

05;12

Исследование разрушения металлических колец при ударном воздействии магнитно-импульсным методом

© В.А. Морозов, Ю.В. Петров, А.А. Лукин, В.М. Кац, А.Г. Удовик, С.А. Атрошенко,
Д.А. Грибанов, Г.Д. Федоровский

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: satroshe@mail.ru

(Поступило в Редакцию 20 октября 2010 г.)

Проведено исследование металлических кольцевых образцов из алюминиевого сплава Д16 при ударном воздействии распределенной радиальной нагрузки магнитно-импульсным методом. Получены две модификации подхода, позволившие уменьшить период синусоидальной нагрузки во времени в семь и в пятьдесят раз, а также определить момент разрыва образца фотоприемником по вспышке, возникающей при разрыве кольца, с регистрацией импульса нагрузки и сигнала фотоприемника на цифровом осциллографе. Показано, что при укорочении импульса нагрузки доля вязкой составляющей в изломе уменьшается и образцы разрушаются более хрупко.

Введение

В серии работ [1–4] описаны современные экспериментальные результаты по высокоскоростному тангенциальному растяжению магнитно-импульсным методом тонких металлических колец до разрыва. Использование электромагнитного нагружения позволило достичь радиальных скоростей расширения кольца в интервале 80–200 м/с, что соответствует скоростям деформации порядка 10^4 s^{-1} . Процесс образования шеек и фрагментации фиксировался с помощью скоростной фотографии с высоким разрешением. Показано, что разрушение кольца происходит за время, существенно меньшее первого периода колебаний тока в кольце. Весь процесс фрагментации занял менее $20 \mu\text{s}$. Радиус кольца определялся по изображениям как функция от времени, скорость вычислялась путем дифференцирования этой функции. Кольцо быстро разгоняется до скорости около 100–250 м/с, а затем постепенно замедляется с падением силы тока и рассеиванием энергии в результате пластических деформаций.

Оценка для скорости деформации $\varepsilon' = r'/r$ дает приближенное значение в промежутке $(0.5–1.3) \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Показано, что деформация кольца в областях, деформирующихся однородно, никогда не превышает порог образования шейки. Увеличение поперечного сечения образца существенно увеличивает деформацию начала локализации. Деформация зарождения локализации не зависит от скорости деформации. Для образцов с отношениями поперечного сечения более пяти локализация появляется в форме полос сдвига. При увеличении размеров образцов наблюдается увеличение однородности деформации. Показано, что полимерные покрытия слабо влияют на начало зарождения шейки при высокоскоростной деформации. Трубные образцы продемонстрировали однородное расширение до критической деформации с последующим зарождением полос сдвига и разрушением на пересечении этих полос.

Испытания алюминиевого сплава на растяжение колец [5] с максимальной скоростью $(0.3–2.3) \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ при длительности импульса от 5 до $41 \mu\text{s}$ выявили влияние скорости и размеров расширяющихся колец на деформацию алюминиевого сплава. Скорость нагружения ниже $2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ не влияет на процесс деформации. Напряжение течения зависит от максимальной скорости деформации и от размера кольца — оно больше в кольцах диаметром 50.8 мм, чем в кольцах диаметром 25.4 мм.

В работе Мурра [6] показано влияние длительности импульса на образующуюся в результате ударного нагружения микроструктуру. Хотя доля двойников и количество мартенсита в стали возрастают с увеличением длительности импульса, это обычно не приводит к росту твердости (или она лишь слегка увеличивается). В интервале длительностей 0.5–1.5 μs значение твердости обычно не зависит от длительности импульса.

Авторы показали, что генерация дислокаций и образование двойников в медном сплаве с низкой энергией дефекта упаковки зависят от длительности импульса менее $0.3 \mu\text{s}$. Основной причиной упрочнения при длительности импульса до $0.5 \mu\text{s}$ является двойникование, а вклад скольжения становится более существенным при импульсах большей длительности.

Г.В. Степанов [8] показал, что при расширении колец из алюминиевых сплавов число разрушений не зависит от радиуса кольца и пропорционально скорости его расширения. С повышением скорости радиального расширения равномерная деформация возрастает, после чего практически не изменяется. Это подтверждает повышение показателей пластичности в условиях роста скорости деформации, связанное с более равномерным вовлечением микрообъемов материала в процесс деформирования. Испытание кольцевых образцов обеспечивает уникальную возможность определения предельной равномерной (не локализованной) деформации.

