

## Прочностные характеристики Mg–Li-сплавов

Д. Регенер<sup>а</sup>, В. Ткаченко<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Отто-фон-Герике университет, Магдебург, Германия

<sup>б</sup> Технический университет, Берлин, Германия

*Исследованы механические свойства Mg–Li-сплавов, полученных литьем под высоким давлением в холодной камере прессования. Изложена методика расчета основных прочностных характеристик, полученных в условиях значительных пластических деформаций. Изучена вязкость разрушения материала при квазистатической и динамической сосредоточенной нагрузке.*

**Ключевые слова:** Mg–Li-сплав, предел прочности, предел текучести, трещиностойкость, коэффициент интенсивности напряжения,  $J$ -интеграл.

**Введение.** Растущие проблемы охраны окружающей среды и вместе с тем ограничение ресурсных запасов требуют создания и внедрения новых экономически выгодных конструкционных материалов [1, 2]. Промышленное использование Mg–Li-сплавов в автомобильной индустрии обусловлено прежде всего легкостью, хорошими формовыми и литейными свойствами материала [3]. Характерное для этих сплавов оптимальное сочетание прочности и пластичности позволяет рассматривать их как потенциально перспективные материалы для производства легких конструкционных элементов автотранспорта, способных выдерживать достаточные ударные нагрузки [4, 5]. Актуальным остается вопрос о надежности таких конструкций, зависящей от прочностных характеристик материала и сопротивления пластическому деформированию при статических и динамических нагрузках.

Одна из причин отсутствия в настоящее время промышленных Mg–Li-сплавов на рынке – некоторые производственные проблемы, возникающие в процессе литья под высоким давлением этих материалов, что приводит к появлению большого количества таких дефектов, как, например, газовая и усадочная пористость, оксидные пленки, которые значительно снижают их демпфирующие свойства [6].

Целью данной работы является исследование физико-механических характеристик Mg–Li-сплавов с учетом технических аспектов литья и эксплуатационных факторов, что позволяет выбирать оптимальные материалы для легких и прочных, экономически выгодных конструкций [7].

**Методика эксперимента.** Для исследования механических характеристик использовались образцы, полученные на фирме Laukötter GmbH Dessau [8] путем литья под высоким давлением в холодной камере специальной формы (рис. 1). Состав шихты для получения литейного сплава подбирался с целью уменьшения его плотности и соответственно увеличения относительной прочности, пластических свойств и степени поглощения энергии удара. С ростом процентного содержания лития наблюдается повышение пластических свойств гексагональной кристаллической структуры магния в результате умень-

шения  $c/a$ -соотношения осей [9] и выравнивания критических напряжений сдвига базисной  $\tau_{cr(b)}$  и призматической  $\tau_{cr(p)}$  плоскостей [10]. Добавка компонентов Al и Zn приводит к увеличению прочности сплава, добавка Mn – его антикоррозионных свойств [11]. Химический состав исследуемых сплавов представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Химический состав (мас.%) исследуемых сплавов

Шихта	Li	Al	Mn	Zn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
I	9,5	0,8	0,1	0,2	0,1	0,013	0,021	0,002	91,38
II	10,7	0,6	0,14	0,35	0,067	0,017	0,03	0,0026	88,76



Рис. 1. Образцы для исследования, изготовленные по стандартам DIN 50148, EN ISO 12737.

Для определения предела прочности  $R_m$  и условного предела текучести  $R_{p0,2}$  при растяжении использовались образцы (в соответствии со стандартом DIN 50148 [12]) плоской формы с поперечным сечением  $8 \times 3$  мм и начальной расчетной длиной 55 мм (на рис. 1 образец № 1). Размеры образца для испытаний на изгиб при сосредоточенной квазистатической нагрузке [13] составляют  $10 \times 20 \times 90$  мм (на рис. 1 образец № 8), расстояние между опорами образца при нагружении – 80 мм. Размеры образца Шарпи для испытаний на ударную вязкость (Charpy-test) [14] составляют  $10 \times 10 \times 55$  мм (на рис. 1 образец № 6), расстояние между опорами образца – 40 мм.

