

О кристаллизации заэвтектического расплава $Al_{98,8}Co_{1,2}$ в равновесных и неравновесных условиях

И. Г. БРодова¹, д-р техн. наук, С. Г. МЕНЬШИКОВА², канд. физ.-мат. наук, В. И. ЛАДЬЯНОВ², д-р физ.-мат. наук, Т. И. ЯБЛОНСКИХ¹, А. Л. БЕЛТЮКОВ², канд. физ.-мат. наук, В. В. АСТАФЬЕВ¹

¹ Институт физики металлов, г. Екатеринбург, Россия

² Физико-технический институт, г. Ижевск, Россия (svetlmenh@mail.ru)

Методами металлографического, дифференциального-термического и рентгенофазового анализов исследованы морфологические особенности структур заэвтектического сплава $Al - 1,2\%$ (ат.) Co , образовавшихся при охлаждении жидкой фазы со скоростями ~ 2 и $\sim 10^4$ °C/с после различных перегревов над ликвидусом. Проведено сравнительное исследование структурных и фазовых превращений в отливках.

Ключевые слова: алюминиевый сплав; микроструктура; вязкость; фаза.

ВВЕДЕНИЕ

Бинарные сплавы на основе алюминия с переходными металлами составляют основу большинства литейных деформируемых и гранулируемых промышленных сплавов [1, 2]. Сплавы на основе алюминия с кобальтом используют для получения сложных аморфных, наноструктурных и квазикристаллических композитов, сочетающих высокие служебные свойства (прочность, пластичность, износостойкость, коррозионная стойкость) и термическую стабильность [3].

В системе $Al - Co$ со стороны алюминия при температуре 655 °C и содержании $\sim 1\%$ (масс.) Co проходят реакции эвтектического типа $Ж \rightarrow (Al) + Al_9Co_2$ [4]. Растворимость Co в Al при эвтектической температуре не превышает 0,02 % (масс.) и уменьшается при понижении температуры [5]. При быстрой закалке из жидкого состояния твердый раствор, в зависимости от температуры и скорости охлаждения расплава, может содержать до 6,5 % (масс.) Co [5]. Подобные растворы достаточно устойчивы при высоких температурах, обладают повышенными прочностными характеристиками [5 – 7].

Ориентируясь на взаимосвязи между жидкой и твердой фазами, актуально исследование особенностей состояния жидкой фазы и их влияния на структуру и свойства получаемых при затвердевании сплавов [6]. Исследования эвтектических расплавов показали, что при небольших перегревах над ликвидусом полного перемешивания компонентов нет, на уровне ближнего порядка существует суперпозиция нескольких структур с упорядоченностью, характер-

ной для расплавов чистых компонентов и промежуточных фаз [8]. Подобная структурная и химическая неоднородность может сохраняться в широком температурном интервале выше температуры ликвидуса сплава [9]. Специально подобранные режимы температурно-временной обработки расплава, а также направленное затвердевание сплавов дает возможность получать композиции, эффективно упрочненные в направлении перемещения фронта кристаллизации [10].

Рентгеноструктурные исследования расплавов $Al - Co$ в концентрационной области $0 < Co < 26\%$ (ат.) показывают существование в жидкой фазе атомных кластеров, упорядоченных по типу интерметаллических соединений [11]: на кривых структурного фактора обнаружено наличие “предпики” в интервале $1,1 - 2,1 \text{ \AA}^{-1}$ с максимальным значением интенсивности в окрестности расплава с содержанием 23,5 % (ат.) Co , который соответствует составу интерметаллического соединения $Al_{13}Co_4$ [12]. В системе $Al - Co$ в твердом состоянии образуются стехиометрические соединения различных структурных типов: Co_2Al_9 , Co_4Al_{13} , $CoAl_3$, Co_2Al_5 [4, 13] и фаза $CoAl$ [14]. Возможность образования упорядоченных кластеров в расплаве обусловлена сильным межчастичным взаимодействием разнородных атомов [15]. Об этом свидетельствуют большие отрицательные значения энтальпий и избыточных свободных энергий смешения [16].

Исследования расплавов косвенными методами, основанными на анализе температурных и временных зависимостей структурно-чувствительных свойств расплавов (вязкости, плотности, электрического сопротивления и др.), позволяют обнаружить признаки

тем больше зона концентрационного переохлаждения и больше вероятность перехода к дендритным и сферолитным формам роста твердой фазы [23]. Исходя из этого постулата и сравнивая условия кристаллизации двух образцов, термически обработанных при 1200 и $1200 \rightarrow 850$ °С, можно объяснить отсутствие сферолитов в высокотемпературном образце (рис. 4, в) и их преимущественное формирование в образце, полученном после подстуживания расплава (рис. 4, з).

ВЫВОДЫ

1. На основании сравнения структурных и фазовых превращений в отливках сплава $\text{Al}_{98,8}\text{Co}_{1,2}$ подтверждены полученные из анализа политерм вязкости расплава экспериментальные данные об обратимости процессов, происходящих в расплаве при нагреве от температуры ликвидуса до 1200 °С и последующем охлаждении.