В настоящей работе развит подход, описанный в [9–12]. Исследование влияния длительности импульса

при магнитно-импульсной обработке ПММА и сферопластика [9–11] на порог хрупкого разрушения выявило возрастание этого порога при уменьшении длительности импульса от 4.3 до $1 \mu\text{s}$, в то время как трещина растет быстрее при большей длительности импульса. В работе [12] показано, что удельная энергия разрушения ПММА с ростом длительности импульса от 1 до $10 \mu\text{s}$ резко уменьшается.

Методика

Две модификации магнитно-импульсного метода были реализованы на базе генератора коротких высоковольтных импульсов ГКВИ-300, обеспечивающего формирование электрических напряжений с амплитудами 30–300 kV.

На рис. 1 показана схема нагружения. Ток, проходящий по катушке, на которой коаксиально располагается кольцевой образец, наводит в нем индукционный ток, а взаимодействие этих токов порождает силу отталкивания между соленоидом и кольцом.

Электрические блок-схемы установки при реализации синусоидальной нагрузки с периодом $T = 7.4 \mu\text{s}$ (модификация 1) и $1 \mu\text{s}$ (модификация 2) приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

При испытании кольцевых образцов с периодом синусоидального тока $T = 7.4 \mu\text{s}$ (рис. 2) заряд конденсатора (C) осуществлялся от выпрямительного устройства (REC) с регулируемым напряжением от 12 до 24 kV. Далее производился разряд конденсатора (C) через катушку (L) с помощью высоковольтного разрядника (S).

Катушка изготовлена из медного провода диаметром 1 мм, имеет 5 витков, диаметр катушки 25 мм. Ток, проходящий через катушку измерялся поясом Роговского (RC) и отображался на цифровом осциллографе (OSC), информация с которого записывалась на электронном носителе. При разрыве кольца (*Sample*), коаксиально закрепленного на середине катушки (L), возникала искра, которая позволяла с помощью фотодиода (PD) фиксировать момент разрушения образца. На рис. 4, а приведено устройство для испытания образцов,

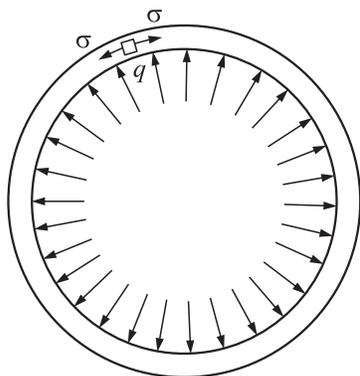


Рис. 1. Схема нагружения образца (q — нагрузка, σ — растягивающее напряжение).

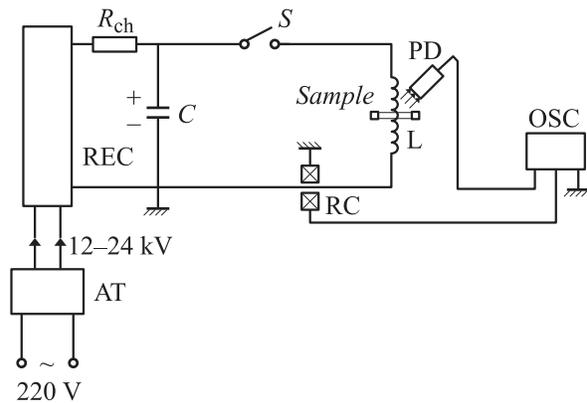


Рис. 2. Блок-схема установки при воздействии синусоидальной электромагнитной нагрузки с периодом $T = 7.4 \mu\text{s}$: АТ — автотрансформатор; REC — выпрямитель; R_{ch} — зарядное сопротивление; C — конденсатор, S — разрядник; RC — пояс Роговского; L — катушка (соленоид без сердечника); *Sample* — образец (металлическое кольцо); PD — фотодиод; OSC — осциллограф.

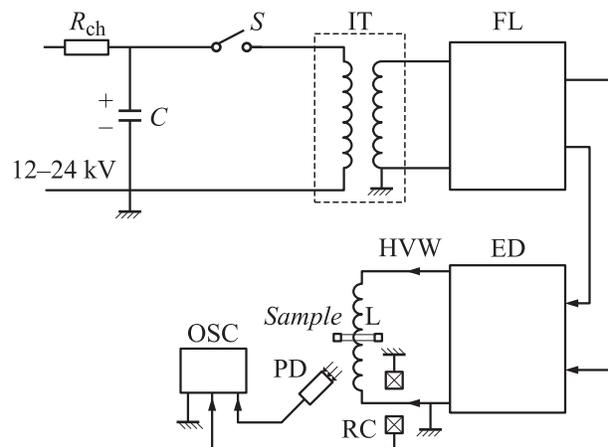


Рис. 3. Блок-схема установки при воздействии синусоидальной электромагнитной нагрузки с периодом $T = 1 \mu\text{s}$: ИТ — импульсный трансформатор; FL — формирующая линия; ED — выходное устройство; HVW — высоковольтный электрод.

