

01,07

Анализ скоростных зависимостей критических напряжений в алюминиевых сплавах системы Al–Mg при ударных нагрузках

© А.Д. Евстифеев¹, И.В. Смирнов², Ю.В. Петров^{2,3}

¹ Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ad.evstifeev@gmail.com

Поступила в Редакцию 2 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 21 июня 2020 г.

Принята к публикации 23 июня 2020 г.

Алюминиевые сплавы системы Al–Mg имеют широкое распространение в автомобильной и авиационной промышленности благодаря сочетанию прочности, хорошей пластичности и коррозионной стойкости. Увеличение процентного содержания магния повышает прочность материала при незначительном снижении пластических характеристик. В работе изучены особенности поведения критических напряжений в рассматриваемых материалах, наблюдаемые при увеличении скорости деформации. Обсуждается возможность прогнозирования критических динамических напряжений в материалах на основе структурно-временного подхода.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, критические динамические напряжения, критерий инкубационного времени.

DOI: 10.21883/FTT.2020.11.50048.077

1. Введение

Широкое применение материалов на основе алюминия требует всестороннего изучения прочностных характеристик материала в широком диапазоне изменения параметров внешнего нагружения. Особое внимание стоит уделять области экстремальных условий эксплуатации, поскольку поведение материала при повышенных скоростях нагружения и импульсном воздействии кардинальным образом отличается от работы в квазистатических режимах. Влияние на прочность материала в условиях динамических нагрузок оказывают химический состав материала, его структурное состояние, а также внешние факторы, например, температура.

Алюминиевые сплавы системы Al–Mg благодаря хорошим функциональным свойствам [1] широко используются как в статическом, так и в динамическом диапазоне изменения параметров внешнего воздействия. Увеличение процентного содержания магния повышает прочность в статическом диапазоне нагружения при незначительном снижении пластических характеристик. При одноосном растяжении предельная деформация до разрушения может достигать 30%. При этом поведение в динамическом диапазоне недостаточно исследовано, несмотря на то, что с повышением скорости деформирования реакция материала существенно изменяется, например, повышается предельная прочность материала, связанная со структурно-временными особенностями

ми процесса разрушения [2–8]. Это требует экспериментального и теоретического изучения динамических прочностных свойств.

2. Материалы и методика экспериментальных исследований

2.1. Материалы

Наиболее широкое распространение в промышленности получили сплавы с содержанием магния от 1 до 5%. Увеличение содержания магния свыше 6% приводит к ухудшению коррозионной стойкости сплава. При этом в нагартованном состоянии механическая структура сплава становится нестабильной.

В настоящей работе рассматриваются сплавы системы Al–Mg: AMg2, AMg3, Al5083 (AMg4.5), AMg5, AMg6. Сплавы AMg2 и AMg3 в состоянии поставки были в виде листов толщиной 1.5 mm. Сплав Al5083 (AMg4.5) был поставлен в виде литой плиты без первоначальной деформационной обработки. Сплавы AMg5 и AMg6 были приобретены в виде экструдированных прутков диаметром 20 mm. С целью исключения влияния предварительной деформации на результаты механических испытаний все материалы подвергались релаксационному отжигу при 633 K.

Для улучшения прочностных характеристик сплавы системы Al–Mg легируют хромом, марганцем, титаном,

Таблица 1. Химический состав алюминиевых сплавов системы Al–Mg

Сплав	Элемент, (wt%)				
	Mg	Mn	Fe	Si	Al
AMg2	2.3	0.2	0.2	0.1	Balance
AMg3	3.6	0.5	0.3	0.6	Balance
AMg4.5 (Al5083)	4.5	0.5	0.5	0.5	Balance
AMg5	5.3	0.6	0.3	0.2	Balance
AMg6	5.8	0.3	0.3	0.2	Balance

кремнием или ванадием. Химический состав рассматриваемых сплавов приведен в табл. 1. Магний является основным легирующим элементом. Примеси меди и железа в сплавы этой системы нежелательны, поскольку они снижают их коррозионную стойкость и свариваемость. При этом видно, что железо присутствует во всех материалах. Максимальное его количество содержится в сплаве AMg4.5.