Для изучения распространения трещины в материале и определения вязкости разрушения предварительно посередине образца с одной стороны наносился V-образный надрез глубиной 8 (для образцов № 8) и 2 мм (для образцов № 6). Затем образец подвергался действию циклических нагрузок,

что приводило к появлению усталостной трещины в вершине надреза. Испытания проводились при комнатной температуре на установках с программным управлением. Временное изменение нагрузки и смещения записывалось автоматически в ASCII-кодах. Диаграммы нагружения и результаты эксперимента записывались также автоматически и в протокольном виде выводились на печать.

Различное механическое поведение материала при деформировании в условиях плоского напряженного состояния оценивалось по диаграмме приложенная нагрузка–прогиб методом линейной механики разрушения или по диаграмме сопротивления росту трещины методом нелинейной механики разрушения. По методу линейной механики разрушения определялся коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ . Для количественной оценки процесса разрушения при упругопластической деформации в рамках энергетической концепции разрушения рассчитывался  $J$ -интеграл и строилась диаграмма трещиностойкости. Стабильное распространение трещины измеряли по методике, предложенной в [15].

Исследование металлографического шлифа после травления проводилось с помощью оптического микроскопа. Топография поверхности излома образца изучалась на РЭМ-растровом электронном микроскопе.

**Результаты анализа микроструктуры.** Металлографические снимки двух исследуемых сплавов, отличающихся содержанием легирующих элементов замещения, приведены на рис. 2. Для Mg–Li-сплава шихты I содержание лития составляет 9,5 мас.%, алюминия – 0,8 мас.%, для шихты II – 10,7 и 0,6 мас.% соответственно.

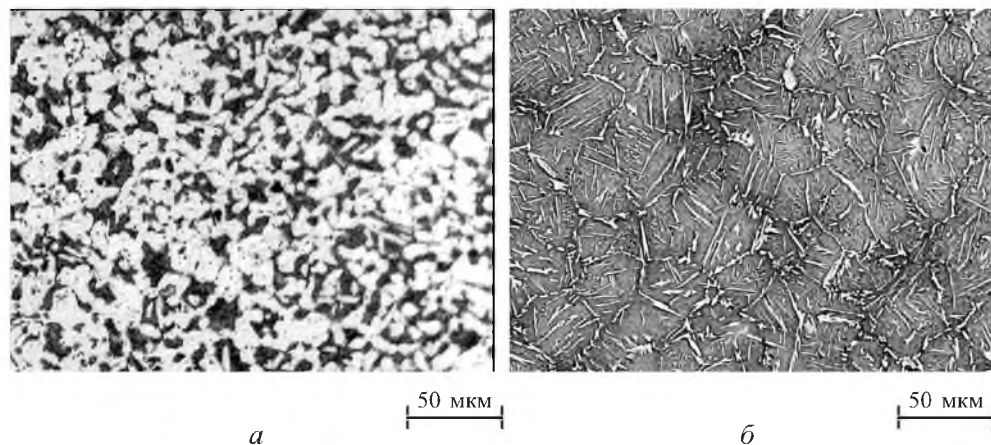


Рис. 2. Микроструктура исследуемых сплавов шихты I (а) и II (б) после травления.

Анализ микроструктуры сплавов свидетельствует о наличии двух основных фаз: одна обогащена магнием ( $\alpha$ -смешанный кристалл, твердый раствор замещения) – на рис. 2 светлые области, другая – литием ( $\beta$ -смешанный кристалл) – темные области.  $\alpha$ -фаза с максимальным содержанием Li 5,5 мас.% имеет, как и чистый магний, гексагональный (плотный) тип решетки, однако с уменьшенным соотношением осей  $c/a$ , что приводит к дуктильности, т.е. хорошей деформируемости. При содержании Mg до 89 мас.% он способен

заместить Li в  $\beta$ -фазе с ОЦК-решеткой. Таким образом, при оптимальном сочетании  $\alpha$ -фазы, обладающей высокой прочностью и низкой пластичностью, и  $\beta$ -фазы с лучшими пластическими свойствами и низкой прочностью [16] можно получить материал с хорошими механическими свойствами.

