

УДК 620.178.3

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА В МАГНИЕВЫХ СПЛАВАХ С ЭФФЕКТОМ АСИММЕТРИИ¹

© Д. Л. Мерсон², Е. В. Васильев², А. Ю. Виноградов^{2,3}*Статья поступила 8 ноября 2016 г.*

Рассмотрены особенности количественной оценки эффекта Баушингера в магниевых сплавах с асимметрией деформационного поведения. Установлено, что эффект Баушингера связан с различным вкладом раздвойникового в общую деформацию, а вычисление количественных параметров этого эффекта по критериям напряжения и работы деформации дает близкие результаты. При этом асимметрия поведения магниевых сплавов при растяжении и сжатии одинаковым образом влияет как на напряжение начала пластической деформации (условном пределе текучести), так и на вклад деформации раздвойникового в общую пластическую деформацию. Параметры эффекта Баушингера при сжатии магниевых сплавов близки к нулю, т.е. эффект в этом случае практически не проявляется, а неупругость, ответственная за него, связана с особенностями двойникового именно при растяжении. Сравнение эффекта Баушингера для двух сплавов — промышленного ZK30 и перспективного ZE10 с редкоземельными элементами — во всех случаях говорит в пользу последнего.

Ключевые слова: эффект Баушингера; асимметрия деформации; магниевые сплавы.

Постоянное ужесточение требований к выбросам отработанных газов в окружающую среду стимулирует автопроизводителей к созданию транспортных средств с пониженным весом, что требует проведения научных исследований в области разработки материалов с повышенной удельной прочностью. В связи с этим за последнее время во всем мире активизировалась разработка конструкционных материалов на основе магния [1–4], который, как известно, более чем на 30 % легче алюминия.

Одним из наиболее серьезных недостатков магния и сплавов на его основе как конструкционных материалов является плохая деформируемость и резко асимметричное поведение при растяжении и сжатии, проявляющееся в существенном отличии пределов текучести на растяжение и сжатие и, как следствие, недостаточно высокая усталостная прочность [5–7]. Асимметрия циклической деформации в металлах с ГПУ решеткой, к которым относятся магниевые сплавы, является следствием полярной природы двойникового и проявляется в активации различных двойниковых систем на фазах сжатия и растяжения, а также в существовании механизма раздвойникового (detwinning), связанного с псевдоупругостью двойника растяжения [8–12]. В магнии двойникование при растяжении реализуется по направлению

$[10\bar{1}2]$ и связано с переориентацией решетки на $86,3^\circ$, а двойникование при сжатии — по направлению $[10\bar{1}1]$ и сопровождается наклоном решетки на 56° . Эти механизмы двойникового уже достаточно подробно изучены [13] и являются определяющим фактором механического поведения магниевых сплавов [14–15].

При работе конструкции в условиях переменных нагрузок, особенно в режиме малоциклового усталости, важнейшее значение приобретает способность материала рассеивать накапливающуюся энергию, которая отражается в различных явлениях неупругости и прежде всего в эффекте Баушингера (ЭБ). Суть этого эффекта, открытого более 100 лет назад [16], заключается в облегчении микропластической деформации материала после его предварительного нагружения в противоположном направлении, т.е. для наиболее распространенной одноосной схемы испытания материалов кривая повторного нагружения образца в обратном направлении будет располагаться ниже кривой первичного испытания (рис. 1, а). Степень несовпадения этих кривых и является мерой ЭБ.

Для оценки величины ЭБ предложен целый ряд параметров [17–19], основные из которых следующие:

абсолютное снижение напряжения (σ) при нагружении материала в обратном направлении при остаточной деформации i (см. рис. 1, а), которая, как правило, выбирается равной 0,2 %, т.е. соответствует условному пределу текучести,

$$k_1 = |\sigma_i^{(1)} - |\sigma_i^{(2)}||; \quad (1)$$

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, проект RFMEFI58615X0021.

² Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия; e-mail: d.merson@tltsu.ru, avellko@yandex.ru, alexei.vino@gmail.com

³ Норвежский университет естественных и технических наук, г. Тронхейм, Норвегия.