2.2. Методики квазистатических и динамических испытаний на растяжение

Экспериментальное исследование статической и динамической прочности материалов было выполнено на образцах с рабочей частью 5 mm на 2 mm в длину и ширину соответственно. Установка ShimadzuAG-50 kNX использовалась для растяжения в квазистатических режимах при скорости деформации $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, а установка Instron CEAST 9350 — для реализации ударных растягивающих нагрузок при скорости деформации порядка $10^2 - 10^3 \text{ s}^{-1}$.

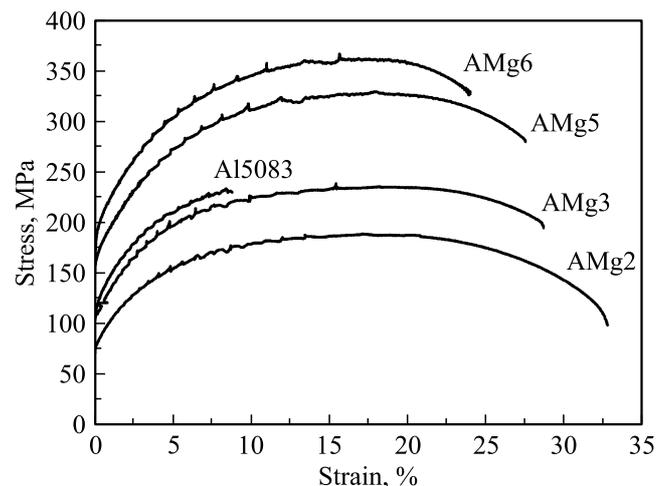
Выполненные ранее исследования [9,10] с использованием башенного копра и специальных захватов подтвердили работоспособность используемой схемы.

Известно, что для многих материалов, при увеличении скорости деформации критическое напряжение разрушения растет [11–14]. Однако фиксация скорости деформации на малых образцах является сложной задачей и в данном исследовании более приемлемым является контроль изменения критических напряжений в зависимости от вариации скорости роста напряжений [9]. Скорость роста напряжений также отражает чувствительность материала к интенсивности воздействия.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Результаты механических испытаний

На рис. 1 представлены диаграммы одноосного деформирования сплавов AMg2, AMg3, Al5083 (AMg4.5), AMg5, AMg6 при скорости деформации $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. С увеличением процентного содержания Mg в сплаве

**Рис. 1.** Диаграммы одноосного деформирования сплавов AMg2, AMg3, Al5083 (AMg4.5), AMg5, AMg6 при скорости деформации $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

увеличивается прочность материала при незначительном снижении пластичности. На этом фоне выделяется сплав Al5083 (AMg4.5) производства фирмы Gleich Aluminium GmbH. Материал поставляется в литом виде без сформированной текстуры [15,16]. Все остальные материалы подвергались первоначальной деформационной обработке.

Для оценки механической прочности были определены стандартные характеристики материалов (табл. 2): временное сопротивление разрыву σ_{UTS} , условный предел текучести $\sigma_{0.2}$, относительное удлинение δ .

Максимальное относительное удлинение образцов было зафиксировано для сплава AMg2, минимальное для AMg4.5, что соответствует их паспортным характеристикам. Также стоит отметить и снижение пластичности у сплава AMg6.

Среди полученных данных особый интерес представляют диаграммы сплавов AMg3 и AMg4.5. Данные сплавы имеют близкие значения прочности, но относительное удлинение различается в три раза. Это позволяет провести исследование динамической прочности материалов с близкими значениями прочности и различными характеристиками пластичности.