Кристаллическая структура сплавов двух шихт характеризуется многочисленной пористостью. Это обусловлено техническими проблемами, возникающими при литье под высоким давлением. На РЭМ-изображениях поверхности излома образцов (рис. 3) видны различные дефекты литья. Газовые поры проявляются в виде круглых углублений с относительно гладкой регулярной внутренней поверхностью. Усадочные полости характеризуются хаотичной (без определенной формы) поверхностью. Сотообразная структура излома указывает на хорошие пластические свойства материала [17].

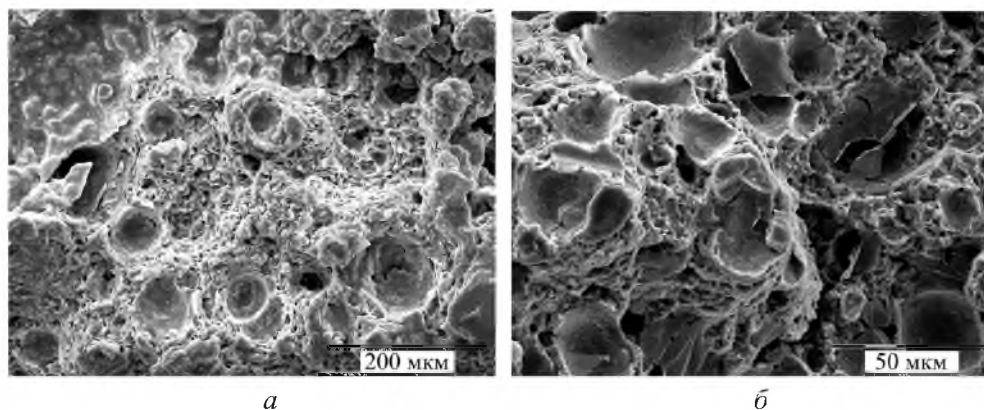


Рис. 3. РЭМ-изображения поверхности излома образцов из сплава шихты I (а) и II (б) после испытания на ударную вязкость.

**Прочностные, пластические характеристики и трещиностойкость сплавов при квазистатическом и динамическом нагружении.** Средние значения предела прочности  $R_m$ , условного предела текучести  $R_{p0,2}$  и относительного удлинения при разрыве  $A$  приведены в табл. 2. Видно, что пластические свойства двух сплавов значительно различаются. Среднее относительное удлинение образцов сплава шихты II с большим содержанием лития почти в пять раз выше такового образцов сплава шихты I с большим содержанием магния.

При испытаниях образцов на вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии (изгиб при сосредоточенной квазистатической нагрузке) фиксировались два разных типа диаграммы нагружения (рис. 4). Диаграммы, полученные при испытании образцов из сплава шихты I, свидетельствуют о разрушении по типу “скол”. На рис. 4,а представлены два типа кривых. Кривая 1 характеризуется четкой неустойчивостью и получила название pop-in-effect [18], природа которого в настоящее время малоизучена. Неустойчивость кривой свидетельствует об ограниченном нестабильном распространении трещины, которое может быть обусловлено перераспределением определенным образом дефектов во время деформаций [19]. Кривая 2 описывает ход линейно-пластической деформации, когда упругие напряжения пропор-

Т а б л и ц а 2

**Прочностные и пластические характеристики исследованных Mg-Li-сплавов при растяжении**

Шихта	$R_m$ , Н/мм <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$A$ , %
I	149	139	3,5
II	177	160	17,3

