

УДК 536.2.023;532.591

ПОВЕДЕНИЕ МАГНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ

© 2022 г. Е. В. Струлева¹, *, П. С. Комаров¹, С. А. Евлашин², С. И. Ашитков¹¹ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

*E-mail: struleva.evgenia@yandex.ru

Поступило в редакцию 21.07.2022 г.

После доработки 09.09.2022 г.

Принято к публикации 13.10.2022 г.

Проведено исследование движения тыльной свободной поверхности пленочного образца магниевого сплава субмикронной толщины при воздействии лазерными импульсами субпикосекундной длительности. Непрерывная диагностика смещения свободной задней поверхности образца осуществлена в пикосекундном диапазоне в одноимпульсном режиме с использованием спектральной интерферометрии. Получено значение откольной прочности при скорости деформирования $\sim 10^9$ с⁻¹, величина которой составляет около 53% от предельно возможной прочности для магниевого сплава.

DOI: 10.31857/S004036442205012X

ВВЕДЕНИЕ

Исследование прочностных свойств материалов при воздействии ультракороткими нагрузками пикосекундного диапазона в настоящее время вызывает значительный интерес [1–9]. Данные исследования перспективны с точки зрения разработки широкодиапазонных уравнений состояния вещества, развития теории фазовых переходов, прочности и пластичности, расчетного прогнозирования интенсивных импульсных воздействий на материалы в широком диапазоне параметров нагрузки, верификации гидродинамических расчетов и результатов атомистического моделирования, а также постановки новых задач.

Предел текучести твердых тел возрастает с увеличением скорости нагружения. Для многих кристаллических тел эта зависимость резко усиливается с превышением скорости деформирования 10^3 – 10^4 с⁻¹, что интерпретируется как следствие изменения механизма движения дислокаций от термофлуктуационного к надбарьерному, контролируемому фонным трением [10]. Разрушение конденсированного вещества при высокоскоростном растяжении происходит путем зарождения, роста и слияния многочисленных несплошностей, однако скорость этих процессов ограничена. При малой длительности и высокой амплитуде ударной нагрузки сопротивление разрушению твердых тел становится сравнимо с предельной теоретической прочностью, которая определяется непосредственно потенциалом межатомных взаимодействий [11]. В работах [1–9] на металлических пленочных образцах в пикосекундном диапазоне удалось приблизиться к иде-

альным значениям объемной и сдвиговой прочности. Накопление таких экспериментальных данных требуется для выявления общих закономерностей скоростных зависимостей сопротивления разрушению в широком диапазоне параметров для различных материалов.

В данной работе с помощью интерферометрической методики непрерывной регистрации движения поверхности с использованием частотно-модулированного (чирпированного) диагностического импульса измерена откольная прочность магниевого сплава (Mg–4Al–2Zn) в твердой фазе вблизи предела теоретической прочности. Исследование поведения магниевых сплавов как легких и высокопрочных материалов оказывается актуальным в связи с широкой областью практического применения в промышленности [12–15].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследования динамической прочности материалов на разрыв в диапазоне длительностей нагрузки $\leq 10^{-6}$ с регистрируются откольные явления при отражении импульса ударно-волнового сжатия от свободной поверхности тела. Для этого определяется профиль скорости свободной поверхности как функции времени $u_{fs}(t)$.

Источником лазерных импульсов являлась титан-сапфировая лазерная система, генерирующая импульсы с энергией до 2 мДж на длине волны 800 нм. Лазерная система собрана по принципу усиления чирпированных импульсов.