Таблица 2. Механические характеристики алюминиевых сплавов системы Al–Mg

Сплав	$\sigma_{0.2}$, MPa	σ_{UTS} , MPa	δ , %	τ , μs
AMg2	71 ± 0.5	188 ± 1	33.5 ± 0.5	18
AMg3	105 ± 1	236 ± 2	28.6 ± 0.7	15
AMg4.5 (Al5083)	110 ± 1	235 ± 2	10 ± 2	16
AMg5	156 ± 2	319 ± 3	29 ± 1.5	10
AMg6	170 ± 2	359 ± 3	23.8 ± 1	9

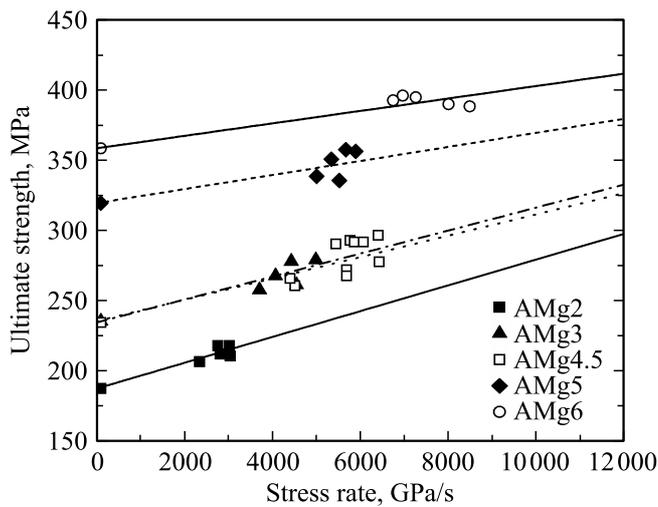


Рис. 2. Зависимость прочности на растяжение от скорости роста напряжений для алюминиевых сплавов системы Al–Mg. Динамические кривые построены по критерию (1) с параметрами материала (табл. 2).

Предельные величины прочности на растяжение для исследуемых материалов в зависимости от скорости роста напряжений представлены маркерами на рис. 2.

С ростом скорости приложения нагрузки для сплавов AMg5 и AMg6 коэффициент динамического упрочнения ниже чем у сплавов AMg2, AMg3 и AMg4.5.

Отмеченные особенности поведения материала при высоких скоростях нагружения можно объяснить с применением структурно-временного подхода. В качестве критерия разрушения материала при растяжении возьмем хорошо зарекомендовавший себя для динамических задач критерий инкубационного времени [17,18]:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{\sigma(s)}{\sigma_{\text{UTS}}} ds \leq 1, \quad (1)$$

где t — время, $\sigma(s)$ — зависимость разрывающего напряжения от времени, σ_{UTS} — временное сопротивление разрыву при квазистатическом нагружении, τ — инкубационное время разрушения, являющееся мерой прочности в динамическом диапазоне параметров внешнего воздействия. Константы σ_{UTS} и τ являются параметрами прочности материала. Критерий позволяет объяснять и прогнозировать особенности скоростных зависимостей критических разрушающих напряжений в материалах, которые зачастую показывают нестабильное поведение, зависящее от параметров и способа приложения внешней нагрузки.

