

УДК 669.721.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЖАРОБЕЗОПАСНОГО ЛИТЕЙНОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Mg-РЗМ-Zr

©2023 г. А.А. Леонов, В.А. Дуюнова, Н.В. Трофимов, З.П. Уридия, И.Ю. Мухина

ФГУП НИЦ «Курчатовский институт» — Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва
E-mail: lab24@viam.ru

Поступила в редакцию 9 июня 2022 г.

После доработки 22 сентября 2022 г. принята к публикации 5 октября 2022 г.

Приведены результаты исследований по разработке пожаробезопасного литейного магниевого сплава системы Mg-РЗМ-Zr нового поколения. Серийные магниевые сплавы не обладают одновременно высокой прочностью при комнатной температуре и достаточным уровнем жаропрочности. Разработан уникальный отечественный литейный магниевый сплав с одновременно стабильно высокими указанными свойствами. Кроме того, полученные показатели температуры воспламенения разработанного сплава позволяют отнести его к группе пожаробезопасных магниевых сплавов. Проведенные исследования параметров его термической обработки позволили выбрать оптимальный режим, обеспечивающий достижение высоких прочностных характеристик сплава.

Ключевые слова: магниевые сплавы; воспламеняемость; температура воспламенения; время остаточного горения; пожаробезопасность; высокопрочный литейный магниевый сплав ВМЛ26.

Одно из главных требований конструкторских бюро при создании новых изделий с повышенными надежностью и весовой эффективностью заключается в использовании материалов с низкой плотностью и высокой удельной прочностью. Данным требованиям удовлетворяют литейные магниевые сплавы. Для узлов, работающих при повышенных температурах, созданы жаропрочные магниевые сплавы. Однако проблемой серийных литейных магниевых сплавов, эксплуатирующихся при повышенных температурах, является то, что они не отвечают современным требованиям по уровню нагрузок при высоких рабочих температурах. Серийные магниевые сплавы, используемые при повышенных температурах, обладают относительно высокими жаропрочными характеристиками и недостаточно высокими прочностными свойствами при нормальных температурах (для сплава МЛ9 $\sigma_B = 230$ МПа, $\sigma_{0,2} = 110$ МПа, $\delta = 4\%$, $\sigma_{100}^{250} = 80$ МПа; для сплава МЛ10 $\sigma_B = 230$ МПа, $\sigma_{0,2} = 140$ МПа, $\delta = 3\%$, $\sigma_{100}^{250} = 70$

МПа; для сплава МЛ19 $\sigma_B = 220$ МПа, $\sigma_{0,2} = 120$ МПа, $\delta = 3\%$, $\sigma_{100}^{250} = 115$ МПа). К недостаткам сплавов на основе магния относятся их невысокие показатели по температуре воспламенения и стойкости к прямому воздействию пламени, а также отсутствие самозатухания пламени [1—3].

Таким образом, существует необходимость в разработке нового пожаробезопасного сплава на основе магния с улучшенными механическими характеристиками в условиях комнатной и повышенных температур, устойчивого к воздействию открытого пламени и способного к самозатуханию при его воздействии на материал детали.

Проведенные ранее всесторонние исследования [4—9] позволили не только создать магниевый сплав ВМЛ26 (система Mg-РЗМ-Zr) с температурой воспламенения, превышающей таковую у серийных сплавов, но и обеспечить научный задел для разработки жаропрочных сплавов на основе магния нового поколения.

**Режимы термической обработки сплава ВМЛ26
в данном эксперименте**

ТО	Принятое обозначение ТО и режим ее проведения
№1	Т61: высокотемпературная закалка от 560 °С с охлаждением в горячей воде + старение с охлаждением на воздухе
№2	Т6: закалка от 540 °С с охлаждением на воздухе + старение с охлаждением на воздухе
№3	Т4: высокотемпературная закалка от 560 °С с охлаждением в горячей воде
№4	Т4: закалка от 540 °С с охлаждением на воздухе

Данная работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.10 «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»)[10—13].

Материал и экспериментальные методы. В качестве материала для исследований выбран новый литейный магниевый сплав ВМЛ26, в состав которого входят в разном количественном соотношении такие РЗМ, как неодим, иттрий и гадолиний. Его выплавку проводили в печи индукционной плавильной установки с защитной газовой средой.

