



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-83-92>

УДК 669.2.017:620.18; 669.2.017:620.17; 669.2-419:620.18; 669.2-419:620.17

Поступила 12.01.2024

Received 12.01.2024

СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Mg–Al–Mn–Ca, ДОПОЛНИТЕЛЬНО ЛЕГИРОВАННЫЕ Zr И La ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ ЭКСТРУЗИИ

А. Т. ВОЛОЧКО, В. А. ЗЕЛЕНИН, М. С. КОВАЛЬКО, Д. С. ФЕДОРОВИЧ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Академика Купревича, 10. E-mail: volochkoat@mail.ru
ЧЭН ВАН, Университет Цзилин, г. Чанчун, Китай, ул. Реньминь. E-mail: chengwang@jlu.edu.cn

В работе проведены расчет и анализ фазовых равновесий в магниевых сплавах системы Mg–Al–Mn–Ca при дополнительном ее легировании Zr и La. Осуществлена оценка влияния степени, скорости деформации, а также температуры экструдирования на состав, структуру и механические свойства сплавов. Исследовано влияние термообработки деформированных образцов на комплекс прочностных и пластических свойств.

Ключевые слова. Магниевые деформируемые сплавы, легирование тугоплавкими и редкоземельными металлами, фазовые равновесия, диаграмма состояния, лигатуры, экструдирование.

Для цитирования. Волочко, А. Т. Сплавы системы Mg–Al–Mn–Ca, дополнительно легированные Zr и La для получения изделий методом скоростной экструзии / А. Т. Волочко, В. А. Зеленин, М. С. Ковалько, Д. С. Федорович, Чэн Ван // Литье и металлургия. 2024. № 1. С. 83–92. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-83-92>.

MAGNESIUM ALLOYS BASED ON THE Mg–Al–Mn–Ca SYSTEM, ADDITIONALLY ALLOYED WITH Zr AND La FOR HIGH-SPEED DEFORMATION OF PRODUCTS AND SEMI-FINISHED PRODUCTS

A. T. VOLOCHKO, V. A. ZELENIN, M. S. KOVALKO, D. S. FEDOROVICH, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Akademika Kuprevicha str.
E-mail: volochkoat@mail.ru
CHENG WANG, Jilin University, Changchun, China, Renmin str. E-mail: chengwang@jlu.edu.cn

The article presents calculations and analysis of phase equilibria in magnesium alloys of the Mg–Al–Mn–Ca system with additional alloying of Zr and La. An assessment of the influence of the degree, deformation rate, and extrusion temperature on the composition, structure, and mechanical properties of the material has been evaluated. The impact of heat treatment of deformed samples on the complex of strength and plastic properties has been investigated.

Keywords. Magnesium deformable alloys, alloying of magnesium alloys with refractory and rare-earth metals, phase equilibria, phase diagram, ligatures, extrusion.

For citation: Volochko A. T., Zelenin V. A., Kovalko M. S., Fedorovich D. S., Cheng Wang. Magnesium alloys based on the Mg–Al–Mn–Ca system, additionally alloyed with Zr and La for high-speed deformation of products and semi-finished products. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 1, pp. 83–92. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-1-83-92>.

Введение

Магниевые сплавы – одни из самых легких конструкционных материалов, широко используемых в промышленности. Магний при плотности 1,74 г/см³ в 4,5 раза легче железа, в 5,0 – меди, в 2,6 – титана и в 1,6 раза – алюминия. Магниевые сплавы обладают хорошей вибрационной стойкостью, что обеспечивает возможность эксплуатации изделий из них в широком диапазоне температур: от криогенных (–70)–(–196) °С до высоких кратковременных до 300–350 °С и длительных до 200–250 °С. Объемы производства магниевых сплавов постоянно увеличиваются, а лидером в этой отрасли является Китай, выпускающий 600–700 тыс. т в год, что составляет около 80% мирового производства. Любопытно, что востребованность этих сплавов выросла в первую очередь в самом Китае и составляет около 30%

мирового спроса. Экспансия магния началась с возможностью замены алюминиевых и других сплавов в машиностроении, прежде всего в авиации и автомобильной промышленности.

Значительную часть деталей из магниевых сплавов изготавливают методами литья, преимущественно литьем под давлением [1]. Этот метод отличается технологичностью и высокой производительностью. Проблемой при литье под давлением остается высокая газовая пористость отливок, возникающая при заполнении формы. Сдерживающим фактором увеличения объемов производства изделий из магниевых сплавов является также невысокая температура их возгорания, требующая повышения культуры производства, использования флюсов или защитной атмосферы.

Повышение литейных свойств магниевых сплавов и обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик изделий из них обеспечивается использованием легирующих элементов. Однако введение в литейные магниевые сплавы одного из основных легирующих элементов – алюминия массовой долей более 4 % снижает вязкость металла, а массовой долей 8–10 % – его прочностные характеристики. Кроме того, γ -фаза переменного состава на основе конгруэнтного соединения $Mg_{17}Al_{12}$ имеет относительно низкую температуру плавления 437 °С, что приводит к нестабильности микроструктуры при температурах более 127 °С, зернограничному скольжению и, как следствие, ухудшению свойств при повышенных температурах. При использовании в качестве упрочняющего легирующего элемента цинка в тройной системе Mg–Al–Zn фаза α - $Mg_{17}Al_{12}$ является катодом по отношению к матрице α -Mg и образует с ним гальваническую пару, что приводит к ускорению коррозии сплавов этой системы.

Особое внимание в мировой практике уделяется деформируемым магниевым сплавам, в первую очередь низколегированным (до 1–2 мас. %) [2, 3]. Актуальна задача повышения их прочности, коррозионной стойкости, а также увеличения пластических свойств как при комнатных температурах, так и при температурах деформирования. Разработка новых сплавов позволила существенно расширить эффективное конструкционное использование изделий и полуфабрикатов из них за счет применения технологий экструдирования профилей, прокатки листов, изготовления поковок высокоскоростными методами обработки давлением.

Состав и концентрацию легирующих элементов в этих сплавах выбирают исходя из соображений, что они должны, во-первых, находиться при температуре деформации в твердом растворе, а во-вторых, не образовывать интерметаллических соединений, что и позволяет применить высокоскоростные методы обработки.

Из известных деформируемых магниевых сплавов особый интерес представляют сплавы на основе системы Mg–Al–Mn. Введение марганца как основного легирующего элемента обусловлено тем, что он не образует с магнием промежуточных соединений. При температуре 652 °С марганец участвует с α -магниевым твердым раствором в периодическом превращении $L + \alpha\text{-Mn} \rightarrow \alpha\text{-Mg}$. Легирование сплавов магния марганцем улучшает коррозионную стойкость и свариваемость.