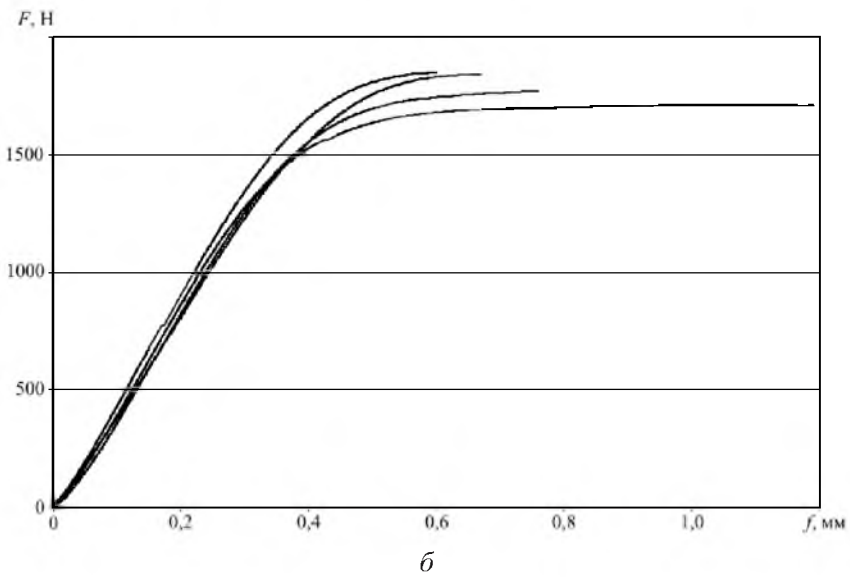
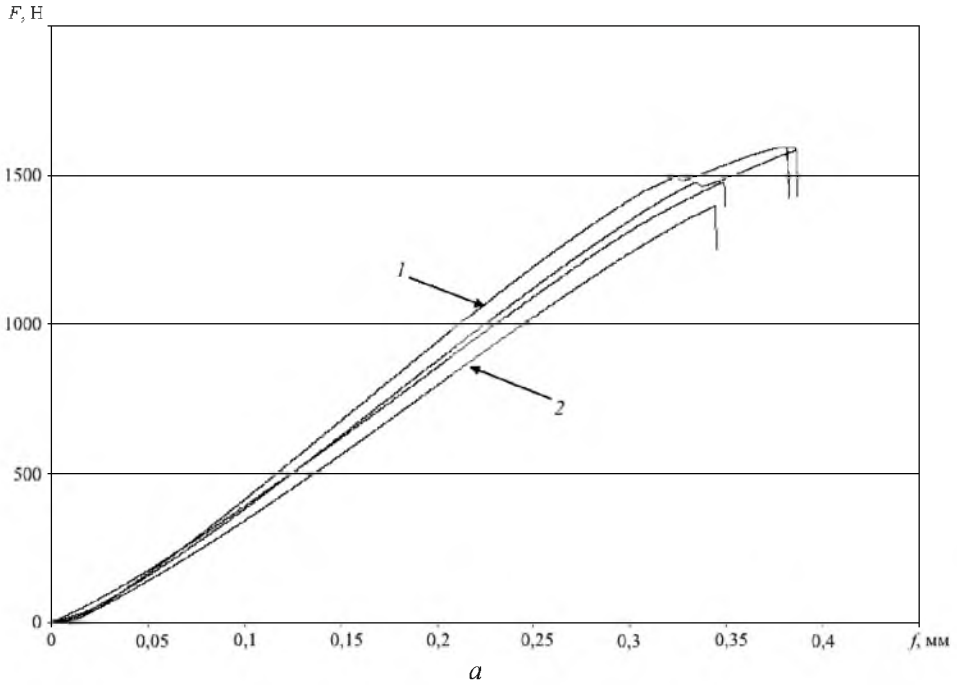


Рис. 4. Типичные диаграммы, полученные при испытании на трещиностойкость образцов из сплава шихты I (а) и II (б) при статической сосредоточенной нагрузке.