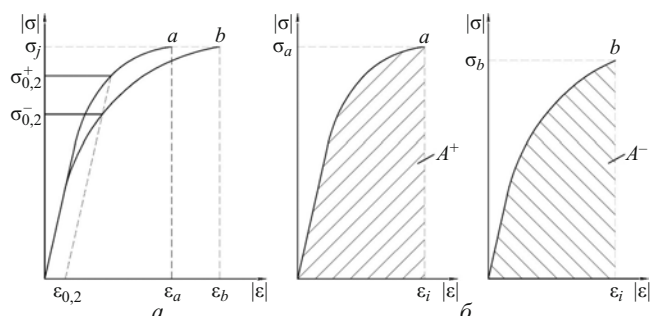


Рис. 1. Схемы к определению параметров эффекта Баушингера по несовпадению кривых нагружения в прямом и обратном направлении (а) и по работе деформации (б)

относительное снижение напряжения при нагружении материала в обратном направлении при остаточной деформации i (см. рис. 1, а)

$$k_2 = \left| \frac{\sigma_i^{(1)} - |\sigma_i^{(2)}|}{\sigma_i^{(1)}} \right| \cdot 100\%; \quad (2)$$

абсолютное увеличение деформации (ϵ) при нагружении материала в обратном направлении при уровне напряжений j (см. рис. 1, а, разница $\epsilon_b - \epsilon_a$)

$$k_3 = |\epsilon_j^{(2)} - |\epsilon_j^{(1)}||; \quad (3)$$

относительное увеличение деформации при нагружении материала в обратном направлении при уровне напряжений j (см. рис. 1, а)

$$k_4 = \left| \frac{\epsilon_j^{(2)} - |\epsilon_j^{(1)}|}{|\epsilon_j^{(1)}|} \right| \cdot 100\%; \quad (4)$$

относительное уменьшение работы (A — площадь под кривой нагружения) на деформирование материала в обратном направлении до деформации i (см. рис. 1, б)

$$k_5 = \frac{A_i^{(1)} - |A_i^{(2)}|}{A_i^{(1)}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где индексы «1» и «2» относятся соответственно к прямому и обратному нагружениям (при этом прямым нагружением может быть как растяжение, так и сжатие).

При сравнении ЭБ в разных материалах (сплавах), безусловно, предпочтительнее коэффициенты, измеряемые в относительных единицах, т.е. выражения (2), (4) и (5).

Отметим, что все вышеприведенные показатели совершенно не пригодны для оценки ЭБ в материалах, обладающих эффектом асимметрии (ЭА) поведения при нагружении на растяжение и сжатие, поскольку для них эти показатели оказываются ненулевыми даже без какого-либо предварительного нагружения в противоположном направлении. Очевидно, что для этого случая при оценке ЭБ правильное сравнивать не прямое и обратное нагружения, а прямое и прямое после предварительного нагружения в обратном направлении. Другими словами, для вычисления показателей ЭБ по выражениям (1) – (5) достаточно только одного образца, испытанного в разных направлениях, а для исследования ЭБ в материалах с ЭА требуется не менее двух образцов: одного — для испытания в прямом направлении и второго — для испытания в прямом направлении после предварительного нагружения в обратном.

Следовательно, для материалов с ЭА для оценки ЭБ можно применять любое из выражений (1) – (5), если под индексом «2» понимать нагружение второго образца в прямом направлении после предварительного нагружения в противоположном, например, как это описано в работе [20].

По аналогии с выражениями (1) – (5) для оценки эффекта асимметрии используют следующие параметры:

отношение пределов текучести на растяжение и сжатие (см. рис. 1, а)

$$a_1 = \left| \frac{\sigma_{0,2}^{(-)}}{\sigma_{0,2}^{(+)}} \right| \cdot 100\%; \quad (6)$$

отношение работ, выполненных при деформировании материала на растяжение и сжатие до деформации i (см. рис. 1, б)

$$a_2 = \left| \frac{A_i^{(-)}}{A_i^{(+)}} \right| \cdot 100\%, \quad (7)$$

где «+» означает растяжение, а «-» — сжатие.