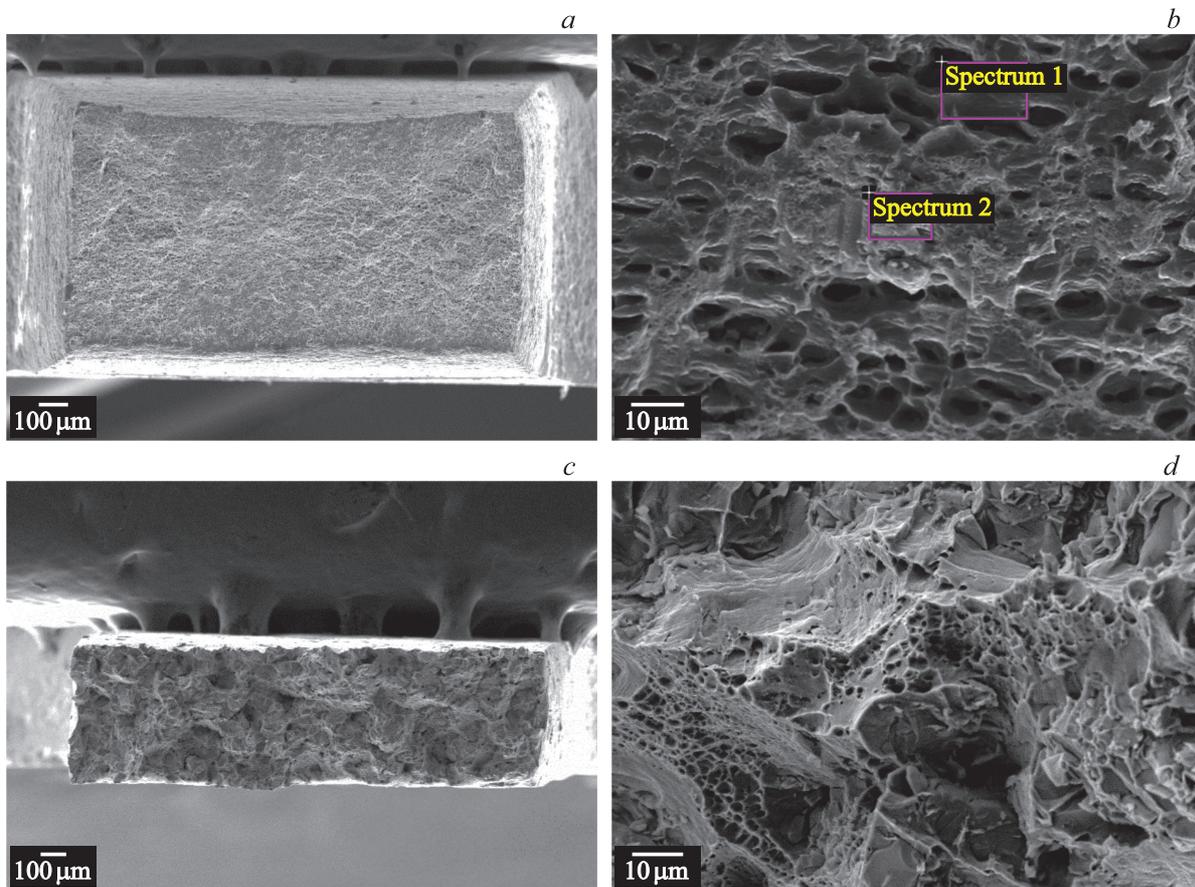


Рис. 3. Данные сканирующей электронной микроскопии. Фрактография образцов *a, b* — AMg3; *c, d* — AMg4.5 после растяжения при скорости деформации $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

