

ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДВУХФАЗНЫХ МАГНИЕВО-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВОВ

Ю.Д. Корягин, Л.Л. Рохлин, Н.Т. Карева, Н.И. Никитина

Магниево-литиевые сплавы относятся к группе материалов с высокими удельными характеристиками прочности и жесткости. Легирование более легким литием позволяет дополнительно улучшить эти характеристики. При содержании лития более 5–7 % магниево-литиевые сплавы переходят в разряд двухфазных ($\alpha+\beta$)-сплавов. Появление более пластичной на основе лития β -фазы с ОЦК-структурой улучшает технологическую пластичность особенно при низких температурах (вблизи комнатных), что является весьма актуальным для магниевых сплавов [1, 2, 3].

Однако материалы этой группы имеют существенный недостаток: склонность к разупрочнению при вылеживании, обусловленную заметной диффузионной подвижностью легирующих элементов, обеспечивающих упрочнение α - и β -растворов. Это связано с тем, что развитая межфазная поверхность α/β облегчает протекание диффузионных процессов.

Известно, что одним из способов повышения механических свойств легких сплавов и их стабильности является дополнительное легирование их элементами, которые, выделяясь преимущественно по границам зерен, подавляют зернограничную диффузию. К таким элементам относят бор (В) и титан (Ti). Небольшие добавки этих элементов используются для измельчения зеренной структуры в некоторых алюминиевых, а также магниевых сплавах (например, МА5). В последнем случае дополнительно уменьшается и склонность к зональной ликвации.

В настоящей работе в качестве базового материала был выбран двухфазный магниево-литиевый сплав ($\alpha+\beta$)-сплав состава Al – 5,13 %; Zn – 1,53 %; Li – 8,23 %; Cd – 4,03 %; Mn – 0,04 %; остальное – Mg. Дополнительное микролегирование титаном и бором проводилось с помощью лигатуры Al – 5,34 % Ti – 1,27 % В до содержания в сплавах, приведенного в табл. 1.

Таблица 1
Содержание титана и бора в опытных плавках

№ сплава	Содержание, %	
	В	Ti
1	0,002	0,0084
2	0,005	0,21
3	0,01	0,042

Для приготовления сплавов использовали магниевый марки МГ1 (99,91 % Mg), литий повышенной чистоты, алюминий АВ000 (99,98 % Al), цинк Ц0 (99,96 % Zn), кадмий КД0 (99,97 % Cd) и другие элементы, в которых содержание примесей не пре-

вышало 0,1 %. Сплавы выплавлялись в электрической печи сопротивления в стальном тигле диаметром 29 мм. Плавка проводилась под флюсом (75 % LiCl + 25 % LiF).

Часть слитков далее подвергалась прессованию в прутки диаметром 10,5 мм на гидравлическом прессе усилием 200 т и степенью обжатия 96 %. Температура нагрева слитков и контейнера при прессовании составляла соответственно 270 и 250 °С¹.

В работе приводится сравнительная характеристика структуры, фазового состава, механических свойств базового и опытных сплавов с микродобавками бора и титана в исходном литом состоянии, после горячего прессования, а также после дополнительной обработки – закалки (от 380 °С в воде) или горячей штамповки с температуры закалки (ВТМО).

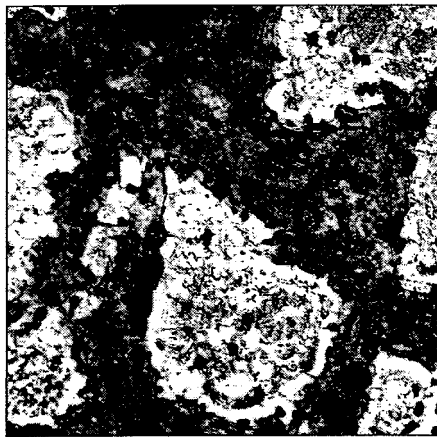
Микроструктура изучалась с помощью микроскопа «Neophot», фазовый состав – рентгеноструктурным методом в медном излучении, механические свойства на растяжение проводились на машине «Instron» с использованием коротких пятикратных образцов диаметром 3 мм. Измерения твердости выполнялись на приборах ТШ2 при нагрузке 2500 Н и Роквелла шариком по шкале HRВ, микротвердость α и β -фаз измерялась с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузке 0,2 Н.

Установлено, что введение минимальных из примененных добавок бора и титана (в количестве 0,002 % В и 0,008 % Ti) уже привносят изменения в структуру литого двухфазного магниево-литиевого сплава: отмечается заметное измельчение зерна особенно в α -фазе (светлая структурная составляющая). С повышением концентрации В и Ti в сплаве дальнейшего измельчения зерен α -фазы не происходит: их размер остается примерно одинаковым (рис. 1).

