

07,01

Влияние ультрамелкозернистой структуры материала на прочностные характеристики сплава алюминия при ударных нагрузках

© А.Д. Евстифеев, И.В. Смирнов, Ю.В. Петров

Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ad.evstifeev@gmail.com

Поступила в Редакцию 26 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 23 января 2019 г.

Принята к публикации 23 января 2019 г.

Рост скоростей автомобильного и аэрокосмического транспорта одновременно с необходимостью снижения их массы приводит к росту требований к эксплуатационной надежности используемых материалов и конструкций. При этом работа материала в условиях динамических ударных нагрузках остается в ненормативных диапазонах. В работе представлена комплексная методика исследования и предсказания поведения материалов в условиях растягивающего и динамического воздействий. На примере алюминиевых сплавов систем Al–Mg и Al–Cu–Mg показана возможность повышения прочностных свойств материала методами интенсивной пластической деформации (ИПД) в широком диапазоне изменения параметров внешнего воздействия и фиксация этих изменений в рамках предложенной методики.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 17-79-10145). 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“, „Нанотехнологии“ и „Рентгенодифракционные методы исследования“.

DOI: 10.21883/FTT.2019.06.47690.347

1. Введение

Благодаря уникальному сочетанию свойств алюминиевые сплавы широко применяются в автомобильной, авиационной и космической промышленности. Например, магнелии, сплавы алюминия и магния, обладают хорошей прочностью и обрабатываемостью, а также высокой коррозионной стойкостью, благодаря чему хорошо зарекомендовали себя для изготовления обшивок на транспорте, а также для изготовления сосудов для транспортировки нефти и других химических веществ. Дюралюмины, сплавы алюминия, магния и меди, обладают повышенной прочностью, поэтому применяются в качестве конструкционных сплавов в автомобилях, самолетах и космических кораблях.

Широкое применение материалов на основе алюминия, в том числе на транспорте и в авиакосмической отрасли, требует всестороннего изучения прочностных характеристик материала в широком диапазоне изменения параметров внешнего нагружения. Особое внимание стоит уделять работе материалов в экстремальных условиях, поскольку с повышением скорости деформирования реакция материала существенно изменяется, повышается предельная прочность материала, связанная со структурно-временными особенностями процесса разрушения [1–6]. Это требует экспериментального и теоретического изучения динамических прочностных свойств.

Одним из наиболее часто применяемых методов исследования прочностных свойств материала в условиях ударных нагрузок является метод Кольского с использованием разрезных стержней Гопкинсона и его модификаций [7,8]. Стоит отметить, что данная методика основана на уникальном оборудовании и имеет определенные сложности в реализации. В настоящей работе предложена методика выполнения экспериментов на растяжение с использованием башенного копра, имеющего сертифицированные системы фиксации скорости ударника и усилия сопротивления образца растяжению.

На примере сплавов в состоянии поставки AlMg системы Al–Mg (аналог 5556 ASTM) и D16 системы Al–Cu–Mg (аналог 2024 ASTM) получены скоростные зависимости максимальных растягивающих напряжений для растягивающей и сдвиговой моды деформирования, а также показаны возможности повышения прочностных свойств материала методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [9–11].

2. Материал и методика экспериментальных исследований

2.1. Материал

Изучение прочностных и эксплуатационных свойств материала является в значительной мере условным,

Химический состав алюминиевых сплавов Al5556 и Al2024

Элемент (mass.%)	Cu	Mg	Mn	Al
Al5556	< 0.1	5.8–6.8	0.5–0.8	Основа
Al2024	3.8–4.9	1.2–1.8	0.3–0.9	Основа

поскольку одни те же материалы в различных условиях нагружения способны демонстрировать разный характер разрушения. Факторы, влияющие на разрушение, подразделяют на внутренние и внешние. К первым относятся химический состав и структура (размер зерна, степень разориентации, тип кристаллической решетки и т.д.). Из внешних факторов наиболее важными являются скорость нагружения и температура. Важными факторами являются также особенности напряженно-деформированного состояния и геометрические особенности исследуемых объектов.

