

Введение

В последние годы было установлено, что наиболее высокие прочностные свойства магниевых сплавов как при близких к комнатной, так и при повышенных температурах (до 250-300 °C) достигаются при использовании в них в качестве легирующих добавок редкоземельных металлов. Магниевые сплавы с редкоземельными металлами проявляют наиболее высокую прочность после термической обработки старением, сопровождающимся распадом пересыщенного твердого раствора. Однако в состаренном состоянии в магниевых сплавах с некоторыми из редкоземельных металлов может происходить снижение прочностных свойств при случайных кратковременных нагревах, так называемый возврат, который ограничивает возможность их практического применения. Ранее при изучении возврата в двойных сплавах магния с редкоземельными металлами было установлено, что склонность к возврату зависит от их атомного номера [1]. В настоящей работе приведены результаты исследования возврата в сплаве Mg-3,56%Y-2,20%Nd-0,47%Zr типа сплава WE43 [2].

Материалы и методика исследования

Сплав Mg-3,56%Y-2,20%Nd-0,47%Zr типа марки WE43 был предоставлен в горячепрессованном состоянии в виде прутка, который подвергали термической обработке, включающей гомогенизацию при 520 °C в течение 7,5 ч с последующей закалкой для получения пересыщенного твердого раствора путем охлаждения на воздухе, что является типичным для этого сплава. Из закаленных заготовок сплава изготавливали образцы для измерения твердости и удельного электросопротивления, по изменению которых прослеживался распад магниевое твердого раствора при старении и последующий после старения возврат в случае отжига при более высокой температуре. Твердость определялась по методу Бринелля при нагрузке 2,45 кН и диаметре вдавливаемого шарика 5 мм на приборе ТШ-2М. Измерение электрического сопротивления проводили на установке, собранной на базе микрометра БС3-010-2, на образцах с диаметром рабочей части 6 мм. Микроструктура сплавов исследовалась с использованием оптической и электронной просвечивающей микроскопии. Оптическая микроскопия осуществлялась на металлографическом микроскопе фирмы Reichert, модель M24. Просвечивающая электронная микроскопия проводилась на электронном микроскопе JEM-2100 с ускоряющим напряжением 200 кВ.

Результаты исследования и обсуждение

На рис.1. приведены результаты измерения твердости сплава Mg-3,56%Y-2,20%Nd-0,47%Zr в процессе изотермического старения при 200 °C с целью установить время, при котором достигается максимальное упрочнение в нем при распаде пересыщенного магниевое твердого раствора. Температура старения 200 °C была выбрана потому, что при ней, по предыдущим данным [3] наблюдается наибольшее упрочнение магниевых сплавов с редкоземельными металлами при распаде магниевое твердого раствора.

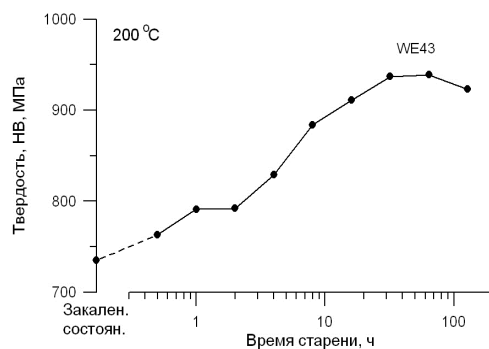


Рис. 1. Изменение твердости сплава системы Mg-Y-Nd-Zr типа WE43 с увеличением времени изотермического старения при 200 °C.

На рис.1 видно, что максимальное упрочнения в исследованном сплаве наблюдается в определенном диапазоне времени старения 32-128 ч, в пределах которого значения его твердости мало изменяются. Выбранное время старения при 200 °C для достижения в сплаве наибольшего упрочнения перед тем, как отжигать его при 250 °C и 300 °C с тем, чтобы наблюдать в нем явление возврата, равнялось 32 ч. На рис.2. приведены результаты измерений твердости и удельного электросопротивления исследованного сплава после старения при 200 °C до наибольшего упрочнения и последующего отжига при температурах 250 и 300 °C для выявления в сплавах возврата.

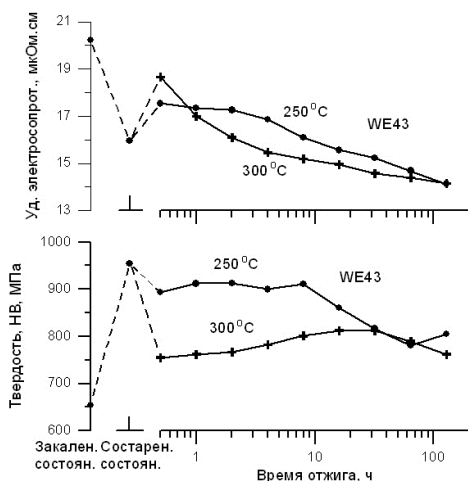


Рис.2. Изменение твердости и удельного электросопротивления состаренного при 200 °C сплава системы Mg-Y-Nd-Zr типа WE43 с увеличением времени последующих отжигов при 250 и 300 °C.

