

## ПОЛЗУЧЕСТЬ УЛЬТРАЛЕГКИХ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

С.И. Ильин, Ю.Д. Корягин, И.В. Лапина

## CREEP OF ULTRALIGHT MAGNESIUM ALLOYS AT LOW TEMPERATURES

S.I. Ilyin, Yu.D. Koryagin, I.V. Lapina

Показано, что ползучесть двухфазных сплавов системы Mg–Li при комнатной температуре происходит в две стадии. Установлена линейная зависимость скорости установившейся ползучести от напряжения при испытаниях, что свидетельствует о диффузионном характере этого вида ползучести. Показано, что ползучесть на установившейся стадии связана с пределом текучести обратно пропорциональной зависимостью.

*Ключевые слова:* сверхлегкие сплавы, магниевые сплавы, ползучесть, механизмы ползучести.

**It is shown that creep of two-phase alloys of Mg–Li system at room temperature occurs in two stages. A linear relation is established between the steady-state creep rate and test stress, which is the evidence of diffusional character of this type of creep. It is shown that steady-state creep is inversely proportional to yield strength.**

*Keywords:* ultralight alloys, magnesium alloys, creep, creep mechanisms.

Сверхлегкие сплавы на базе системы Mg–Li обладают комплексом эксплуатационных характеристик, обуславливающих перспективность их применения в качестве конструкционных материалов для летательных аппаратов. Главное достоинство этих сплавов – рекордно малая для металлических материалов плотность и высокая удельная прочность. Благодаря малой плотности конструкции того же веса, что и из сплавов на другой основе, имеют значительно более высокую жесткость. Магниево-литиевые сплавы вдвое легче алюминиевых сплавов, на 10–15 % легче стандартных магниевых сплавов и на 30 % легче бериллиевых. Применение магниево-литиевых сплавов в ракетно-космической технике позволяет снизить массу некоторых частей ракеты на 20–30 % и более [1–3].

В данной работе изучены процессы ползучести магниево-литиевого сплава MA21 при длительных выдержках при комнатной температуре. Сплав MA21 является двухфазным и после упрочняющих обработок находится в структурно-нестабильном состоянии [4, 5]. При длительных выдержках при комнатных температурах и при технологических нагревах в сплаве наблюдается снижение прочностных характеристик ниже допустимого уровня.

Ползучесть в сплаве MA21 состава (%): 8,0 Li; 5,24 Al; 1,48 Zn; 0,25 Mn; 4,49 Cd; 0,064 Ce; остальное – Mg измеряли при постоянных нагрузках и комнатной температуре стрелочными индикаторами. Напряжение на образцах при испытаниях составляло от 26 до 86,7 МПа при базе испытания

до 1000 часов. Кривые ползучести приведены на рис. 1. Как видно из приведенных кривых при малых нагрузках четко наблюдаются две стадии ползучести. На первой неустановившейся стадии скорость ползучести непрерывно увеличивается и переходит ко второй установившейся стадии с постоянной скоростью. При максимальной нагрузке (86,7 МПа) вторая стадия быстро переходит к третьей стадии ускоренной ползучести.

Для выяснения закона ползучести кривые ползучести представили в логарифмических координатах. Оказалось, что только начальный участок, соответствующей неустановившейся ползучести в сплаве MA21 становится линейным, и, следовательно, только неустановившаяся ползучесть подчиняется закону логарифмической ползучести.

Зависимость скорости ползучести сплава MA21 на установившейся стадии, рассчитанная по кривым, приведенным на рис. 1, от величины приложенного напряжения представлена на рис. 2. Видно, что при относительно малых напряжениях, когда нет перехода к третьей стадии, наблюдается линейная зависимость скорости установившейся ползучести от напряжения. Этот факт свидетельствует о том, что при малых напряжениях наблюдается диффузионная ползучесть.