циональны внешней нагрузке. В качестве меры сингулярности напряжений в вершине трещины используется коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$ . После выборки экспериментальных данных, отвечающих критерию применимости линейно-упругой механики разрушения,

$$Ba_0(W - a_0) \geq 2,5 (K_{Ic}/R_{p0,2})^2, \quad (1)$$

определялась средняя величина критического коэффициента интенсивности напряжений при плоской деформации:

$$K_{Ic} = 9,2 \pm 0,8 \text{ (МПа}\sqrt{\text{м}}), \quad (2)$$

где  $B$  – толщина образца, в данном случае  $B = 10$  мм;  $W$  – высота образца,  $W = 20$  мм;  $a_0$  – первоначальная длина усталостной трещины в образце.

Благодаря высоким пластическим свойствам сплава шихты II, при испытаниях получены нелинейные диаграммы нагружения образцов (рис. 4, б). В этом случае понятие коэффициента интенсивности напряжений теряет смысл. В качестве средней характеристики поля напряжений и деформаций в окрестности вершины трещины принимается  $J$ -интеграл. Значения  $J$ -интеграла и величина стабильного роста трещины  $\Delta a$  определялись согласно методике, изложенной в [20]. Для построения кривой сопротивления росту трещины  $J(\Delta a)$  – рис. 5 образцы с приблизительно одинаковым соотношением  $a_0/W$  нагружались таким образом, чтобы получить разные значения  $\Delta a$ . Аппроксимирующая кривая сопротивления росту трещины определялась по формуле

$$J = c + m\Delta a^n. \quad (3)$$

Аппроксимация проводилась по экспериментальным значениям, выбранным в соответствии с условиями применимости энергетического критерия разрушения. Для этого необходимо соблюдение следующих условий:

$$\Delta a \leq 0,1 \Delta a_{\max}(W - a_0); \quad (4)$$

$$J \leq J_{\max} = a_0[(R_{p0,2} + R_m)/40]; \quad (5)$$

$$J \leq J_{\max} = B[(R_{p0,2} + R_m)/40]; \quad (6)$$

$$J \leq J_{\max} = (W - a_0)[(R_{p0,2} + R_m)/40]. \quad (7)$$

Для оценки вязкости разрушения рассчитывался параметр  $J_{0,2BL}$ , полученный при пересечении кривой сопротивления росту трещины с секущей, т.е. с так называемой линией затупления трещины (blunting line), исходящей из точки 0,2 мм на оси абсцисс. Секущая построена согласно [20] по формуле (7):

$$J = 3,75 R_m \Delta a. \quad (8)$$

Результирующее значение  $J_{0,2BL}$ , составляющее 11,9 Н/мм (рис. 5), является характеристикой материала и не зависит от размера исследуемых образцов.

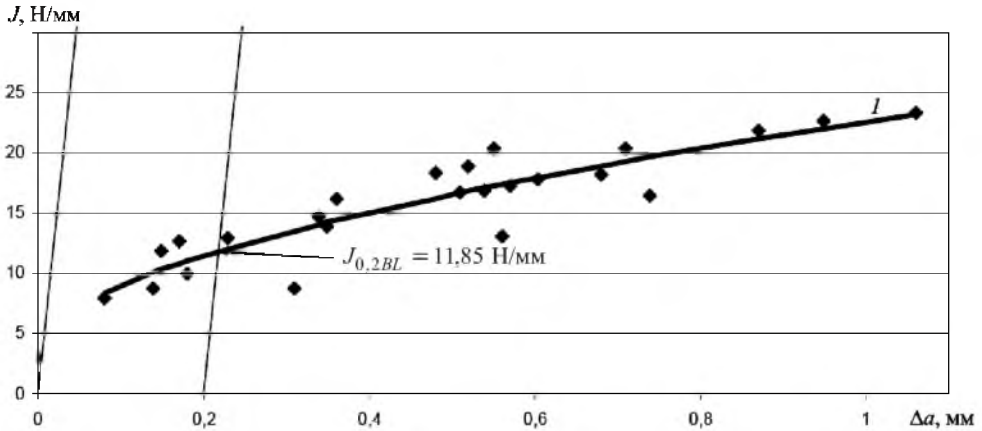


Рис. 5. Зависимость  $J$ -интеграла от стабильного роста трещины  $\Delta a$  ( $I - J = 3,89 + 18,68\Delta a^{0,56}$ ).