В данной работе исследовали сплавы ZK30 (Mg – 2,6 % Zn – 0,01 % Zr) и ZE10 (Mg – 1,3 % Zn – 0,2 % Nd), химический состав которых приведен в табл. 1. Сплавы изготавливали методом валковой разливки-прокатки в двухвалковом кристаллизаторе, при котором расплав заливался между двумя вращающимися стальными валками с водяным охлаждением. После изготовления сплавы подвергали термообработке на твердый раствор по режиму: выдержка при 415 °C

Таблица 1. Химический состав сплавов, % масс.

Сплав	Mg	Zn	Mn	Si	Zr	Fe	Nd
ZK30	97,3	2,606	0,0139	0,0047	0,0101	0,0015	<0,0010
ZE10	98,4	1,279	0,0230	0,0128	<0,0010	0,0323	0,2390

в течение 24 ч с охлаждением на воздухе. В результате такой обработки средний размер зерна составлял 105 и 16 мкм для сплавов ZK30 и ZE10 соответственно.

Образцы для механических испытаний имели такую форму (рис. 2), чтобы их можно было деформировать как на растяжение, так и на сжатие (без потери устойчивости). Вырезали их параллельно направлению прокатки листа на электроискровом проволоочно-вырезном станке Sodick AG400L.

Механические испытания образцов проводили на испытательной машине Kammrath & Weiss при скорости нагружения 5 мкм/с ($5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) по двум схемам одноциклового нагружения: первая — «растяжение – сжатие», когда испытание начинали с растяжения; вторая — «сжатие – растяжение», когда первой фазой было сжатие. В обеих схемах нагружение осуществляли с амплитудой полной деформации 0,52 %. На рис. 3 в качестве примера для сплава ZE10 приведены диаграммы испытания по обеим схемам с обозначением всех необходимых для дальнейших вычислений данных.

Рассмотрим особенности кривой циклического нагружения по схеме «растяжение – сжатие» (см. рис. 3, а). Диаграмма представляет собой разомкнутую петлю достаточно сложной формы, последовательно проходящую через точки: *o*, *b*, *c*, *d* и *e*. На стадии растяжения диаграмма имеет типичный для всех материалов линейный участок (закон Гука), который переходит в параболический, связанный с активацией пластической деформации. На стадии же разгрузки от точки *b* только в начале диаграмма подчиняется линейному закону Гука, а далее начинает существенно отклоняться и вместо точки *m* попадает в точку *c*. Таким образом, в точке начала разгрузки *b* полная деформация (отрезок *on*) состоит из упругой деформации ϵ_e (отрезок *mn*) и пластической ϵ_p (отрезок *om*), которая включает остаточную (отрезок *oc*) и квазиупругую ϵ_d (отрезок *cm*) деформации. Нет сомнений, что деформация ϵ_d является результатом раздвойнивания, т.е. связана с исчезновением на стадии раз-

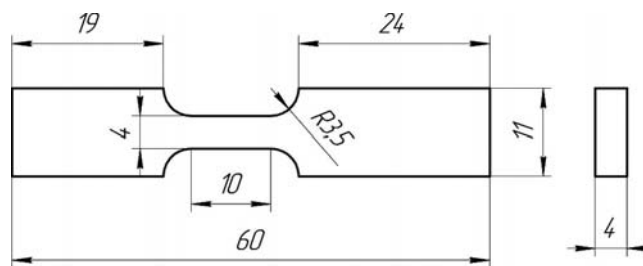


Рис. 2. Геометрия образцов для испытаний

грузки двойников, образовавшихся на стадии нагружения [21].

Диаграмма испытаний образцов по схеме «сжатие – растяжение» (см. рис. 3, б) сильно отличается от диаграммы «растяжение – сжатие», однако их объединяют описанные выше особенности.

Кроме того, на рис. 3 приняты следующие обозначения характеристик: $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести, соответствующий остаточной деформации 0,2 % (строго говоря, эта остаточная деформация — величина условная, так как не учитывает деформацию, связанную с раздвойниванием); верхний индекс «+» или «-» обозначает соответственно стадию растяжения или сжатия; верхний индекс «1» или «2» относится соответственно к прямому или обратному нагружению.