Отметим, что сплав MA21 является двухфазным, т. е. его структура представляет  $\alpha$ -твердый раствор (с ГПУ-решеткой) и  $\beta$ -твердый раствор (ОЦК) с многосвязной системой межзеренных границ. Процессы диффузии различных механиз-

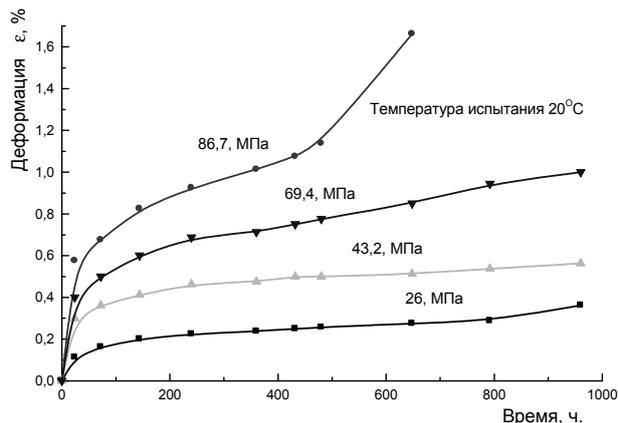


Рис. 1. Кривые ползучести сплава МА21 при разных нагрузках (значения напряжения при ползучести указаны на кривых)

мов в этом случае многократно облегчаются, поскольку могут происходить как по межфазным границам, так и по межзерненным границам. Кроме того, в сплаве МА21 установлено существование метастабильной фазы  $\theta$ , имеющей ГЦК-решетку и отвечающей составу  $MgLi_2Al$ . Эта фаза в процессе естественного старения и нагрева может превращаться в фазу  $AlLi$ , что также сопровождается диффузионными процессами [5, 6].

В пользу диффузионного механизма установившейся ползучести свидетельствует и уменьшение плотности образцов сплава МА21 в процессе ползучести, определенной методом гидростатического взвешивания. На рис. 3 приведена зависимость плотности  $\rho$  от величины приложенного напряжения  $\sigma$ .

Сравнивая кривые ползучести, полученные для образцов с различным структурным состоянием, и скорости ползучести на установившейся стадии, соответствующие этим образцам, можно отметить определенную корреляцию между пределом ползучести и прочностными свойствами сплава. В частности, наименьшей скоростью ползучести и соответственно наибольшим значением предела ползучести обладает сплав с наибольшими

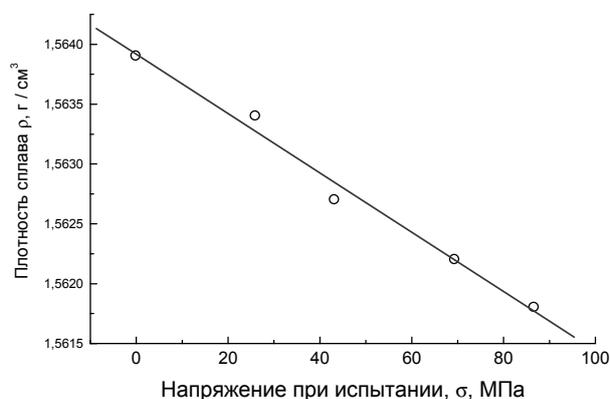


Рис. 3. Изменение плотности сплава МА21 в процессе ползучести от величины напряжения при испытании

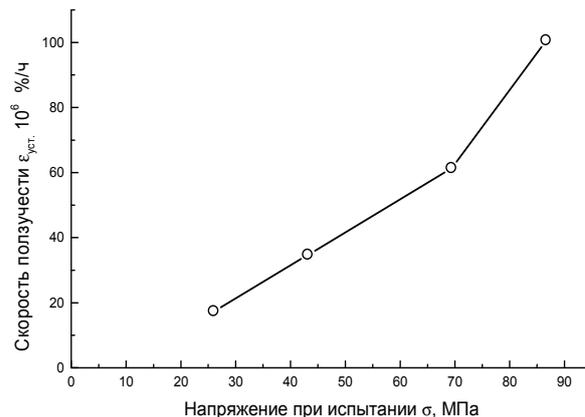


Рис. 2. Зависимость скорости установившейся ползучести  $\epsilon_{уст}$  от напряжения при испытании  $\sigma$

значениями предела текучести и прочности. Сплав МА21 в исходном состоянии, обладая наименьшими прочностными характеристиками, отличается наибольшей деформацией ползучести и скоростью ползучести на установившейся стадии. Зависимость скорости ползучести на установившейся стадии от предела текучести сплава МА21 представляет обратно пропорциональную зависимость  $\epsilon_{уст}$  от  $\sigma_{0.2}$ .

Для оценки линейности связи между скоростью ползучести на установившейся стадии и пределом текучести сплава МА21 построили корреляционный график в координатах  $\epsilon_{уст}$  от  $\sigma_{0.2}$ , который представлен на рис. 4. Экспериментальные точки ложатся на прямую линию с незначительным рассеиванием.