Приведенные данные подтверждают значительный возврат в состаренном до максимума твердости сплаве WE43 при 250 и 300 °C в течение 30 мин, причем возврат при 300 °C заметно больше, чем возврат при 250 °C. Кроме вышеприведенных экспериментов были проведены исследования, в которых устанавливалась возможность возврата после старения при более кратковременных выдержках. Образцы сплавов для измерения твердости и удельного электросопротивления вновь закалялись от 520 °C и старились при 200 °C в течение 32 ч. После старения до максимального упрочнения при 200 °C образцы сплавов отжигались в течение 5, 10, 20, 40 мин. при 250 и 300 °C. Для того, чтобы сократить время нагрева образцов в печи до установленной температуры и получить тем самым более надежные результаты, в печь для нагрева образцов устанавливалась массивная плита из нержавеющей стали, нагревавшаяся вместе с печью. Масса образцов была значительно меньше, чем масса плиты, и они нагревались до заданной температуры менее, чем 1 мин. (около 50 сек). Результаты проведенных экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Твердость и удельное электросопротивление образцов сплава системы Mg-Y-Nd-Zr типа WE4, подвергнутых кратковременным отжигам при 250 и 300 °C после закалки и старения 200 °C, 32 ч до максимума твердости

Состояние сплава	Отжиг при 250 °C		Отжиг при 300 °C	
	Твердость НВ, МПа	Уд. электросопр., мкОм·см	Твердость НВ, МПа	Уд. электросопр., мкОм·см
Закаленное	621,3	20,23	621,3	20,28
Старение 200 °C, 32 ч	913,3	15,45	972,0	15,45
Отжиг 5 мин	910,7	15,57	959,3	17,67
Отжиг 10 мин	912,0	15,81	775,4	18,55
Отжиг 20 мин	885,3	16,65	726,4	18,45
Отжиг 40 мин	864,5	17,04	717,9	18,62

Из приведенных данных по удельному электросопротивлению можно было сделать вывод, что возврат во всех образцах сплавов может происходить при обеих температурах уже после выдержки в течение 10 мин. с последующим развитием при увеличении продолжительности выдержки. Трансмиссионная электронная микроскопия (ТЕМ) позволила выявить особенности изменения в структуре сплава после возврата и последующих отжигов, которые при оптической микроскопии выявить не удавалось. Типичная микроструктура и соответствующая микродифракция для сплава Mg-3,56%Y-2,20%Nd-0,47%Zr, после кратковременного отжига, вызывающего возврат в этом сплаве при 250 °C, приведены на рис.3.

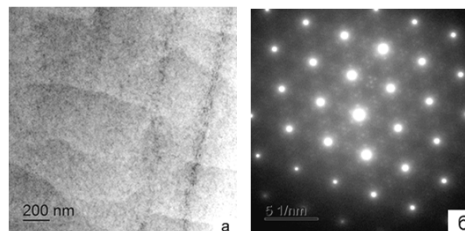


Рис. 3. Исследование микроструктуры сплава системы Mg-Y-Nd-Zr типа WE43 методом ПЭМ. Отжиг после возврата при 250 °C в течение 1 ч. а — микроструктура в светлом поле; б — микродифракция с того же места, ось зоны [001].

Микроструктура демонстрирует «рябой» контраст в области магниевое твердого раствора, а микродифракция — расположение сверхструктурных рефлексов, характерное для присутствия метастабильной фазы β' [4]. Сверхструктурные рефлексы оказались слабыми из-за небольшого содержания в сплаве Mg-3,56%Y-2,20%Nd-0,47%Zr редкоземельных металлов.

Исследование структуры сплавов с использованием оптической и трансмиссионной электронной микроскопии (ТЕМ) показало, что в структуре исследованного сплава после старения наблюдаются только такие же продукты распада магниевое твердого раствора, которые могут наблюдаться в соответствующих двойных системах Mg-Y и Mg-Nd. Возврат в сплаве сопровождается только растворением в магниевом твердом растворе метастабильной фазы β' вплоть до того, что она может полностью раствориться в магниевом твердом растворе с увеличением выдержки при температуре отжига при возврате перед тем, как выделяться из него затем частицы равновесной фазы.

Выводы

- Впервые установлено, что в магниевом сплаве типа WE43 системы Mg-Y-Nd-Zr, состаренном до максимального упрочнения, может происходить возврат после возможных кратковременных нагревов.
- Установлено, что эффект возврата увеличивается с повышением температуры нагрева сплава в диапазоне температур его возможной эксплуатации в качестве конструкционного материала (до 250-300 °C). Возврат в сплаве может происходить при температурах 250 и 300 °C уже после выдержки в течение 10 мин. с последующим развитием его с увеличением продолжительности выдержки.

Литература

- Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, Н.Ю. Табачкова, Е.А. Лукьянова, И.Е. Тарыгина // *Металлы*. 2019. № 3. С. 31-37.
- P. Lyon, I. Syed, S. Heaney. *Proceedings of the 7th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Weinheim: Wiley-VCH. 2007. P.20-25.
- L.L. Rokhlin, *Magnesium alloys containing rare earth metals*. London and New York, Taylor & Francis, (2003), 245p.
- J. F. Nie // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012. V.43A, No11. P. 3891-3939.



This document was created with the Win2PDF "print to PDF" printer available at
<http://www.win2pdf.com>

This version of Win2PDF 10 is for evaluation and non-commercial use only.

This page will not be added after purchasing Win2PDF.

<http://www.win2pdf.com/purchase/>