Испытания по определению температуры воспламенения и времени остаточного горения выполняли на образцах размером $(120 \times 10) \times (5 \pm 2)$ мм. Образцы закрепляли в держателях на стойках приспособления и подвергали прямому воздействию пламени газовой горелки, регистрируя время начала воспламенения образца и длительность его самостоятельного горения. Для определения указанной характеристики разработана методика проведения испытаний, включающая оборудование, материалы, регистрируемые параметры, критерии оценки, подготовительные операции, рекомендации по обслуживанию оборудования и регистрацию испытаний.

Для исследования фазового состава и микроструктуры применен современный растровый электронный микроскоп.

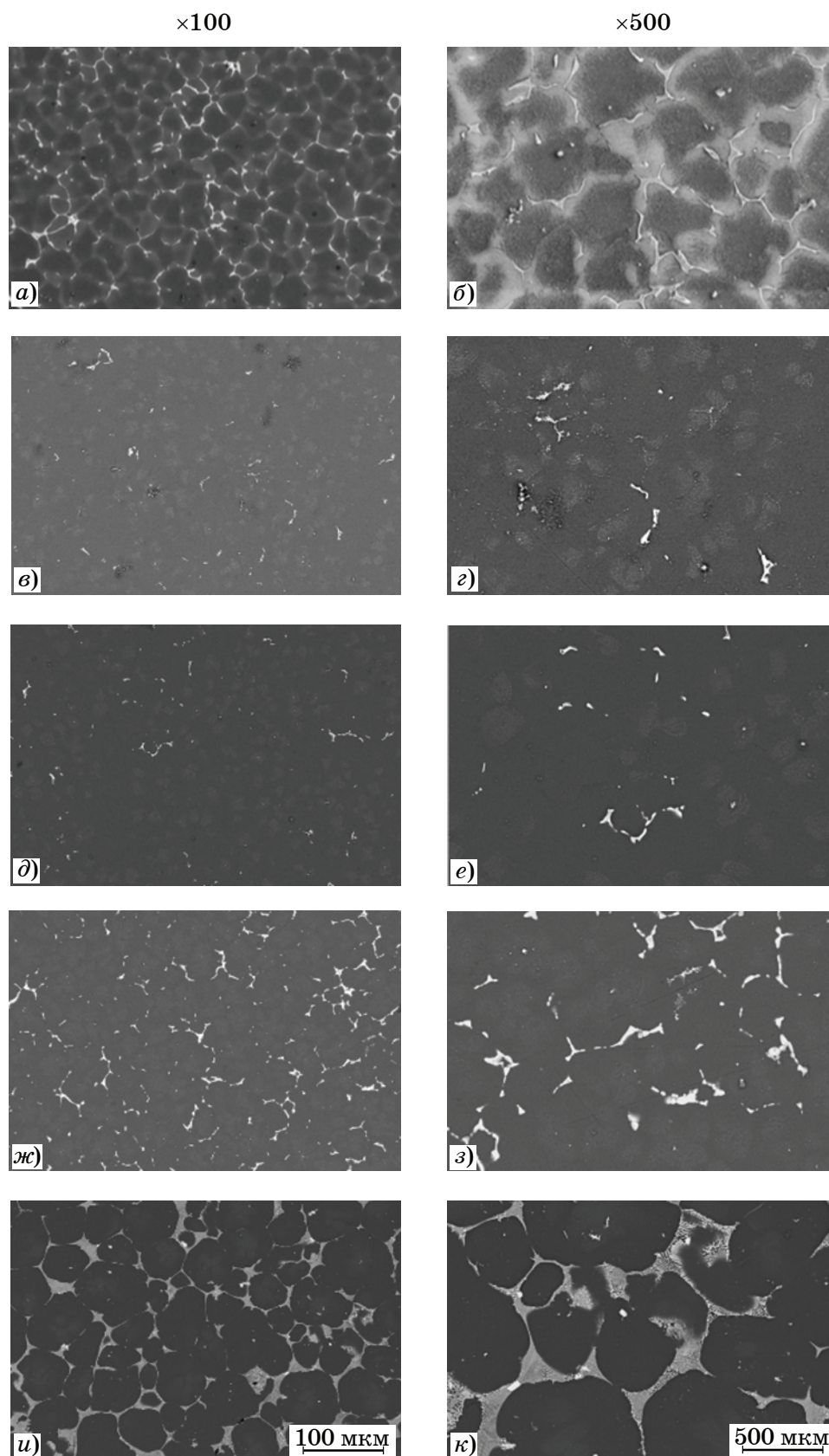
Результаты исследований и их обсуждение. С целью достижения стабильно высоких прочностных характеристик сплава проведены исследования влияния ряда технологических параметров термической обработки (ТО), в том числе температуры нагрева под закалку и условий охлаждения (табл. 1).

