

# СОТНОШЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ТЕКУЧЕСТИ ПРИ СЖАТИИ И РАСТЯЖЕНИИ У ШТАМПОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДВУХФАЗНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Mg-Li-Al

*В.М. Елгин, А.А. Звонкое, Ю.Д. Корягин,  
Д.А. Мирзаев, Х.М. Ибрагимов, К.Ю. Окишев*

Как правило [1, 2], двухфазные сплавы системы Mg-Li-Al имеют содержание лития между 5 и 11 %. Двухфазными ( $\alpha+\beta$ ) их называют, основываясь на фазовом составе после кристаллизации. В ходе охлаждения из каждой фазы может выделиться небольшое количество интерметаллидных фаз типа (Al, Zn)Li, MgLi<sub>2</sub>Al или Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>. Поэтому термообработанные сплавы могут в действительности состоять из 4...5 фаз.

Важной механической характеристикой сплавов, необходимой для расчетов на прочность, является предел текучести. Конструкторы обычно считают, что пределы текучести на сжатие и растяжение равны. Но это допущение не вполне точно. Рассмотрим данные [1, 2] о пределах текучести подобных сплавов, представленные в табл. 1.

Обращает на себя внимание то, что отношение  $\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2}$  для двухфазных сплавов оказывается того же типа, что и для  $\beta$ -фазы. Среди про-

мышленных сплавов на двухфазной основе широкое распространение получили сплавы MA21 (7...10 % Li; 4...6 % Al; 3...5 % Cd; 0,8...2 % Zn; 0,15...0,5 % Mn) и MA21-1 (7...9 % Li; 4...6 % Al; 2...4 % Sn; 0,8...2 % Zn; 0,15...0,5 % Mn).

Сплав MA21-1, по существу, эквивалентен сплаву MA21. Оба сплава легко поддаются обработке давлением при температурах 240...300 °С. По своим прочностным характеристикам они несколько уступают магниево-литиевым сплавам на основе  $\alpha$ -фазы, но существенно превосходят богатые литием сплавы на основе  $\beta$ -фазы. В табл. 2 приведены пределы текучести этих сплавов после различных обработок.

В лабораториях материаловедения КБМ и ЮУрГУ было проведено систематическое исследование механических свойств пресованных деталей из сплава MA21 в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Не приводя конкретных данных для пределов текучести, укажем только отно-

Таблица 1  
Пределы текучести на сжатие и растяжение двухфазных ( $\alpha+\beta$ ) сплавов на Mg-Li основе

Состав сплавов	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{-0,2}$ , МПа	$\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2}$
Термически обработанные сплавы			
7Li-3Al	308	315	1,022
9Li-2Al	203	224	1,103
9Li-6Al	231	245	1,060
7Li-2Al-3Zn	189	224	1,185
9Li-2Al-7Zn	392	413	1,060
9Li-6Al-7Zn	357	364	1,020
Термообработка + холодная прокатка + старение 108 °С, 48 ч			
7Li-2Al-7Zn	252	273	1,080
7Li-4Al-7Zn	294	301	1,024
7Li-6Al	259	301	1,160
9Li-6Al-3Zn	203	224	1,103
9Li-8Al-12Zn	238	287	1,206

Таблица 2  
Пределы текучести сплавов MA21 и MA21-1

Состояние сплава	MA21-1			MA21		
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{-0,2}$ , МПа	$\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{-0,2}$ , МПа	$\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2}$
Горячепрессованные прутки	180...220	240...280	1,33...1,27	170...210	220...260	1,23...1,24
Прутки, отожженные при 175 °С, 6 ч	160...200	190...230	1,19...1,15	160...200	180...220	1,13...1,10
Горячекатаные листы вдоль НП	170...210	200...240	1,18...1,14	170...210	200...240	1,18...1,14

шения  $\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2}$  для трех взаимно перпендикулярных направлениях для большой серии образцов:

Ось I	1,34; 1,25; 1,33; 1,25; 1,33; 1,286; 1,179; 1,22; 1,36; 1,353; 1,271; 1,356
Ось II	1,25; 1,34; 1,20; 1,34; 1,21; 1,216; 1,349; 1,361; 1,408; 1,294; 1,267; 1,31
Ось III	1,27; 1,19; 1,31; 1,19; 1,247; 1,244; 1,337; 1,20; 1,459; 1,349; 1,367; 1,28

