

УДК 621.73.06-52

Миленин А. А.
Петров П. А.
Петров М. А.
Крутина Е. В.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ МАГНИЕВОГО СПЛАВА МА 2-1

В большинстве случаев, магниевые сплавы характеризуются низкой технологической пластичностью, что связано с особенностями их кристаллической структуры и с действующими механизмами пластической деформации [1–2]. Магниевые сплавы имеют гексагональную кристаллическую структуру с одной базисной плоскостью скольжения. Пластическая деформация обусловлена, преимущественно, механизмом двойникования. При высоких температурах (200–450 °С) возникает скольжение по дополнительным плоскостям, что приводит к повышению технологической пластичности [2].

Однако основной сложностью при обработке магниевых сплавов давлением является слишком узкий диапазон параметров, характеризующих процесс пластической деформации. Так, например, при прессовании даже небольшое изменение скорости деформирования, начальной температуры заготовки и температуре контейнера приводит к разрушению [2].

Авторы работы [3] исследовали процесс прессования сплавов MgCa0.8 и Ах30. Экспериментальные исследования выполнены в Техническом университете им. Лейбница (г. Ганновер). Здесь показано, что повышение скорости деформирования с 2 мм/с до 8 мм/с приводит к разрушению. С другой стороны, чем меньше температура деформации, тем быстрее происходит исчерпание ресурса пластичности деформируемого материала. Поэтому задача, связанная с разработкой модели разрушения исследуемого сплава, является актуальной [4, 5]. Таким образом, при определении оптимальных параметров пластической деформации магниевых сплавов должны учитываться перегрев деформируемого материала и его ограниченная технологическая пластичность при низких температурах.

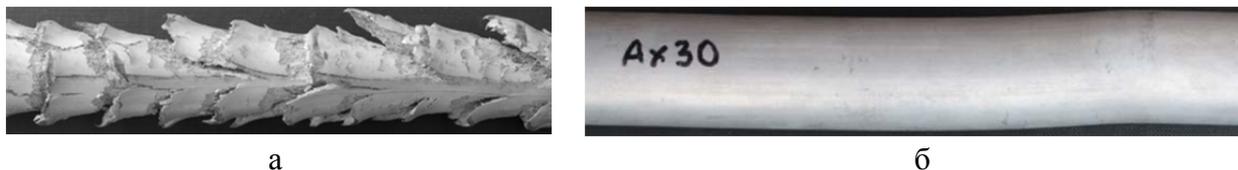


Рис. 1. Результаты прессования сплава Ах 30 при скорости прессования 8 мм/с (а) и 2 мм/с (б) [3]

Целью данной статьи является разработка модели разрушения магниевое сплава МА 2-1, основанной на результатах экспериментальных исследований, проведенных при различных скоростях деформирования и значениях показателя напряженного состояния, температуры деформации.

Разработанная модель разрушения апробирована при компьютерном моделировании процесса прессования профиля из магниевое сплава. Компьютерное моделирование выполнено с применением программного кода разработанного А. А. Милениным [6–8]. Программный код основан на методе конечных элементов.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- 1) провести испытания на растяжение и сжатие образцов магниевое сплава МА 2-1 (95,03 Mg; 3,5 Al; 0,22 Mn; 0,88 Zn, остальные 0,37); испытания проводятся до разрушения;
- 2) на основе испытаний на сжатие определить модель сопротивления сплава деформации.

При выполнении компьютерного моделирования предполагаем, что границы температурного интервала прессования магниевое сплава выбираются исходя из значения технологической пластичности (нижняя граница) и температуры солидуса (верхняя граница).

Компьютерное моделирование в данной работе выполняется с применением конечно-элементного кода, разработанного А. А. Милениным [6–8], в который добавлена информация о модели разрушения и модели сопротивления деформации.

Модель разрушения магниевго сплава получена на основе проведения испытаний растяжением и сжатием образцов сплава до разрушения; модель сопротивления деформации – испытаний сжатием.

