

05

Формирование упругопластических фронтов и откольное разрушение в сплаве АМг6 при ударных воздействиях

© Н.В. Савельева¹, Ю.В. Баяндин¹, А.С. Савиных^{2,3},
Г.В. Гаркушин^{2,3}, С.В. Разоренов^{2,3}, О.Б. Наймарк¹

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

² Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: saveleva@icmm.ru

Поступило в Редакцию 29 мая 2018 г.

На основе анализа полных волновых профилей, зарегистрированных с помощью лазерного интерферометра VISAR в процессе ударно-волнового нагружения образцов сплава АМг6, исследуются закономерности выделения упругого предвестника, изменение его амплитуды при распространении упругопластического фронта в образцах при нагружении ударной волной разной интенсивности. Измерены критические напряжения, приводящие к откольному разрушению образцов в зависимости от скорости деформирования при разгрузке.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.18.46610.17411

Алюминиевые сплавы, обладающие повышенными пластическими и прочностными свойствами, широко применяются в авиа- и судостроении, и изучение их свойств в широком диапазоне интенсивностей нагружения представляет значительный интерес. Одним из таких сплавов является сплав АМг6, обнаруживающий при квазистатическом нагружении выраженные эффекты многомасштабной пластической неустойчивости (эффект Портевена–Ле Шателье) [1]. Эти эффекты проявляют себя как особенности в механизмах диссипации, в слабой зависимости характеристик трещиностойкости от скорости деформации при динамическом нагружении [2]. Исследование поведения данного сплава при ударно-волновом нагружении позволит более детально

изучить механизмы локализации пластической деформации и развития разрушения.

Двухволновая структура ударной волны в твердых телах, связанная с упругопластическим переходом, обычно наблюдается при умеренных амплитудах давлений ударного сжатия. Измерения прочностных характеристик данного сплава, выполненные в настоящей работе, основаны на анализе эволюции ударной волны при ее распространении по образцу [3]. Большинство экспериментов по регистрации полных волновых профилей проводится в условиях одномерного (или плосковолнового) нагружения, когда скорость упругого предвестника близка к продольной скорости звука, а скорость пластического фронта — к объемной скорости звука. Регистрация упругопластических волновых фронтов позволяет получить уникальную информацию о кинетике перехода от упругого деформирования материала к пластическому, исследовать роль структуры в развитии пластической деформации. Несмотря на многочисленные исследования закономерностей формирования ударно-волновых фронтов [4–7], изучение проблем, связанных с природой динамического предела упругости материала, характера его изменения при вариациях давления или скорости деформации, механизма затухания упругого предвестника при распространении волнового фронта до сих пор является актуальным. Настоящая работа посвящена изучению поведения алюминиевого сплава АМгб при ударно-волновом нагружении применительно к эффектам, определяющим механизмы формирования упругопластического фронта, а также особенностям откольного разрушения сплава при различных скоростях деформирования.

Проведены две серии экспериментов по ударно-волновому нагружению образцов из сплава АМгб при нормальной температуре с использованием взрывных генераторов и баллистической установки (газовой пушки) для инициирования плоских ударных волн соударением пластин-ударников и мишени [3]. Образцы-мишени сплава АМгб имели форму пластин, которые вырезались из прутка и отжигались при температуре 350°С в течение часа. Толщины образцов варьировались от 0.5 до 10 мм. В исходном состоянии средний размер зерна составлял 20 мкм, продольная скорость звука при плотности сплава $\rho_0 = 2640 \text{ kg/m}^3$ по данным акустических измерений равна $c_l = 6359 \pm 5 \text{ m/s}$, что соответствует [8]. В экспериментах с использованием взрывного генератора алюминиевые ударники толщиной от 0.2 до 4 мм разгонялись до скорости $660 \pm 60 \text{ m/s}$. В экспериментах с

газовой пушкой использовались медные ударники толщиной 2 мм, имеющие скорость перед соударением с образцом 350 ± 5 м/с. В первом случае максимальное давление ударного сжатия в образцах достигало 6 ГПа, во второй серии экспериментов — 5 ГПа. Во всех экспериментах регистрировались профили скорости свободной поверхности (u_{fs}) с помощью лазерного интерферометра VISAR [9].