Кальций в магниевых сплавах в количестве 0,1–0,4 мас. % способствует: повышению стойкости к окислению благодаря защитной оксидной пленке; измельчению структуры, повышению твердости и термической стабильности; снижению пористости заготовки.

Наибольший интерес представляют сплавы, содержащие цирконий и редкоземельные металлы. Ряд сплавов, содержащих цирконий, были разработаны фирмой Magnesium Electron Limited (Великобритания) и нашли применение за рубежом.

Методика проведения исследований

В качестве базового низколегированного материала использовали сплав $Mg_{0,85}Al_{0,53}Mn_{0,2}Ca$, который дополнительно легировали 0,5 мас. % Zr и 0,4 мас. % La. Плавку лигатур и образцов магниевых сплавов для последующего экструдирования осуществляли в индукционной тигельной печи ИСВ 0,04. Шихту помещали в тигель из диоксида циркония, затем камеру печи вакуумировали и поддерживали в ней давление 5×10^4 Па. При достижении температуры плавления в камеру подавали инертный газ (аргон), предотвращающий возгорание. Расплав заливали в металлическую форму и в последующем получали заготовки массой 20–40 г, которые подвергали экструдированию с различной степенью деформации (от 85 до 96 %) в температурном интервале 350–450 °С. Скорость деформирования при экструзии варьировалась в пределах 0,16–0,24 м/с. Процесс экструзии осуществляли как на гидравлических, так и на кривошипно-шатунных прессах.

Часть полученных заготовок подвергали термической обработке по режиму Т61: закалка с 420 °С после выдержки в течение 30–60 мин охлаждением в горячую воду с $t = 80$ °С и искусственное

старение в течение 8–16 ч при $t = 200$ °С. Механические свойства заготовок исследовали в соответствии с ГОСТ 25503–97 и 9012–59.

Для определения доли вторичных фаз, образовавшихся при кристаллизации расплава, использовали программные продукты PATDAT и PanMagnesium.

Металлографический анализ выполняли с помощью комплекса Micro-200. Рентгенофазовый анализ производили на дифрактометре Дрон-3М (CuK_α - и CoK_α -излучения) в режиме сканирования (по точкам) с шагом $0,1^\circ$ в интервале углов рассеяния $2\theta = 20\text{--}60^\circ$. Состав и распределение основных элементов определяли на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3.

Анализ фазовых равновесий в магниевых сплавах

Расчеты диаграмм равновесного состояния интерметаллидных фаз, образующихся в магниевых сплавах $\text{Mg}_{0,85}\text{Al}_{0,2}\text{Ca}_{0,53}\text{Mn}$, $\text{Mg}_{0,85}\text{Al}_{0,2}\text{Ca}_{0,53}\text{Mn}_{0,5}\text{Zr}$ и $\text{Mg}_{0,85}\text{Al}_{0,2}\text{Ca}_{0,53}\text{Mn}_{0,5}\text{La}$, выполненные с использованием PATDAT и PanMagnesium, приведены на рис. 1–3 [4, 5].

Согласно расчетам, образование первичных кристаллов фазы Al_8Mn_5 при затвердевании расплава $\text{Mg}_{0,85}\text{Al}_{0,2}\text{Ca}_{0,53}\text{Mn}$ начинается при температуре 620 °С (рис. 1). Доля кристаллов соединения Al_8Mn_5 по мере охлаждения расплава медленно увеличивается вплоть до температуры 180 °С, при которой начинается его превращение в соединение $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$. При комнатной температуре доля вторичных кристаллов $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$ в сплаве в три раза превышает долю кристаллов соединения Al_8Mn_5 .

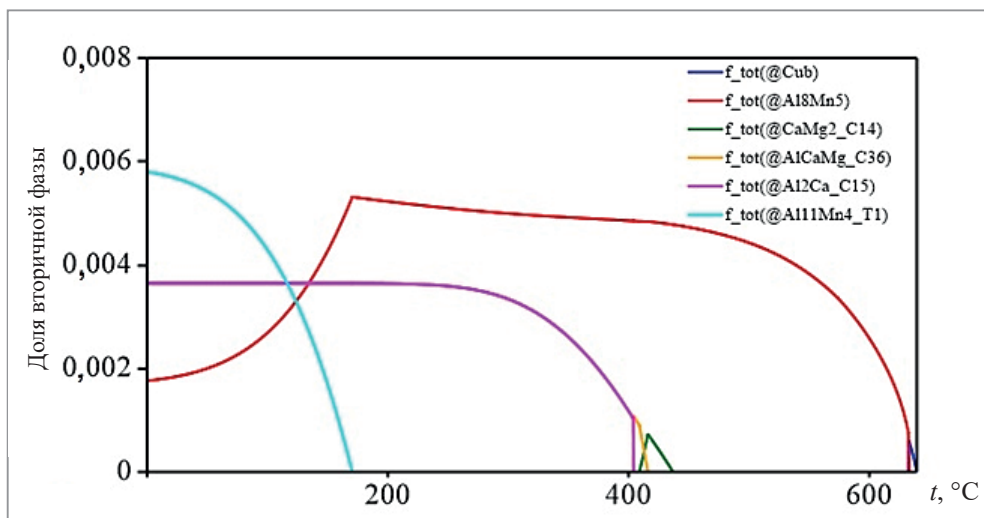
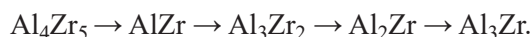


Рис. 1. Зависимость доли вторичных фаз, образующихся при затвердевании расплава состава $\text{Mg}_{0,85}\text{Al}_{0,2}\text{Ca}_{0,53}\text{Mn}$, от температуры

Температура сольвуса соединения Mg_2Ca составляет 435 °С. Однако уже при температуре порядка 400 °С кристаллы этого соединения полностью распадаются, как и кристаллы тройного соединения AlCaMn , с образованием соединения Al_2Ca . В результате при остывании до комнатной температуры в сплаве данного состава образуется выпадающий по границам зерен твердого раствора магния упрочняющий каркас, состоящий из зерен трех соединений: Al_8Mn_5 , $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$ и Al_2Ca .

Образование первичных кристаллов фазы Al_4Zr_5 при затвердевании расплава состава $\text{Mg}_{0,85}\text{Al}_{0,2}\text{Ca}_{0,53}\text{Mn}_{0,5}\text{Zr}$ начинается, согласно расчетам, при температуре 1440 °С (рис. 2). В процессе остывания расплава при температурах 1160 , 940 , 630 и 500 °С происходят фазовые превращения по схеме:



Образование кристаллов фазы Al_8Mn_5 начинается при температуре ~ 600 °С. Кристаллы соединения Mg_2Ca начинают выделяются в виде преципитатов из пересыщенного твердого раствора магния при температурах менее 400 °С, а кристаллы соединения Al_2Ca – при температурах ниже 260 °С. В результате в сплаве данного состава формируется более прочный каркас, состоящий из зерен четырех соединений: Al_3Zr , Al_8Mn_5 , Mg_2Ca и Al_2Ca .