Испытания образцов исследуемого сплава растяжением выполнены при температуре 20 °С, 100 °С, 200 °С, 250 °С, 300 °С. Геометрия образца для проведения испытаний растяжением представлена на рис. 2. В процессе проведения испытания растяжением измерялось удлинение образца, по величине которого оценивали его пластичность. На рис. 3 показаны образцы после деформации.

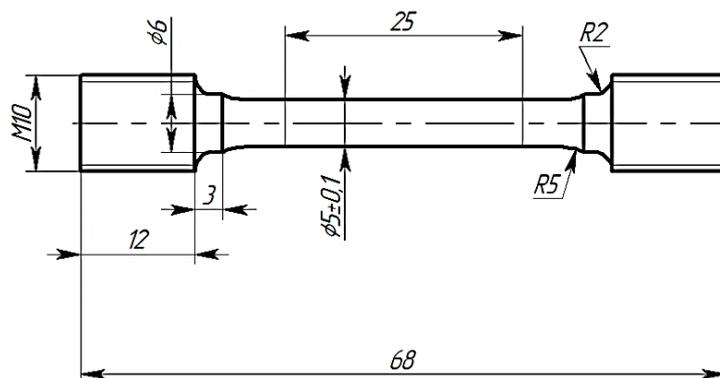


Рис. 2. Геометрия образца для испытаний растяжением при повышенных температурах

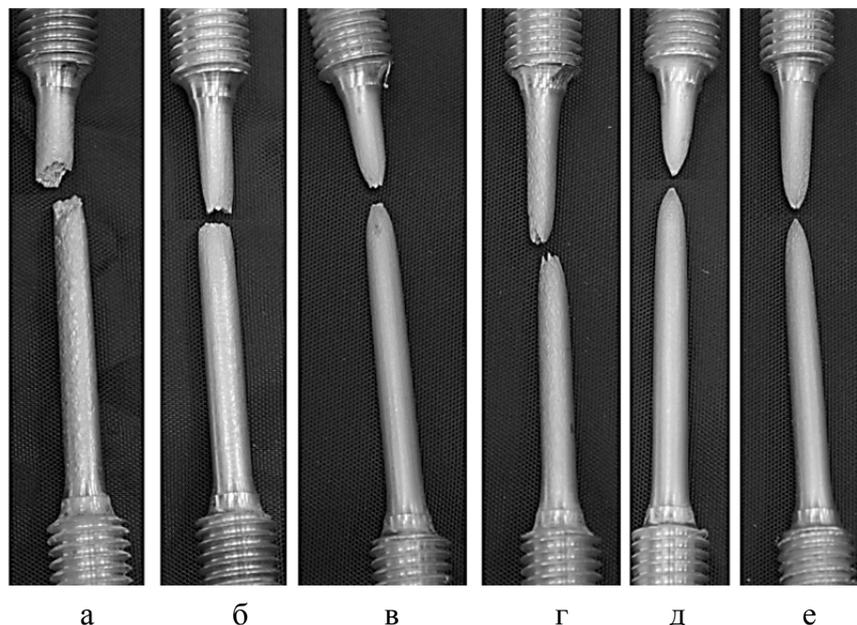


Рис. 3. Образцы сплава МА2-1 после растяжения со скоростью деформирования 60 мм/мин (а, в, д) и 240 мм/мин (б, г, е) при температуре 200 °С (а, б), 250 °С (в, г), 300 °С (д, е)

Испытания образцов исследуемого сплава размером $\varnothing 8 \times 10$ мм сжатием выполнены при температуре 20 °С, 100 °С, 200 °С, 250 °С, 300 °С. Испытания проводились на универсальной испытательной машине LFM-50 (Walter + BaiAg)¹. При проведении испытаний скорость деформирования в процессе испытания поддерживалась постоянной и равной

¹ Испытания выполнялись в лаборатории механических испытаний ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют».

10 мм/мин (только при температуре 20 °С), 60 мм/мин (при температуре 100–300 °С), 240 мм/мин. Сжатие образцов выполнялось без применения смазки. На рис. 4 показан внешний вид образцов после испытания сжатием при различных температурах.