Таким образом, переходя к изучению прочностных свойств материала в условиях широкого спектра нагрузок необходимо наиболее полно охарактеризовать их состояние с точки зрения стандартных подходов.

Рассмотрим широко используемые алюминиевые сплавы Al5556 системы Al–Mg и Al2024 системы Al–Cu–Mg. Химический состав сплавов приведен в таблице. В сплаве Al5556 магний является основным легирующим элементом. Будучи сплавом на основе твердого раствора он в закаленном состоянии имеет гомогенную структуру, что обеспечивает высокие пластические свойства. Последнее обстоятельство позволяет применять эти сплавы для тяжёлонагруженных деталей, работающих в условиях динамических нагрузок. В сплаве Al2024 медь является основным легирующим элементом. Сплавы этой серии широко используются в авиационной промышленности, где требуется высокая прочность.

Микроструктура сплава Al5556 состоит из зерен со средним размером $10\ \mu\text{m}$. Микроструктура сплава Al2024 состоит из зерен со средним размером $23\ \mu\text{m}$.

Первичный анализ механических свойств показал, что микротвердость по Виккерсу у сплава Al2024 ($147.1 \pm 3.6\ \text{Hv}$) на 30% больше, чем у сплава Al5556 ($113.2 \pm 2.7\ \text{Hv}$). Предел кратковременной прочности на разрыв также отличается примерно на 30%: 430 ± 13 и $319 \pm 11\ \text{MPa}$ соответственно. С точки зрения поведения материалов в условиях квазистатических нагрузок, где требуется повышенная прочность, наиболее предпочтительным является сплав Al2024. При этом у сплава Al5556 есть преимущества, описанные выше. С целью повышения его прочностных свойств была выполнена обработка методами ИПД. Для формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры исходные заготовки были подвергнуты деформационной обработке. При равноканальном угловом прессовании (РКУП) [12–14] был использован маршрут Вс, при котором после каждого из четырех проходов заготовка поворачивается на 90° вокруг своей продольной оси. В процессе прессования

при температуре 200°C материал продавливался в специальной оснастке через два канала диаметром $9.5\ \text{mm}$, пересекающихся под углом 90° .

Ультрамелкозернистый материал продемонстрировал повышение микротвердости по Виккерсу $149.2 \pm 2.8\ \text{Hv}$. Предел кратковременной прочности также повысился до уровня прочностных характеристик сплава Al2024 — $430 \pm 10\ \text{MPa}$. Микроструктура сплава Al5556 после четырех проходов РКУП стала более однородная и состоит из зерен со средним размером $2\ \mu\text{m}$, что также подтверждается данными из работы [15].

2.2. Методики квазистатических и динамических испытаний на растяжение

Известно, что для многих материалов, при увеличении скорости деформации критическое напряжение растет [16–19]. В настоящей работе для выполнения экспериментов на растяжение были применены серийные экспериментальные установки. Установка Shimadzu AG-50kNX использовалась для растяжения в квазистатических режимах, а установка Instron CEAST 9350 — для реализации ударных растягивающих нагрузок при скорости деформации порядка $10^2 - 10^3\ \text{s}^{-1}$.

Выполненные ранее работы [20,21] показали работоспособность методики испытаний на растяжение малых образцов с длиной рабочей части $5\ \text{mm}$, шириной $2\ \text{mm}$. В этом случае реализуется одноосное растягивающее напряженное состояние.

Другим важным аспектом в изучении прочностных свойств конструкционных материалов является исследование прочности на сдвиг. Как вид напряженного состояния, встречается редко, но может реализовываться в ответственных элементах и узлах, к примеру, может иметь место в заклепочных и сварных соединениях.