Образование первичных кристаллов фазы Al_8Mn_5 при затвердевании расплава состава $\text{Mg}_{0,85}\text{Al}_{0,2}\text{Ca}_{0,53}\text{Mn}_{0,5}\text{La}$ начинается, согласно расчетам, при температуре 620 °С (рис. 3).

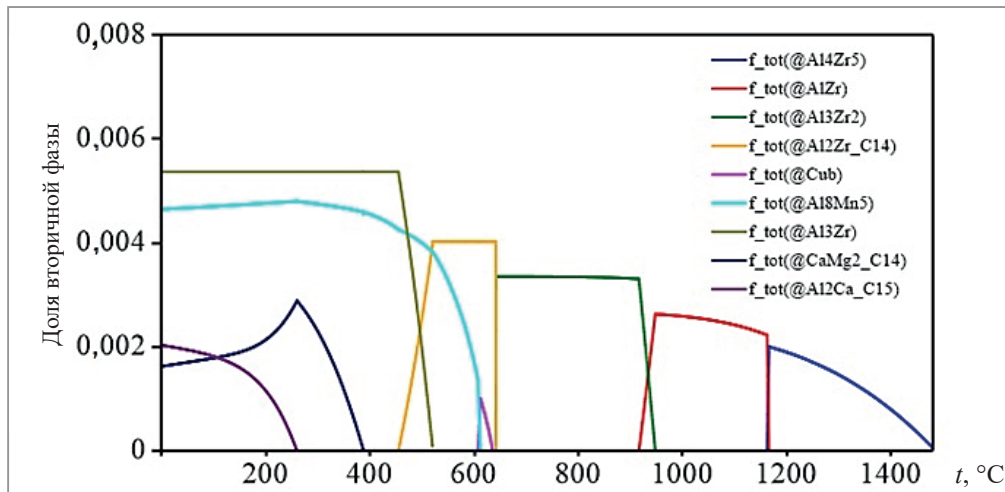


Рис. 2. Зависимость доли вторичных фаз, образующихся при затвердевании расплава состава $Mg_{0,85}Al_{0,2}Ca_{0,53}Mn_{0,5}Zr$, от температуры

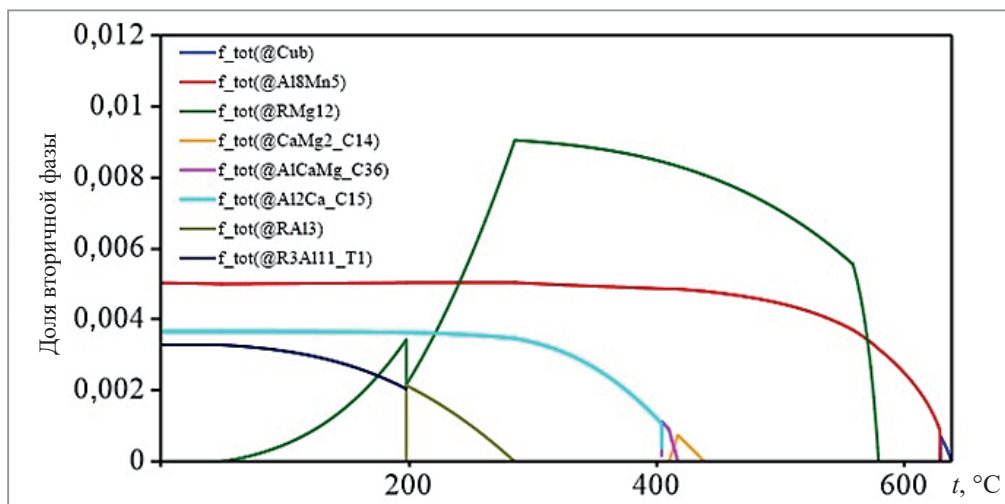


Рис. 3. Зависимость доли вторичных фаз, образующихся при затвердевании расплава состава $Mg_{0,85}Al_{0,2}Ca_{0,53}Mn_{0,5}La$, от температуры

При температуре $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинается образование кристаллов соединения $Mg_{12}La$. В интервале температур $580\text{--}280\text{ }^{\circ}\text{C}$ их доля в сплаве растет. При температуре $435\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуется соединение Mg_2Ca . При температуре порядка $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ кристаллы этого соединения полностью распадаются, как и кристаллы тройного соединения $AlCaMn$, с образованием соединения Al_2Ca .

При температуре $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ соединение $Mg_{12}La$ вступает в реакцию с алюминием с образованием Al_3La . Однако уже при температуре порядка $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит фазовое превращение с образованием соединения $Al_{11}La_3$. В результате при остывании до комнатной температуры в сплаве данного состава образуется выпадающий по границам зерен твердого раствора магния упрочняющий каркас, состоящий из зерен трех соединений: Al_8Mn_5 , Al_2Ca и $Al_{11}La_3$.

Анализ системы Mg–Al–La–Mn–Zr на основе двойных диаграмм состояний

Анализ представленной на рис. 4 пятикомпонентной системы Mg–Al–La–Mn–Zr показал, что самым тугоплавким элементом в ней является Zr, температура плавления которого равна $1855\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, как видно на рис. 4, Zr плохо растворяется в Mg (до $0,983\text{ ат. }%$) и в паре с Mn образует две эвтектики с содержанием до $5,0$ и $67,5\text{ ат. }%$ Zr.

С La цирконий не образует ни эвтектик, ни интерметаллических соединений.

Состав и температура плавления эвтектик, образующихся в двойных системах Mg–Al, Mg–La и Al–La, приведены на рис. 5.

Представляется целесообразным приготовление в первую очередь твердого раствора Zr в магнии. Введение до $0,985\text{ ат. }%$ Zr не окажет заметного влияния на литейные свойства Mg. В связи с этим