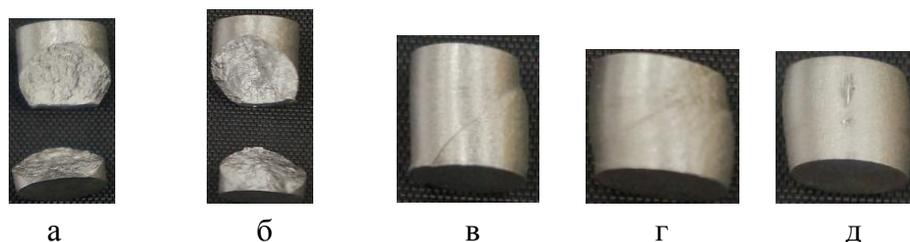


Рис. 4. Внешний вид образцов после деформации:
20 °С (а); 100 °С (б); 200 °С (в); 250 °С (г); 300 °С (д)

Расчет сопротивления деформации выполнен с применением эмпирической модели Хензеля-Шпиттеля, устанавливающей связь между напряжением текучести σ_i и термомеханическими параметрами:

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T) T^{m_9} \varepsilon_i^{m_2} \exp(m_4 / \varepsilon_i) (1 + \varepsilon_i)^{m_5 T} \exp(m_7 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_3} \dot{\varepsilon}_i^{m_8 T}, \quad (1)$$

где $A, C, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_7, m_8, m_9$ – коэффициенты.

Неизвестные коэффициенты в уравнении (1) определялись из решения задачи минимизации суммы квадрата разницы между расчетными значениями σ_i и значениями этого параметра, определенными по результатам экспериментов на сжатие. Значения неизвестных коэффициентов уравнения (1): $A = 9,9989$; $m_3 = -0,026301$; $m_7 = 0,090858$; $m_1 = 0,0044744$; $m_4 = -0,017288$; $m_8 = 0,0005576$; $m_2 = -0,2907$; $m_5 = 0,0011936$; $m_9 = -0,00025146$.

При построении модели разрушения сплава МА 2-1 принимали подход, предложенный в работах Колмогорова В. Л. [9]:

$$\psi = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_p(k, t, \xi_i)} < 1, \quad (2)$$

где ε_i – накопленная деформация; $k = \frac{\sigma_0}{\sigma_s}$; $\varepsilon_p(k, t, \xi_i)$ – критическая деформация материала (может определяться на основе результатов экспериментов на сжатие и растяжение).

В данной работе предложено аппроксимировать зависимость $\varepsilon_p(k, t, \xi_i)$ следующим уравнением:

$$\varepsilon_p = d_1 \exp(-d_2 k) \exp(d_3 t) \bar{\xi}^{d_4}. \quad (3)$$

Значения неизвестных коэффициентов уравнения (3) определялись из решения задачи минимизации суммы квадрата разницы между расчетными значениями ε_p и значениями этого параметра, определенными по результатам экспериментов на растяжение и сжатие. Полученные значения неизвестных коэффициентов уравнения (1): $d_1 = 0,0229$; $d_2 = 0,128$; $d_3 = 0,0161$; $d_4 = -0,156$.

Полученная модель разрушения, а также модель сопротивления деформации добавлены в программный код, основанный на методе конечных элементов и позволяющий моделировать процессы прессования [6–8].

На рис. 5 и 6 представлены результаты компьютерного моделирования прессования профиля из заготовки сплава МА 2-1 диаметром 160 мм. Геометрия профиля представлена ранее в работе [7].