Для реализации сдвиговых напряжений при растяжении была подобрана геометрия (рис. 1, а), аналогичная представленной в [22,23], адаптированная к возможностям испытательных машин и геометрическим размерам образцов из материалов, подвергнутых равноканальному угловому прессованию. По полученным в ANSYS данным (рис. 1, б) видно, что в узкой области между круговыми отверстиями при растяжении реализуются локализованные поля сдвиговых деформаций. Это также подтверждается микроструктурными исследованиями разрушенных образцов. На рис. 2 представлена фрактурграфия разрушенного образца при увеличении $5\times$ и $20\times$, соответственно. При масштабе $200\ \mu\text{m}$ видно, что поля сдвиговых деформаций не выходят за границу локального объема, ограниченного круговыми вырезами. В то время как при увеличении $20\times$ в выделенном объеме наблюдаются сплошные полосы сдвига.

3. Результаты и дискуссия

Предел кратковременной прочности для исследуемых материалов для двух типов реализуемых деформаций

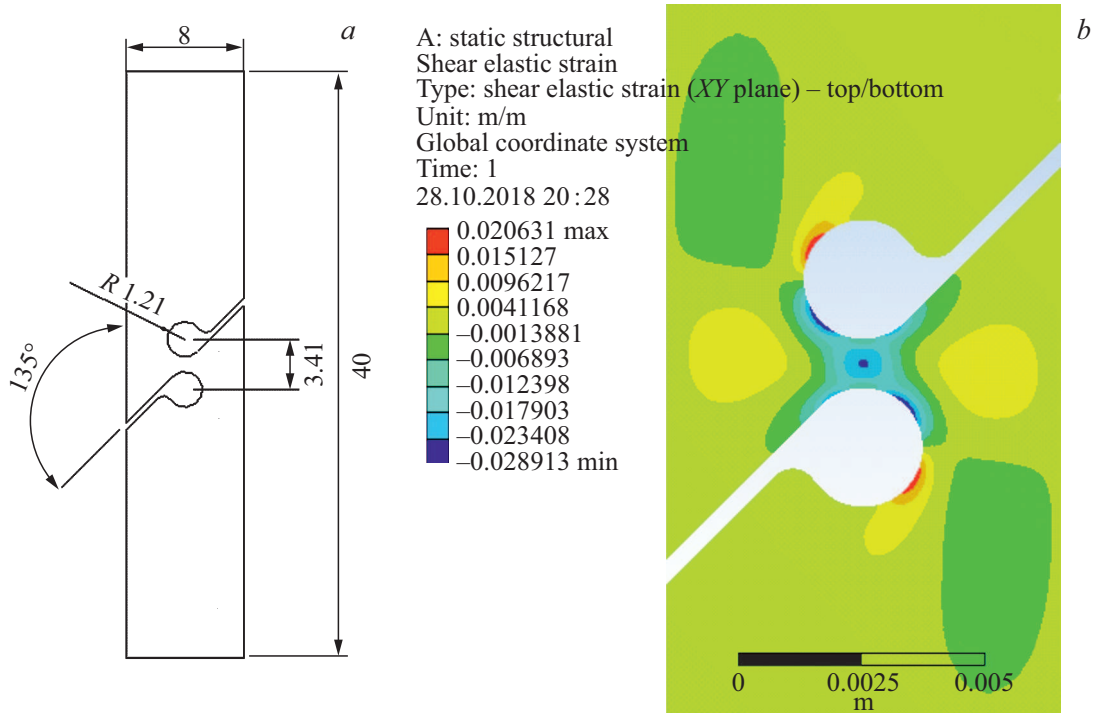


Рис. 1. Геометрические размеры образца на сдвиг (а). Рассчитанные в ANSYS поля сдвиговых деформаций при растягивающей нагрузке 500 N (b).

