

## УЛУЧШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕКОТОРЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЗАКАЛКЕ ИЗ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

Современное машиностроение предъявляет все более высокие требования к эксплуатационным свойствам материалов. Особенно остро вопрос стоит с металлическими материалами, поскольку в Республике Беларусь отсутствует их сырьевая база. Оптимизация состава сплавов и повышение их качества позволяют снизить материалоемкость изделий, а значит, более рационально использовать материальные ресурсы. Однако необходимо отметить, что возможности эффективного легирования в традиционных процессах литья почти исчерпаны. Поэтому значительный интерес представляют процессы затвердевания при неравновесных условиях, открывающие новые возможности в управлении структурой и свойствами металлов [1].

Неравновесное затвердевание охватывает широкий спектр процессов. Сюда входит и модифицирование, создающее местное отклонение от равновесных условий кристаллизации [2]. Местное плавление и затвердевание в крайне неравновесных условиях имеют место и при сверхглубоком проникании, вызывая формирование совершенно необычных фаз и соединений [3]. Местные отклонения от равновесного хода процесса кристаллизации и последующего затвердевания зафиксированы при получении макроготерогенных композиционных материалов [4].

С точки зрения получения в структуре наноразмерных элементов интерес представляют термические методы, такие, как обработка с использованием источников концентрированной энергии (лазерная, электронно-лучевая обработка) и закалка из жидкого состояния.

При закалке из жидкого состояния обеспечиваются условия для расширения области твердой растворимости, формирование ультрамелкой структуры, новых кристаллических и некристаллических метастабильных фаз, включая формирование аморфного состояния. При последующей термообработке происходит распад пересыщенного твердого раствора или аморфного состояния с выделением по границам наноразмерных частиц. Такие частицы на границах зерен обеспечивают значительное увеличение твердости матрицы и стабильности микроструктур при повышенной температуре.

Для разработки новых алюминиевых сплавов, упрочненных наноразмерными частицами, необходимо проведение исследований бинарных

сплавов для установления механизма упрочнения. В настоящей работе приведены результаты исследования двойных сплавов алюминия с цирконием. Известно, что цирконий оказывает комплексное воздействие на структуру и свойства алюминиевых сплавов. С одной стороны, растворенный в алюминии цирконий повышает прочностные характеристики  $\alpha$ -твердого раствора, а с другой – тугоплавкие частицы интерметаллида  $Al_3Zr$  служат активными центрами кристаллизации и обуславливают измельчение зерна (модифицирование). Несмотря на наличие работ по особенностям затвердевания сплавов алюминий – цирконий, в отношении механизма структурообразования сплавов этой сложной системы с наличием многих промежуточных фаз остается множество неясных вопросов.

Исследовались сплавы алюминия, содержащие от 0,3 до 5,0% (по массе) циркония. Анализ зависимости микротвердости  $\alpha$ -твердого раствора от содержания циркония и скорости охлаждения (рис. 1) показывает, что значительный рост микротвердости (с 200 до 800 МПа) обусловлен сильным влиянием циркония как легирующего элемента на твердый раствор, а также свидетельствует об очевидной пересыщенности последнего цирконием вследствие неравновесной кристаллизации.

Металлографический и электронно-микроскопический анализ показал, что структура быстроохлажденных сплавов Al – Zr является сложной и не укладывается в описанную для равновесных условий диаграмму состояния. Анализ структуры сплавов Al – Zr с разными содержанием циркония, отлитых при скорости охлаждения  $v_{охл} = 10^2$  К/с, показывает, что сплавы с добавками циркония до 0,6% находятся в однофазном состоянии, а структура представляет собой пересыщенный твердый раствор циркония в алюминии. При содержании циркония 0,8% и более сначала появляется по границам зерен  $\alpha$ -твердого раствора вторая фаза  $Al_3Zr$ . С увеличением

