

## **Механические свойства магниевых сплавов, полученных по технологии, включающей быструю кристаллизацию и последующее компактирование**

Л. Л. Рохлин<sup>†</sup>, Т. В. Добаткина, И. Г. Королькова, Е. А. Лукьянова

<sup>†</sup>rokhlin@imet.ac.ru

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Ленинский проспект 49, Москва, 119991, Россия

Изучены структура и механические свойства магниевых сплавов, содержащих алюминий, кальций и редкоземельные металлы (Y, Nd, La, Yb), которые были получены методом экструзии брикетов, изготовленных из лент быстрозакристаллизованных сплавов. Ленты магниевых сплавов получены путем закалки из жидкого состояния методом литья на внешнюю боковую поверхность быстро вращающегося медного диска в атмосфере гелия, что обеспечивало высокую скорость охлаждения при затвердевании сплавов  $10^6\text{K/c}$ . Брикеты изготавливались при комнатной температуре. Большая часть из них была дополнительно подвергнута перед экструзией осадке при температуре  $150\text{--}200^\circ\text{C}$  с целью их уплотнения. Полученные заготовки экструдировали в прутки диаметром 4,3 мм со степенью вытяжки 16 при температуре  $350\text{--}430^\circ\text{C}$  в зависимости от состава сплава. Фрактографические исследования мест разрушения полученных прутков при растяжении показали отсутствие пор, которые могли бы быть обусловлены методом их получения. Исследование микроструктуры прутков методами световой и просвечивающей электронной микроскопии показало, что структура сплавов после экструзии является гетерогенной с весьма дисперсными частицами вторых фаз. Размер зерна как в быстрозакристаллизованных лентах, так и в компактных материалах составлял  $1\text{--}2\text{ мкм}$ . В структуре лент и прутков сплавов, содержащих редкоземельные металлы иттрий и неодим совместно с алюминием, присутствуют кристаллы вторых фаз  $\text{Mg}_{24}\text{Y}_5$  или  $\text{Mg}_{12}\text{Nd}$ , выделившиеся из магниевых твердых растворов при экструзии, и более крупные закристаллизовавшиеся из жидкого состояния фазы  $\text{Al}_2\text{Y}$  или  $\text{Al}_2\text{Nd}$ . Наличие этих интерметаллических соединений в структуре этого материала в значительном количестве приводит к снижению его пластичности. Использование описанной технологии получения и обработки магниевых сплавов позволяет повысить уровень их прочностных свойств до 500 МПа, что является результатом измельчения структурных составляющих с сохранением их размеров при дальнейших технологических нагревах и пересыщения магниевых твердых растворов с последующим его распадом.

**Ключевые слова:** магниевые сплавы, быстрое затвердевание, прочностные свойства

## **Mechanical properties of the magnesium alloys prepared by technology including rapid solidification and compaction**

L. L. Rokhlin, T. V. Dobatkina, I. G. Korol'kova, E. A. Lukyanova

Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS, Leninskiy prospect 49, Moscow, 119991, Russia

Structure and mechanical properties of the magnesium alloys containing aluminum, calcium and rare earth metals (Y, Nd, La, Yb), prepared by extrusion of the briquettes compiled from the rapidly crystallized ribbons were investigated. The ribbons of the alloys were prepared by quenching from liquid state with the method of casting on outer lateral surface of the rapidly rotating copper disc in helium atmosphere. This method resulted in high cooling rate during solidification of the alloys  $10^6\text{K/c}$ . The ribbons were compacted into the briquettes at room temperature. Besides, most of them were additionally subjected to compression at  $150\text{--}200^\circ\text{C}$  in order to increase density. The obtained briquettes were extruded into the rods of 4.3 mm in diameter with the reduction of area being 16 at temperatures  $350\text{--}430^\circ\text{C}$  depending on the alloy compositions. Observation of the fracture places of the obtained rods after tensile tests indicated absence of the pores, which could be arisen as a result of the rod fabrication method. Investigation by the optical and transmission electron microscopy revealed the rod structures after extrusion to be heterogeneous with quite disperse particles of the second phases. The grain size in both rapid crystallized ribbons and in compact materials amounted  $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ . Structures of the ribbons and rods of the alloys containing rare earth metals yttrium and neodymium together with aluminium included crystals of the second phases  $\text{Mg}_{24}\text{Y}_5$  or  $\text{Mg}_{12}\text{Nd}$  precipitated from magnesium solid solution during extrusion and coarse crystals of the  $\text{Al}_2\text{Y}$  or  $\text{Al}_2\text{Nd}$  phases precipitated directly from liquid phase. Existence of these intermetallic compounds in structures of these materials in large quantities results in decrease of their plasticity/ Application of the described technology of preparation

and treatment of the magnesium alloys enables to increase level of their strength properties up to 500 MPa, what can be explained by diminution of the structure constituents with retention of their dimensions during further technological heatings, including supersaturation of magnesium solid solution followed with its decomposition.