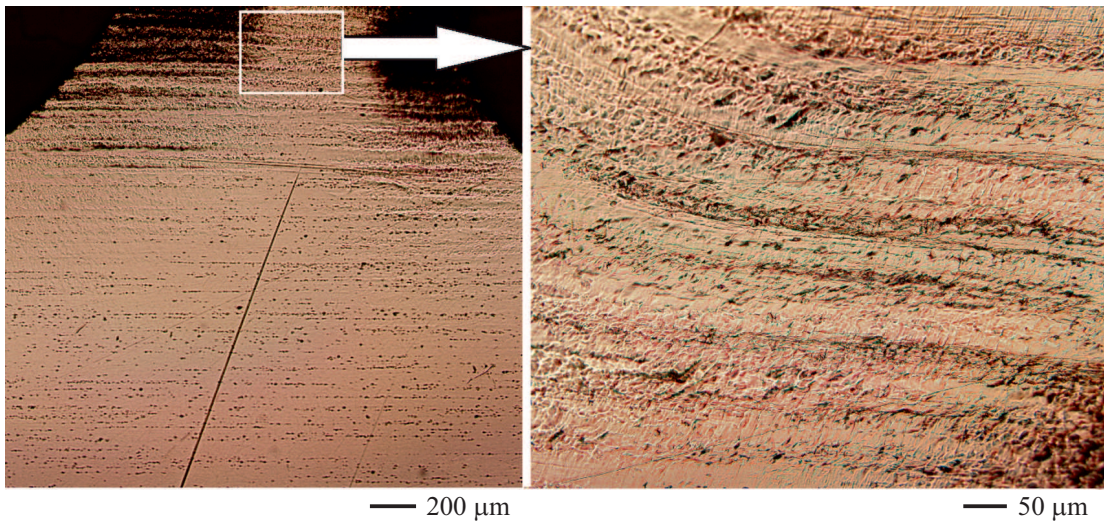


Рис. 2. Поля сдвиговых деформаций в образце из Al5556 после испытания.

(растяжение/сдвиг) в зависимости от скорости роста напряжений представлены на рис. 3. Скоростную зависимость прочности определяли относительно скорости роста напряжений. Данный подход позволил минимизировать влияние погрешностей, связанных с жесткостью испытательной машины и свойств материала. Полученные результаты демонстрируют, что в условиях квазистатических нагрузок сплав Al5556 имеет меньшую прочность при растяжении и сдвиге, чем сплав Al2024.

Квазистатические режимы деформирования соответствуют скоростям роста напряжений 50–100 GPa/s. С ростом скорости приложения нагрузки при реализации схемы на сдвиг соотношение сохраняется, в то время как в случае динамического растяжения происходит сближение экспериментальных точек.

Отмеченные особенности поведения материала при высоких скоростях нагружения можно объяснить с применением структурно временного подхода. В качестве