2. При перегреве расплава относительно температуры ликвидуса на 150 – 500 °С и охлаждении со скоростью ~ 2 °С/с в процессе кристаллизации формируется структура, соответствующая заэвтектическому составу сплава с образованием первичных алюминидов кобальта Al_9Co_2 и эвтектики ($\text{Al} + \text{Al}_9\text{Co}_2$). При повышении температуры перегрева расплава выше 950 °С наблюдается смена формы роста первичных кристаллов от гранной к дендритной.

3. Перегрев расплава до 1200 °С в сочетании с высокой скоростью охлаждения ~ 10^4 °С/с подавляет преимущественный рост первичных фаз и приводит к формированию квазиэвтектической структуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 15-02-06288а, № 13-02-90742мол_рф_нр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елагин В. И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами. М.: Металлургия, 1975. 247 с.
2. Добаткин В. И., Елагин В. И. Гранулированные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1981. 181 с.
3. Inoue I. Amorphous, nanoquasicrystalline and nanocrystalline alloys in Al-based // Progress in Materials Science. 1998. V. 43. P. 365 – 520.
4. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 1 / Под ред. Н. П. Лякишева М.: Машиностроение, 1996. 991 с.
5. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1979. 640 с.
6. Бродова И. Г., Попель П. С., Барбин Н. М., Ватолин Н. А. Расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 370 с.
7. Ефимов В. Е. Влияние температурно-временной обработки расплава интерметаллидных сплавов на основе Ni_3Al на их фазовый состав и жаропрочность // Авиационные материалы и технологии. Вып. Высокопрочные материалы для современных и перспективных газотурбинных двигателей и прогрессивные технологии их производства / Под. ред. Е. Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2003. С. 79 – 92.
8. Мазур В. И., Осетров С. А., Пригунова А. Г. и др. Модель структуры эвтектических расплавов // ФММ. 1977. Т. 43, вып. 5. С. 1021 – 1027.
9. Попель П. С., Никитин В. И., Бродова И. Г. и др. Влияние структурного состояния расплава на кристаллизацию силуминов // Расплавы. 1987. Т. 1, № 3. С. 31 – 35.
10. Курило Ю. П., Сомов А. И., Тортика А. С., Черный О. В. Морфология структуры и микротвердость эвтектических композиций $\text{Al} - (\text{Ni}, \text{Cu}, \text{Be}, \text{Fe}, \text{Co})$ // ФММ. 1973. Т. 35, вып. 2. С. 347 – 354.
11. Xu R., Verkerk P., Howells W. S. et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 1993. V. 5, No. 50. P. 9254 – 9260.
12. Роик А. С., Самсонников А. В., Казимиров В. П. и др. Рентгенодифракционное исследование структуры расплавов системы $\text{Al} - \text{Co}$ // Журнал структурной химии. 2006. Т. 47. С. 171 – 176.
13. Newkirk J. B., Black P. J., Damjanovic A. // Acta Crystallogr. 1961. V. 14, No. 5. P. 532 – 533.
14. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. М.: Металлургия, 1962. 606 с.
15. Татаринова Л. И. Структура твердых аморфных и жидких веществ. М.: Наука, 1983. 151 с.
16. Nemoshkalenko V. V., Aleshin V. G., Pessa V. M., Chudinov M. G. Localization of d-states in alloys of transition and noble metals // Phys. Scr. 1975. V. 11, No. 6. P. 387 – 393.
17. Бельтюков А. Л., Меньшикова С. Г., Ладьянов В. И. Об особенностях вязкости расплавов $\text{Al} - \text{Ni}$ с содержанием никеля до 10 ат. % // Расплавы. 2012. № 2. С. 55 – 62.
18. Рожаница Е. В., Чикова О. А., Попель П. С. и др. Взаимосвязь структурного состояния твердых и жидких сплавов $\text{Al} - \text{Co}$ // Расплавы. 2002. № 5. С. 36 – 41.
19. Аюшина Г. Д., Левин Е. С., Гельд П. В. Влияние температуры и состава на плотность и поверхностную энергию жидких сплавов алюминия с кобальтом и никелем // ЖФХ. 1969. Т. XLIII. С. 2756 – 2760.
20. Lad'yanov V. I., Bel'yukov A. L., Menshikova S. G., Korepanov A. U. Viscosity of $\text{Al} - \text{Ni}$ and $\text{Al} - \text{Co}$ melts in the Al-rich area // Physics and Chemistry of Liquids. 2014. V. 52. P. 46 – 54.
21. Brodova I. G., Popel P. S., Eskin G. I. Liquid Metal Processing: Applications to Aluminium Alloy Production. London and New York: Taylor & Francis, 2002. 269 с.
22. Бодакин Н. Е., Баум Б. А., Глебовский В. Г., Зеленев В. Н. Об аномалиях на политермах вязкости металлических расплавов // Изв. Вузов. Черная металлургия. 1977. № 9. С. 17 – 19.
23. Флемингс М. Процессы затвердевания. М.: Мир, 1977. 423 с.