Известно, что для сплавов на основе магния характерна относительно малая скорость прохождения диффузионных процессов, поэтому для достижения повышенных механических характеристик температуру нагрева под закалку выбирают близкой к температуре солидуса сплава. Температура нагрева под закалку зависит от состава сплава и чем она выше, тем больше растворимость компонентов и выше скорость их растворения в твердом растворе. Длительность выдержки при температуре нагрева под закалку зави-

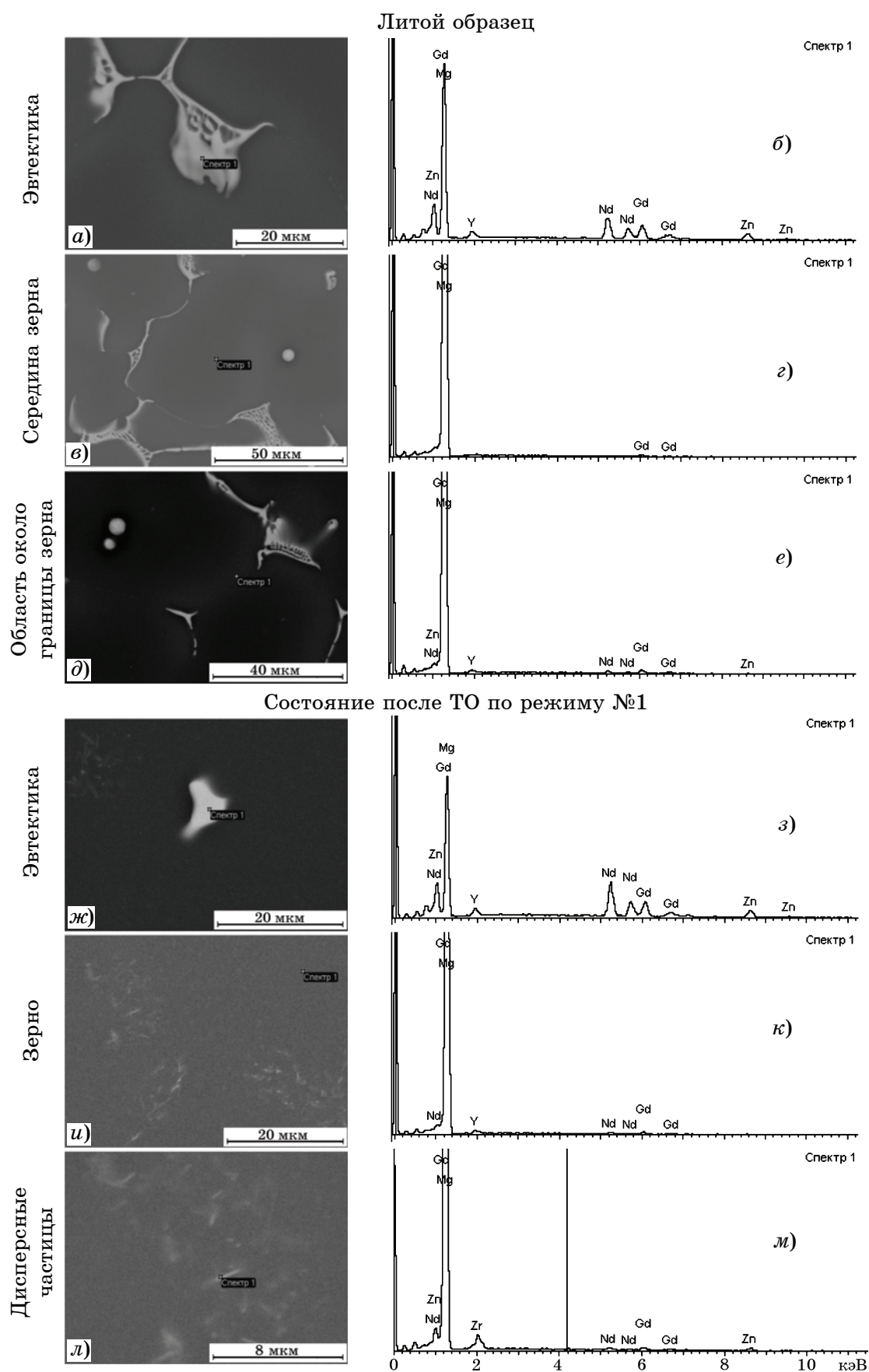
сит от скорости растворения упрочняющих фаз, которая определяется не только составом сплава, но и размером зерна. Сплавы на основе системы Mg-Zr имеют мелкое и однородное зерно, поэтому максимальная длительность выдержки при температуре нагрева под закалку для этих сплавов может быть небольшой. В качестве охлаждающей среды магниевых сплавов при закалке используют воздух (спокойный воздух либо обдув сжатым воздухом), а также горячую воду с температурой ≥ 80 °С. Закалка в горячую воду способствует повышению упругих свойств после старения сплавов. Наиболее чувствительны к скорости закалки сплавы системы Mg-РЗМ (скорость переноса садки из печи в ванну).