Для определения надежности и выносливости исследуемого сплава проанализировано нарастание модуля разрыва  $T_J$  (tearing modul) [21]:

$$T_J = \frac{dJ}{da} \frac{E}{R_F^2}, \quad (9)$$

где

$$R_F = 0,5(R_m + R_{p0,2}).$$

Для образцов из сплава шихты II диаграмма устойчивости модуля разрыва приведена на рис. 6. Кривая  $J$ -интеграла (на рис. 6 сплошная линия) аппроксимирована по экспериментальным данным, интерполяция показана штриховой линией. В качестве критерия неустойчивости разрыва принято значение  $J_{50} = J_C$ , полученное при пересечении кривой  $J(T_J)$  с секущей  $J = 8,8T_J$ . Значение  $J_{50}$  не превышает 67 Н/мм.

Испытания образцов на ударную вязкость материала проводились при разных углах падения молота. Таким образом, образцы подвергались воздействию различной ударной силы. Диаграммы испытаний образцов при разных углах падения молота приведены на рис. 7. При всех углах падения образцы полностью разрушались. Поэтому стабильный рост трещины нельзя измерить по методу, который применялся для образцов, исследованных на вязкость разрушения под действием квазистатической сосредоточенной нагрузки. Для оценки динамической вязкости использовался метод, предложенный в [22]. Исходным является утверждение, что способность материала к изгибу (упругая податливость) отличается до и после начала распространения трещины. Изменение степени податливости материала на диаграмме

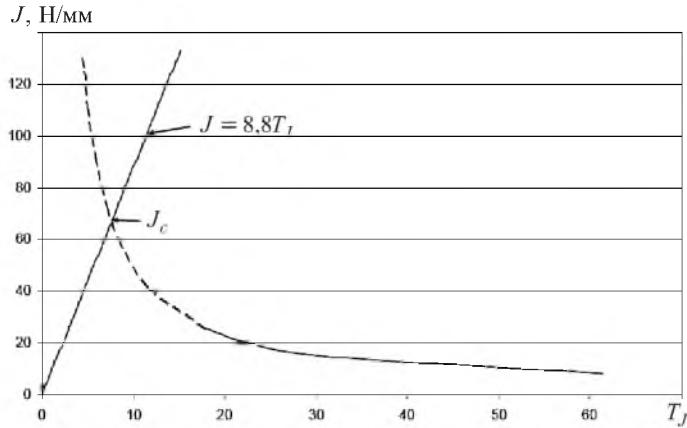
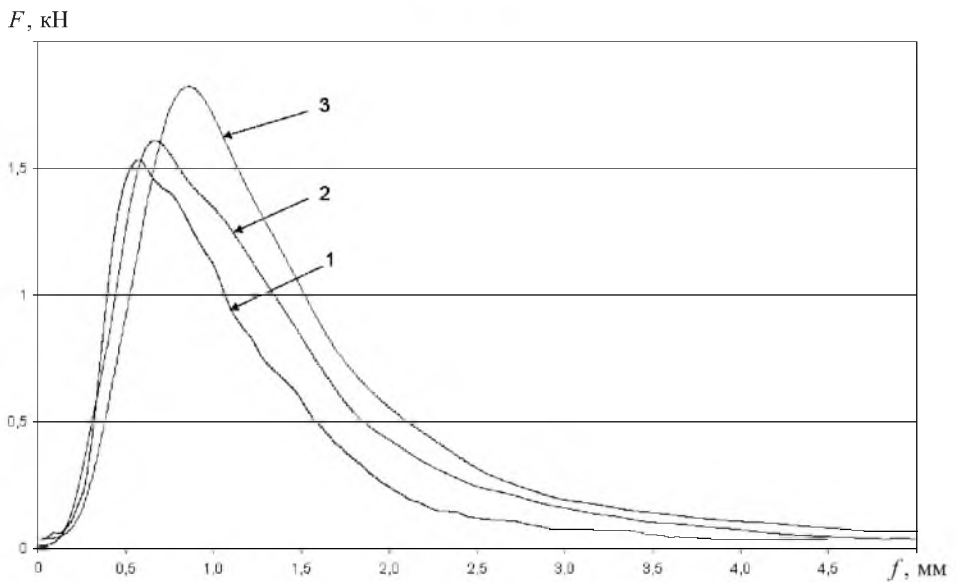