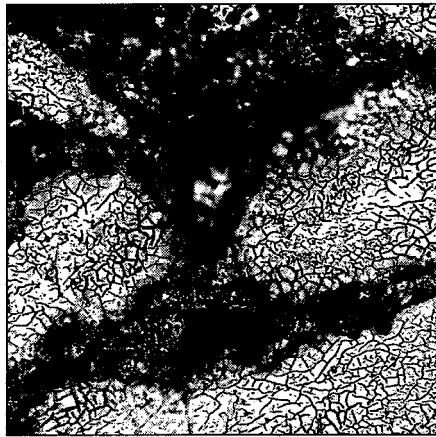
Следовательно, титан и бор в количествах до 0,01 % и 0,042 % соответственно можно использовать как модификаторы для двухфазных Mg–Li сплавов (типа МА21) с целью измельчения зерна, особенно α -фазы.

Важно отметить, что в модифицированных сплавах мелкое зерно сохраняется и после высокотемпературных нагревов, например, после закалки от 380 °С (рис. 2); т. е. микролегирование сдерживает рост зерна α и β -фаз и при последующих технологических операциях, связанных с нагревами.

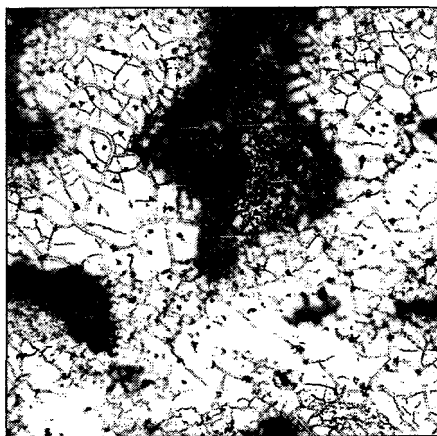
¹ Плавка и прессование сплавов проводились в институте металлургии им. А.А. Байкова.



а)



б)

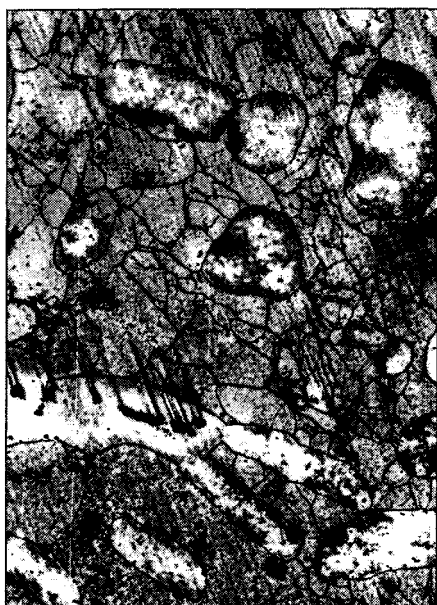


в)

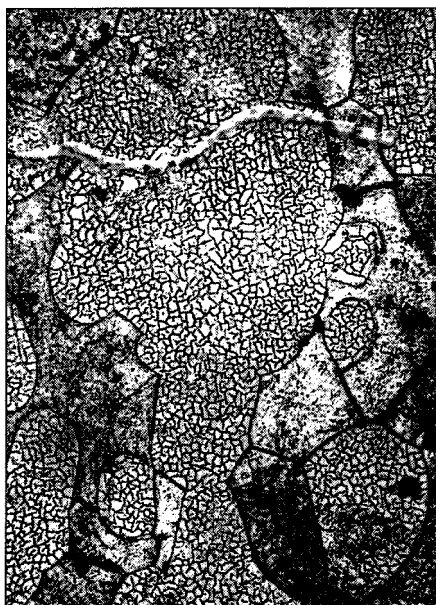


г)

Рис. 1. Влияние микродобавок бора и титана на микроструктуру литого двухфазного Mg-Li сплава: а – базовый состав; б – с добавкой 0,002 % В и 0,008 % Тi; в – 0,005 % В и 0,021 % Тi; г – 0,01 % В и 0,042 % Тi (x400)



а)



б)

Рис. 2. Влияние закалки от 380 °С на микроструктуру двухфазного сплава: а – базовый состав; б – с микродобавками 0,002 % В и 0,0084 % Тi (x400)

В двухфазном Mg-Li кроме основных твердых α и β -растворов после литья присутствуют метастабильная θ -фаза сложного состава $MgLi_2(Al,Zn)$ и стабильная $(Al,Zn)Li$, о чем свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа (рис. 3).