Для получения информации об элементном составе и распределении фаз в материале исследования проводили на растровом электронном микроскопе, оснащенный энергодисперсионным спектрометром для электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА). Изображения микроструктуры образцов получены в режиме отраженных электронов. Контраст изображения определяется средним атомным номером области (фазы): чем выше средний атомный номер исследуемой области (фазы), тем светлее данный участок выглядит на фотографии. Таким образом, на фотографиях исследованных образцов матрица сплава — твердый раствор легирующих элементов в магнии — имеет серый цвет, а цвет частиц интерметаллидных фаз, богатых легирующими элементами, белый.

Микроструктура образцов и данные качественного ЭЗМА приведены на фиг. 1, 2.



Фиг. 1. Микроструктура образцов сплава ВМЛ26 в литом состоянии (а, б) и после ТО по режимам №1 (в, г), №2 (д, е), №3 (ж, з), №4 (и, к)



Фиг. 2. Данные качественного ЭЗМА структурных составляющих сплава ВМЛ26 в литом и термообработанном по режиму №1 состояниях: а, в, д, ж, и, л — области анализа; б, г, е, з, к, м — спектры характеристического рентгеновского излучения

Таблица 2

**Механические свойства* при температуре 20 °С
пожаробезопасного высокопрочного литейного
магниевого сплава ВМЛ26 в разных состояниях**

Образец сплава	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	МПа		
Литой	195	90	5,5
После ТО по режимам:			
№1	300	190	1,9
№2	285	130	2,0
№3	275	120	3,4
№4	260	85	4,1

*Минимальные значения.

По результатам исследований установлено следующее. Микроструктура в литом состоянии (фиг. 1, а, б) представлена равноосными зернами твердого раствора легирующих элементов в магнии с ярко выраженной эвтектической фазой, состоящей из образований, прерывисто декорирующих границы литого зерна.

После ТО по режимам №1 (фиг. 1, в, г) и №2 (фиг. 1, д, е) микроструктура образцов мелкокристаллическая, при этом в теле и по границам зерен отмечается равномерное распределение скоплений мелкодисперсных частиц интерметаллидов разной морфологии; характер их ориентации в структуре свободный, что может быть свидетельством их первичной кристаллизации из расплава с дальнейшим нарастанием вокруг них зерен основной магниевой фазы.

В образцах после ТО по режимам №3 (фиг. 1, ж, з) и №4 (фиг. 1, и, к) в отличие от других режимов ТО, когда эвтектика почти полностью растворяется, эвтектическая фаза растворяется частично и коагулирует, причем в большей степени этому способствует ТО по режиму №4. В этом случае эвтектика состоит из крупных образований, причем в объеме сохраняются ее расположение и характер прерывистого декорирования границ зерен.

Результаты качественного ЭЗМА структурных составляющих сплава ВМЛ26 в литом состоянии и состоянии после ТО по режиму №1 показали следующее: элементный состав эвтектики до и после ТО идентичен; элементный состав твердого раствора в литом состоянии неоднородный: в центре зерна это твердый раствор гадолиния в магнии, а ближе к границе зерна отмечается присутствие цинка, неодима и иттрия. Термическая обработка выравнивает элементный состав твердого раствора зерна сплава. Элементный состав упрочняющих частиц идентичен составу эвтектики.

В табл. 2 приведены результаты испытаний по определению механических свойств при комнатной температуре сплава ВМЛ26 после ТО по исследуемым режимам.