Результаты измерения основных характеристик (табл. 2) были использованы для определения параметров ЭБ согласно выражениям (2) и (5), значения которых представлены в табл. 3. Как видно, вычисления параметров ЭБ по критериям напряжения [выражение (2)] и работы деформации [выражение (5)] дают очень близкие результаты. Совершенно очевидно, что точного совпадения быть не может, поскольку точка, соответствующая полной деформации 0,5 %, для которой рассчитывали критерий k_5 , лежит на диаграмме несколько ближе к точке *b* (или *d*), чем точка, соответствующая условному пределу текучести, для

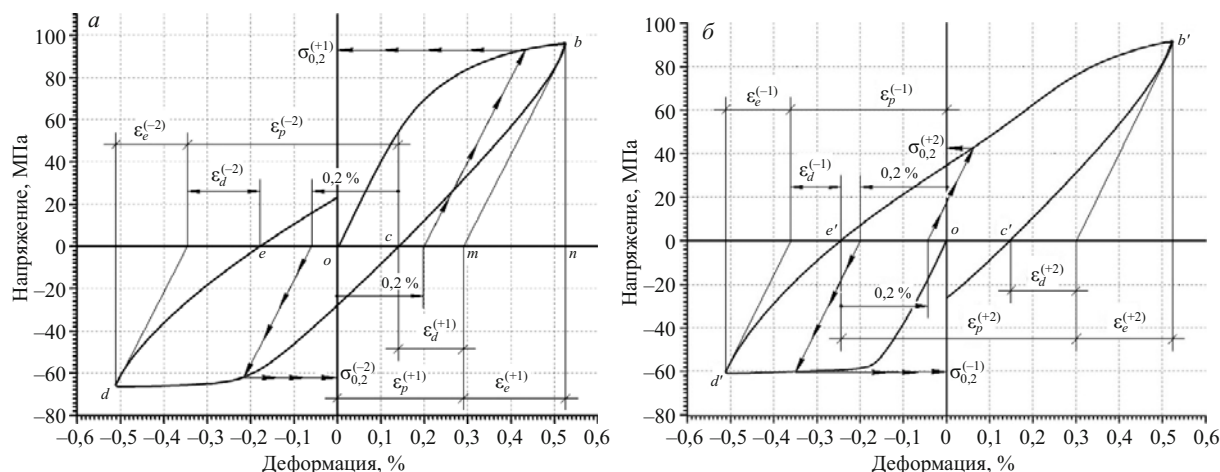


Рис. 3. Диаграммы испытаний образцов сплава ZE10 по схемам «растяжение – сжатие» (а) и «сжатие – растяжение» (б)

Таблица 2. Характеристики диаграмм нагружения сплавов

Параметр	Сплав	Цикл растяжения		Цикл сжатия	
		1	2	1	2
$\sigma_{0,2}$, МПа	ZK30	76	18	32	32
	ZE10	92	46	61	61
ε_p , %	ZK30	0,30	0,54	0,42	0,58
	ZE10	0,29	0,53	0,37	0,5
ε_d , %	ZK30	0,12	0,07	0,09	0,12
	ZE10	0,15	0,15	0,13	0,18
$A_{0,5}$ *, 10^{-3} н · м	ZK30	17,4	6,38	8,63	8,5
	ZE10	20,9	11,1	15,7	14,8

* Площадь под кривой при полной деформации 0,5 %.

которой вычисляли критерий k_2 , т.е. критерии k_2 и k_3 определяли не при точно совпадающих условиях.

По выражениям (6) и (7) вычисляли параметры оценки эффекта асимметрии a_1 и a_2 . Как и при оценке ЭБ, значения различных критериев оказались близки друг другу (табл. 4).

