

А. Р. ТОЛЕУОВА, Д. У. СМАГУЛОВ

УПРОЧНЕНИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-ЦИРКОНИЙ

(Представлена академиком НАН РК С. М. Кожахметовым)

Сделан вывод о нецелесообразности использования методов быстрого затвердевания для упрочнения алюминиевых сплавов за счет образования вторичных выделений наноразмерных частиц фазы Al_3Zr . Это обосновано тем, что существенное увеличение растворимости Zr в алюминиевом твердом растворе по сравнению с обычным литьем (в 2–3 раза) не может дать соответствующего прироста прочности.

Сплавы, содержащие цирконий в количестве более 0,5 % и получаемые методами сверхбыстрого затвердевания, с последующим применением порошковой металлургии, длительное время рассматривались как одними из наиболее перспективных материалов. Вторичные выделения фаз Al_3Zr со структурой Ll_2 (дисперсоиды), которые образуются при повторном нагреве закаленных сплавов, являются наиболее эффективными упрочнителями в алюминиевых сплавах [1, 2]. Это обусловлено образованием дисперсных (менее 10 нм) частиц, когерентных алюминиевой матрице.

Однако из-за высокой себестоимости сплавов (из-за сложной технологии) и скромных результатов в настоящее время они практически не используются.

Целью данной работы являлось изучение влияния состава, температуры литья, скорости охлаждения, деформации и термической обработки на механические свойства алюминиевых сплавов, содержащих до 1% Zr. Также предлагается возможность использования добавки циркония в количестве 0,4–0,6 % для упрочнения (без использования закалки) литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, получаемых традиционными методами.

Методика исследований. При получении исходных литых образцов сплавов использовали различные скорости охлаждения, в том числе и закалку из жидкого состояния, затем они подвергались термической обработке (отжигу). Фазовый состав, структуру и свойства сплавов изучали методами оптической и электронной

микроскопии, количественной металлографии, измерения твердости и прочности.

Результаты исследований. Скорость охлаждения при кристаллизации (V_c) и температура расплава перед литьем (T_m) являются важнейшими технологическими параметрами для сплавов данной группы. Упрочняющий эффект после гетерогенизационного отжига зависит от среднего расстояния (λ) между частицами вторичных выделений фазы $L1_2$ [2, 3]. Если минимизировать размер (d) последних (реально 5-10 нм), то при их равномерном распределении величина λ будет определяться только объемной долей (Q_v) выделений. Величина Q_v , в свою очередь, зависит от содержания циркония в исходном (т.е. в литом состоянии) алюминиевом твердом растворе (Al). Очевидно, что наличие первичных алюминидов (Al_3Zr) очень нежелательно.

Цирконий резко повышает ликвидус (T_L), что не позволяет использовать обычные температуры литья (700–750 °C). Линия ликвидуса (рис. 1a), построенная методом закалки после часовой выдержки (при разных T_m), дает представление

о структуре расплава при соответствующей температуре. Этот рисунок демонстрирует, что всегда (в том числе и при сверхбыстрой кристаллизации) должны выполняться условия $T_m > T_L$ (с учетом необходимого перегрева, как минимум на 30 °C, можно предложить $T_m > T_L + 30$). В ином случае первичные кристаллы Al_3Zr будут присутствовать в расплаве (т.е. до литья) и, очевидно, в литой структуре. Поскольку верхний предел значений T_m , допустимый в промышленных условиях (при получении фасонных отливок и слитков) составляет 800–850 °C, то рассматривать концентрации выше 0,6 % Zr нецелесообразно.

С другой стороны, скорость охлаждения влияет на образование пересыщенного твердого раствора Zr в (Al). Из (рис. 1, б) следует, что при получении тонкостенных отливок в металлических формах ($V_c = 10-20$ К/с), использование такой сравнительно большой концентрации циркония (т.е. 0,6 % Zr) должно быть возможным. При меньших концентрациях, очевидно, допустимы и меньшие значения V_c .

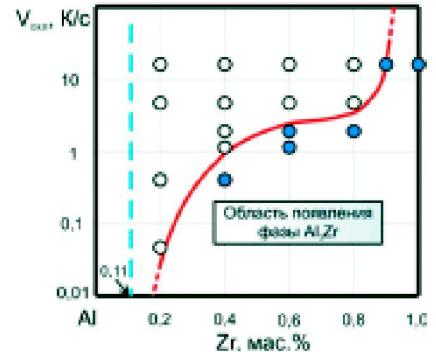
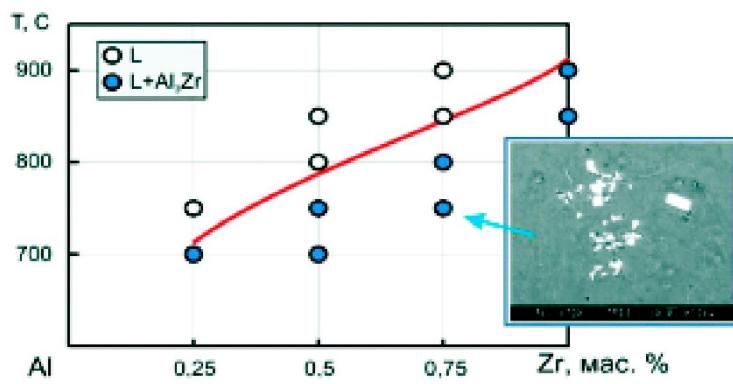