**Keywords:** magnesium alloys, rapid solidification, mechanical properties

## Введение

Одним из направлений решения проблемы создания новых конструкционных материалов, обладающих специальными характеристиками, повышенной прочностью и надежностью, является развитие технологий, основанных на закалке из жидкого состояния со скоростями охлаждения  $10^6$  К/с и выше. Такие скорости охлаждения обеспечивают существенное измельчение всех структурных составляющих, получение пересыщенных твердых растворов, новых кристаллических и, в ряде случаев, аморфных фаз в широком круге металлических систем. За счет структурных изменений, происходящих в сплавах, в том числе магниевых, в результате кристаллизации с высокой скоростью, было достигнуто заметное улучшение их механических и коррозионных свойств [1,2]. В последние годы развитие исследований и применения методов быстрой кристаллизации для магниевых сплавов идет достаточно ограниченно, что связано с их высокой химической активностью, и как следствие, с усложнением технологического процесса из-за необходимости применения защитной атмосферы. Однако сочетание малого удельного веса с достаточно высокими прочностью и модулем упругости как при комнатной, так и при повышенных температурах, делает магниевые сплавы, полученные методом быстрого затвердевания, очень привлекательными для ряда областей техники. В этой связи, одной из основных задач является получение качественного полупродукта из быстрозакаленных лент.

## Материалы и методы исследования

Известно, что магниевые сплавы, содержащие редкоземельные металлы (РЗМ), характеризуются высокой прочностью и жаропрочностью [3], поэтому для получения компактного материала были выбраны сплавы, содержащие РЗМ разных подгрупп: иттриевой (иттрий и иттербий) и цериевой (неодим и лантан), а также кальций и алюминий, которые широко используются в промышленных магниевых сплавах. Сплавы были отлиты на поверхность быстро вращающегося медного диска ( $V=2200$  об/мин) в атмосфере гелия, и получены ленты шириной 6—10 мм и толщиной 40—60 мкм. Скорость охлаждения, которую определяли по известной зависимости между скоростью охлаждения при кристаллизации и величиной дендритного параметра [4], для всех сплавов составила порядка  $10^6$  К/с. Способ получения компактного материала состоял из дробления лент, их холодного брикетирования, уплотнения брикетов горячим прессованием при температуре брикета 150-

200°C и контейнера 350-380°C (соотношение диаметров контейнера и брикета составляло 1:1,3) и последующего экструдирования в прутки диаметром 4,3 мм со степенью вытяжки 16 [5]. Температура экструзии составляла 350, 400 и 430°C в зависимости от состава сплава и выбиралась с целью сохранения наибольшей дисперсности структуры быстрозакристаллизованных сплавов. С этой же целью некоторые сплавы экструдировали без предварительного доуплотнения брикета. Механические испытания на растяжение проводили на испытательной машине «Instron» при комнатной температуре со скоростью деформации  $10^{-3}$ /с, используя образцы с диаметром рабочей части 1,5 мм. Микроструктуру сплавов изучали с использованием светового микроскопа NU-2E и просвечивающего электронного микроскопа JEM -200A, фрактографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе JSM-U3.

## Результаты исследования и их обсуждение

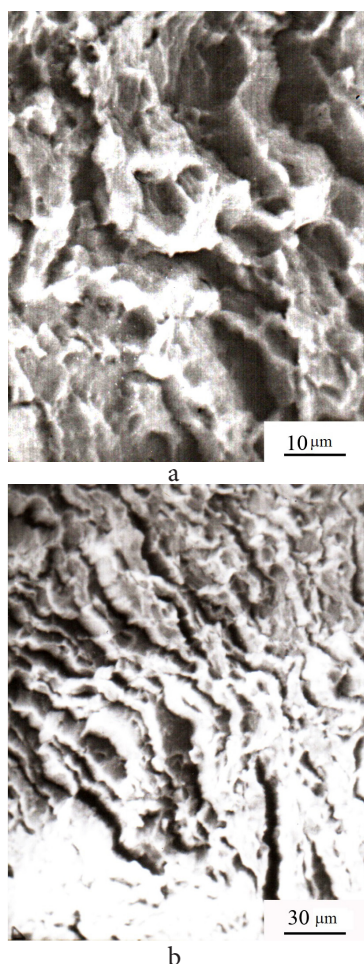
Результаты механических испытаний на растяжение при комнатной температуре приведены в табл.1. Уровень механических свойств прутков, полученных по технологии, включающей быструю кристаллизацию с последующим компактированием, достаточно высок. Сплав Mg-7%Al имеет предел прочности 380 МПа, предел текучести 294 МПа и удлинение 14%, что соответствует уровню высокопрочных магниевых сплавов, содержащих редкоземельные металлы и получаемых