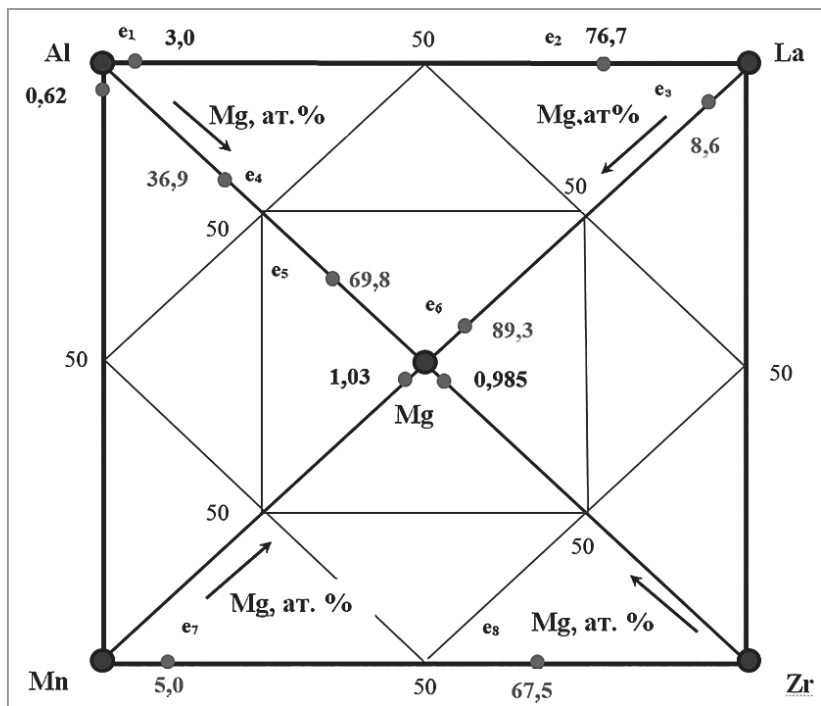


Рис. 4. Представление пятикомпонентной системы Mg–Al–La–Mn–Zr с указанием положения двойных эвтектик

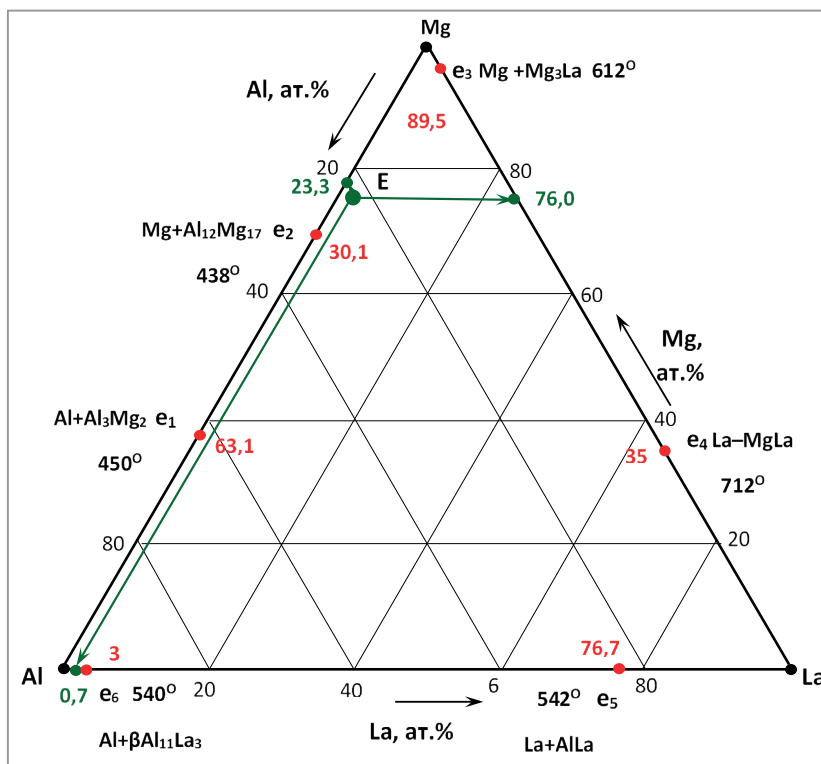


Рис. 5. Расположение двойных (e_1 – e_6) и тройной E эвтектики в системе Al–La–Mg

пятикомпонентную систему Mg–Al–La–Mn–Zr в первом приближении можно упростить и свести к трехкомпонентной Al–La–Mg.

Расчет тройной высокомагниевого эвтектики в системе Al–La–(Mg)

Температуру плавления тройной эвтектики в системе Al–La–(Mg) можно рассчитать, используя в качестве исходных данных температуру плавления: эвтектики Mg– γ Mg₁₇Al₁₂ ($T_{эвт} = 438$ °C), ее компонентов Mg (651 °C) и γ Mg₁₇Al₁₂ (460 °C), а также эвтектики Mg–Mg₃La (612 °C) и ее компонентов Mg и Mg₃La (675 °C) [6].

Для двойной системы

$$T_{\text{эвт}} = K_{\text{эт}}(T_1 + T_2), \quad (1)$$

где $K_{\text{эт}}$ – коэффициент эвтектической температуры,

$$K_{\text{эт}} = 0,497 \exp(-0,2657X), \quad (2)$$

где X – масштабный температурный параметр,

$$X = (T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)^{0,74}. \quad (3)$$

Расчеты эвтектической концентрации тройных эвтектик проводили по вычисленным значениям эвтектической температуры (в % по массе) по формулам:

$$C_{\text{эвт}}^{T1} = [(T_2 - T_{\text{эвт}})/(T_1 + T_2 - 2T_{\text{эвт}})]100\%; \quad (4)$$

$$C_{\text{эвт}}^{T2} = [(T_1 - T_{\text{эвт}})/(T_1 + T_2 - 2T_{\text{эвт}})]100\%. \quad (5)$$

При расчетах эвтектики в системе Al–La–(Mg) сводим к расчету двойной системы (Mg–Mg₃La)–(Mg–γMg₁₇Al₁₂)_{эвт} [7].

По уравнениям (1–5) находим:

$$X = (612 - 438)/(612 + 438)^{0,74} = 174/172 = 1,01;$$

$$K_{\text{эт}} = 0,497 \exp(-0,2657 \cdot 1,01) = 0,3800;$$

$$T_{\text{эвт}} = 0,38(612 + 438) = 400 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Концентрация элементов в тройной эвтектике

$$C_{\text{эвт}}^{T1} = 100[(438 - 400)/(1050 - 800)] = 24,8 \text{ мас. \% (Mg–Mg}_3\text{La)}.$$

Концентрация (Mg–γMg₁₇Al₁₂)_{эвт} в тройной эвтектике составляет 75,2 мас. %.

В 75,2 мас. % (Mg–γMg₁₇Al₁₂)_{эвт} состава 67,6 мас. % Mg и 32,4 мас. % Al содержится 50,8 мас. % Mg и 24,4 мас. % Al. В 24,8 мас. % эвтектики (Mg–Mg₃La) состава 83,5 мас. % Mg и 16,5 мас. % La содержится 20,7 мас. % Mg и 4,1 мас. % La.

Таким образом, установлено, что эвтектика в тройной системе Al–La–(Mg) плавится при температуре $T_{\text{эвт}} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ и содержит 71,5 мас. (76,0 ат.) % Mg (50,8 мас. % Mg + 20,7 мас. % Mg), 24,4 мас. (23,3 ат.) % Al и 4,1 мас. (0,7 ат.) % La. Результаты расчета эвтектики в системе Al–La–(Mg) представлены на рис. 5.

