	14,76	9,8	116,3	1,72	
7	20	325	8,45	64,68	22,06	14,84	274,07	1,85	Сплав AlSi38Cu3
8	12	447	8,15	50,91	17,77	11,46	183,85	1,83	
9	6	450	8,43	52,39	18,05	12,69	187,41	1,69	Сплав AlSi38Cu3
10	20	596	8,4	46,08	16,37	10,63	140,74	1,8	
11	12	739	7,67	42,55	14,37	9,4	103,82	1,76	Сплав AlSi38Cu3
12	6	1030	6,99	36,43	12,03	7,85	67,85	1,74	

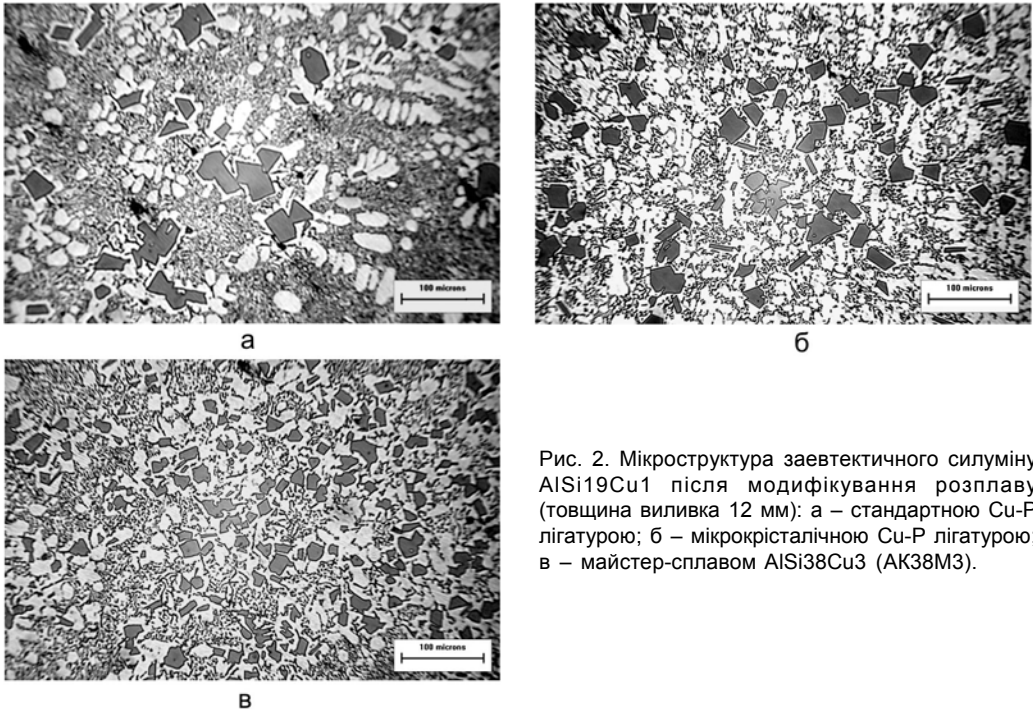


Рис. 2. Мікроструктура заевтектичного силуміну AlSi19Cu1 після модифікування розплаву (товщина виливка 12 мм): а – стандартною Cu-P лігатурою; б – мікрокристалічною Cu-P лігатурою; в – майстер-сплавом AlSi38Cu3 (AK38M3).

структурна спадковість модифікатора [3, 4]. В результаті цього кількість КПК на одному квадратному сантиметрі площі виливка товщиною 6 – 20 мм збільшується в 1,4 – 1,7 рази порівняно з обробкою розплаву дрібнокристалічною Cu-P лігатурою (табл. 2).

На форму і розмір первинних кристалів кремнію в силумінах впливають також швидкість тверднення і перегрів сплаву над температурою ліквідус. При збільшенні швидкості тверднення виливків стабілізується форма росту кристалів кремнію в сплаві, а підвищення температури розплаву сприяє зменшенню їх розмірів і кількості [5]. Тому після обробки металу лігатурами, по мірі збільшення товщини виливків ступінь диспергування КПК в сплаві знижується. При цьому, незалежно від структурного стану лігатур і товщини виливків, співвідношення максимальних довжини до ширини кристалів кремнію, практично однакове і становить 1,7 – 1,87 (табл. 2). Це свідчить про більш компактну форму КПК, які утворюються при всіх способах обробки розплаву.

Таким чином експериментально встановлено, що застосування дисперсноструктурованих модифікаторів дозволяє суттєво збільшити кількість центрів зародкоутворення в розплаві і таким чином зменшити розміри структурних складових в виливках з заевтектичного силуміну. Представлені дані можуть бути використані при розробці процесів приготування спеціальних лігатур для виробництва литих виробів з силуміну із заданими структурою і властивостями.

## Література

1. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. – М.: Металлургия, 1988. – 296 с.
2. Dong Nian-shun, Cui Chun-xiang, Liu Shuang-Jin. Eiu Fu-cai Preparation of nanocrystal modifier and its modification mechanism // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2007. – 17. – P 823 – 827.
3. Никитин В.И., Никитин К.В. Наследственность в литых сплавах. – М.: Машиностроение, 2005. – 476 с.
4. Кондратюк С.Є., Стоянова О.М., Щеглов В.М. Модифікування сталі нанорозмірними порошковими інокуляторами // Металознавство та обробка металів. – 2015. – № 3. – С. 3 – 7.
5. Бродова И.Г., Попель П.С., Бардин Н.М. Расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 370 с.

Одержано 29.06.16

**В. М. Бондаревский, А. В. Наривский, К. В. Гаврилюк,  
В. Д. Бабюк, Е. А. Жидков**

### **Влияние модифицирования расплава мелкокристаллическими лигатурами на структуру заэвтектического силумина**

#### **Резюме**

Представлены результаты исследования по влиянию модифицирования расплава мелкокристаллическими Cu-P лигатурами и высококремнистым (Si 37,8 %) сплавом на процессы формирования  $b_{Si}$ -фазы в заэвтектическом силумине. Показано, что средний размер и морфология кристаллов первичного кремния в литой структуре зависит от интенсивности затвердевания лигатур и отливок из модифицированного сплава.

**V. N. Bondarevsky, A. V. Narivsky, K. V. Gavrilyuk,  
V. D. Babiuk, Ye. A. Gidkov**

### **The modifying effect of melt crystalline ligatures on the structure of hypereutectic silumin**

#### **Summary**

The results of studies on the modifying effect of crystalline Cu-P master alloys and high-silicon (Si 37,8 %) alloy on the processes of  $b_{Si}$ -phase formation in the hypereutectic silumin. It is shown that the average size and morphology of primary silicon crystals in the cast structure depends on the intensity of solidification of the castings and ligatures of modified alloy.