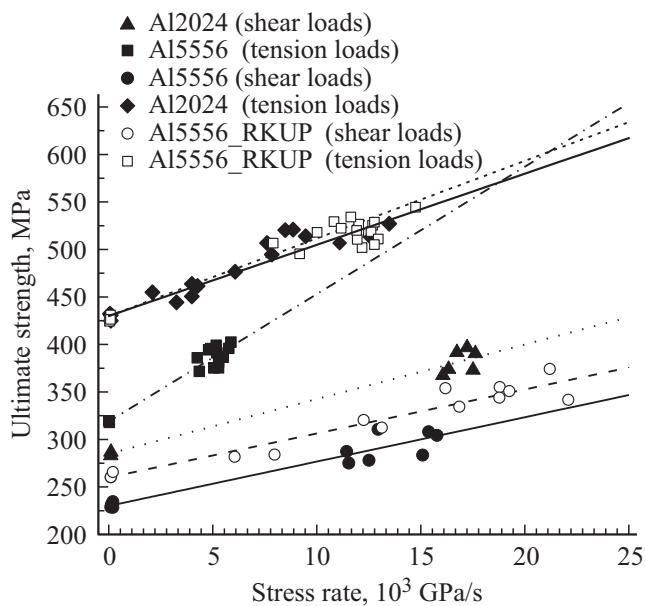


Рис. 3. Зависимость прочности на растяжение и сдвиг от скорости роста напряжений для алюминиевых сплавов Al2024, Al5556 и Al5556 после РКУП обработки. Динамические кривые для каждого вида реализуемой нагрузки и материала построены по критерию (1) с параметрами материала: для сплава Al2024 при растяжении $\tau_c = 17.5 \mu\text{s}$, $\sigma_c = 430 \text{ MPa}$ при сдвиге $\tau_c = 11.5 \mu\text{s}$, $\sigma_c = 285 \text{ MPa}$; для сплава Al5556 при растяжении $\tau_c = 26.8 \mu\text{s}$, $\sigma_c = 319 \text{ MPa}$ при сдвиге $\tau_c = 9.3 \mu\text{s}$, $\sigma_c = 230 \text{ MPa}$; для сплава Al5556 после РКУП обработки при растяжении $\tau_c = 15 \mu\text{s}$, $\sigma_c = 430 \text{ MPa}$ при сдвиге $\tau_c = 9.3 \mu\text{s}$, $\sigma_c = 260 \text{ MPa}$.

критерия разрушения материала при растяжении используем критерий инкубационного времени [24,25]

$$\frac{1}{\tau_c} \int_{t-\tau_c}^t \frac{\sigma(s)}{\sigma_c} ds \leq 1, \quad (1)$$

где t — время, σ — зависимость разрывающего (растяжение/сдвиг) напряжения от времени, σ_c — статический предел прочности при растяжении или сдвиге, τ_c — инкубационное время разрушения, являющейся мерой прочности в динамическом диапазоне параметров внешнего воздействия. Константы σ_c и τ_c являются параметрами материала. В качестве модельной нагрузки принимается — линейно возрастающая во времени, что наиболее приближенно к условиям эксперимента.

Анализируя полученные данные можно отметить, что алюминиевые сплавы Al2024 и Al5556 имеют примерно одинаковую динамическую прочность на сдвиг в терминах инкубационного времени. Это выражается в наклоне расчетной кривой в координатах предельное напряжение—скорость роста напряжений. И тем самым, с ростом скорости приложения нагрузки тенденция относительно соотношения прочностных характеристик двух материалов, полученная в квазистатической области нагружения, сохраняется. В случае же реализации

растягивающей нагрузки динамические кривые прочности пересекаются и происходит инверсия прочности. При квазистатических нагрузках сплав Al2024 примерно на 30% прочнее сплава Al5556. С ростом скорости нагружения сплав Al2024 теряет свое преимущество и может разрушиться при меньших нагрузках, нежели сплав Al5556. Это связано с динамической прочностью в терминах инкубационного времени. У сплава Al5556 $\tau_c = 26.8 \mu\text{s}$, в то время как для сплава Al2024 эта величина равняется $16.3 \mu\text{s}$.

Обработка методами РКУП алюминиевого сплава Al5556 привела к повышению статической прочности на сдвиг и на растяжение. При сдвиговых нагрузках динамическая прочность материала не изменилась, а статическая повысилась примерно на 10%. При растяжении с реализацией сдвиговой моды разрушения ультрамелкозернистый материал продемонстрировал повышение статической прочности до уровня сплава Al2024 с сохранением динамической прочности на высоком уровне.

4. Заключение

Разработана методика комплексных испытаний материала в широком диапазоне изменения параметров внешнего воздействия — от квазистатического нагружения до высокоскоростного ударного воздействия. Полученные результаты в рамках структурно-временного подхода позволяют проводить сравнительный анализ материалов в условиях динамических воздействий.

Апробация методики была проведена на примере широко используемых алюминиевых сплавов системы Al—Cu—Mg и Al—Mg. Результаты экспериментальных работ показали повышенные прочностные свойства сплава Al2024 в условиях квазистатических нагрузок. С ростом скорости нагружения в случае растягивающих нагрузок данный сплав по своим прочностным характеристикам приблизился к сплаву Al5556. При этом в случае реализации чистого сдвига запас по прочности сохранился. Полученные результаты были проанализированы с точки зрения структурно-временного подхода. Получено, что в терминах инкубационного времени динамическая прочность при растяжении у сплава Al5556 на 65% больше, чем у сплава Al2024, что объясняет пересечение прочностных кривых.