Рис. 1. Зависимость температуры литья и скорости охлаждения от содержания циркония

Для оценки возможного упрочнения за счет дисперсионного твердения при распаде пересыщенного цирконием алюминиевого твердого раствора, определяли изменение твердости слитков двойных сплавов при разных режимах отжига. Анализ кривых упрочнения (рис. 2) показал, что прирост твердости от сплава, содержащего 0,2 % Zr, (что соответствует его верхнему пределу в промышленных алюминиевых сплавах) практически отсутствует. С другой стороны, существенный прирост HB (более чем в 2 раза) наблюдается уже при 0,4 % Zr. Однако при одноступенчатом нагреве упрочнение идет

очень медленно (свыше 30 часов), поэтому рекомендуется использовать многоступенчатые нагревы, что позволяет сократить время до 10 часов (и менее). Структура сплава с 0,4 % Zr. (рис. 2, б) показывает, что упрочнение связано именно с дисперсионными частицами Al_3Zr , при этом расчетное значение λ составляет 34-68 (при $d = 5-10$ нм). Из (рис. 2, б) также видно, что упрочняющий эффект сохраняется до 450 °C. Это свидетельствует о высокой термической стабильности дисперсионных частиц Al_3Zr , что может быть особенно полезным при разработке жаропрочных сплавов.

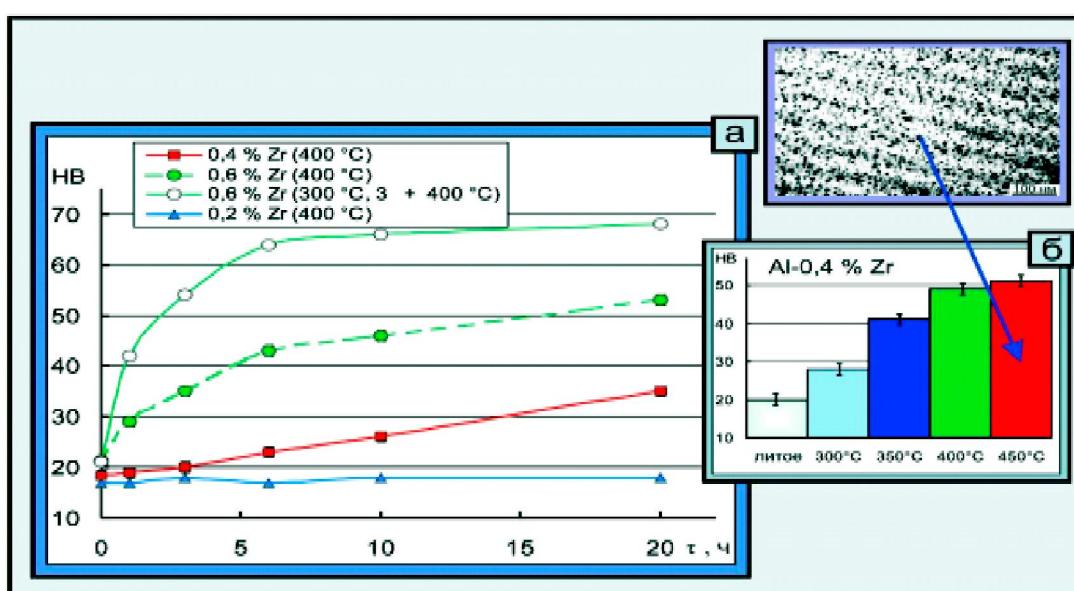


Рис. 2. Кривые упрочнения при распаде пересыщенного цирконием алюминиевого твердого раствора

В ряде случаев перегрев расплава выше ~ 750 °C недопустим, в частности, это относится к магниалиям. В этом случае содержание циркония не должно превышать 0,2–0,3 % Zr. В связи с этим была изучена возможность совместного введения Zr и Sc с целью поиска оптимального сочетания этих элементов, но при минимальной концентрации скандия. Экспериментально построенная поверхность ликвидуса алюминиевого угла системы Al-Zr-Sc позволила выявить область, в которой значение T_L не превышает 750 °C (рис. 3). Для сравнительной оценки эффекта упрочнения исследовали двойные и тройные сплавы (отмечены на рис. 3), которые были получены при двух значениях V_c (20 и 7 K/c). Изуче-

ние процессов распада пересыщенного твердого раствора проводили путем измерения твердости при ступенчатом режиме нагрева в интервале от 250 до 640 °C с выдержкой 3 ч на каждой ступени. В литом состоянии все экспериментальные сплавы не содержали первичных кристаллов алюминидов, что, однако, как будет показано ниже, не гарантирует однофазную структуру.