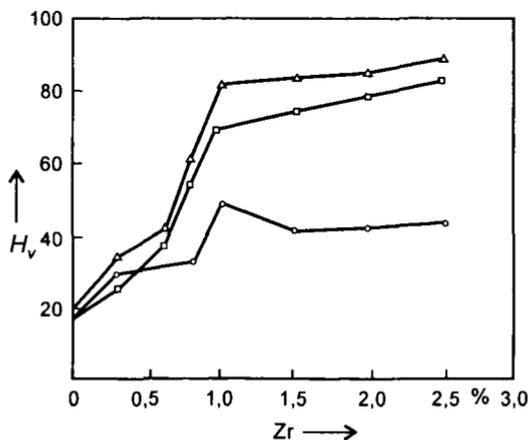


Рис. 1. Зависимость микротвердости  $\alpha$ -твердого раствора от состава и скорости охлаждения сплавов Al – Zr

содержания циркония до 1,5...2,0% наблюдаются первичные кристаллы этой фазы двоякой формы: пластинчатой (иглообразной) и более компактной звездоподобной. Двоякая природа соединения  $\text{Al}_3\text{Zr}$  зависит от скорости охлаждения расплава. При небольших скоростях кристаллизации сплавов с содержанием циркония свыше 0,5% выделяется тетрагональная равновесная фаза  $\text{Al}_3\text{Zr}$  с параметрами  $a = 4,013 \text{ \AA}$  и  $c = 17,321 \text{ \AA}$ , а при высоких скоростях охлаждения образуется новая метастабильная фаза с кубической кристаллической структурой ( $a = 4,073 \text{ \AA}$ ), причем эта фаза не является сплошным монокристаллом, а представляет собой конгломерат тонких дендритов, выросших вдоль направления  $\langle 100 \rangle$ . Это обусловлено пониженной поверхностной энергией между метастабильной фазой и  $\alpha$ -твердым раствором.

Интересно отметить, что в структуре матричной фазы сплавов с повышенным содержанием циркония (1,5...2%), затвердевших при высоких скоростях охлаждения, появляются характерные фигуры травления, которые видны на фоне твердого раствора при глубоком травлении и имеют четко очерченную форму, близкую к квадратной. Возникновение фигур травления в твердом растворе, по-видимому, связано с образованием частиц метастабильной фазы  $\text{Al}_3\text{Zr}$ .

В структуре быстроохлажденных образцов ( $v_{\text{охл}} = 10^5 \text{ K/c}$ ) появляются отдельные дисперсные включения второй фазы при содержании 1% циркония, а при содержании 1,5% циркония выделения интерметаллида становятся заметными. При больших увеличениях в электронном микроскопе мелкие частицы овальной формы наблюдаются в пленках сплавов, содержащих 0,8% циркония. Очевидно, что это выделения метастабильной фазы  $\text{Al}_3\text{Zr}$  (рис. 2).

С помощью электронного микроскопа исследовали «прозрачные» для электронов участки пленок толщиной около 0,2 мкм, скорость охлаждения которых была порядка  $10^8 \text{ K/c}$ . Границы на светлопольном изображении параллельны направлению кристаллизации и являются малоугловыми. Ось зоны участка с параллельными границами –  $[350]$ , направление границ –  $\langle 100 \rangle$ . Вдоль этого же направления вытянуты цепочки точечных

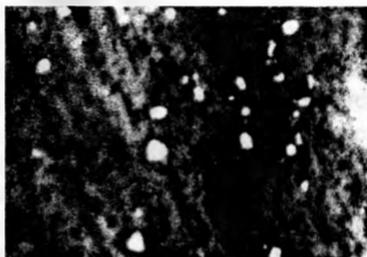


Рис. 2. Электронная микрофотография структуры сплава Al – 0,8% Zr ( $\times 10\,000$ )

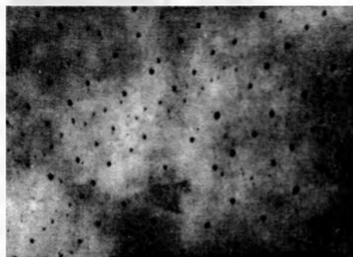
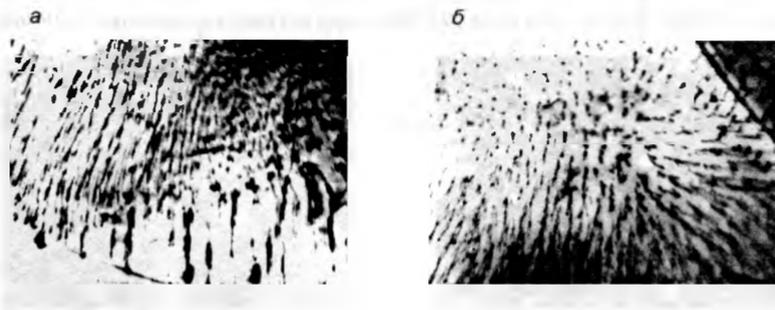