В результате анализа полученных механических свойств и изображений микроструктуры сплава ВМЛ26, обработанного по разным режимам ТО, установлено, что наилучшим значением прочности сплав обладает после ТО по режиму №1. Если сравни-

вать с режимом №2, то это обусловлено более высокой температурой выдержки сплава перед закалкой (560 вместо 540 °С), при которой более полно растворяется упрочняющая фаза в твердом растворе, а использование вместо охлаждения на воздухе по режиму №2 охлаждения в горячей воде способствует в большей степени сохранению высокотемпературной структуры сплава при комнатной температуре, что затем при старении сплава обеспечивает распад пересыщенного твердого раствора и выделение высокодисперсных частиц упрочняющей фазы по границам и внутри зерен твердого раствора. Таким образом, ТО по режиму №2 (нагрев под закалку до температуры 540 °С с охлаждением после закалки и старения на воздухе) менее эффективна, а режимы №3 и №4 (закалка без искусственного старения) приводят к недостаточному повышению прочности и снижению пластичности сплава по сравнению со сплавом в литом состоянии.

Проведено исследование сплава, термообработанного по режиму №1, на прочность по ГОСТ 10145 в условиях длительной выдержки в течение 100 ч при температуре 250 °С. При этом создаваемое напряжение варьировалось от 115 до 130 МПа. Результаты испытаний представлены в табл. 3. Из них следует, что образцы сплава ВМЛ26, термообработанные по режиму №1, выдерживают нагрузку в диапазоне 120—125 МПа в течение 100 ч без разрушения.

Определена огнестойкость образцов пожаробезопасного литейного магниевого сплава. Для испытаний использовались газовая горелка по ГОСТ 21204—97 с диаметром сопла 40 мм, обеспечивающая создание факела пламени с температурой 1100±50 °С, и комп-

Таблица 3

Длительная прочность при температуре 250 °С при разном напряжении σ экспериментальных образцов пожаробезопасного высокопрочного литейного магниевого сплава ВМЛ26

σ , МПа	Время*, ч
130	86—95
125	100—107
120	105—124
115	148—156

*Минимальное и максимальное время, которое образец сплава выдержал при испытании.

лект приспособлений для закрепления испытываемого образца. Источником воспламенения служила горелка типа горелки Бунзена диаметром 10 мм. Испытания проводили на образцах сплава ВМЛ26 толщиной от 3 до 5 мм. Результаты представлены в табл. 4 (для сравнения приведены данные для образцов сплава МЛ10 толщиной до 7 мм).

Таблица 4

Температура воспламенения образцов магневых сплавов разной толщины b

Сплав	b , мм	Температура на образце при воспламенении в точке воздействия пламени, °С	Время остаточного горения, мин
ВМЛ26	3	805—850	0,5—1,0
	5	860—890	1,0—2,0
	7	900—945	2,5—3,5
МЛ10	3	650—700	1,0—1,5
	5	710—730	1,0—2,5
	7	750—770	2,0—3,5

По результатам исследований температуры воспламенения установлено, что при воздействии пламени толщина образца заметно влияет на время остаточного горения материала. Образцы толщиной 3 мм быстро нагреваются, но при этом имеют минимальное время остаточного горения по сравнению с образцами толщиной 5—7 мм. Средняя длительность воздействия пламени составила: 1,5 мин на образцы толщиной 3 мм, 2 мин на образцы толщиной 5 мм и 2,5 мин на

образцы серийного жаропрочного литейного магниевого сплава МЛ10 толщиной 7 мм.

Из результатов видно, что температура воспламенения образцов сплава МЛ10 на 150 °С ниже, чем у сплава ВМЛ26, но время остаточного горения практически одинаковое. Возможно, фазовый состав сплава ВМЛ26, включающий интерметаллиды РЗМ с высокой температурой плавления, позволяет повысить температуру воспламенения и жаропрочность данного сплава по сравнению со сплавом-аналогом по применению.

Для определения критерия воспламеняемости необходимы дальнейшие исследования с проведением количественного рентгеноспектрального микроанализа и изучением фазового состава сплава ВМЛ26.

Выводы. 1. Проведенные исследования позволили выбрать режим термической обработки (ТО) пожаробезопасного высокопрочного литейного магниевого сплава ВМЛ26, обеспечивающий одновременно высокие прочностные свойства при комнатной температуре и жаропрочность.

2. Применение в процессе ТО нагрева под закалку до температуры 560 °С и охлаждения в горячей воде с последующим старением приводит при закалке к более полному растворению содержащей РЗМ упрочняющей фазы в твердом растворе, а при старении — к образованию упрочняющих мелкодисперсных соединений как внутри зерна, так и по его границам.