Результаты исследований

Процесс скоростной экструзии реализовывали на кривошипных прессах в изготовленных пресс-формах (рис. 6, а). Для повышения точности сопряжения рабочих деталей пуансон – матрица при скоростной экструзии в пресс-форме использовали направляющие втулки. Нагрев матрицы с фильерой производили при помощи водоохлаждаемого индуктора.

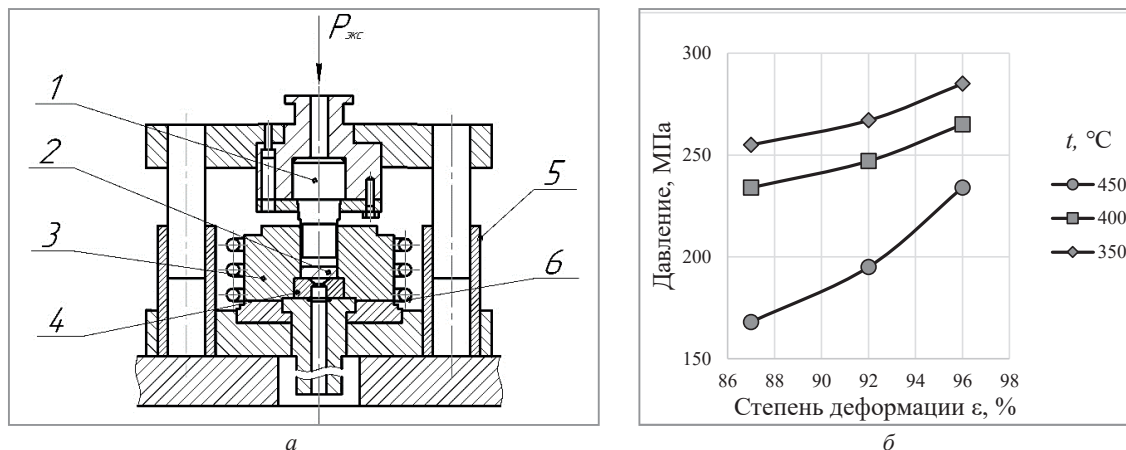
На рис. 6, б представлены зависимости изменения давления экструдирования базового состава от степени деформации при различных температурах экструдирования. Результаты исследований показали, что повышение температуры экструдирования с 350 до 450 °C снижает давление прессования на 20–25%. Причем более существенное различие в давлении экструдирования отмечается при меньших степенях деформации.

Повысить прочностные и пластические свойства магниевых сплавов, дополнительно легированных Zr и La, можно при увеличении степени деформации. Так, изменение данного показателя с 87 до 96% повышает предел прочности на 10–13% и относительное удлинение в среднем на 5% (рис. 7).

Исследования влияния температуры экструдирования на прочностные (σ_b , МПа, НВ) и пластические (δ , %) свойства для базового состава магниевых сплавов, дополнительно легированных 0,5 мас. % Zr и 0,4 мас. % La, представлены на рис. 8.

Наиболее существенное повышение твердости (до 100–110 НВ) при возрастании температуры экструдирования наблюдается для сплава, дополнительно легированного Zr. При этом предел прочности магниевых сплавов с Zr и La при изменении температуры экструдирования от 350 до 450 °C повышается в среднем на 10–15% (рис. 8, а).

Анализ результатов изменения относительного удлинения (рис. 8, б) для различных составов показывает, что наиболее высокие пластические свойства (на уровне $\delta = 10\%$) зафиксированы для образца магниевых сплавов, дополнительно легированных 0,4% La и экструдированных в температурном интервале 400–450 °C.



1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица; 4 – фильера;
5 – направляющая втулка; 6 – водоохлаждаемый индуктор

Рис. 6. Схема пресс-формы для высокоскоростной экструзии (а), влияние температуры и степени деформации на давление экструдирования (б)

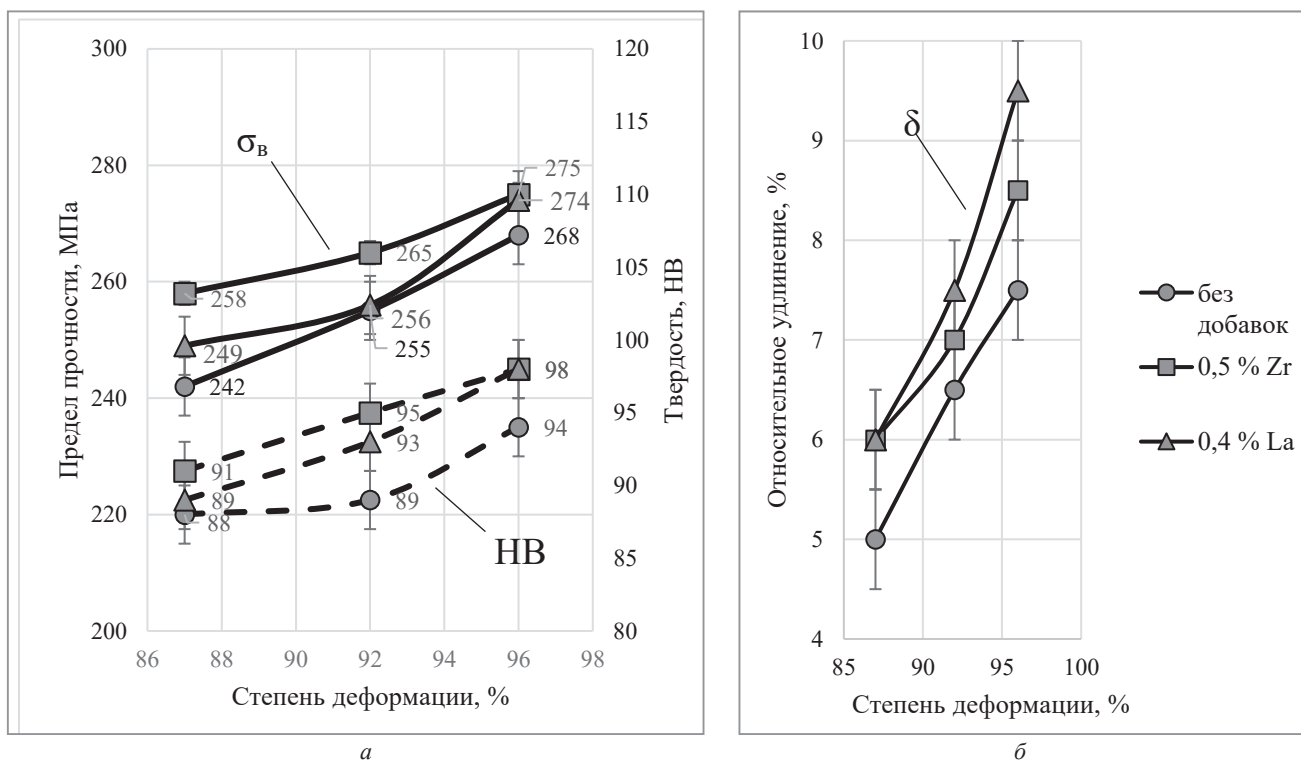


Рис. 7. Влияние степени деформации магниевых сплавов различных составов:
а – на предел прочности при растяжении σ_B , МПа (сплошные линии) и твердость, НВ (штриховые линии);
б – относительное удлинение при растяжении δ , %

Анализ фазового состава и микроструктуры образцов показывает, что для магниевого сплава, легированного La, структура характеризуется пересыщенным твердым раствором магния без интерметаллических фаз, что и позволяет повышать его пластичность на 25%. Для упрочненных образцов с добавками 0,5% Zr в структуре дополнительно выявлены соединения ZrMg при углах рассеивания 36,31° и 57,07° (рис. 9).