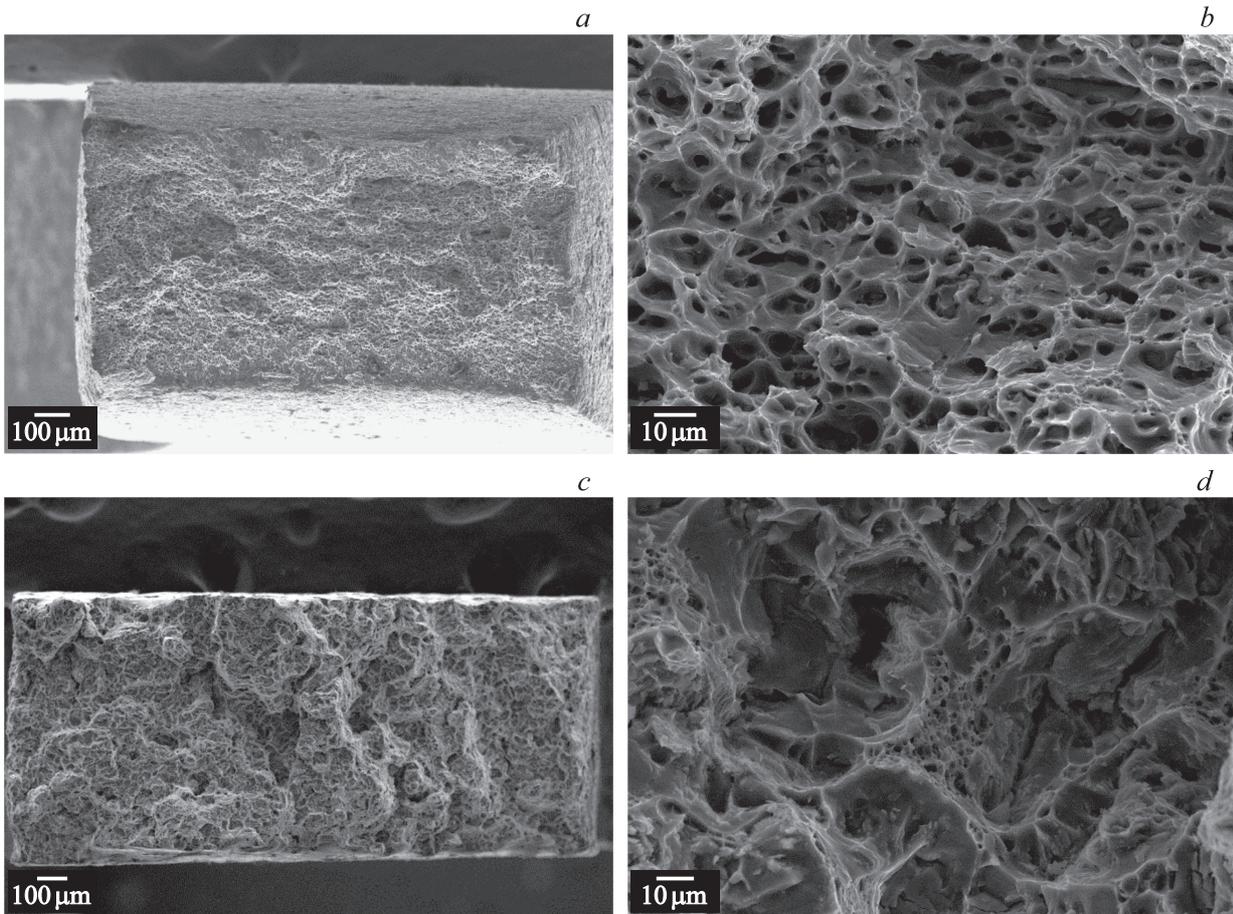


Рис. 4. Данные сканирующей электронной микроскопии. Фрактография образцов *a, b* — AMg3; *c, d* — AMg4.5 после растяжения при скорости 4400 GPa/s.

В качестве модельного разрывающего напряжения был выбран импульс (2), линейно возрастающий во времени, что наиболее приближено к условиям ударного эксперимента

$$\sigma(t) = \dot{\sigma} \cdot t \cdot H(t), \quad (2)$$

где $H(t)$ — функция Хевисайда, $\dot{\sigma}$ — скорость роста напряжений. Подставляя выражение (2) в критерий (1) при достижении равенства находим момент времени разрушения как функцию от $\dot{\sigma}$ (3)

$$t^* = \begin{cases} \tau/2 + \sigma_{UTS}/\dot{\sigma}, & t^* \geq \tau \\ \sqrt{2\sigma_{UTS} \cdot \tau/\dot{\sigma}}, & t^* < \tau \end{cases} \quad (3)$$

Тогда из (2) следует следующее выражение для порогового напряжения

$$\sigma^* = \sigma(t^*) = \begin{cases} \sigma_{UTS} + \dot{\sigma} \cdot \tau/2, & t^* \geq \tau \\ \sqrt{2\dot{\sigma} \cdot \sigma_{UTS} \cdot \tau}, & t^* < \tau \end{cases} \quad (4)$$

Инкубационное время разрушения τ можно определить полуэмпирическим методом путем перебора величин параметра τ и сравнения получаемых величин

с экспериментальными данными. Поиск искомой величины параметра заключается в минимизации отклонения теоретической кривой от экспериментальных точек. Итоговые величины τ для каждого из рассмотренных материалов приведены в табл. 2.