Модификация структуры сплава Al5556 путем равноканального углового прессования позволило повысить статическую прочность материала при растяжении до уровня сплава Al2024 с сохранением динамической прочности на высоком уровне, что было зафиксировано в рамках численных расчетов.

Выполненные исследования показали, что применение материала в экстремальных условиях нагружения требует всестороннего экспериментально-теоретического изучения его прочностных и эксплуатационных свойств в предполагаемых диапазонах изменения параметров нагружения.

Список литературы

- [1] 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).
- [2] А.М. Брагов, А.К. Ломунов. *ПМТФ* **5**, 168 (1988).
- [3] A.A. Gruzdkov, E.V. Sitnikova, N.F. Morozov, Y.V. Petrov. *Mathem. Mech. Solids* **14**, 72 (2009).
- [4] A.A. Gruzdkov, S.I. Krivosheev, Y.V. Petrov. *Phys. Solid State* **45**, 886 (2003).
- [5] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.A. Bogatch, A.V. Utkin, V.E. Fortov, D.E. Grady. *J. Appl. Phys.* **20**, 467 (1997).
- [6] Г.В. Гаркушин, Г.И. Канель, С.В. Разоренов. *ФТТ* **52**, 2216 (2010).
- [7] H. Kolsky. *Proc. Phys. Soc. B* **62**, 676 (1949).
- [8] A.M. Bragov, A.K. Lomunov. *Int. J. Impact Eng.* **16**, 321 (1995).
- [9] R. Valiev. *Nature Mater.* **3**, 511 (2004). Q. Wei. *Acta Mater.* **54**, 4079 (2006).
- [10] L.W. Meyer, M. Hockauf, L. Kruger, I. Schneider. *Int. J. Mater. Res.* **98**, 191, (2007).
- [11] M.A. Meyers, A. Mishra, D.J. Benson. *Progr. Mater. Sci.* **51**, 427 (2006).
- [12] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov. *Progr. Mater. Sci.* **45**, 103 (2000).
- [13] I.P. Semenova, M.K. Smyslova, K.S. Selivanov, R.R. Valiev, Y.M. Modina. In *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **194**, 012035 (2017).
- [14] I.P. Semenova, A.V. Polyakov, V.V. Polyakova, Y. Huang, R.Z. Valiev, T.G. Langdon. *Adv. Eng. Mater.* **18**, 2057 (2016).
- [15] А.А. Козулин, В.А. Красновейкин, В.В. Скрипняк, Б.В. Хандаев, Ю.В. Ли. *Современ. проблемы науки и образования* **6**, 888 (2013).
- [16] W. Goldsmith, J.L. Sackman, C. Ewerts. *Rock. Mech. Min. Sci. Geomech.* **13**, 303 (1976).
- [17] S. Howe, W. Goldsmith, J. Sackman. *Exp. Mech.* **14**, 337 (1974).
- [18] Y.V. Petrov, I.V. Smirnov, A.A. Utkin. *Mech. Solids* **45**, 476 (2010).
- [19] Н.А. Златин, С.М. Мочалов, Г.С. Пугачев, А.М. Брагов. *ФТТ* **16**, 1752 (1974).
- [20] A.D. Evstifeev, A.A. Chevrychkina, Y.V. Petrov. *Mater. Phys. Mech.* **32**, 258 (2017).
- [21] A.D. Evstifeev. *J. Phys.: Conf. Ser.* **991**, 012019 (2018).
- [22] M. Brünig, O. Chyra, D. Albrecht, L. Driemeier, M. Alves. *Int. J. Plasticity* **24**, 1731 (2008).
- [23] Q. Yin, B. Zillmann, S. Suttner, G. Gerstein, M. Biasutti, A.E. Tekkaya, A. Brosius. *Int. J. Solids Struct.* **51**, 1066 (2014).
- [24] Y.V. Petrov, A.A. Utkin. *Sov. Mater. Sci.* **25**, 153 (1989).
- [25] Y.V. Petrov, N.F. Morozov. *ASME J. Appl. Mech.* **61**, 710 (1994).

Редактор К.В. Емцев