Результаты исследования структуры образцов магниевого сплава после литья и экструдирования указывают на более дисперсное распределение структурных составляющих материала в деформированных заготовках (рис. 10).

Повысить предел прочности (до 350–355 МПа) и твердость (до 120–125 НВ) можно за счет термической обработки магниевых сплавов по режиму T61 (рис. 11) с использованием закалочного охлаждения в горячей воде.

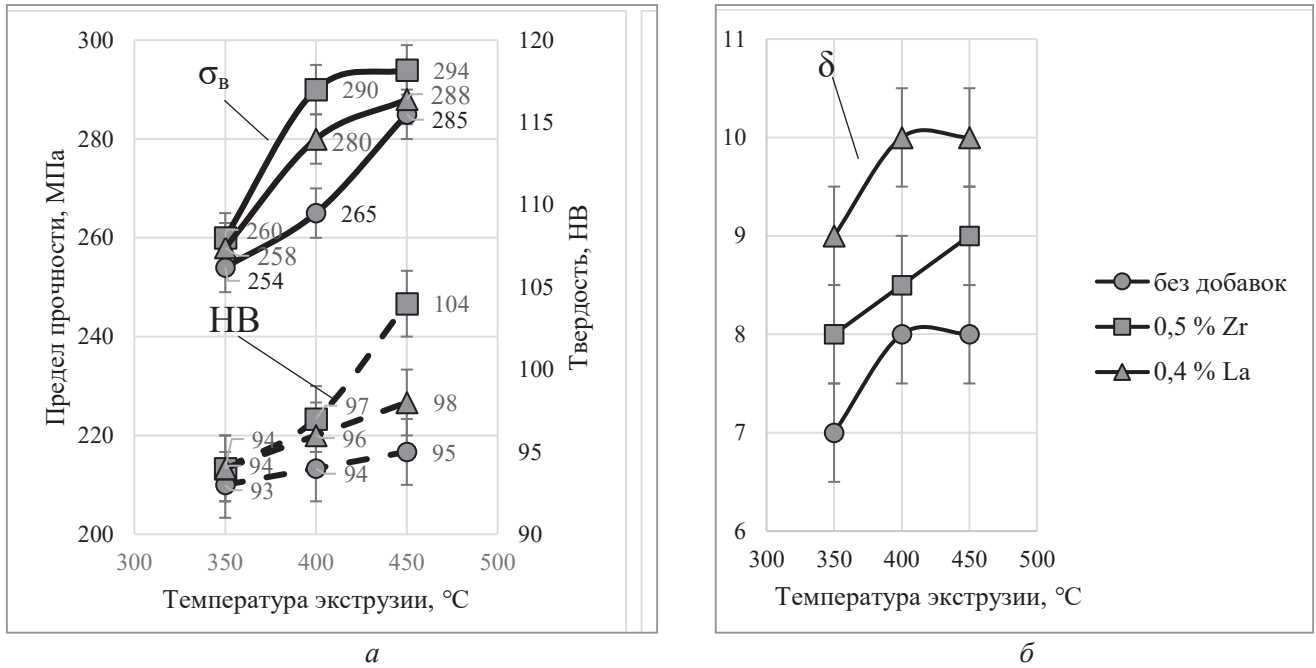


Рис. 8. Влияние температуры экструзии магниевых сплавов различных составов: а – на предел прочности при растяжении σ_B , МПа (сплошные линии) и твердость, HB (штриховые линии); б – относительное удлинение при растяжении δ , %

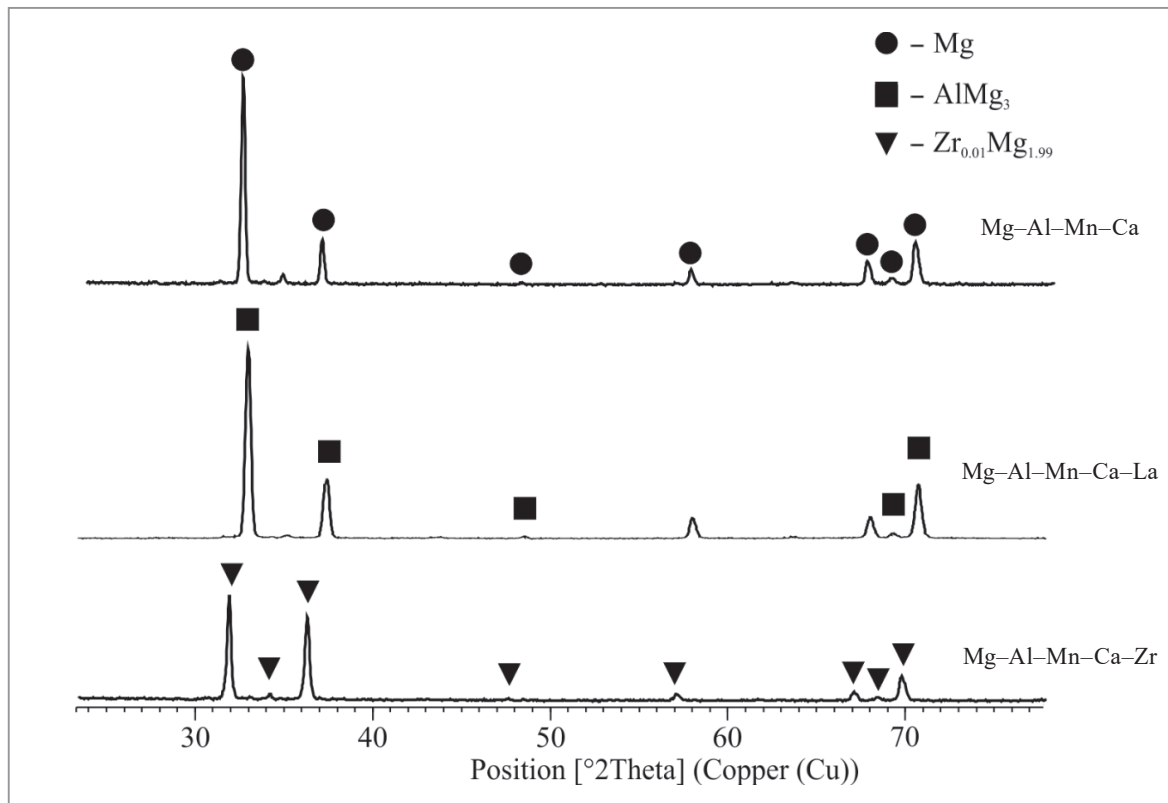


Рис. 9. Фазовый состав экструированных образцов из магниевых сплавов с различными добавками; $\epsilon = 96\%$, $t = 450^\circ\text{C}$

