

V. M. Duka, A. G. Borisov

**Influence of changing conditions of cooling in crystallization range
on the structure of AK7ч alloy**

Summary

Influence of cooling regimes of AK7ч alloy samples on cast structure was investigated. It was found that processes regulating formation of not-dendritic structures occur in narrow interval of time and temperature and cooling rate out of this interval have no substantial influence on the morphology of primary phase.

УДК 621.74: 669.714

*Вплив титану на схильність до утворення
гарячих тріщин та структуру сплавів Al-Cu5*

В. П. Гаврилук, член-кореспондент НАН України

В. В. Ласковець

К. Ю. Гзовський, кандидат технічних наук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

За допомогою зіркоподібної форми для визначення схильності сплавів до утворення гарячих тріщин та мікроскопічного аналізу досліджено вплив титану на схильність до утворення гарячих тріщин та формування структури сплаву Al – Cu5. На основі кластерної теорії розглянуто механізм впливу хімічного складу на процеси структуроутворення.

Високоміцні алюмінієві сплави є одним із найбільш перспективних видів матеріалів для авіакосмічної техніки, машинобудування та медицини. Це пов'язано, насамперед, з їх високою питомою міцністю, яка перевищує питому міцність сталей. Однак, разом із перевагами, існуючі алюмінієві сплави мають й недоліки. Так силуміни, маючи високі технологічні властивості, не відзначаються високим рівнем міцності. Високоміцні сплави, навпаки, при високому рівні міцності мають низькі ливарні властивості. Отже, підвищення рівня технологічних властивостей алюмінієвих сплавів та встановлення механізму їх структуроутворення є актуальною науковою проблемою.

Однією з найбільш перспективних груп високоміцних ливарних алюмінієвих сплавів є сплави на основі системи Al – Cu – Ti, вони відрізняються високою міцністю в поєднанні з пластичністю та теплостійкістю.

В [1] було встановлено, що застосування лігатури AlTi5B1 та титану для подрібнення зерна в сплаві AlCu4Ti не призводить до зниження кількості гарячих тріщин при литті в металеві форми. Підвищення вмісту титану від 0,01 до 0,18 % (тут і далі мас. частка) призводить до збільшення розмірів зерна від 93 μm до 158 μm. Однак, при литті сплаву в форми з піщано-глинистих сумішей збільшення вмісту

Плавлення і кристалізація

титану від 0,01 до 0,18 % та внесення зародкової фази TiB_2 призводить до значного покращення технологічних властивостей сплаву.

Утворення тріщин при литті сплавів пов'язують із наступними головними причинами: великий інтервал кристалізації, напруження в інтервалі кристалізації та охолодження, фази або структури із низькою температурою плавлення на границях зерен, груба зеренна структура, низька в'язкість матриці при підвищених температурах, груба будова дендритів, низька рухливість зерен в інтервалі твердіння, низька рухливість рідкої фази в інтервалі кристалізації [2].

Однак, зауважимо, що практично всі фактори, розглянуті у попередніх роботах, не пов'язані із взаємодією компонентів у розплавах, а стосуються лише особливостей процесів зародження і росту твердої фази. Такий підхід до питання структуроутворення сплавів домінує впродовж багатьох десятиліть, внаслідок чого наукова проблема керування процесом кристалізації та практична проблема отримання виливків з високоміцних ливарних сплавів складної форми залишаються не вирішеними. На нашу думку одним з важливих факторів, можливо, первинних, що впливає на формування структури та, як наслідок, процеси утворення гарячих тріщин, є взаємодія компонентів в розплаві та їх топологічне і хімічне упорядкування, наслідком чого стає зміна процесів зародження і росту твердої фази, об'ємні зміни та напруження.

Таким чином, завданням даного дослідження є встановлення взаємозв'язку між хімічним складом модельних сплавів на основі системи Al – Cu – Ti, їх структурою і схильністю до утворення гарячих тріщин та подальший розвиток уявлень про упорядкування в розплавах та його вплив на процес структуроутворення.