Измеренные в экспериментах профили скорости свободной поверхности образцов сплава АМгб, показанные на рис. 1, демонстрируют расщепление ударной волны на упругий предвестник и пластический фронт. Для большей наглядности масштаб времени отнесен к толщине образца. Значение динамического предела упругости определялось по величине скорости свободной поверхности u_{HEL} , соответствующей амплитуде фронта упругого предвестника, с помощью соотношения $\sigma_{HEL} = 0.5\rho_0 c_1 u_{HEL}$.

Участки фронта пластической волны на измеренных профилях являются подобными и отражают автомодельные закономерности формирования пластических волновых фронтов, имеющих универсальный степенной характер зависимости скорости деформации $\dot{\epsilon}$ от амплитуды напряжений σ_a : $\dot{\epsilon} \sim A\sigma_a^4$ [10–12]. Универсальность связывается с формированием коллективных мод ансамблей дефектов, имеющих природу автомодельных решений — автоволновых фронтов, локализованных на соответствующих масштабах [13]. Последовательность инициирования коллективных мод проявляется на пластических фронтах, инициированных в тонких мишенях и обладающих многоволновой структурой. При этом волновые фронты представляют собой последовательность областей локализованной пластичности, соответствующих различным автоволновым структурам. Формирование установившегося пластического фронта достигается на некотором расстоянии от поверхности соударения (толщине мишени), когда масштаб локализованной автоволновой структуры приближается к масштабу волнового фронта.

На рис. 2 представлены результаты обработки экспериментальных профилей в виде зависимости динамического предела упругости от толщины образцов. Результаты показывают, что с ростом пройденного упругим предвестником расстояния (при увеличении толщины образца) амплитуда импульса упругого сжатия и соответственно значения динамического предела упругости алюминиевого сплава заметно уменьшаются. Полученные при одинаковых толщинах образцов для

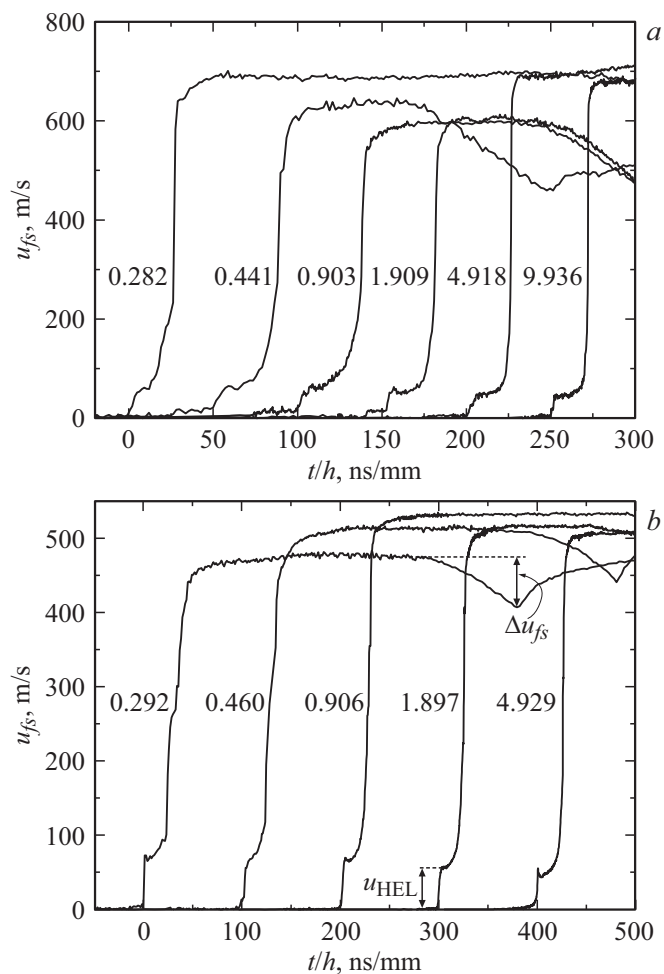


Рис. 1. Измеренные волновые профили в нормированных по толщине образца координатах. Числа около кривых — толщина образца (в mm). *a* — нагружение алюминиевым ударником со скоростью 660 ± 60 m/s, *b* — нагружение медным ударником со скоростью 350 ± 5 m/s.