Рис. 3. Электронная микрофотография структуры сплава Al – 1% Zr, полученного при  $v_{\text{охл}} \approx 10^7 \text{ K/c}$  ( $\times 13\,000$ )

включений, которые не дают собственных рефлексов на микроэлектроннограмме, а потому и определить их кристаллическую структуру не представлялось возможным. Аналогичная структура представлена и на рис. 3, однако направления цепочек точечных выделений, определенных по микроэлектроннограмме этого участка, ось зоны которого  $[112]$ , иные:  $\langle 012 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ .

Для поддержания высокой прочности пересыщенного переходным элементом алюминиевого твердого раствора важна его стабильность при повышенных температурах. Жаропрочные алюминиевые сплавы должны обладать хорошей прочностью, т.е. сохранять стойкость против распада при температурах выше  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . Изучали характер структуры твердого раствора сплавов Al – Zr после отжига при температуре  $360\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 1 ч с последующей закалкой в воде. На рис. 4, а представлены электронные микрофотографии структуры быстрокристаллизованного ( $v_{\text{охл}} = 10^5\text{ K/c}$ ) сплава, содержащего 0,8% Zr, после отжига при температуре  $360\text{ }^\circ\text{C}$  и охлаждения в воде. Сохраняется зернистое строение твердого раствора, на некоторых участках виден полосчатый контраст, который сопровождается появлением на микроэлектроннограмме «лишних» рефлексов, закономерно расположенных относительно рефлексов матрицы. В результате расчетов межплоскостных расстояний для этих рефлексов, проведенных обычными методами, получены значения 1,76 и 1,88 Å. Сравнение этих значений со значениями, указанными в межплоскостных расстояниях для интерметаллидных соединений, встречающихся в системе Al – Zr, не дает оснований для идентификации.

В сплаве аналогичного состава, состаренном по тому же режиму, но охлажденном после нагрева на воздухе, эффект распада пересыщенного твердого раствора на светлопольных изображениях структуры заметен сильнее. На рис. 4, б четко просматривается образование игольчатых выделений, расходящихся из общего центра, подобно строению сферолита, т.е. колонии эвтектоидоподобного вида. Однако на микроэлектроннограмме присутствует только один рефлекс, для которого можно рассчитать



**Рис. 4.** Электронные микрофотографии структуры сплава Al – 0,8% Zr, полученного при  $v_{\text{охл}} \approx 10^5\text{ K/c}$  после старения при температуре  $360\text{ }^\circ\text{C}$  и последующего охлаждения в воде (а) и на воздухе (б) ( $\times 20\ 000$ )

межплоскостное расстояние, что недостаточно для идентификации фазы. Расположение рефлекса указывает на закономерную связь с матрицей и упорядочение по структурному типу  $Li_2$  (т.е. метастабильная фаза  $Al_3Zr$ ). Исследования последних лет не исключают превращения с выделением метастабильных когерентных промежуточных фаз.

На основании электронно-микроскопических исследований можно сделать следующие предварительные выводы.

При охлаждении со скоростями до  $10^8$  К/с расплава алюминия, содержащего до 1,5% циркония, наблюдается либо расслоение твердого раствора, либо выделение мелкодисперсных фаз, закономерно распределенных относительно направления кристаллизации и кристаллографических направлений.

При старении пересыщенного твердого раствора циркония в алюминии возможно превращения эвтектидного типа с образованием игольчатых дисперсных структур.