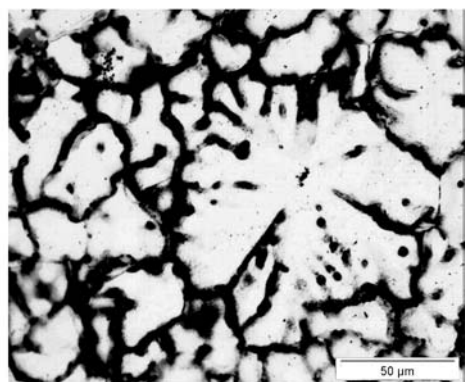
В даних дослідженнях використовували модельні сплави системи Al – Cu5 – Ti. Вміст титану змінювали від 0,19 до 0,47 %. Хімічні склади сплавів та їх вплив на параметр схильності сплаву до утворення гарячих тріщин (N), величину зерна та фазовий склад представлено в таблиці.

Хімічний склад сплаву та параметр схильності сплаву до утворення гарячих тріщин

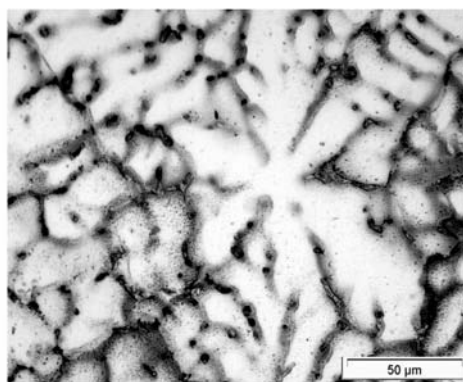
Сплав	Cu, %	Ti, %	Cu (ат.%) / Ti (ат.%)	N	Величина зерна, μm	Фазовий склад
1	5,10	0,19	20,27	3,25	160	α , CuAl ₂
2	5,03	0,22	17,32	3,75	237	α , CuAl ₂
3	5,06	0,24	15,89	4,00	430	α , CuAl ₂
4	5,04	0,27	14,10	2,50	46	α , CuAl ₂ , Al ₃ Ti
5	5,01	0,38	9,95	2,75	97	α , CuAl ₂ , Al ₃ Ti
6	5,05	0,43	8,84	3,00	125	α , CuAl ₂ , Al ₃ Ti
7	5,03	0,47	8,14	3,50	174	α , CuAl ₂ , Al ₃ Ti

Виправку дослідних сплавів проводили в електричних печах опору типу СШОЛ з використанням графіто-шамотного тигля. Виготовлення зразків для встановлення схильності сплавів до утворення гарячих тріщин проводили з використанням металевої форми (діаметр робочої частини зразків 0,01 м), підігрітої до температури 400 °C [1]. Хімічний склад сплавів визначали методом іонної спектроскопії за допомогою спектрометра SDP 750 фірми LECO TECHNIK.

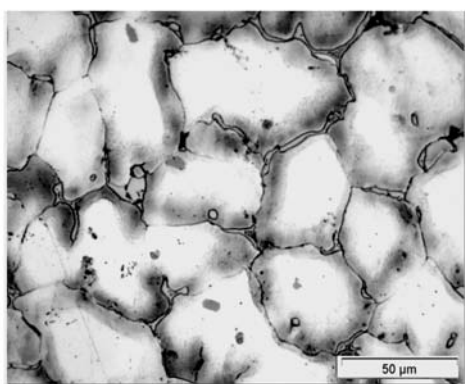
Як це видно із структур, представлених на рисунку а, структура сплаву Al – Cu5 складається із комірчастих зерен α -твердого розчину та включень фази $CuAl_2$, що розташовані, здебільшого, на границях зерен. Як видно з даних, представлених в таблиці та на рисунку б, підвищення вмісту титану від 0,19 % до 0,24 % (Cu/Ti =



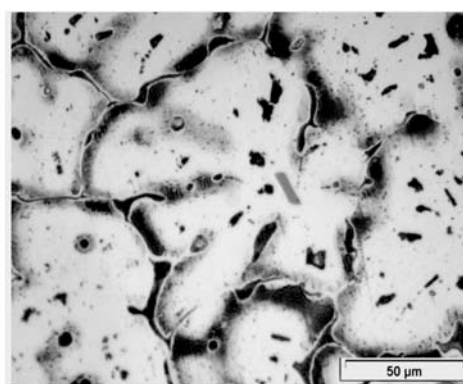
а



б



в



г

Вплив вмісту титану на структуру сплаву Al – Cu5. а – 0,19 % Ti, б – 0,24 % Ti, в – 0,27 % Ti, г – 0,38 % Ti.