Экспериментальный образец представлял собой поликристаллическую пленку из магниевого

сплава (Mg–4Al–2Zn) толщиной 660 нм, нанесенную методом магнетронного напыления на стеклянную подложку толщиной 120 мкм. Сплав состоял из 94% Mg, 4% Al и 2% Zn. Толщина пленочных образцов измерялась электронным микроскопом непосредственно в области проведения экспериментов. В экспериментальной схеме лазерное воздействие на образец осуществлялось со стороны стеклянной подложки. Диагностика изменений проводилась на тыльной (свободной) поверхности. Нагревающий импульс фокусировался линзой с фокусным расстоянием 20 см через подложку на поверхность металлической пленки с радиусом пучка 30 мкм по уровню e^{-1} с гауссовым распределением интенсивности. Существовало ограничение на энергию нагревающего лазерного излучения в связи с возможным возникновением оптического пробоя в стеклянной подложке при интенсивности $\sim 10^{13}$ Вт/см². Поэтому для уменьшения пиковой интенсивности (при неизменном значении энергии) длительность нагревающего импульса была увеличена с 40 фс до 0.8 пс с помощью соответствующей настройки оптического компрессора лазерной системы.

Энергия в каждом импульсе плавно варьировалась с помощью поляризационного ослабителя и измерялась калиброванным фотодиодом. После каждого воздействия мишень перемещалась на новое место на расстояние около 300 мкм с помощью микроманипулятора.

Для диагностики смещения свободной поверхности мишени часть chirпированного импульса длительностью 300 пс с шириной спектра 40 нм и центральной длиной волны $\lambda_0 = 800$ нм отводилась из лазерного тракта перед компрессором. В экспериментальной схеме применялся интерферометр Майкельсона, собранный по схеме переноса изображения, и дифракционный спектрометр Acton-2300i (схема Черни–Тернера) с решеткой 600 штрих/мм. Перенос изображения осуществлялся с помощью микрообъектива Olympus с числовой апертурой $NA = 0.3$. Регистрация оптических сигналов на выходе спектрометра производилась с помощью ПЗС-камеры SensiCam QE с матрицей размером 1420×1080 пкс и разрядностью 12 бит. В каждом эксперименте записывались три типа интерферограмм: поверхности образца до воздействия (начальная), в момент воздействия выхода ударной волны (временная) и после окончания процесса — спустя несколько секунд после воздействия (финальная). Сопоставление начальной и временной интерферограмм дает информацию о динамике ударно-волнового процесса.

Применяемая методика измерений обеспечивала непрерывную регистрацию динамики процесса в интервале $\Delta t = 0–200$ пс с временным разрешением $\delta t \approx 2$ пс. Более подробно оптическая схема и методика измерений описана в [16, 17].

Дальнейшая обработка интерферограмм проводилась с помощью двумерного фурье-анализа, подробно описанного в работах [17–19]. Результатом анализа являлись пространственно-временные распределения изменения фазы $\Delta\varphi(x, t)$ отраженной от мишени диагностической волны.

Величина смещения границы поверхности $z(t)$ связана с изменением фазы $\Delta\varphi(t)$ соотношением

$$z(t) = \frac{\Delta\varphi(t)\lambda}{4\pi}.$$

При этом точность измерения фазы составляла $\delta\varphi \approx 0.02$ рад, что соответствует погрешности определения смещения поверхности на уровне $\delta z \approx (1–2)$ нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведено пространственно-временное распределение $\Delta\varphi(x, t)$, описывающее динамику пространственно-неоднородного движения тыльной свободной поверхности пленочного образца магниевого сплава толщиной $h = 660$ нм в момент выхода ударной волны, генерируемой лазерным импульсом с энергией $E = 50$ мкДж.

Измеренный профиль смещения $z(t)$ тыльной свободной поверхности магниевого образца и профиль скорости $u_{fs}(t)$, полученный путем дифференцирования зависимости $z(t)$, показаны на рис. 2. Профили построены для центральной части области взаимодействия при $E = 50$ мкДж.

Интерференция падающей и отраженной волн внутри образца приводит к возникновению в нем растягивающих напряжений. Откольное разрушение или откол с образованием откольной пластины наблюдаются, если величина растягивающих напряжений превосходит некоторое критическое значение для данного материала. По мере развития разрушения растягивающие напряжения релаксируют к нулю. Формируются волны сжатия в обе стороны от поверхности откола. Выход волны сжатия на свободную поверхность от-