Анализ зависимости изменения параметра кристаллической решетки  $\alpha$ -твердого раствора от содержания циркония в быстроохлажденных пленках ( $v_{\text{охл}} = 10^5$  К/с) указывает на некоторое увеличение периода решетки алюминия при добавках в него до 1,0% циркония; в целом же параметр решетки твердого раствора изменяется незначительно. Это свидетельствует о незначительном различии атомных радиусов компонентов. Изменение параметра решетки в зависимости от скорости охлаждения сплавов не выявлено.

Фазовый рентгеноструктурный анализ показывает сложную картину расположения дифракционных линий быстроохлажденных сплавов с содержанием циркония свыше 1%.

Установлено, что при охлаждении со скоростью  $10^2$  К/с сплава с содержанием 1% Zr кроме основных линий  $\alpha$ -твердого раствора отмечаются слабые рефлексы избыточной фазы  $Al_3Zr$ , которые заметно усиливаются для сплава, содержащего 1,5% Zr. Это согласуется с результатами металлографического анализа. Очень сильно усложняется фазовый состав при содержании циркония свыше 1,5%. На рис. 5 приведены дифрактограммы сплава Al – 2,5% Zr, охлажденного с разными скоростями. Как видно из дифрактограмм, в быстроохлажденных образцах, содержащих 2,5% Zr, появляются метастабильные фазы, расположенные на диаграмме состояния Al – Zr за конгруэнтно плавящимся соединением  $Al_3Zr$  в сторону циркония. В сплаве, охлажденном со скоростью  $10^2$  К/с, наряду с  $\alpha$ -твердым раствором и четко выраженным рефлексом стабильной фазы  $Al_3Zr$  появляются слабовыраженные линии метастабильной фазы  $Al_2Zr$ . При увеличении скорости охлаждения до  $10^5$  и  $10^6$  К/с кроме указанных фаз возникают новые метастабильные соединения:  $Al_3Zr_2$  и  $Al_2Zr_3$  соответственно.

Приведенные результаты фазового рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о сложном механизме структурообразования при резко неравновесной кристаллизации сплавов Al – Zr.

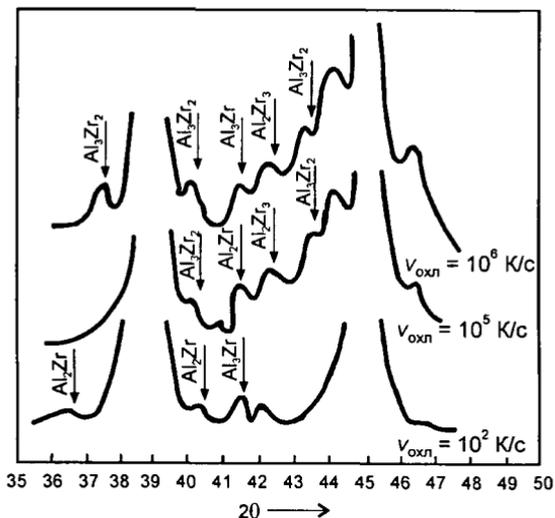


Рис. 5. Дифрактограммы сплава Al – 2,5% Zr, охлажденного из жидкого состояния с различными скоростями

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калиниченко А.С., Бергманн Г.В. Управляемое направленное затвердевание и лазерная обработка: Теория и практика. Мн.: Технопринт, 2001. 362 с.
2. Немененок Б.М. Теория и практика комплексного модифицирования сплавов. Мн.: Технопринт, 1999. 272 с.
3. Usherenko S.M., Kalinichenko A.S. The production of materials with an amorphous and ultradispersed structure under conditions of the high pressure cumulating and intensive deformation // Advanced Technologies and Materials. Proc. Workshop 08.12.03. Korea. Seoul, 2003. P. 181 – 189.
4. Кезик В.Я., Калиниченко А.С. Упрочнение литых макрогетерогенных композитов // Литье и металлургия. 2004. № 1. С. 40 – 44.

УДК 620.2

В.Я. КЕЗИК, д-р техн. наук,  
А.С. КАЛИНИЧЕНКО, д-р техн. наук (БНТУ)

## НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ О СТРУКТУРЕ И СВОЙСТВАХ МАКРОГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛОВ

К несомненным достоинствам магния и его сплавов принято относить их малую плотность. Она позволяет характеризовать подобные материалы как обладающие высокой удельной прочностью. Однако по абсолютным