Средние значения отношения  $\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2} = 1,29$ ; 1,30;  $1,28 \pm 0,02$  соответственно вдоль каждой оси. По существу оказалось, что в среднем  $\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2} \approx 1,29$  и не зависит от направления вырезки образцов. А это означает, что кристаллографическая текстура, которая существенно влияла на отношение пределов текучести  $\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2} < 1$  для  $\alpha$ -сплавов с ГПУ решеткой, не оказывает такого воздействия в случае двухфазных сплавов. Более того, сама текстура  $\alpha$ -фазы после прессования проявляется слабо. Хотя систематических дифракционных исследований текстуры мы не проводили, но оценочный эксперимент был выполнен. Головка разрывного образца была помещена плоской гранью в держатель образца дифрактомера ДРОН-0.5, а затем счетчик и образец были установлены в отражающее положение для рефлекса 004 ( $2\theta = 96^\circ$ ). Затем счетчик и образец разъединили и наблюдали за изменением интенсивности по мере поворота образца. Изменение было относительно слабым и обусловлено, главным образом, эффектом дефокусировки. Текстура  $\alpha$ -фазы почти отсутствовала, вероятно, потому, что деформация в процессе прессования при 280 °С происходила главным образом в  $\beta$ -фазе. Сплав Mg-5 % Li ( $\alpha$ -сплав) имеет при комнатной температуре предел текучести около 140 МПа,  $\beta$ -сплав Mg-14 % Li – около 80 МПа, то есть в 1,7 раза ниже. Но при температуре испытания 200 °С для первого  $\alpha$ -сплава  $\sigma_{0,2} \approx 25$  МПа, а для второго  $\beta$ -сплава менее 5 МПа [2]. С повышением температуры  $\beta$ -фаза разупрочняется существенно сильнее, что обусловлено более низкими температурами плавления и меньшей энергией активации диффузии вакансий. Особенности микроструктуры исследуемого сплава МА21 также дают основания заключить, что пластическая деформация при прессовании проходила в основном в  $\beta$ -фазе. Ее кристаллы вытянуты, сплюснены, часто окаймляют тонкой прослойкой зерна  $\alpha$ -фазы. Напротив,  $\alpha$ -кристаллы приблизительно равноосны, они почти сохранили ту же форму, которая наблюдалась в литом состоянии. Деформация  $\beta$ -фазы проходит неоднородно. Наряду с прослойками между  $\alpha$ -зернами, утонченными до предела, имеются протяженные довольно широкие участки  $\beta$ -фазы, как бы зажатые между  $\alpha$ -зернами.

Мы можем указать несколько процессов, при-

водящих к росту отношения  $\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2}$  в двухфазных сплавах. Один, уже отмеченный, эффект подавления текстуры в ГПУ фазе, второй – выделение частиц интерметаллидных фаз в ходе штамповки. И, наконец, третий – это неодинаковый механизм начала деформации при сжатии и растяжении. В условиях сжатия нагрузку воспринимает жесткий каркас из зерен  $\alpha$ -фазы, контактирующих непосредственно между собой или через упрочненные тонкие прослойки  $\beta$ -фазы. При растяжении деформируются, в первую очередь, мягкие округлые участки  $\beta$ -фазы. Заметим, что отношение  $\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2}$  должно зависеть от объемной доли  $\beta$ -фазы, а значит от содержания лития в сплаве. Колебания концентрации лития в пределах марочного состава будут приводить к изменению отношения  $\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2}$ .

Рассмотрим количественные оценки. М.А. Штрель [3] показал, что если различие пределов текучести двух фаз порядка два или меньше, то некоторые зерна прочной фазы текут раньше, чем невыгодно ориентированные зерна мягкой. Тогда предел текучести линейно меняется в зависимости от объемных долей двух фаз в сплаве:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}^{\alpha} \cdot f_{\alpha} + \sigma_{0,2}^{\beta} \cdot f_{\beta}; \quad (1)$$

$$\sigma_{-0,2} = \sigma_{-0,2}^{\alpha} \cdot f_{\alpha} + \sigma_{-0,2}^{\beta} \cdot f_{\beta}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{0,2}^{\alpha}$ ;  $\sigma_{-0,2}^{\alpha}$ ;  $\sigma_{0,2}^{\beta}$ ;  $\sigma_{-0,2}^{\beta}$  – пределы текучести при растяжении и сжатии  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз в сплаве. Таким образом

$$\frac{\bar{\sigma}_{-0,2}}{\bar{\sigma}_{0,2}} = \frac{\sigma_{-0,2}^{\alpha} \cdot f_{\alpha} + \sigma_{-0,2}^{\beta} \cdot f_{\beta}}{\sigma_{0,2}^{\alpha} \cdot f_{\alpha} + \sigma_{0,2}^{\beta} \cdot f_{\beta}}. \quad (3)$$

Уже отмечено, что для исследуемого сплава МА21 соотношение между объемными долями фаз было измерено методами металлографической стереометрии, точнее, методами секущих. Как известно [4], отношение длин отрезков прямой, пересекающих участки разных фаз, равно отношению объемных долей. Было найдено  $f_{\alpha} = 0,666$ ;  $f_{\beta} = 0,333$ .