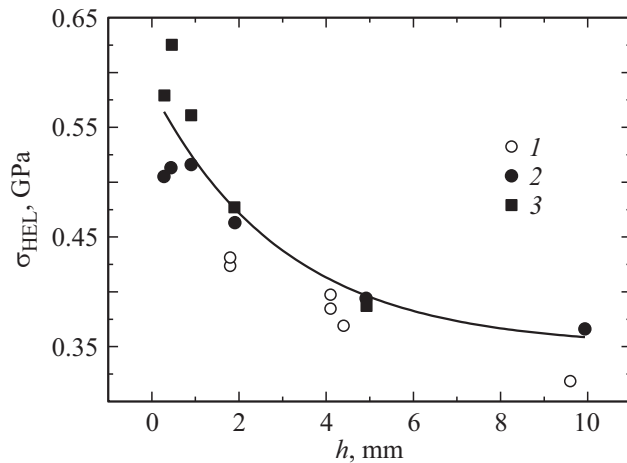


Рис. 2. Зависимость динамического предела упругости от толщины образца. 1 — АМг6М [14], 2 — нагружение алюминиевым ударником со скоростью 660 ± 60 m/s, 3 — нагружение медным ударником со скоростью 350 ± 5 m/s. Сплошная линия — аппроксимационная кривая $\sigma_{HEL} = 0.23546 \exp(-h/3.05235) + 0.34961$.

различных давлений ударного сжатия значения σ_{HEL} совпадают в рамках допустимой погрешности измерений.

На рис. 2 представлены полученные результаты в сопоставлении с данными по ударно-волновому нагружению сплава АМг6М [14]. Уменьшение амплитуды упругого предвестника при одинаковых толщинах образцов совпадает в рамках допустимой величины погрешности, что является свидетельством независимости величины динамического предела упругости в исследуемом диапазоне давлений ударного сжатия. Экспоненциальный характер затухания амплитуды упругого предвестника аналогичен наблюдаемому при ударно-волновом нагружении ванадия [15]. В [16] показано, что уменьшение амплитуды упругого предвестника является следствием изменения термодинамических свойств и падения упругого модуля материала при развитии (зарождении и росте) дефектов. Термодинамический потенциал — неравновесная свободная энергия материала с дефектами — обнаруживает при этом выраженную метастабильность. Кинетика роста дефектов в области

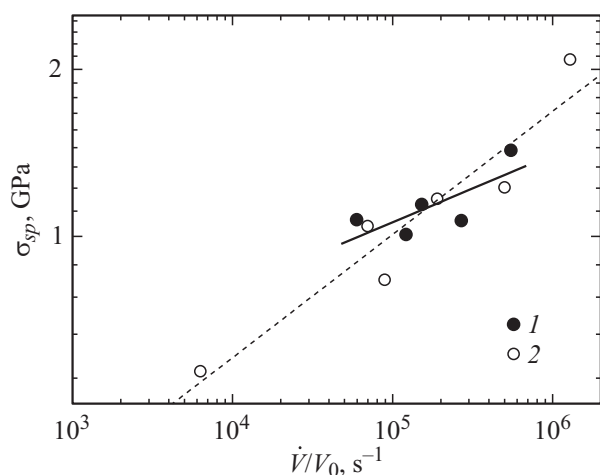


Рис. 3. Зависимость откольной прочности сплавов алюминий–магний от скорости деформации. 1 — АМг6 (сплошная), 2 — АМг6М [14,17] (штриховая линия).

метастабильности имеет признаки „спинодального распада“, который соответствует переходной области от амплитуды упругого предвестника к пластическому фронту.

На рис. 3 представлены зависимости откольной прочности сплава АМг6 от скорости деформации. Величина откольной прочности σ_{sp} пропорциональна декременту скорости свободной поверхности Δu_{fs} (рис. 1, *b*) и определяется с помощью соотношения [3]:

$$\sigma_{sp} = 0.5\rho_0 c_b (\Delta u_{fs} + \theta),$$

где c_b — объемная скорость звука, θ — поправка, которая рассчитывается в предположении простой суперпозиции падающей волны разрежения и откольного импульса с учетом измеренных градиентов скорости свободной поверхности перед фронтом откольного импульса и в самом импульсе. По сравнению с данными для АМг6М [14,17] зависимость откольной прочности сплава АМг6 обнаруживает несколько меньшую чувствительность к скорости деформации. Слабое влияние скорости деформации на откольную прочность, аналогичное эффекту

„динамической ветви“ зависимости времени разрушения от амплитуды импульса [18], дает основание предположить справедливость механизма откольного разрушения, установленного в [19]. При этом формирование откольной поверхности связывается с развитием множественных областей локализации поврежденности (очагов макроскопических трещин), кинетика зарождения которых имеет также автомодельный характер [20].