Выше уже отмечалось, что асимметричное поведение сплавов на основе магния при растяжении и сжатии объясняется разницей в кристаллографии двойникования при этих двух схемах нагружения, а отклонение разгрузочной ветви диаграммы от линейной зависимости (закона Гука) объясняется протеканием процесса раздвойникования. В связи с этим можно предположить, что эффект Баушингера связан с различным вкладом раздвойникования в общую деформацию при прямом нагружении и прямом после обратного. Обозначим долю раздвойникования в общей пластической деформации как

$$\varepsilon_d/\varepsilon_p \quad (8)$$

и введем на ее основе еще один параметр оценки ЭБ по тому же принципу, что и все предыдущие:

$$k_6 = \frac{(\varepsilon_d/\varepsilon_p)^{(1)} - (\varepsilon_d/\varepsilon_p)^{(2)}}{(\varepsilon_d/\varepsilon_p)^{(1)}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Результаты вычисления параметра k_6 также приведены в табл. 3, и их значения оказались практически такими же, как все остальные. Иными словами, в исследуемых магниевых сплавах за эффект Баушингера отвечает неупругость, связанная с процессом раздвойникования.

Таблица 3. Значения параметров оценки эффекта Баушингера

Сплав	Тип прямого нагружения	$k_2 = \frac{\sigma_{0,2}^{(1)} - \sigma_{0,2}^{(2)}}{\sigma_{0,2}^{(1)}} \cdot 100\%$	$k_5 = \frac{A_{0,5}^{(1)} - A_{0,5}^{(2)}}{A_{0,5}^{(1)}} \cdot 100\%$	$k_6 = \frac{(\varepsilon_d/\varepsilon_p)^{(1)} - (\varepsilon_d/\varepsilon_p)^{(2)}}{(\varepsilon_d/\varepsilon_p)^{(1)}} \cdot 100\%$
ZK30	Растяжение	76	63	68
	Сжатие	0	2	3
ZE10	Растяжение	50	47	45
	Сжатие	0	6	1

Таблица 4. Значения параметров оценки эффекта асимметрии

Сплав	$a_1 = \left \frac{\sigma_{0,2}^-}{\sigma_{0,2}^+} \right $	$a_2 = \left \frac{A_{0,5}^-}{A_{0,5}^+} \right $	$a_3 = \frac{(\varepsilon_d/\varepsilon_p)^{(-)}}{(\varepsilon_d/\varepsilon_p)^{(+)}}$
ZK30	0,42	0,54	0,54
ZE10	0,66	0,54	0,68

Применим для оценки ЭА критерий, основанный на величине $\varepsilon_d/\varepsilon_p$:

$$a_3 = (\varepsilon_d/\varepsilon_p)^{(-)}/(\varepsilon_d/\varepsilon_p)^{(+)}. \quad (10)$$

Результаты вычисления a_3 , приведенные в табл. 4, также оказались близки к остальным. Это свидетельствует о том, что асимметрия поведения магниевых сплавов при растяжении и сжатии одинаковым образом влияет как на напряжение начала пластической деформации (условный предел текучести), так и на деформацию раздвойникования (ее вклад в общую пластическую деформацию).

Согласно данным табл. 3 все параметры оценки эффекта Баушингера при сжатии близки к нулю, т.е. ЭБ в этом случае практически не проявляется. Следовательно, в магниевых сплавах неупругость, ответственная за ЭБ, связана с особенностями двойникования именно при растяжении.

Сравнение результатов испытаний для двух разных сплавов во всех случаях говорит в пользу сплава ZE10: для него выше показатели условного предела текучести как при растяжении, так и при сжатии, меньше проявляется асимметрия поведения и ниже величина эффекта Баушингера. Представляет большой интерес установление в магниевых сплавах корреляции между ЭБ и усталостными свойствами. Такие исследования проводятся в настоящее время.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Mordike B. L., Ebert T. Magnesium: properties — applications — potential / Mater. Sci. Eng. A. 2001. Vol. 302. N 1. P. 37 – 45.
2. Wolff M., Ebel T., Dahms M. Sintering of magnesium / Advanced Engineering Materials. 2010. Vol. 12. N 9. P. 829 – 836.
3. Ben Hamu G., Eliezer D., Shin K. S. The relation between processing, microstructure and corrosion behavior of new magnesium alloys for transportation application / 47th Annual Conference of the Australasian Corrosion Association 2007: Corrosion Control, 2007. P. 906.
4. Hirsch J., Al-Samman T. Superior light metals by texture engineering: optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications / Acta Mater. 2013. Vol. 61. N 3. P. 818 – 843.
5. Luo A. A. Magnesium: current and potential automotive applications / JOM. 2002. Vol. 54. N 2. P. 42 – 48.