Рис. 6. Диаграмма устойчивости модуля разрыва для сплава шихты II.

Рис. 7. Диаграмма испытания образцов Шарпи из сплава шихты II на трещиностойкость при разных углах падения молота: 1 –  $A_p = 10$  Дж; 2 –  $A_p = 161$  Дж; 3 –  $A_p = 300$  Дж.

характеризуется резкой нерегулярностью хода кривой между точкой предела текучести и предела прочности. Вторая производная определяет момент появления этой нерегулярности, что является моментом инициирования распространения нестабильной трещины. Вычисленные исходя из этого предположения усредненные значения  $J_{id}$ -интеграла приведены в табл. 3.

В табл. 4 представлены прочностные и пластические характеристики для некоторых легких магниевых сплавов, которые применяются в современной автомобильной промышленности [23, 24]. Прослеживается повышение пластических свойств (относительное удлинение при разрыве) для исследованных Mg-Li-сплавов (табл. 2). Недостатком данных материалов, полученных методом литья под высоким давлением, является наличие большого числа пор и других дефектов, которые ограничивают потенциальные возможности системы легирования для использования в конструктивных элементах.



Т а б л и ц а 3

## Динамическая вязкость разрушения образцов из сплава шихты П

Ударная скорость $v$ , м/с	Полная кинетическая энергия молота $A_p$ , Дж	Динамическая вязкость трещины $J_{id}$ , Н/мм
0,91	9,7	9,6
1,39	22,0	6,5
2,28	48,0	8,2
3,83	161,0	7,0
4,43	216,0	5,3
4,69	241,0	4,5
4,91	264,0	4,5
5,09	284,0	4,4
5,20	300,0	5,4

Т а б л и ц а 4

## Прочностные и пластические характеристики магниевых сплавов

Сплав	$R_m$ , Н/мм <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$A$ , %
AZ91	206	153	1,7
AM50	218	126	6,9
AE42	192	135	4,6

**Выводы**

1. Определены прочностные характеристики, вязкость разрушения для плоской деформации при сосредоточенной нагрузке Mg–Li-сплавов в соответствии с законами линейной и нелинейной механики разрушения. Испытания проводились при квазистатических и динамических нагрузках.

2. Образцы с меньшим содержанием лития разрушались по типу “скол”.

3. Показано, что увеличение содержания лития позитивно влияет на пластические свойства, что выгодно отличает исследуемые материалы от других легких сплавов, применяемых в современной автомобильной индустрии.

4. Установлена взаимосвязь между микроструктурой и прочностными свойствами двух Mg–Li-сплавов разных шихт, отличающихся содержанием Li и Al. С увеличением содержания лития возрастает доля  $\beta$ -фазы с ОЦК-решеткой, что улучшает пластические свойства сплава.

5. Наличие пор и дефектов отрицательно влияет на механические свойства исследованных материалов. Их количество можно уменьшить путем совершенствования технологии литья под высоким давлением.

**Резюме**

Досліджено механічні властивості Mg–Li-сплавів, отриманих шляхом лиття під високим тиском у холодній камері пресування. Описано методику розрахунку основних характеристик міцності, що отримані в умовах значних

пластичних деформацій. Розглянуто в'язкість руйнування матеріалу за квазі-статичного та динамічного зосередженого навантаження.