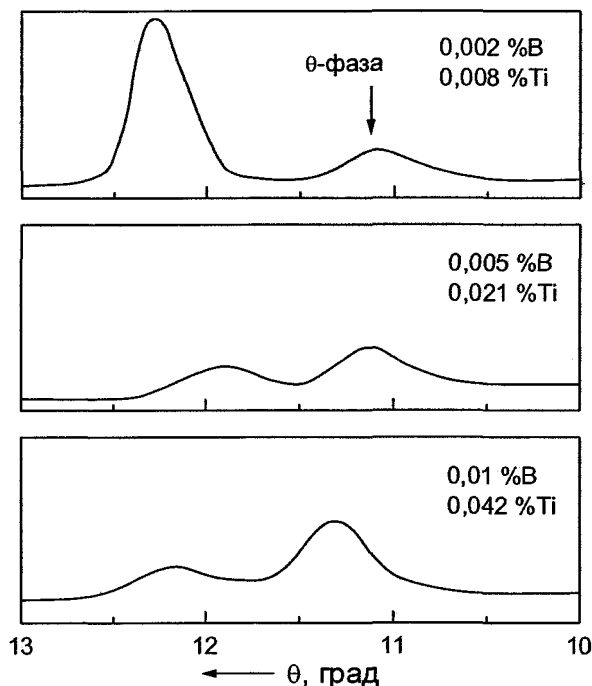


Рис. 3. Профили рентгеновских линий избыточных фаз $(Al,Zn)Li$ и $MgLi_2(Al,Zn)$ двухфазного Mg-Li сплава с добавками бора и титана

Заметим, что метастабильная фаза зарождается гомогенно, она когерентна с матрицей и может служить причиной дополнительного упрочнения сплава [3]. Равновесная фаза зарождается гетерогенно: на границах зерен, на включениях оксидов и т. д. [3].

Модифицирование (0,042 % Ti; 0,01 % B) позволило в литом состоянии несколько повысить прочность основных структурных составляющих (α - и β -фаз) и сплава в целом (табл. 2).

Отметим, что исходной литой структуре свойственны низкие прочностные характеристики (табл. 3). Часто разрушение образцов при испытании на растяжение происходило при напряжениях ниже предела текучести. Закаленному состоянию также характерна низкая пластичность: относительное удлинение (δ) не превышало 2,2 %. Очевидно, микроскопическая неоднородность литой структуры не устраняется одной закалкой.

Горячее прессование и дополнительная стабилизирующая термообработка (150 °C – 16 ч) литых Mg-Li сплавов позволяет улучшить их прочностные и пластические характеристики (табл. 4). При этом модифицированный сплав, сохраняя прочность на уровне базового сплава, имеет пластичность (δ) в 2–3 раза выше.

В работе также показано, что в качестве дополнительного способа повышения прочности

двухфазных магниево-литиевых сплавов можно использовать высокотемпературную термомеханическую обработку с деформацией при температуре закалки. Исследованные сплавы подвергались штамповке при температуре 380 °C со степенями обжатия 30 и 60 % и последующим немедленным охлаждением в воде. Данные табл. 5 свидетельствуют, что подобная обработка позволяет повысить твердость сплавов на 17–20 %. Причем, модифицированный сплав по сравнению с базовым имеет твердость выше как до, так и после деформации.

Оценка влияния микролегирования на стабильность свойств изученных сплавов осуществлялась с помощью измерения твердости (HRB). Сплавы, подвергнутые предварительно горячей штамповке и закалке от 280 °C, выдерживались при температурах 60, 100, 175 °C.

Разупрочнение материала наблюдалось при всех температурах старения (рис. 4). Наименьший темп падения твердости наблюдался, естественно, при низкотемпературном старении (60 °C). Модифицированный сплав (0,01 % B; 0,042 % Ti), имевший по сравнению с базовым сплавом более высокую твердость в исходном до старения состоянии (~ на 4 ед. HRB), сохраняет это преимущество и при длительном старении. В результате после 12 часов старения при 60 °C этот материал имеет твердость на уровне свежезакаленного базового сплава. Микролегирование изменяет характер старения на начальных этапах: приводит к некоторому увеличению твердости на начальных стадиях старения (до 1 ч; см. рис. 4).