После закалки и искусственного старения в структуре наблюдаются темные иглы (пластинки), которые представляют собой выделения интерметаллидов типа Mg₁₇Al₁₂, при этом добавки 0,5% Zr и 0,4% La приводят к их диспергированию. Пластинчатые выделения Mg₁₇Al₁₂ образуются при распаде пересыщенного твердого раствора магния после закалки и последующем старении. Увеличение продолжительности старения приводит к большему охвату указанными интерметаллидами площади шлифа, что особенно ярко наблюдается в магниевом сплаве с добавками 0,4% La (рис. 12).

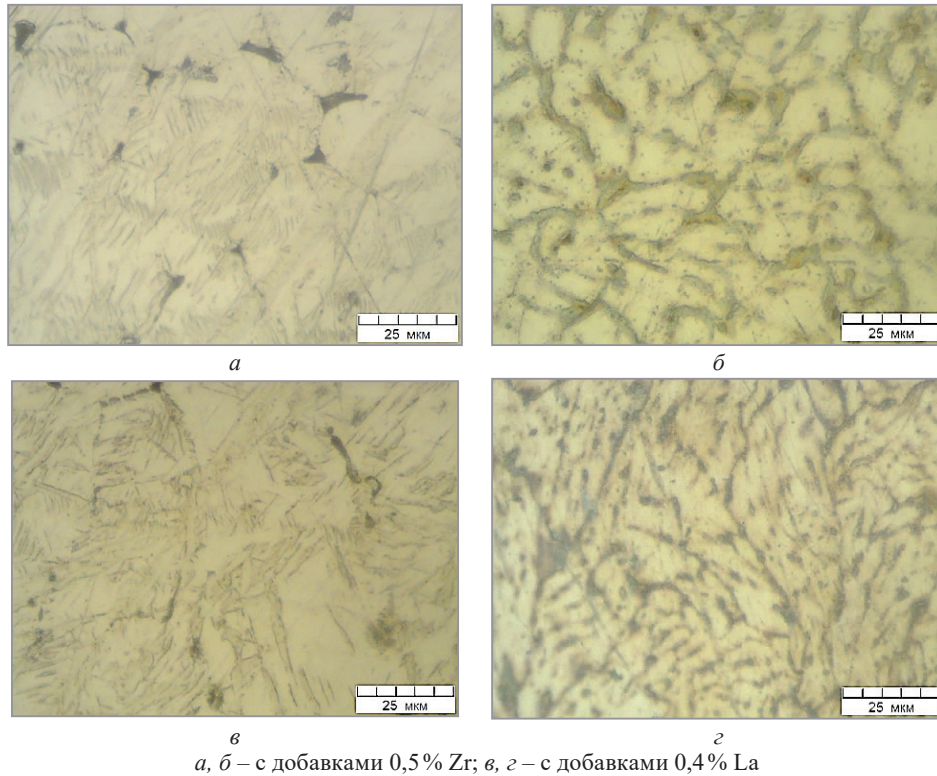


Рис. 10. Микроструктура магниевого сплава после литья (а, в) и после экструдирования (б, г); $\epsilon = 96\%$, $t = 450\text{ }^\circ\text{C}$; $\times 1000$

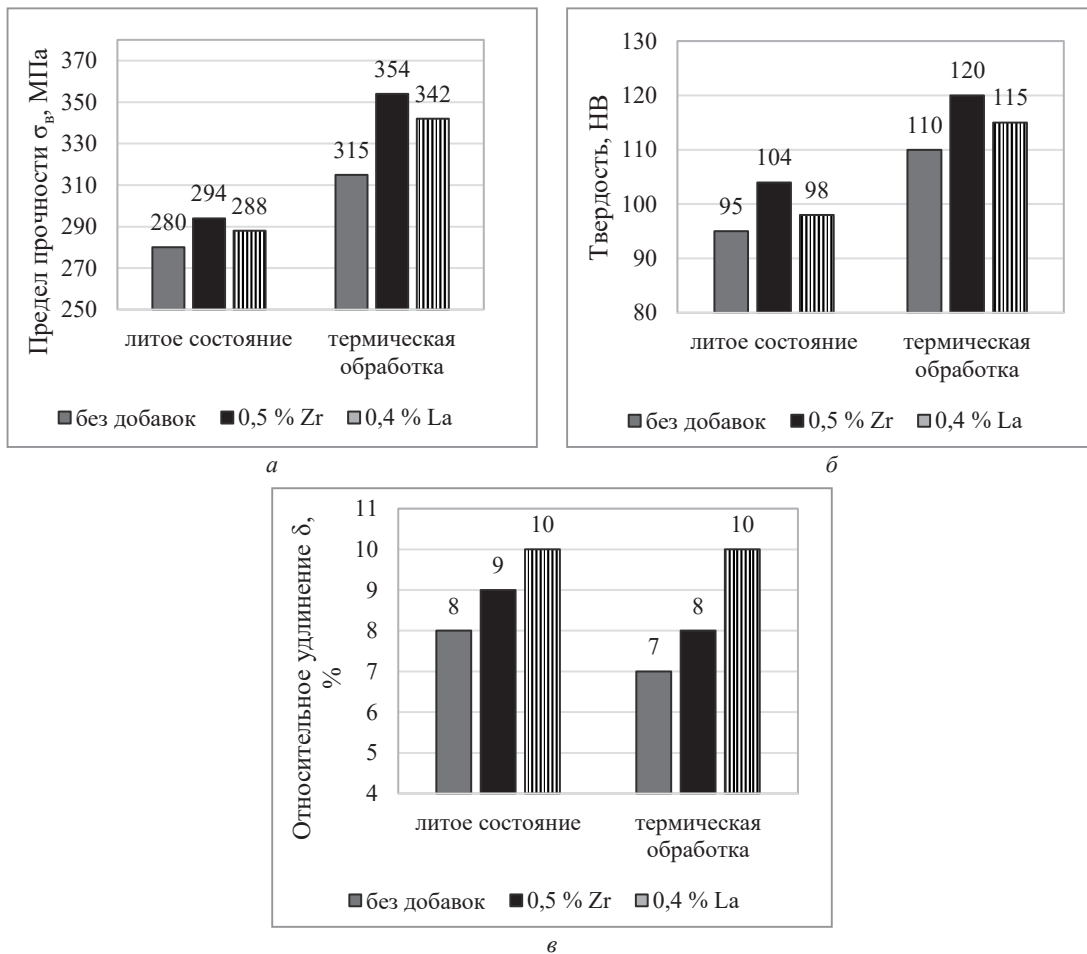


Рис. 11. Изменение прочности (а), твердости (б) и относительного удлинения (в) магниевых сплавов после термической обработки, режим Т61: закалка 420 °С, 40 мин, охлаждение в горячей воде (80–85 °С), искусственное старение 200 °С, 8 ч