1. *Koewius A.* Der Leichtbau des Serienautomobils erreicht eine neue Dimension. Teil 1 // Aluminium. – 1994. – **70** (1/2). – S. 38 – 48.
2. *Der Volkswagen Umweltbericht.* – 2003/2004. – № 315.1240.11.01.
3. *Schumann S.* The paths and strategies for increased magnesium applications in vehicles // Mater. Sci. Forum. – 2005. – **488-489**. – P. 1 – 8.
4. *Furui M., Xu C., Aida T., et al.* Improving the super plastic properties of a two-phase Mg-8%Li alloy through processing by ECAP // Mater. Sci. Eng. – 2005. – **A410-411**. – P. 439 – 442.
5. *Jaschik C.* Eigenschaftserweiterung von Magnesiumlegierungen durch Lithium // Fort-Berichte VDI Reihe 5. – № 696. – Düsseldorf, 2004.
6. *Wang Z. C. and Prangnell P. B.* Microstructure refinement and mechanical properties of severely deformed Al-Mg-Li alloys // Mater. Sci. Eng. – 2002. – **A328**. – Issue 1-2. – P. 87 – 97.
7. *Regener D. and Tkachenko V.* Static fracture toughness of pressure die-cast Mg-Li alloys // Int. Foundry Res. – 2006. – **58**. – P. 33 – 37.
8. *Regener D. und Tkachenko V.* Bruchzähigkeit von druckgegossenen Magnesium-Lithium-Legierungen // Gießerei. – 2006. – **93**, № 5. – S. 20 – 25.
9. *Regener D., Tkachenko V., Pinkernelle A., und Wernecke J.* Mechanische Kennwerte von druckgegossenen Mg-Li-Legierungen // Gießerei. – 2007. – **94**, № 8. – S. 28 – 35.
10. *Schemme K.* Entwicklung superleichter Magnesium-Werkstoffe. – Dissertation. – Universität Bochum (VDI 5, 293), Düsseldorf, 1993.
11. *Hauser F. E., Landon P. R., and Dorn J. E.* Deformation and fraction of alpha solid solutions of lithium in magnesium // Trans. ASME. – 1958. – **50**. – P. 857 – 883.
12. *Sakkinen D. J.* Physical metallurgy of magnesium die cast alloys // Attributes of Magnesium for Automobile Design. – SAY-Papers No. 940779. – 1994. – P. 71 – 82.
13. *DIN 50148:* 2006. Tensile Test Pieces for Non-Ferrous Metals Pressure Die Castings.
14. *EN ISO 12737:* 1999. Metallic Materials. Determination of Plane-Strain Fracture Toughness.
15. *EN ISO 14556:* 2000. Steel-Charpy V-Notch Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method.
16. *E 1820:* 1996. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
17. *Stolyarov V. V., Shuster L. S., Migranov M. S., et al.* // Mater. Sci. Eng. – 2004. – **A371**, No. 1-2. – P. 313 – 317.
18. *Bergmann W.* Werkstofftechnik, Teil 1. – München; Wien: Carl Hanser-Verlag, 2003.

19. *Pethica J. B. and Oliver W. C.* Mechanical properties of nanometer volumes of material: use of the elastic response of small area indentations // Proc. of Mat. Res. Soc. Symp. – 1989.
20. *Lorenz D.* Untersuchungen zur homogene Versetzungsnukleation mittels Nano-indentierung. – Dissertation. – Martin-Luther-Universität Halle, 2001.
21. *ISO 12135: 2002.* Metallic Materials. Unified Method of Test for Determination of Quasistatic Fracture Toughness.
22. *Blumenauer H. und Pusch G.* Technische Bruchmechanik. – Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993.
23. *Kobayashi T.* Strength and Toughness. – Tokyo: Springer-Verlag, 2004.
24. *Datenblatt* Magnesium-Druckgusslegierungen, Hydro Magnesium. – 06/01.

Поступила 09. 10. 2007