Анализ экспериментальных результатов показывает сильное влияние состава, режима нагрева и V_c . Из расчета объемной доли (Q_v) выделений $L1_2$ следует, что введение 0,1 % Sc должно быть эквивалентно введению 0,2 % Zr.

Было обнаружено, что значения HB одного сплава, полученного с разными V_c (7 K/c и 20 K/c) могут иметь значительную разницу в литом состоянии. В частности, у сплава Al-0,5 % Sc твердость при меньшем значении V_c более чем в два раза выше (рис. 4, a). Объяснить прирост HB можно только тем, что уже при охлаждении после окончания затвердевания, частично происходит распад пересыщенного твердого раствора с образованием выделений. После отжига упрочнение у «медленнозакристаллизованного» сплава оказывается меньшим, что можно объяснить более неравномерным распределением выделений по сравнению с «быстроизакристаллизованным». Аналогичный эффект влияния скорости охлаждения на литую твердость и последующее упрочнение проявился и в тройном сплаве Al – 0,3 % Sc – 0,2 % Zr (рис. 4, б).

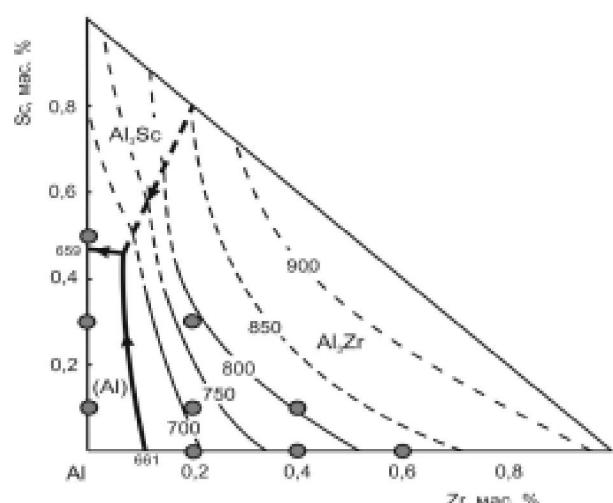


Рис. 3. Эффект упрочнения двойных и тройных сплавов

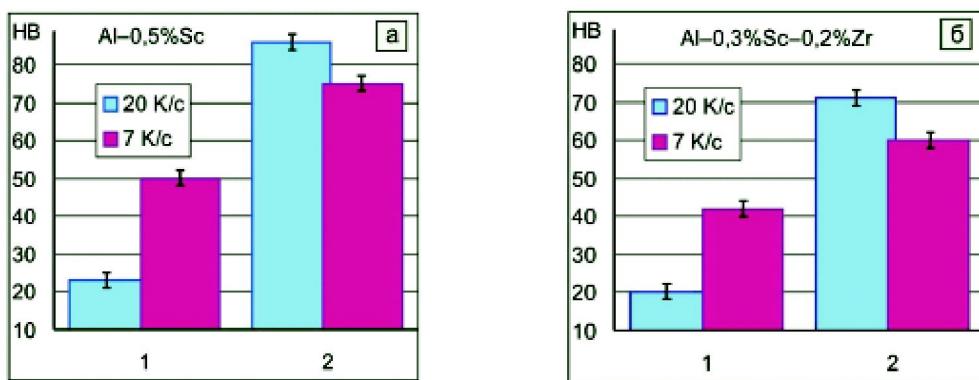
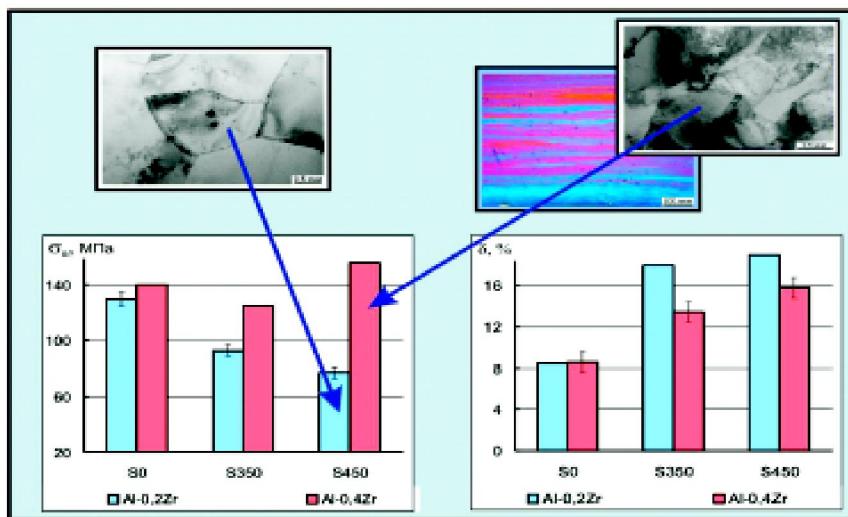