15,89) в сплаві призводить до максимального огрублення структури твердого розчину (розмір зерна складає $430\ \mu\text{m}$) і максимального підвищення схильності сплаву до утворення гарячих тріщин $N = 4$ (таблиця).

Подальше підвищення вмісту титану від 0,24 % до 0,27 %, ($\text{Cu}/\text{Ti} = 14,1$) призводить до утворення дрібних включень фази Al_3Ti компактної форми, частки алюмінідів в структурі розташовані біля границь зерен (рисунок в), які орієнтовані відповідно напрямку тепловідводу, наслідком чого є подрібнення структури твердого розчину, розмір зерна якого становить $46\ \mu\text{m}$ та зниження схильності сплаву до утворення гарячих тріщин. Підвищення вмісту титану від 0,27 % до 0,38 %, призвело до збільшення розмірів фази Al_3Ti та огрублення структури.

Огрублення структури сплаву Al – Cu5 та підвищення його схильності до утворення гарячих тріщин при вмісті титану до 0,24 % ($\text{Cu}/\text{Ti} = 15,89$) не можуть бути пояснені на основі класичних теорій подрібнення зерна, що вимагає пошуку нових науково обґрунтованих пояснень цього явища.

Наявність ікосаедричного упорядкування металевих розплавів є теоретично обґрунтованою [3] та експериментально підтвердженою [4 – 7] й знайшла широке використання для прогнозування складів сплавів, що мають схильність до переохолодження і, як наслідок, утворення квазікристалів та металевих скла [4 – 7]. Це дає нам змогу використовувати цю теорію для пояснень інших явищ при вивченні переходу металевих розплавів до твердої фази. Виходячи із розрахунку різниць атомних радіусів титану та міді $\Delta r = 1,13$, та базуючись на даних,

представлених в роботах [8] й розрахунках за допомогою топологічної моделі, представленої в [9], визначено, що в системі Cu – Ti, Al – Cu – Ti утворюється кластер із координаційним числом CN = 15,088. Кластер $Cu_{15}Ti$ відноситься до кластерів ікосаедричного типу, однак йому притаманна мінімальна ефективність упакування атомів серед кластерів із координаційними числами від 6 до 20 [8].

Отже, особливо висока схильність сплавів системи Al – Cu – Ti до утворення гарячих тріщин полягає, на нашу думку, у природі його розплаву, зокрема, в утворенні кластеру $Cu_{15}Ti$ із низькою ефективністю упакування атомів та його невідповідність структурі твердої фази. Як видно з експериментальних даних (таблиця), саме збільшення концентрації титану по відношенню до міді, що відповідає співвідношенню у кластері $Cu_{15}Ti$, призводить до максимального підсилення схильності сплавів до утворення гарячих тріщин.

Подальше підвищення вмісту титану до 0,27 % ($Cu/Ti = 14,1$) призводить до утворення кластеру між алюмінієм та титаном. Виходячи із розрахунку різниць атомних радіусів титану та алюмінію $\Delta r = 1,01$, та базуючись на даних, представлених в роботах [8] й розрахунках з використанням топологічної моделі [9], визначено, що в системі Al – Ti утворюється кластер із координаційним числом CN = 13,358. Отже, найбільш вірогідним є утворення кластеру $Al_{13}Ti$ в системі Al – Ti. Однак, ми не виключаємо можливість формування кластерів $Al_{12}Ti$ та $Al_{14}Ti$, що за своєю природою схожі на кластер $Al_{13}Ti$. Кластер $Al_{13}Ti$ належить до кластерів неікосаедричного типу. Як це видно із даних, представлених в [8], структура кластеру $Al_{13}Ti$ наближена до кубічної гранецентрованої ґратки алюмінію. Це пояснює найбільш високу ефективність саме титану по відношенню до алюмінію як елемента, що спричинює подрібнення зеренної структури навіть при надзвичайно низьких концентраціях [10].