Анализируя полученные данные, представленные на рис. 2, можно отметить, что алюминиевые сплавы AMg2, AMg3 и AMg4.5 имеют примерно одинаковую динамическую прочность в терминах инкубационного времени. Это выражается в наклоне расчетной кривой в координатах предельное напряжение — скорость роста напряжений. С ростом скорости приложения нагрузки тенденция относительно соотношения прочностных характеристик, полученная в квазистатической области нагружения, сохраняется. В случае же сплавов AMg5 и AMg6 динамические кривые прочности имеют меньший наклон, что выражается меньшей динамической прочностью в терминах инкубационного времени. По всей видимости, полученные результаты связаны с различиями в химическом составе материалов. В случае динамического нагружения сплав AMg4.5 не выделяется из общей тенденции, несмотря на свои деформационные характеристики при квазистатическом нагружении.

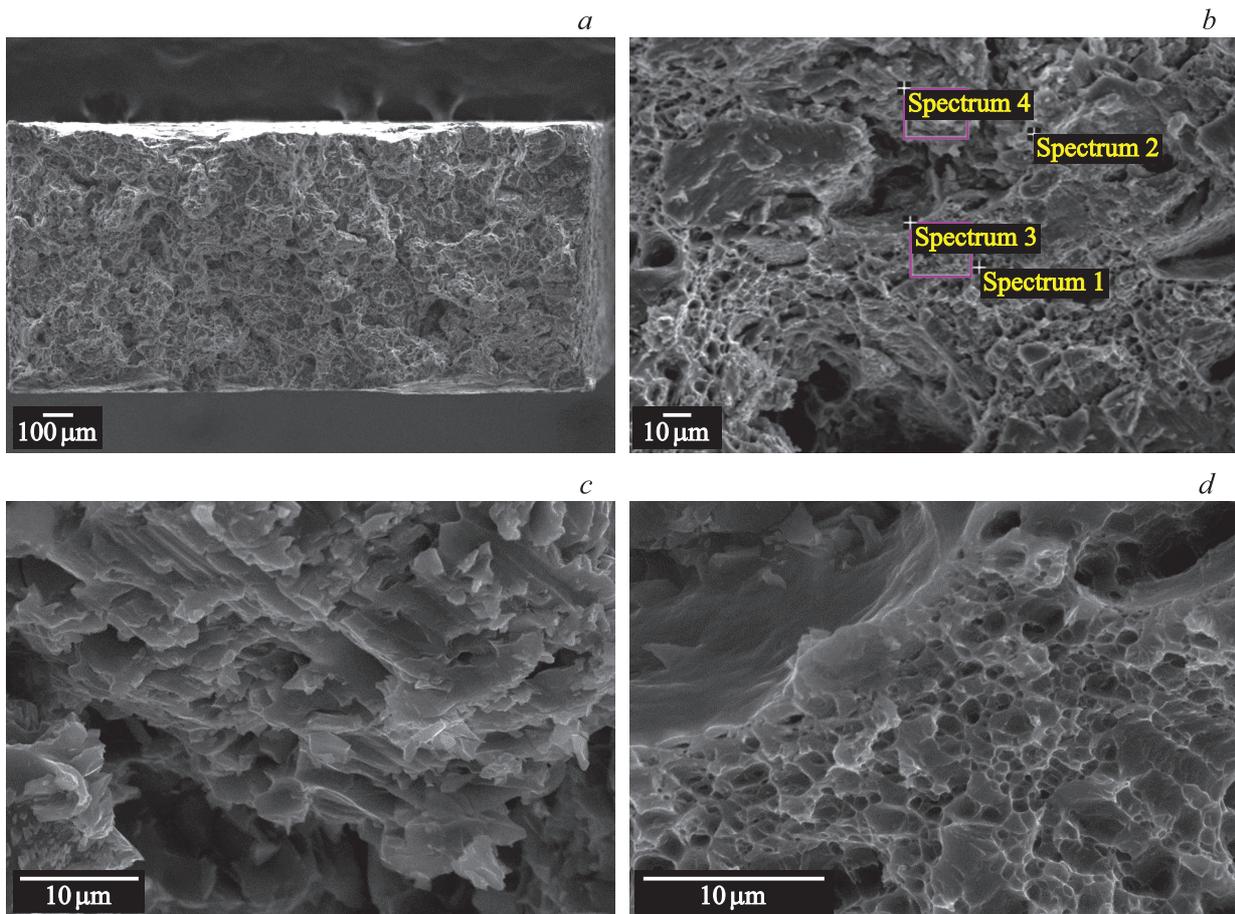


Рис. 5. Данные сканирующей электронной микроскопии. Фрактография образцов АМg4.5 после растяжения при скорости 5860 GPa/s; *c* — область „Spectrum 4“; *d* — область „Spectrum 3“.