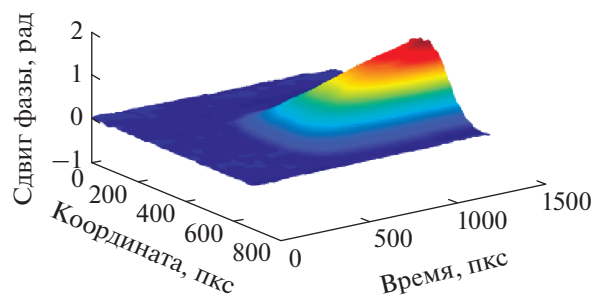


Рис. 1. Пространственно-временное распределение фазы диагностического импульса при выходе ударной волны на свободную тыльную поверхность образца; масштаб по оси времени — 0.164 пс/пкс, пространственный масштаб по вертикальной оси — 0.3 мкм/пкс.

кольной пластины приводит к повторному возрастанию ее скорости (откольный импульс) [11]. Величина растягивающего напряжения непосредственно перед разрушением определяется методом характеристик по декременту скорости свободной поверхности Δu_{fs} между ее максимальным значением и значением перед откольным импульсом [11].

На рис. 2 на профиле $u_{fs}(t)$ на фронте волны вблизи максимального значения скорости свободной поверхности регистрируется уменьшение градиента скорости. Аналогичная особенность наблюдалась на других профилях в данной серии экспериментов. Такое поведение может быть связано с наличием упругого предвестника в упругопластической волне сжатия, амплитуда которого на субмикронной длине распространения в металлах может составлять от единиц до десятков гигапаскалей [1–8].

Откольная прочность в упругопластическом теле для импульсов нагрузки треугольной формы определяется выражением [20]

$$\sigma_{spall} = \rho c_l \Delta u_{fs} \frac{1}{1 + c_l/c_b}.$$

Здесь $\rho = 1.79$ – начальная плотность, г/см³; $c_l = 5.78$ – продольная скорость звука в магниевом сплаве [13] км/с; $c_b = 4.5$ – объемная скорость звука в магнии [21], км/с; $\Delta u_{fs} = 0.7$ км/с – разность между максимальным и минимальным значениями скорости свободной поверхности из рис. 2. Соответствующее значение откольной прочности при этом равно $\sigma_{spall} = 3.2$ ГПа.

Под скоростью деформирования $\dot{\epsilon}$ в ударно-волновых экспериментах понимается скорость расширения вещества в волне разряжения. Скорость деформирования определяется по соотношению

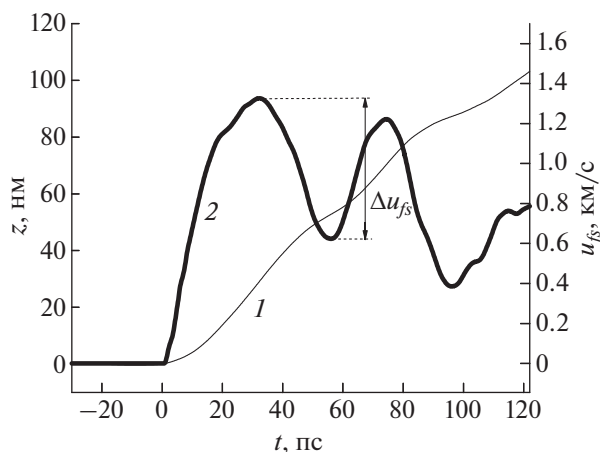


Рис. 2. Временные профили смещения (1) и скорости (2) движения свободной поверхности магниевого образца при $E = 50$ мкДж.

$$\dot{\epsilon} = \dot{V}/V_0 = -\dot{u}_{fs}/2c_b,$$

где \dot{u}_{fs} – измеренная скорость спада скорости свободной поверхности в разгрузочной части импульса ударного сжатия [11], и составляет $\dot{\epsilon} \approx 3.2 \times 10^9$ с⁻¹. Толщину откола можно оценить по формуле $L_{spall} \approx c_b \Delta t/2 \approx 54$ нм, где $\Delta t = t_{min} - t_{max} \approx 24$ пс (рис. 2). Таким образом, получается, что откольное разрушение в образце магниевого сплава происходит в твердом состоянии. После откола на профиле $u_{fs}(t)$ наблюдаются осцилляции, связанные с акустическими колебаниями откольного слоя.