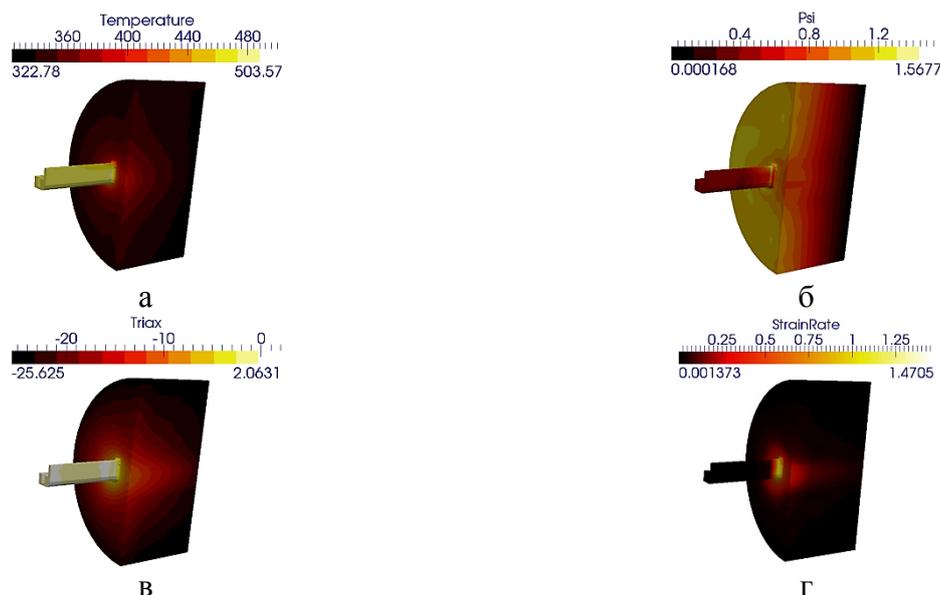


Рис. 5. Результаты моделирования прессования в плоской матрице: распределение температуры (а), распределение показателя ψ (б), распределение показателя напряженного состояния k (в), распределение скорости деформации (г)

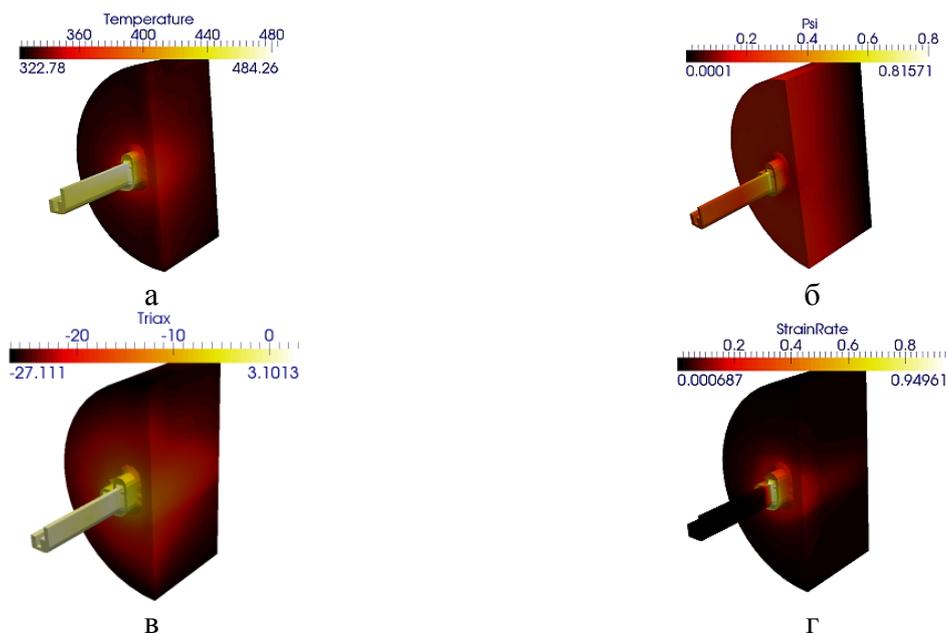


Рис. 6. Результаты моделирования прессования в матрице с форкамерой: распределение температуры (а), распределение показателя ψ (б), распределение показателя напряженного состояния k (в), распределение скорости деформации (г)

При моделировании учитывалось, что прессование может быть выполнено в плоской матрице (рис. 5) либо в матрице с форкамерой глубиной 10 мм (рис. 6). Температура нагрева заготовки принималась равной 350 °С; матрицы – 320 °С; скорость прессования – 1 мм/с.