**Таблица 1.** Механические свойства прутков магниевых сплавов  
**Table 1.** Mechanical properties of magnesium alloys rods

Состав сплава, масс. % Alloy composition, mas. %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	d, %
Mg-3%Al	298	249	9,2
Mg-5%Al	327	252	11,6
Mg-7%Al	380	294	14,0
Mg-11,5%Y	381	367	9,1
Mg-10%Nd	328	323	8,0
Mg-9%Al-11%Y	403	394	2,2
Mg-5%Al-5%Nd	352	293	7,7
Mg-5%Al-10%Nd	406	386	7,2
Mg-9%Al-10%Nd	500	472	2,8
Mg-9%Al-18%Nd	450	436	0,7
Mg-9%Al-1%La	387	338	4,7
Mg-9%Al-5%La	485	445	9,4
Mg-21%Yb*	264	-	0,2
Mg-8,5%Al-5%Ca*	430	-	0,5

\*прутки получены без операции дополнительного уплотнения брикета путем горячего прессования

\*rods were obtained by hot pressing without additional sealing operation of briquettes



**Рис. 1.** Поверхности изломов сплавов Mg-11,5%Y (a) и Mg-5%Al-10%Nd (b) при наблюдении в растровом электронном микроскопе.

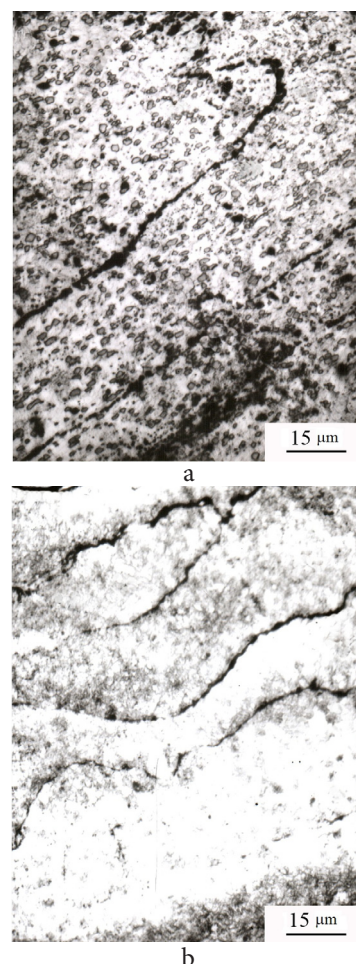
**Fig. 1.** Fracture surface of Mg-11,5% Y (a) and Mg- 5%Al-10%Nd (b) alloys in a scanning electron microscope observation.

по обычной слитковой технологии [6]. С увеличением содержания легирующих элементов прочностные свойства возрастают и могут достигать для предела прочности 500 МПа, предела текучести 472 МПа при удлинении 2,8% для сплава Mg-10%Nd-9%Al. Сплавы составов, отмеченных знаком (\*) в табл.1, получены без операции доуплотнения брикетов, что приводит к резкому снижению пластичности при сохранении высокого уровня прочностных свойств.

Фрактографический анализ показал, что разрушение сплавов носит хрупко-вязкий характер (рис.1), а поры и микродефекты, связанные со способом получения компактного материала, отсутствуют.

На рис.2 приведены микроструктуры некоторых исследованных сплавов после закалки из жидкого состояния и последующего компактирования. Они свидетельствуют о том, что структура сплавов в этом состоянии является гетерогенной с весьма дисперсными частицами вторых фаз. В прутках сплавов отсутствуют поры и имеется плотное сцепление между отдельными частицами материала.

Согласно электронно-микроскопическим исследованиям, размер зерна в быстрозакристаллизованных лент-



**Рис. 2.** Микроструктура прутков сплавов Mg-9%Al-18%Nd (a), Mg-9%Al-5%La (b).

**Fig. 2.** Microstructure of Mg-9%Al-18%Nd (a) and Mg-9%Al-5%La (b) alloys rods.

тах и компактных материалах составлял 1—2 мкм, тогда как в литых сплавах размер дендритной ячейки был на уровне 30 мкм.