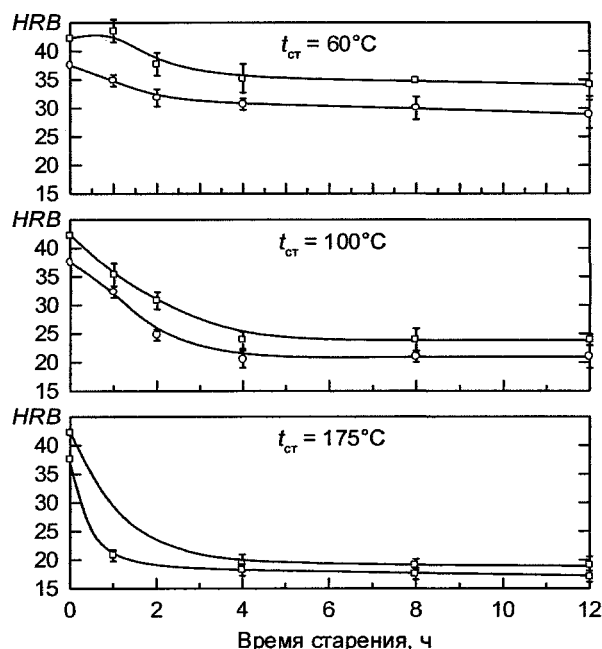


Рис. 4. Изменение твердости двухфазного Mg-Li сплава в процессе старения: \circ - базовый сплав; \square - модифицированный сплав

С ростом температуры старения разупрочнение интенсифицируется. Но даже при 175 °C до 4-часовой выдержки различие в уровнях твердости

Таблица 2

Твердость Mg–Li сплава в литом состоянии

Сплав	Твердость НВ, МПа	Микротвердость Н ₂₀ , МПа
Базовый	630	α-фаза 616–630 β-фаза 656–680
Модифицированный	660	α-фаза 627–640 β-фаза 758–780

Таблица 3

Механические свойства Mg–Li сплава с микродобавками бора и титана в литом состоянии (числитель) и после дополнительной закалки от 380 °С (знаменатель)

Сплав	Предел прочности σ _в	Предел текучести σ _{0,2}	Относительное удлинение δ %
	МПа		
Базовый	194 / 233	159 / 212	3,1 / 0,8
0,002% В; 0,0084% Ti	165 / 249	151 / 240	2,2 / 0,8
0,005% В; 0,021% Ti	210 / 246	181 / 240	4,1 / 1,2
0,01% В; 0,042% Ti	207 / 276	180 / 247	2,1 / 2,2

Таблица 4

Механические свойства сплавов при комнатной температуре после горячего прессования и термической обработки

Сплав	Горячепрессованное состояние			Термообработанное состояние (стабилизация 150 °С – 16 ч)		
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %
Базовый	251	215	3,3	226	188	2,7
Модифицированный (0,042 % Ti; 0,01 % В)	256	217	10,1	222	188	5,1

Таблица 5

Влияние ВТМО на твердость сплавов

Сплав	Твердость НВ, МПа		
	Степень деформации, %		
	0	30	60
Базовый	764	804	897
Модифицированный	804	849	950

базового и модифицированного сплавов сохраняется (см. рис. 4).

Согласно [2], в сплавах, подобных изученным в настоящей работе, после закалки с достаточно низких температур (280 °С), при старении испытывает распад, прежде всего, β-фаза по схемам: β ⇒ θ [MgLi₂(Al,Zn)] ⇒ (Al,Zn)Li или β ⇒ (Al,Zn)Li. Первый вариант превращения через метастабильную фазу θ реализуется при низких температурах старения (~ до 100 °С) и может сопровождаться повышением прочности. Образование некогерентной стабильной фазы (Al,Zn)Li при более высоких температурах старения вызывает снижение твердости. Небольшие добавки бора и титана до 0,01 и 0,042 % соответственно, судя по полученным результатам, оказывают влияние на процессы старения, особенно, естественного. Они позволяют сохранять твердость сплавов на требуемом уровне в процессе старения при 60 °С и ниже.

Таким образом, небольшие добавки бора (до 0,01 %) и титана (до 0,042 %) оказывают модифи-

цирующее влияние на структуру и свойства двухфазных магниево-литиевых сплавов, которое сохраняется при последующих высокотемпературных технологических нагревах. Микролегирование обеспечивает дополнительный прирост прочности Mg–Li сплавов при их обработке давлением (горячее прессование), термообработке и сохранение более высокого уровня прочности при длительном естественном старении.

Литература

1. Магниево-литиевые сплавы: справ. / М.Б. Альтман, А.Ф. Белов, В.И. Добаткин и др. — М.: Металлургия, 1978. — 232 с.
2. Магниево-литиевые сплавы: моногр. / М.Е. Дриц, Ф.М. Елкин, И.В. Гурьев и др. — М.: Металлургия, 1980. — 138 с.
3. Рохлин, Л.Л. Магниево-литиевые сплавы, содержащие редкоземельные металлы: моногр. / Л.Л. Рохлин. — М.: Наука, 1980. — 190 с.