В случае прессования в плоской матрице показатель ψ превышает предельное значение 1,0, т. е. высока вероятность образования трещин. Максимальная температура нагрева материала в очаге деформации 504 °С, что ниже, чем температура солидуса данного сплава (532 °С).

Применение форкамеры в конструкции матрицы приводит к снижению скорости деформации (см. рис. 5–6, д) и, соответственно, к увеличению пластичности сплава. Максимальная температура нагрева материала составляет 484 °С, что позволяет говорить о расширении температурного интервала прессования примерно на 20 °С.

ВЫВОДЫ

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- получена модель сопротивления сплава МА 2-1 деформации и его модель разрушения, пригодные для анализа процесса прессования с помощью программного кода, основанного на методе конечных элементов;
- разработанный программный код позволяет оценить разрушение материала на основе расчета следующих параметров: температуры, скорости деформации, параметра ψ и показателя напряженного состояния k ;
- установлено, что применение форкамеры повышает технологическую пластичность материала при прессовании.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного контракта № 14.740.11.1361 «Разработка, исследование и практическое применение критерия разрушения и математической модели сопротивления магневых сплавов пластической деформации».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu G. Prediction and verification of temperature evolution as a function of ram speed during the extrusion of AZ31 alloy into a rectangular section / G. Liu, J. Zhou, J. Duszczuk // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – № 186. – P. 191–199.
2. Lapovok R. Ye. Construction of extrusion limit diagram for AZ31 magnesium alloy by FE simulation / R. Ye. Lapovok, M. R. Barnett, C. H. J. Davies // *J. Mater. Process. Technol.* – 2004. – № 146. – P. 408–414.
3. 2010a. Production of thin wires of magnesium alloys for surgical applications / Milenin A., Seitz J.-M., Bach Fr.-W., Bormann D., Kustra P. // *Proc. Conf. Wire Expo 2010 Milwaukee, USA*. – P. 61–70.
4. Milenin A. Mathematical Model of Warm Drawing Process of Magnesium Alloys in Heated Dies / A. Milenin, P. Kustra // *Steel Research International*. – 2010. – Vol. 81 no. 9 spec. ed. – S. 1251–1254.
5. Temperature and strain rate effect incorporated failure criteria for sheet forming of magnesium alloys / W. J. Kim, H. K. Kim, W. Y. Kim, S. W. Han // *Materials Science and Engineering*. – 2008A. – № 488. – P. 468–474.
6. Миленин А. А. Математическое моделирование и решение технологических задач прессования фасонных профилей // *Сталь*. – 1999. – № 8. – С. 57–60.
7. Milenin A. A. The application of three-dimensional computer simulation when developing dies for extrusion of aluminium shapes / A. A. Milenin, A. N. Golovko, I. Mamuzic // *Metallurgija*. – 2002. – № 41(1). – P. 53–55.
8. Lishnij A. I. Two levels approach to the problem of extrusion optimisation / A. I. Lishnij, N. V. Biba, A. A. Milenin // *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications. Proceedings of the 7 Int. Conf. On Numerical Methods in Industrial Forming Processes*. – Enschede (Netherlands). – 1998. – P. 627–631.
9. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 689 с.

Миленин А. А. – д-р техн. наук, проф. КГМА;

Петров П. А. – канд. техн. наук, доц. МГТУ «МАМИ»;

Петров М. А. – канд. техн. наук МГТУ «МАМИ»;

Крутина Е. В. – канд. техн. наук, доц. МГТУ «МАМИ».

КГМА – Краковская горно-металлургическая академия, г. Краков, Польша.

МГТУ «МАМИ» – Московский государственный технический университет «МАМИ», г. Москва, Россия.

E-mail: p.petrov@mami.ru

Статья поступила в редакцию 03.05.2012 г.