3. Высказано предположение, что повышение порога воспламеняемости сплава ВМЛ26 связано с комплексным легированием сплава редкоземельными металлами. Это делает возможным расширение области применения сплава при повышенных температурах, а также увеличение безопасности эксплуатации транспортных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозова, Г.И. Наноструктурное упрочнение литейных магневых сплавов системы Mg-Zn-Zr / Г.И. Морозова, И.Ю. Мухина // МнТОМ. 2011. №11. С.3—7.
2. Мухина, И.Ю. Структура и свойства сплавов системы Mg-Al-Zr при литье в кокиль и формы из ХТС / И.Ю. Мухина, Б.Л. Бобрышев, В.В. Антипов, А.О. Кошелев, Д.Б. Бобрышев // Литейн. пр-во. 2014. №8. С.6—10.
3. Мухина, И.Ю. Влияние легирования РЗМ на жаропрочность литейных магневых сплавов / И.Ю. Мухина, В.А. Дуюнова, А.В. Фролов, З.П. Уридия // Металлургия машиностроения. 2014. №5. С.34—38.

4. Дуюнова, В.А. Особенности влияния качественного и количественного соотношения редкоземельных элементов в новом пожаробезопасном литейном магниевом сплаве / В.А. Дуюнова, А.А. Леонов, Н.В. Трофимов, А.С. Ростовцева // *Металлы*. 2021. №6. С.34—38. — (V.A. Duyunova, A.A. Leonov, Trofimov, N.V., A.S. Rostovtseva, «Effect of qualitative and quantitative ratios of rare-earth elements in a new fireproof cast magnesium alloy». *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021. №11. P. 1409—1412.)
5. Рохлин, Л.Л. Закономерности влияния различных редкоземельных металлов в магниевых сплавах на их прочностные свойства / Л.Л. Рохлин // *Вестн. Концерна ВКО «Алмаз-Антей»* 2020. №3 (34). С.38—44.
6. Дуюнова, В.А. Исследования влияния редкоземельных элементов и термической обработки на структуру и свойства жаропрочного литейного магниевого сплава системы Mg-РЗМ-Zr / В.А. Дуюнова, А.А. Леонов, Н.В. Трофимов // *Металлы*. 2020. №5. С.58—63. — (V.A. Duyunova, A.A. Leonov, N.V. Trofimov. «Effect of rare-earth elements and heat treatment on the structure and properties of a heat-resistant cast Mg-REM-Zr magnesium alloy». *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020. №9. P. 982—986.)
7. Уридия, З.П. О герметизации отливок из магниевых и алюминиевых сплавов / З.П. Уридия, И.Ю. Мухина // *Литейн. пр-во*. 2012. №2. С.34—38.
8. Волкова, Е.Ф. Новое решение проблемы защиты магниевых сплавов от воспламенения / Е.Ф. Волкова, С.Л. Барботько, О.И. Обрезков, Б.А. Вершок // *Технология легких сплавов*. 2010. №1. С.151—156.
9. Мухина, И.Ю. Магний — основа сверхлегких материалов / И.Ю. Мухина, З.П. Уридия // *Металлургия машиностроения*. 2005. №6. С.29—31.
10. Каблов, Е.Н. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевого сплава МЛ9 в литом и термообработанном состоянии / Е.Н. Каблов, М.В. Акинина, Е.Ф. Волкова, И.В. Мостяев, А.А. Леонов // *Авиаци. матер. и технол.* 2020. №2 (59). С.17—24. DOI : 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
11. Пат. 2753660 РФ : С22С23/04, С22С23/06. Пожаробезопасный высокпрочный литейный магниевый сплав / Каблов Е.Н., Трофимов Н.В., Леонов А.А., Уридия З.П., Дуюнова В.А. ; заявитель ВИАМ. — №2020136001 ; заявл. 02.11.2020 ; опубл. 19.08.2021.
12. Мухина, И.Ю. Развитие ресурсосберегающих технологических процессов в металлургии магния / И.Ю. Мухина, Н.В. Трофимов, А.А. Леонов, А.С. Ростовцева // *Металлы* 2021. №6. С.16—25. — (I.Y. Mukhina, N.V. Trofimov, A.A. Leonov, A.S. Rostovtseva. «Development of resource-saving technological processes in the metallurgy of magnesium». *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021. №11. P. 1394—1401.)
13. Кечин, В.А. Пути повышения эффективности применения магниевых сплавов / В.А. Кечин // *Литейщик России*. 2008. №7. С.17—20.