Остановимся более детально на особенностях деформирования сплавов АМg3 и АМg4.5.

3.2. Результаты анализа поверхности разрушения

На рис. 3 представлены данные фрактографии поверхности разрушения образцов АМg3 и АМg4.5 после растяжения со скоростью $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Данные получены с использованием сканирующего электронного микроскопа Zeiss Merlin. Различия в деформационной картине кардинальные. Во-первых, для сплава АМg3 характерна локализация деформации, сопровождающаяся уменьшением сечения в среднем на 50%, в то время как для сплава АМg4.5 только 17%. Во-вторых, сплав АМg3 имеет более ровную поверхность разрушения, на которой выделяются две области с различными размерами ямок. В области с меньшими ямками (рис. 3, *b* „Spectrum 1“) концентрируются Si, Mn и Fe. В области „Spectrum 2“ данные элементы отсутствуют. При этом, поскольку ямочная поверхность разрушения (рис. 3, *b*, рис. 4, *b*) не обнаруживает ручьистого узора, то данные ямки не должны идентифицироваться как фасетка скола. Данный

вид разрушения можно отнести к вязкому разрушению, инициированному путем зарождения, слияния и роста микропор. В свою очередь сплав АМg4.5 показал сильно выраженную рельефную смешанную структуру поверхности разрушения на которой присутствуют признаки вязкого ямочного разрушения и хрупкого скола.

С ростом скорости приложения нагрузки для сплава АМg3 (рис. 4, *a, b*) до $\dot{\sigma} = 4400 \text{ GPa/s}$ деформационная картина становится более однородной с равномерным распределением одноразмерных ямок. Рентгеноструктурный анализ показывает равномерное распределение химических элементов из состава сплава по поверхности разрушения.

Поверхность разрушения сплава АМg4.5 при скорости $\dot{\sigma} = 4400 \text{ GPa/s}$ схожа со случаем квазистатического нагружения. Поверхность разрушения образована в основном путем скола и отрыва. Аналогичная картина наблюдается и при $\dot{\sigma} = 5860 \text{ GPa/s}$ (рис. 5). На поверхности разрушения образцов можно выделить отдельные области с глубокими ямками, которые являются инициаторами разрушения. Только в отличие от инициаторов на поверхности разлома у АМg3, в АМg4.5 разломы сопровождаются смесью хрупкого и вязкого

разрушения (рис. 5, *c* и *d* соответственно). При этом в областях, соответствующих хрупкому разрушению, концентрируются элементы Si, Mn и Fe, в то время как, во-вторых, эти элементы отсутствуют. Поверхности разрушения сплава AMg4.5 содержат фасетки сколов (рис. 3, *d*, 4, *d*, 5, *b*). Наличие признаков хрупкого и вязкого разрушения на поверхности слома говорит о конкуренции двух механизмов разрушения — хрупкого и вязкого. Данный факт позволяет объяснить существенные различия в области деформирования образцов как в области квазистатических, так и в области динамических нагрузок.

4. Заключение

В работе получены диаграммы деформирования алюминиевых сплавов системы Al–Mg в случае квазистатического нагружения и скоростные зависимости максимальных растягивающих напряжений в случае ударного воздействия. Показано, что с ростом концентрации Mg в сплаве увеличиваются пределы текучести и временной прочности при незначительном уменьшении пластичности. Однако эта закономерность нарушается при рассмотрении сплава AMg4.5 в литом состоянии без сформированной деформационной обработкой внутренней структуры.