Эксперименты по ударно-волновому нагружению образцов сплава АМгб при различных максимальных давлениях ударного сжатия позволили установить подобие профилей скорости свободной поверхности мишеней различной толщины, следствием которого является автомодельность пластических волновых фронтов. Уменьшение амплитуды упругого предвестника объясняется изменением термодинамических свойств и падением упругого модуля материала при развитии дефектов. Поведение материала в переходной области от амплитуды упругого предвестника к пластическому фронту связывается с метастабильностью термодинамического потенциала и кинетикой „спинодального распада“ в среде с дефектами. Установлено слабое влияние скорости деформирования на откольную прочность, аналогичное эффекту „динамической ветви“ зависимости времени разрушения от амплитуды импульса.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-2439.2017.1) с использованием оборудования Московского регионального взрывного центра коллективного пользования РАН.

Список литературы

- [1] Kok S., Bharathi M.S., Beaudoin A.J., Fressengeas C., Ananthakrishna G., Kubin L.P., Lebyodkin M. // Acta Mater. 2003. V. 51. N 13. P. 3651–3662.
- [2] Froustey C., Naimark O., Bannikov M., Oborin V. // Eur. J. Mech. A. 2010. V. 29. N 6. P. 1008–1014.
- [3] Kanel G.I., Razorenov S.V., Fortov V.E. Shock-wave phenomena and the properties of condensed matter. N.Y.: Springer-Verlag, 2004. 322 p.
- [4] Kanel G.I., Razorenov S.V., Garkushin G.V. // J. Appl. Phys. 2016. V. 119. N 18. P. 185903.
- [5] Zaretsky E.B., Kanel G.I. // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. N 7. P. 073504.
- [6] Zaretsky E.B., Kanel G.I. // J. Appl. Phys. 2016. V. 120. N 10. P. 105901.

- [7] *Antoun T., Seaman L., Curran D.R., Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V.* Spall fracture. N.Y.: Springer-Verlag, 2003. 404 p.
- [8] *Волков А.Д., Кокшайский А.И., Коробов А.И., Прохоров В.М.* // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 685–691.
- [9] *Asay J.R., Barker L.M.* // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 6. P. 2540–2546.
- [10] *Наймарк О.Б.* // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. В. 9. С. 751–757.
- [11] *Naimark O.B.* // J. Phys. IV (France). 2006. V. 134. P. 3–9.
- [12] *Naimark O.B., Bayandin Yu.V., Zocher M.A.* // Phys. Mesomech. 2017. V. 20. N 1. P. 10–30.
- [13] *Naimark O.B.* // Advances in multifield theories of continua with substructure / Eds G. Capriz, P. Mariano. Boston: Birkhauser, 2004. P. 75–114.
- [14] *Разоренов С.В., Канель Г.И., Фортвов В.Е.* // ФММ. 2003. Т. 95. № 1. С. 91–96.
- [15] *Савельева Н.В., Баяндин Ю.В., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Ляпунова Е.А., Разоренов С.В., Наймарк О.Б.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 12. С. 32–39.
- [16] *Bayandin Yu., Saveleva N., Naimark O.B.* // Interfacial Phenom. Heat Transfer. 2017. V. 5. N 2. P. 129–141.
- [17] *Канель Г.И., Разоренов С.В., Фортвов В.Е.* // ПМТФ. 1984. № 5. С. 60–64.
- [18] *Златин Н.А., Пугачев Г.С., Беллендир Э.Н., Зильбербранд Е.Л.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 4. С. 797–802.
- [19] *Naimark O.B.* // Int. J. Fracture. 2016. V. 202. P. 271–279.
- [20] *Беляев О.Б., Наймарк О.Б.* // ДАН СССР. 1990. Т. 312. № 2. С. 289–293.