На рис. 3 полученное в настоящей работе значение динамической откольной прочности магниевого сплава сопоставляется с данными экспериментов по соударению пластин в микросекундном диапазоне длительности ударного нагружения.

С увеличением скорости растяжения имеет место существенное увеличение динамической прочности магния и сплавов на разрыв. В настоящей работе удалось достичь значения σ_{spall} , которое составляет около 53% от значения “идеальной” откольной прочности для магниевого сплава. Расчетное предельное значение прочности на растяжение данного сплава по результатам [23] равно $\sigma_{lim} = 6.01$ ГПа. Так как данные, полученные в результате экспериментов с лазерными ударными волнами с образцами субмикронной толщины, могут быть согласованы со сведениями, полученными на образцах миллиметровой толщины в экспериментах по удару пластин, это позволяет спрогнозировать поведение магния и сплавов в широком диапазоне скоростей деформации от 10^5 до 10^9 с⁻¹.

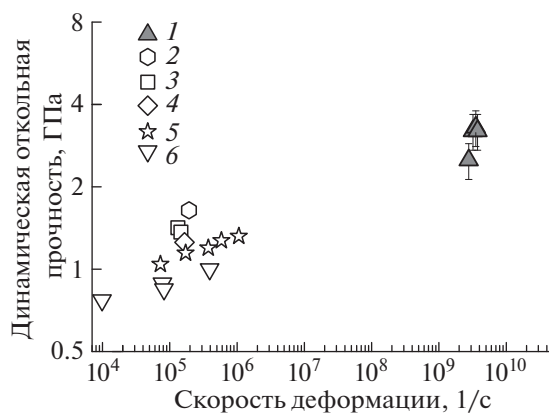


Рис. 3. Результат измерения динамической откольной прочности сплава Mg–4Al–2Zn в зависимости от скорости деформирования по данным настоящей работы (1) в сравнении с данными экспериментов по соударению пластин: 2–4 – для монокристаллов ориентации (1010), (0001) и 45° [22]; 5 – сплава Mg2–1 [13]; 6 – крупнозернистого первичного магния Mg95 [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интерферометрическим методом с пикосекундным разрешением исследована динамика движения свободной поверхности магниевых сплавов Mg–4Al–2Zn при выходе ударной волны, генерируемой лазерными импульсами субпикосекундной длительности. Измерена откольная прочность магниевых сплавов, равная 3.2 ГПа, при скорости деформирования $3.2 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$. Полученные в настоящей работе данные позволяют характеризовать тенденцию роста динамической прочности магния и его сплавов в широком диапазоне скоростей деформирования. Представленные экспериментальные данные дополняют литературные данные о сопротивлении разрушению магния и его сплавов в микросекундном диапазоне, полученные в экспериментах по соударению пластин [13–15, 22, 24, 25]. Эти исследования представляют интерес для молекулярно-динамического моделирования разрушения сплава магния в пикосекундном диапазоне нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.). Эксперименты проведены на оборудовании ЦКП “Лазерный фемтосекундный комплекс” ОИВТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашитков С.И., Агранат М.Б., Канель Г.И. и др. Поведение алюминия вблизи предельной теоретической прочности в экспериментах с фемтосекундным лазерным воздействием // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. С. 568.
2. Whitley V.H., McGrane S.D., Eakins D.E. et al. The Elastic-Plastic Response of Aluminum Films to Ultrafast Laser-generated Shocks // Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 013505.
3. Crowhurst J.C., Armstrong M.R., Knight K.B. et al. Invariance of the Dissipative Action at Ultrahigh Strain Rates above the Strong Shock Threshold // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 144302.
4. Demaske B.J., Zhakhovsky V.V., Inogamov N.A., Oleynik I.I. Ultrashort Shock Waves in Nickel Induced by Femtosecond Laser Pulses // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. P. 054109.
5. Ashitkov S.I., Agranat M.B., Kanel G.I., Fortov V.E. Approaching the Ultimate Shear and Tensile Strength of Aluminum in Experiments with Femtosecond Pulse Laser // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1426. P. 1081.
6. Ашитков С.И., Комаров П.С., Агранат М.Б. и др. Реализация предельных значений объемной и сдвиговой прочности железа при воздействии фемтосекундными лазерными импульсами // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 98. С. 439.