6. **Liu W. C., Dong J., Zhang P., Yao Z. Y., Zhai C. Q., Ding W. J.** High cycle fatigue behavior of as-extruded ZK60 magnesium alloy / *J. Mater. Sci.* 2009. Vol. 44. N 11. P. 2916 – 2924.
7. **Shiozawa K., Kitajima J., Kaminashi T., Murai T., Takahashi T.** Low-cycle fatigue deformation behavior and evaluation of fatigue life on extruded magnesium alloys / *Proc. Eng.* 2011. Vol. 10. P. 1244 – 1249.
8. **Lin X. Z., Chen D. L.** Strain controlled cyclic deformation behavior of an extruded magnesium alloy / *Mater. Sci. Eng. A.* 2008. Vol. 496. N. 1. P. 106 – 113.
9. **Yin S. M., Yang F., Yang X. M., Wu S. D., Li S. X., Li G. Y.** The role of twinning — detwinning on fatigue fracture morphology of Mg — 3% Al — 1% Zn alloy / *Mater. Sci. Eng. A.* 2008. Vol. 494. N 1. P. 397 – 400.
10. **Proust G., Tomé C. N., Jain A., Agnew S. R.** Modeling the effect of twinning and detwinning during strain-path changes of magnesium alloy AZ31 / *Int. J. Plasticity.* 2009. Vol. 25. N 5. P. 861 – 880.
11. **Wu L., Jain A., Brown D. W., Stoica G. M., Agnew S. R., Clausen B., Liaw P. K.** Twinning — detwinning behavior during the strain-controlled low-cycle fatigue testing of a wrought magnesium alloy, ZK60A / *Acta Mater.* 2008. Vol. 56. N 4. P. 688 – 695.
12. **Lee S. Y., Wang H., Gharghouri M. A.** Twinning-detwinning behavior during cyclic deformation of magnesium alloy / *Metals.* 2015. Vol. 5. N 2. P. 881 – 890.
13. **Christian J. W., Mahajan S.** Deformation twinning / *Progr. Mater. Sci.* 1995. Vol. 39. N 1. P. 1 – 157.
14. **Barnett M. R.** Twinning and the ductility of magnesium alloys: Part I. “Tension” twins / *Mater. Sci. Eng. A.* 2007. Vol. 464. N 1. P. 1 – 7.
15. **Barnett M. R.** Twinning and the ductility of magnesium alloys: Part II. “Contraction” twins / *Mater. Sci. Eng. A.* 2007. Vol. 464. N 1. P. 8 – 16.
16. **Bauschinger J.** Ueber die veränderung der elasticitätsgrenze und elasticitätsmodul verschiedener / *Metal caviling.* 1881. Vol. 27. P. 289 – 348.
17. **Mc’Lin D.** Mekhanicheskie svoistva metallov [Mechanical properties of metals]. — Moscow: Metallurgiya, 1965. — 431 p. [in Russian].
18. **Lemoine X., Aouafi A.** Bauschinger effect correspondence of experimental tests / *Int. J. Mater. Forming.* 2008. Vol. 1. N 1. P. 241 – 244.
19. **Abel A.** Historical perspectives and some of the main features of the Bauschinger effect / *Materials Forum.* — Institute of Metals and Materials Australasia. 1987. Vol. 10. N 1. P. 11 – 26.
20. **Stolyarov V. V.** Effect Bauschingera v ultramelkozernistykh materialakh [Bauschinger effect in ultra-finegrained metals materials] / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2006. Vol. 72. N 9. P. 45 – 49 [in Russian].
21. **Vinogradov A., Vasilev E., Linderov M., Merson D.** In situ observations of the kinetics of twinning — detwinning and dislocation slip in magnesium / *Mater. Sci. Eng. A.* 2016. Vol. 676. P. 351 – 360.