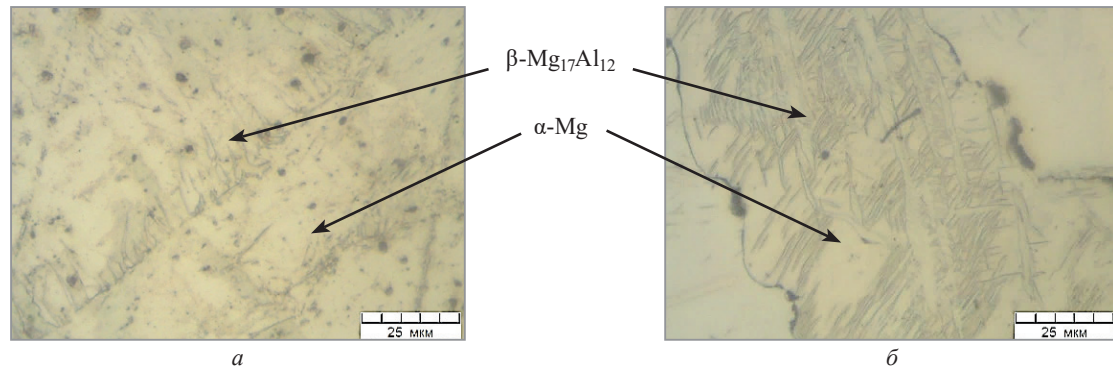


Рис. 12. Изменение структуры магниевого сплава с добавками 0,4% La в зависимости от длительности старения:
а – 4 ч; б – 8 ч; $\times 1000$

Выводы

Проведены исследования структуры, фазовых равновесий и механических свойств сплавов системы Mg–Al–Mn–Ca при дополнительном ее легировании Zr и La. Установлено, что структура магниевого сплава, легированного La, характеризуется пересыщенным твердым раствором магния без интерметаллических фаз, что и позволяет повышать его пластичность на 25%. В структуре сплавов, упрочненных введением 0,5 мас. % Zr, выявлено наличие фаз соединений Zr с Mg.

Работа выполнена при поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований, проект № T22КИТГ-015.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синтез магниевых циркониевых лигатур / Н.В. Францева [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 7, ч. 4. – С. 138–142.
2. Achieving extraordinary thermal stability of fine-grained structure in a dilute magnesium alloy / Zhao-Yuan Meng [et al.] // Material Research Letter. – 2022. – Vol. 10, iss. 12. – P. 797–804.
3. Tailoring the microstructure and enhancing the corrosion resistance of extruded dilute Mg–0.6Al–0.5Mn–0.25Ca alloy by adding trace Ce / Mei-Xuan Li [et al.] // Corrosion Science. – 2022. – Vol. 207. – P. 110605.
4. Плисецкая, И. В. Исследование влияния малых добавок кальция на структуру и свойства литейных магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn с целью повышения температуры возгорания: дис. ... канд. техн. наук / И. В. Плисецкая. – М.: МИСиС, 2014.
5. Инновации в области литейных магниевых сплавов / В.Д. Белов [и др.] // Metallurg. – 2010. – № 5. – С. 67–70.
6. Колтыгин, А. В. Перспективы развития магниевых литейных сплавов, связанные с применением кальция в качестве легирующей добавки / А. В. Колтыгин, И. В. Плисецкая // Литейщик России. – 2012. – № 1. – С. 38–41.
7. Колтыгин, А. В. Особенности плавки магниевых сплавов, легированных кальцием в защитной газовой среде, содержащей элегаз / А. В. Колтыгин, И. В. Плисецкая // Прогрессивные литейные технологии: сб. материалов конф. – М.: МИСиС, 2011. – С. 40–42.

REFERENCES

1. Franceva N. V., Wojciechowski V. N., Savchenkov S. A, Bazhin V. Yu. Sintez magnij-cirkonijevyh ligatur [Synthesis of master alloys magnesium-zirconium]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International scientific research journal*, 2016, no. 7, part 4, pp. 138–142.
2. Zhao-Yuan Meng, Cheng Wang, Zhen-Ming Hua, Min Zha, and Hui-Yuan Wang. Achieving extraordinary thermal stability of fine-grained structure in a dilute magnesium alloy. *Material Research letter*; 2022, vol. 10, iss. 12, pp. 797–804.
3. Mei-Xuan Li, Cheng Wang, Yi-Jia Li, Da-Wei Wang, Min Zha, Yipeng Gao, Hui-Yuan Wang. Tailoring the microstructure and enhancing the corrosion resistance of extruded dilute Mg–0.6Al–0.5Mn–0.25Ca alloy by adding trace Ce. *Corrosion Science*, 2022, vol. 207, p. 110605.
4. Pliseckaja I. V. *Issledovanie vlijanija malyh dobavok kal'cija na strukturu i svojstva litejnyh magnijevyh splavov sistemy Mg–Al–Zn–Mn s cel'ju povyshenija temperatury vozgoranija: dis. ... kand. tehn. nauk* [Study of the influence of small calcium additions on the structure and properties of cast magnesium alloys of the Mg–Al–Zn–Mn system in order to increase the ignition temperature. Ph.D. tech. Sci. diss.]. Moscow, MISiS Publ., 2014.
5. Belov V. D., Koltygin A. B., Belov H. A., Pliseckaja I. V. Innovacii v oblasti litejnyh magnijevyh splavov [Innovations in area of cast magnesium alloys]. *Metallurg = Metallurgist*, 2010, no. 5, pp. 67–70.
6. Koltygin A. B., Pliseckaja I. V. Perspektivy razvitija magnijevyh litejnyh splavov, svjazannye s primeneniem kal'cija v kachestve legirujushhej dobavki [Prospects for the development of magnesium cast alloys associated with the use of calcium as an alloying additive]. *Litejshhik Rossii = Foundryman of Russia*, 2012, no. 1, pp. 38–41.
7. Koltygin A. B., Pliseckaja I. V. Osobennosti plavki magnijevyh splavov, legirovannyh kal'ciem v zashhitnoj gazovoj srede, soderzhashhej jelegaz [Features of melting magnesium alloys alloyed with calcium in a protective gas environment containing SF6 gas]. *Progressivnye litejnye tehnologii = Progressive foundry technologies*, 2011, pp. 40–42.