Таким образом, можно заключить, что процессы низкотемпературной ползучести сплава МА21 на начальной стадии неустановившейся ползучести подчиняются закону логарифмической ползучести, а на установившейся стадии проходят по механизму диффузионной ползучести.

Таким образом, наиболее низкие значения установившейся ползучести сплава МА21 можно достигать путем повышения его предела текуче-

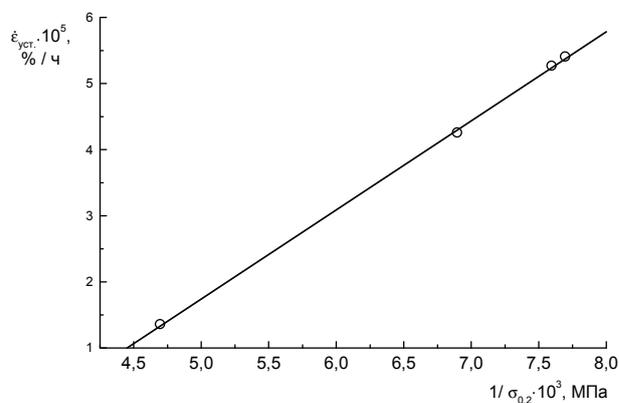


Рис. 4. Корреляционный график между скоростью установившейся ползучести сплава МА21 и  $1/\sigma_{0.2}$

Механические характеристики и сопротивление ползучести сплава МА21

Обработка	Механические свойства			Скорость ползучести на установившейся стадии (%/ч) при напряжении		
	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , МПа	9,8 МПа	29,4 МПа	49 МПа
Гор. шт.	217	150	18,3	$6,2 \cdot 10^{-7}$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$11,8 \cdot 10^{-5}$
Закалка	286	196	12,2	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$
ВТМО	315	237	8,9	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$

сти. Для подтверждения этого положения провели испытания на ползучесть сплава МА21 в горячештампованном состоянии, а также после закалки от 380 °С и ВТМО с деформацией 60 % при температуре нагрева под закалку. Образцы с диаметром рабочей части 8 мм и длиной расчетной части 100 мм испытывали на машине ZST 3/3 согласно ГОСТ 3248–81. По результатам испытаний строили кривые ползучести и определяли скорость ползучести на установившейся стадии. Исследование длительной ползучести проводилось при напряжениях, взятых с учетом фактического уровня длительно действующих напряжений в силовых конструкциях из сплава МА21, которые составляют 4,9–53,9 МПа. Механические свойства и характеристики ползучести сплава МА21 приведены в таблице.

Отметим, что при выбранной базе испытаний 1000 ч и напряжениях 9,8–49 МПа не наблюдалось разрушения образцов. Закалка сплава обеспечивает заметное понижение скорости ползучести по сравнению с горячештампованным состоянием; еще в большей мере скорость ползучести уменьшается после ВТМО.

Таким образом, вышеприведенные данные убедительно показывают, что термические и термомеханические обработки сплава МА21 являются эффективными способами, обеспечивающими уменьшение скорости ползучести и сохранение прочностных характеристик изделий из сверхлегкого

магниево-литиевого сплава на более длительный срок эксплуатации.

#### Литература

1. Магниево-литиевые сплавы / М.Е. Дриц, Ф.М. Ёлкин, И.И. Гуров и др. – М.: Металлургия, 1980. – 140 с.
2. Магниево-литиевые сплавы: справ. Ч 1: Металловедение магния и его сплавов, области применения / под ред. М.Б. Альтмана и др. – М.: Металлургия, 1975. – 232 с.
3. Рохлин Л.Л. Магниево-литиевые сплавы, содержащие редкоземельные металлы / Л.Л. Рохлин. – М.: Наука, 1980. – 199 с.
4. Влияние термомеханической обработки на кинетику старения и механические свойства двухфазного магниево-литиевого сплава МА21 / Ю.Д. Корягин, М.М. Штейнберг, Н.Т. Карева, Т.Н. Болдина // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 1980. – № 5. – С. 68–72.
5. Корягин, Ю.Д. О стабильности структурного состояния сверхлегкого магниево-литиевого сплава МА21 / Ю.Д. Корягин, С.И. Ильин // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 1982. – № 2. – С. 94–97.
6. Гурьев, И.И. Ползучесть и длительная прочность магниево-литиевых сплавов / И.И. Гурьев, Ф.М. Ёлкин, Н.А. Воробьев // Технология легких сплавов. – 1973. – № 3. – С. 26–29.

Поступила в редакцию 23 ноября 2011 г.