В ранее проведенных исследованиях установлено что, растворимость иттрия и неодима в магнии при скорости охлаждения 106 К/с увеличивается с 12,6 до 17 мас.% и с 3,6 до 15 мас.% соответственно [7,8]. Поэтому быстрозакаленные ленты исследованных двойных сплавов магния с иттрием и неодимом должны были иметь и имели структуру магниевого твердого раствора. Кроме того, структуру магниевого твердого раствора должны были иметь и двойные сплавы магния с алюминием после быстрой кристаллизации, учитывая содержание алюминия, меньшее его максимальной растворимости в магнии [9]. Технологические нагревы в процессе производства компактных материалов не вызвали заметного огрубления структуры, и, принимая во внимание устойчивость магниевого твердого раствора, содержащего редкоземельные металлы, структура полученных прутков двойных магниевых сплавов, по-видимому, сохранилась однофазной. Алюминий снижает растворимость иттрия и неодима в магнии [10], поэтому в структуре лент и прутков могут присутствовать кристаллы вторых фаз  $Mg_{24}Y_5$  или  $Mg_{12}Nd$ , выделившиеся из магниевого



твердого раствора, и более крупные закристаллизовавшиеся из жидкого состояния фазы  $Al_2Y$  или  $Al_2Nd$ . Наличие этих интерметаллидных соединений в структуре компактного материала в значительном количестве приводит к снижению его пластичности.

Таким образом, результаты работы показали, что предложенный способ изготовления полуфабрикатов позволяет получить материалы с достаточно высокими прочностными свойствами при удовлетворительной пластичности.

### Выводы

1. Показана возможность получения магниевых сплавов с высоким уровнем прочностных свойств и приемлемой пластичностью по технологии, включающей закалку из жидкого состояния с последующим компактированием материала путем прессования.

2. Высокие прочностные свойства достигаются в структуре с более мелким зерном и присутствием дисперсных упрочняющих вторых фаз.

### Литература / References

1. J. Cai, G. C. Ma, Liu Z., H. F. Zhang, A. M. Wang, Z. Q. Hu. *Materials Science and Engineering A*. **456**, 364—367 (2007).
2. A. Elsayed, K. Konndoh, H. Imai, J. Umeda. *Materials and Design*. **31**, 2444—2453 (2010).
3. L. L. Rokhlin. *Magnesium alloys containing rare earth metals*. London-New York. Taylor and Francis. (2003) 245 p.
4. H. Matyja, B. C. Giessen, N. J. Grant. *J. Inst. Metal.* **96**, 30—32 (1968).
5. L. L. Rokhlin, V. V. Kuleshov, T. V. Dobatkina, I. G. Korolkova. Russian Patent № 2035261. A method for producing of semi-finished products of quickly crystallized magnesium alloys. (in Russian) [Л. Л. Рохлин, В. В. Кулешов, Т. В. Добаткина, И. Г. Королькова. Способ получения полуфабрикатов из быстро закристаллизованных магниевых сплавов. Патент РФ № 2035261.]
6. Handbook of structural materials. Ed. By B. N. Arzamasov, T. V. Solov'eva. BMSTU (2005) 640 p. (in Russian) [Справочник по конструкционным материалам. Под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. М. МГТУ им. Н. Э. Баумана (2005) 640 с.]
7. T. V. Dobatkina, M. E. Drits, I. G. Korol'kova, L. L. Rokhlin. *Izvestiya AN USSR. Metals*. **1**, 190—194 (1988). (in Russian) [Т. В. Добаткина, М. Е. Дриц, И. Г. Королькова, Л. Л. Рохлин. *Изв. АН СССР. Металлы*. **1**, 190—194 (1988).]
8. L. L. Rokhlin, T. V. Dobatkina, I. G. Korolkova. *Rus. Met.* **2**, 152—156 (1994). (in Russian) [Л. Л. Рохлин, Т. В. Добаткина, И. Г. Королькова. *Металлы*. **2**, 152—156 (1994).]
9. Phase diagrams of binary metallic systems. Handbook in 3d V., ed. by N. P. Lyakishev. *Mashinostroenie*. **1**, 167—170 (1996). (in Russian) [Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник в 3 т. Под ред. Н. П. Лякишева М. Машиностроение (1996), 167—170.]
10. Ternary Alloys. A comprehensive compendium of evaluated constitutional data and phase diagrams, ed. by G. Effenberg, F. Aldinger, L. Rokhlin. **16** (1999) 638 p.