Несмотря на пониженные пластические характеристики сплава AMg4.5 в области статического нагружения, данный материал демонстрирует динамическую прочность в терминах инкубационного времени на уровне AMg3, при равных значениях статической прочности. Расчеты с использованием структурно-временного подхода позволяют сделать вывод о достаточности уровня пластичности у сплава AMg4.5 для работы в реализованных скоростных режимах. Несмотря на существенные различия в деформационных процессах, происходящих в материалах AMg4.5 и AMg3, итоговые значения динамической прочности оказываются соизмеримыми, за тем исключением, что AMg4.5 является более хрупким и тем самым более чувствительным материалом к изменению внешнего воздействия. Это выражается в способности материала реагировать на ударное нагружение с более высокими скоростями роста напряжений и их максимальными значениями, превосходящими материал AMg3.

Выполненные исследования показали, что применение материала в экстремальных условиях нагружения требует всестороннего экспериментально-теоретического изучения его прочностных и пластических характеристик. Ухудшение свойств по одному из параметров может не оказать влияния на безопасную эксплуатацию конечного объекта в допустимом диапазоне ударных нагрузок.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (№ 19-31-60031).

Механические и структурные исследования проведены с использованием оборудования лаборатории СПбГУ „Механики перспективных массивных наноматериалов для инновационных инженерных приложений“, ресурсных центров Научного парка СПбГУ „Исследование экстремальных состояний материалов и конструкций“ и „Нанотехнологии“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.R. Davis. Aluminum and aluminum alloys. Ohio: ASM International, Materials Park (1993). 783 p.
- [2] G.V. Stepanov, V.V. Astanin, V.I. Romanchenko, A.P. Vashchenko, V.M. Tokarev, B.D. Chukhin, Y.P. Guk. *Strength Mater.* **15**, 220 (1983).
- [3] А.М. Брагов, А.К. Ломунов. *ПМТФ* **5**, 168 (1988);
- [4] А.М. Брагов, В.Л. Кариалоо, Ю.В. Петров, А.Ю. Константинов, Д.А. Ламзин, А.К. Ломунов, И.В. Смирнов. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **53**, 6, 926 (2012).
- [5] А.А. Груздков, Е.В. Ситникова, Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров. *Mathem. Mech. Solid.* **14**, 72 (2009).
- [6] А.А. Груздков, С.И. Кривосшеев, Ю.В. Петров. *Phys. Solid State* **45**, 886 (2003).
- [7] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.A. Bogatch, A.V. Utkin, V.E. Fortov, D.E. Grady. *J. Appl. Phys.* **20**, 467 (1997).
- [8] Г.В. Гаркушин, Г.И. Канель, С.В. Разоренов. *ФТТ* **52**, 2216 (2010).
- [9] А.Д. Евстифеев, И.В. Смирнов, Ю.В. Петров. *Phys. Solid State* **61**, 1062 (2019).
- [10] А.Д. Евстифеев, А.А. Шеврычкина, Ю.В. Петров. *Mater. Phys. Mechan.* **32**, 258 (2017).
- [11] W. Goldsmith, J.L. Sackman, C. Ewerts. *Rock. Mech. Min. Sci. Geomech.* **13**, 303 (1976).
- [12] S. Howe, W. Goldsmith, J. Sackman. *Exp. Mech.* **14**, 337 (1974).
- [13] Ю.В. Петров, И.В. Смирнов, А.А. Уткин. *Mech. Solids* **45**, 476 (2010).
- [14] Н.А. Златин, С.М. Мочалов, Г.С. Пугачев, А.М. Брагов. *ФТТ* **16**, 1752 (1974).
- [15] Я.Д. Вишняков, А.А. Бабарэко, С.А. Владимиров, И.В. Эгиз. *Теория образования текстур в материалах и сплавах.* Наука, М. (1979). 343 с.
- [16] М.А. Штремель. *Прочность сплавов.* Ч. 2. МИСиС, М. (1997). 527 с.
- [17] Ю.В. Петров, А.А. Уткин. *Sov. Mater. Sci.* **25**, 153 (1989).
- [18] Ю.В. Петров, Н.Ф. Морозов. *ASME J. Appl. Mech.* **61**, 710 (1994).

Редактор Т.Н. Василевская