Далее будем считать, что в силу отсутствия текстуры в ГПУ  $\alpha$ -фазе пределы текучести на растяжение и сжатие для этой фазы равны

$$\sigma_{0,2}^{\alpha} = \sigma_{-0,2}^{\alpha}. \quad (4)$$

У  $\beta$ -фазы предел текучести при сжатии выше, чем при растяжении, то есть

$$\sigma_{-0,2}^{\beta} = m \cdot \sigma_{0,2}^{\beta}, \quad (5)$$

где  $m$  – коэффициент, постоянный для данного сплава, но несколько изменяющийся при переходе от одного сплава к другому в зависимости от количества  $\beta$ -фазы. И, наконец, примем, что

$$\sigma_{0,2}^{\alpha} = p \cdot \sigma_{0,2}^{\beta}, \quad (6)$$

где  $p$  – коэффициент, показывающий соотношение пределов текучести  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз;  $p > 1$ , так как  $\alpha$ -фаза

Связь параметра  $m$  и отношения  $\bar{\sigma}_{-0,2}/\bar{\sigma}_{0,2}$ 

$m$	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
$\sigma_{-0,2}/\sigma_{0,2}$	1	1,04	1,075	1,112	1,15	1,19	1,225	1,262	1,3	1,337	1,375

более прочная. Проведенные нами исследования по перераспределению элементов между фазами, а также данные работ М.Е. Дрица с сотрудниками [1, 2, 5] позволили заключить, что состав  $\beta$ -фазы близок к составу сплава МА18, тогда как  $\alpha$ -фаза имеет состав, близкий к сплаву Mg–5%Li–5%Al–4%Cd. После горячего прессования и стабилизирующего отжига при 100 °С в течение 100 часов первый сплав имеет предел текучести  $\sigma_{0,2}^{\alpha} = 137$  МПа, а второй сплав  $\sigma_{0,2}^{\alpha} = 163$  МПа. Следовательно,  $p = 1,19$ . Рассчитаем предел текучести сплава МА21:

$$\bar{\sigma}_{0,2} = 137 \cdot 0,333 + 163 \cdot 0,666 = 154 \text{ МПа.}$$

Именно такой предел текучести действительно наблюдается у исследуемого сплава в исходном состоянии. Преобразуем выражение (3) к общему виду, разделив числитель и знаменатель на  $\sigma_{0,2}^{\alpha}$ :

$$\frac{\bar{\sigma}_{-0,2}}{\bar{\sigma}_{0,2}} = \frac{f_{\alpha} + mp \cdot f_{\beta}}{f_{\alpha} + p \cdot f_{\beta}} \approx \frac{2 + mp}{2 + p}. \quad (7)$$

При  $p = 1,2$

$$\frac{\bar{\sigma}_{-0,2}}{\bar{\sigma}_{0,2}} = \frac{2 + 1,2 \cdot m}{3,2} = 0,625 + 0,375 \cdot m. \quad (8)$$

Зависимость отношения  $\bar{\sigma}_{-0,2}/\bar{\sigma}_{0,2}$  двухфазных сплавов от параметра  $m$  показана в табл. 3, которая позволяет на основе установленного в эксперименте отношения пределов текучести на сжатие и растяжение определить величину  $m$ , рав-

ную отношению пределов текучести на сжатие и растяжение, но только для  $\beta$ -фазы. Для сплава МА21 величина  $m = 1,8$ , что позволяет надежно рассчитывать отношение  $\bar{\sigma}_{-0,2}/\bar{\sigma}_{0,2}$  на основе формул (3), (6), (7).

Итак, показано, что анизотропия предела текучести в двухфазных Al–Mg–Li сплавах имеет другую природу, чем у однофазных образцов. Она обусловлена различием прочности индивидуальных фаз и формированием структуры, в которой кристаллы одной фазы окружают зерна другой, а также подавлением текстуры ГПУ фазы.

Работа поддержана грантом НШ-5965.2006.3.

### Литература

1. Сверхлегкие конструкционные сплавы / М.Е. Дриц, З.А. Свидерская, Ф.М. Елкин, В.Ф. Трохова. – М.: Наука, 1972. – 144 с.
2. Магниево-литиевые сплавы / под ред. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1980. – 140 с.
3. Штремель, М.А. Прочность сплавов. Ч. II: Деформация/М.А. Штремель–М.: МИСиС, 1997. – 527 с.
4. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография/С.А. Салтыков. — М.: Металлургия, 1976.–271 с.
5. Легкие сплавы, содержащие литий / М.Е. Дриц, Е.М. Падежнова, Н.Л. Рохлин и др. – М.: Наука, 1982. – 144 с.