7. Crowhurst J.C., Reed B.W., Armstrong M.R. et al. The $\alpha \rightarrow \epsilon$ Phase Transition in Iron at Strain Rates up to $\sim 10^9 \text{ s}^{-1}$ // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 113506.
8. Ашитков С.И., Комаров П.С., Струлева Е.В., Агранат М.Б., Канель Г.И. Механические и оптические свойства ванадия под действием ударных нагрузок пикосекундного диапазона // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101. С. 294.
9. Струлева Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И. Откольная прочность титана при высокоскоростном растяжении // ТВТ. 2020. Т. 58. № 5. С. 823.
10. Альшиц В.И., Инденбом В.Л. Динамическое торможение дислокаций // УФН. 1975. Т. 115. № 1. С. 3.
11. Канель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В. Ударные волны в физике конденсированного состояния // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 809.
12. Mordike B., Ebert T. Magnesium: Properties – Applications – Potential // Mater. Sci. Eng. A. 2001. V. 302. P. 37.
13. Garkushin G.V., Kanel' G.I., Razorenov S.V. High Strain Rate Deformation and Fracture of the Magnesium Alloy Mg-2-1 under Shock Wave Loading // Phys. Solid State. 2012. V. 54. P. 1079.
14. Garkushin G.V., Kanel G.I., Razorenov S.V. The Resistance to Deformation and Fracture of Magnesium Mg-2-1 under Shock-Wave Loading at 293 K and 823 K of the Temperature // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1426. P. 935.
15. Kanel G.I., Razorenov S.V., Bogatch A.A., Utkin A.V., Fortov V.E., Grady D.E. Spall Fracture Properties of Aluminum and Magnesium at High Temperatures // J. Appl. Phys. 1996. V. 79. P. 8310.
16. Ашитков С.И., Комаров П.С., Овчинников А.В., Струлева Е.В., Агранат М.Б. Динамика деформации и откольная прочность алюминия при однократном воздействии фемтосекундного лазерного импульса // Квант. электроника. 2013. Т. 43. № 3. С. 242.
17. Струлева Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И. Интерферометрическая диагностика нанодеформаций поверхности мишени в пикосекундном диапазоне при импульсном лазерном воздействии // Вестн. ОИВТ РАН. 2018. Т. 1. № 1. С. 130.
18. Geindre J.P., Audebert P., Rebibo S., Gauthier J.C. Single-Shot Spectral Interferometry with Chirped Pulses // Opt. Lett. 2001. V. 26. P. 1612.
19. Temnov V.V., Sokolovski-Tinten K., Zhou P., von der Linde D. Ultrafast Imaging Interferometry at Femtosecond Laser-Excited Surfaces // J. Opt. Soc. Am. B. 2006. V. 23. P. 1954.
20. Канель Г.И. Искажение волновых профилей при отколе в упругопластическом теле // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 2. С. 194.
21. Antoun T., Seaman L., Curran D.R., Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V. Spall Fracture. N.Y.: Springer, 2003. P. 317.
22. Kanel G.I., Garkushin G.V., Savinykh A.S., Razorenov S.V., de Resseguier T., Proud W.G., Tyutin M.R. Shock Response of Magnesium Single Crystals at Normal and Elevated Temperatures // J. Appl. Phys. 2014. V. 116. P. 143504.
23. Kanel' G.I. Distortion of the Wave Profiles in an Elastoplastic Body upon Spalling // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2001. V. 42. № 2. P. 358.
24. Renganathan P., Gupta Y.M. Shock Compression/Release of Magnesium Single Crystals Along a Low-Symmetry Orientation: Role of Basal Slip // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. P. 115902.
25. Winey J.M., Renganathan P., Gupta Y.M. Shock Wave Compression and Release of Hexagonal-close-packed Metal Single Crystals: Inelastic Deformation of C-Axis Magnesium // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. № 10. P. 105903.