Рис. 4. Изменение твердости при различных скоростях охлаждения

Особый интерес вызывает изучение влияния режимов отжига на структуру и механические свойства холоднокатанных листов, полученных из литых слитков (без предварительного отжига) двойных алюминиевых сплавов. Экспериментальные данные показывают, что при содержании циркония до 0,2 % отжиг при 350 °C приводит к сильному разупрочнению, что объясняется протеканием рекристаллизации. При 0,4–0,6 % Zr отжиг при 400–450 °C (по ступенчатому режиму), наоборот, приводит к заметному упрочнению, при этом зеренная структура в них остается нерекри-

стализованной. Сравнение механических свойств сплавов с 0,2 и 0,4 % Zr после отжига при 450 °C, 3 ч показывает, что сплав с большим содержанием циркония имеет в два раза более высокие значения HV и γ_b при практически одинаковой пластичности (рис. 5). Такое различие объясняется не только более высокой объемной долей дисперсий, но и их более равномерным распределением, что эффективнее препятствует движению дислокаций. Кроме того, дисперсии способны закреплять эти дислокации и, как следствие, сохранять нерекристаллизованную структуру.

Рис. 5. Изменение HV и γ_b при одинаковых значениях пластичности

Из полученных результатов следует, что цирконий в количестве 0,4–0,6 % может рассматриваться как перспективная упрочняющая добавка не только в литейных, но и в деформируемых алюминиевых сплавах.

Выводы. Изучено влияние состава, температуры литья (680–950 °C), скорости охлаждения

(0,02–20 K/s), деформации и термической обработки на механические свойства алюминиевых сплавов, содержащих до 1 % Zr. Обоснована возможность использования добавки циркония в количестве 0,4–0,6 % для упрочнения (без использования закалки) литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, получаемых традиционными методами.

Показано, что максимальный упрочняющий эффект при отжиге за счет образования вторичных выделений фазы $\text{Al}_3(\text{Sc},\text{Zr})$ со структурой L1₂ в сплавах с добавками циркония определяется в основном объемной доли этой фазы. Однако при содержании более 0,6 % Zr велика вероятность распада твердого раствора после окончания кристаллизации, что сильно снижает упрочняющий эффект за счет отжига.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Toropova L.S., Eskin D.G., Kharakterova M.L., Dobatkina T.V.* Advanced aluminium alloys containing scandium: structure and properties. Gordon and Breach Sci Publ., Amsterdam, 1998.
2. *Lae L., Guyot P., Sigli C.* Cluster dynamics in AlZr and AlSc alloys Proc. ICAA9 (Brisbane, August 2004) // Materials Science Forum. 2004. P. 281-286.
3. *Emmanuelle A. Marquis, David N. Seidman* Coarsening kinetics of nanoscale Al₃Sc precipitates in an Al-Mg-Sc alloy Acta Mater. (2005).

4. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник / Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндра. М.: Металлургия, 1984.

5. Белов Н.А., Истомин-Кастровский В.В., Алабин А.Н. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2003. № 4. С. 54-60.

6. Белов Н.А., Золоторевский В.С. // Цветные металлы. 2003. № 2. С. 99-105.

Резюме

Термиялық өндөрде кезінде бөлінетін Al₃Zr түйіршіктегерінің өсерімен алюминий қорытпаларының беріктік қасиеттерін жақсарту үшін тез кристалдандыру әдістерін қолдану тиімсіз екені туралы қорытынды жасалған. Цирконийдің концентраттарын әдеттегі құймалардағы шамасынан 2-3 есе арттыру – қорытпалардың беріктік қасиеттерінің кажетті өсу шегін қамтамасыз етпейді.

Summary

Concluded on the inappropriate use of methods of rapid solidification for hardening of aluminum alloys due to the formation of secondary phase precipitates Al₃Zr. This based on the fact that significant increase in the solubility of Zr in the aluminum solid solution in comparison with conventional casting (2-3 times) can not give the corresponding increase in strength.

КазНТУ им. К. И. Саппаева,
г. Алматы

Поступила 11.02.2011 г.