Як відомо з [9 – 11], ефективність упорядкування атомів в розплавах, процес кристалізації, структура та механічні властивості мають тісний зв'язок. При високій ефективності пакування атомів в розплавах (таких як металеве скло, квазікристалічні сплави евтектики) кристалізація відбувається при відносно низькому рівні об'ємних змін і напружень, наслідком чого є їх високі технологічні та механічні властивості у литому стані [9 – 11]. І навпаки, при утворенні розплавів із низькою ефективністю пакування, таких як Al – Cu – Ti, особливо в областях концентрацій, що відповідають співвідношенню елементів у кластерах з низькою ефективністю пакування, таких як $Cu_{15}Ti$ (таблиця), кристалізація відбувається при відносно високому рівні об'ємних змін і напружень при кристалізації [2], наслідком чого є висока схильність до утворення гарячих тріщин.

Таким чином висока схильність сплавів системи Al – Cu – Ti до утворення гарячих тріщин пов'язана, поряд з відомим фактором, також природою його розплаву, а саме з утворенням кластера $Cu_{15}Ti$ ікосаедричного типу з низькою ефективністю упакування атомів та його невідповідністю структурі алюмінію.

Підвищення вмісту титану більше, ніж достатньо для формування кластеру $Cu_{15}Ti$ до ($Cu/Ti = 14,1$), призводить до утворення кластера $Al_{13}Ti$, що наближений до кубічної гранецентрованої ґратки алюмінію, подрібненню зерна та максимальному зниженню схильності сплаву до утворення гарячих тріщин. Утворення кластера $Al_{13}Ti$, упорядкування якого наближено до кубічної гранецентрованої ґратки алюмінію, пояснює найбільш високу ефективність саме титану по відношенню до алюмінію як елемента, що спричинює подрібнення зеренної структури.

Література

1. Sigworth G., DeHart F., Millhollen S. Use of high strength aluminum casting alloys in automotive applications // Konferenz-Einzelbericht: Light Metals 2001 Metaux Legers, 40th Annual Conf. of Metallurgist of CIM. – 2001. – P. 313 – 322.
2. Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. – М.: Наука, 1966.
3. Miracle D. B., Senkov O. N. // J. Non-Cryst. Sol. – 2003. – P. 174 – 191.
4. Holland-Moritz D., Schenk T., Bellissent R. Short-range order in undercooled Co-melts // J. Non-Cryst. Solids. – 2002. – P. – 312 – 314.
5. Schenk T., Simonet V., Holland-Moritz D. // Europhys. Lett. – 2004. – 65. – P. 34 – 40.
6. Holland-Moritz D., Schenk T., Simonet R. // Mater. Sci. Eng. A. – 2004. – 98. – P. 375 – 377.
7. Hirotsu M., Matsushita T., Ohkubo A. // Mat. Sci. Eng. A. – 1997. – P. 226 – 228.
8. Miracle D., Lord E., Ranganathan S. Candidate Atomic Cluster Configurations in Metallic Glass Structures. // Materials Transactions. – 2006. – 47, No. 7. – P. 1737 – 1742.
9. Ling-Ling Shi, Jian Xu, Evan Ma. Alloy composition of metallic glasses and eutectics from an idealized structural model. // Acta Materialia. – 2008. – 56. – P. 313 – 321.
10. McCartney D.G. // Int. Mater. Rev. – 1989. – 34. – P. 247 – 260.
11. Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys // Acta mater. – 2000. – 48. – P. 279 – 306.

Одержано 08.12.09

В. П. Гаврилюк, В. В. Ласковец, К. Ю. Гзовский

Влияние титана на склонность к образованию горячих трещин и структуру сплава Al – Cu5

Резюме

Исследовано влияние титана на склонность к образованию горячих трещин и структуру сплава Al – Cu5. Рассмотрен механизм влияния титана на процессы, проходящие в расплаве и в процессе кристаллизации.

V. P. Gavriljuk, V. V. Laskovets, K. Yu. Gzowski

Influence of the titanium on propensity of hot cracks formation and structure of Al – Cu5 alloy

Summary

Influence of the titanium on propensity of hot cracks formation and structure of Al – Cu5 alloy is investigated. The mechanism of influence of the titanium on the processes in a liquid alloy and in the course of crystallisation is considered.