а на рис. 4, б — фотография вспышки при разрыве кольца.

Более сложная установка применялась при испытании образцов, когда через катушку пропусклся ток с периодом затухающих колебаний $T = 1 \mu\text{s}$. Ее блок-схема приведена на рис. 3. С помощью импульсного трансформатора (ИТ), системы двух связанных электрических контуров и формирующей линии (FL) напряжение синусоидального сигнала повышалось в 10 раз по сравнению с вышеописанным случаем (рис. 2). Оно подавалось на эту же катушку через выходное устройство (ED) (рис. 4, с). Однако период колебаний тока здесь уже был $T = 1 \mu\text{s}$.

Исследование поверхностей разрушения алюминиевых образцов после испытаний осуществлялось на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-32 в темном поле.

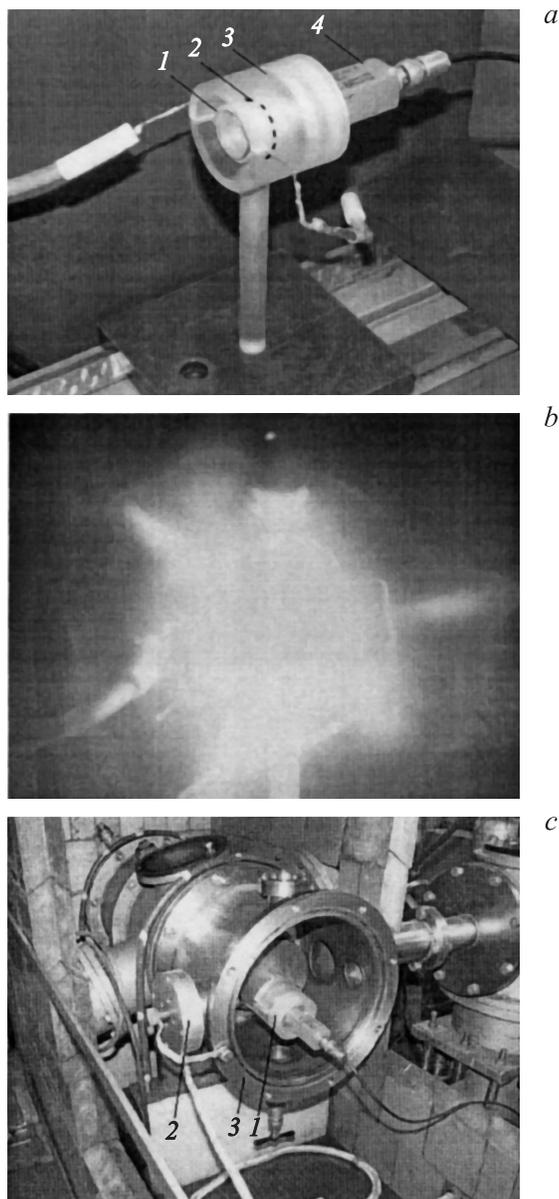


Рис. 4. Испытание образцов: *a* — при $T = 7.4 \mu\text{s}$ (*1* — соленоид; *2* — образец; *3* — корпус, позволяющий улавливать фрагменты разрушенного образца; *4* — фотодиод); *b* — вспышка при разрушении образца; *c* — эксперимент при $T = 1 \mu\text{s}$ (*1* — корпус; *2* — пояс Роговского; *3* — выходное устройство).

Поверхность вязкого излома характеризуется тусклым серым видом с характерными „волоками“. Поверхность хрупкого излома на вид кристаллическая, без видимых следов пластической деформации на поверхности разрушения.

Количество вязкой составляющей в изломе ($B, \%$) определяли по формуле, аналогичной той, что приведена в ГОСТ 30456-97: $B = 100 - X$, где X — доля хрупкой составляющей в рассматриваемой площади излома. Площадь хрупкой составляющей определяли измерением площади хрупкого излома по фотографии.

Экспериментальная часть

Были испытаны кольцевые образцы из дюралюминия марки Д16 с внутренним диаметром 28 мм. При

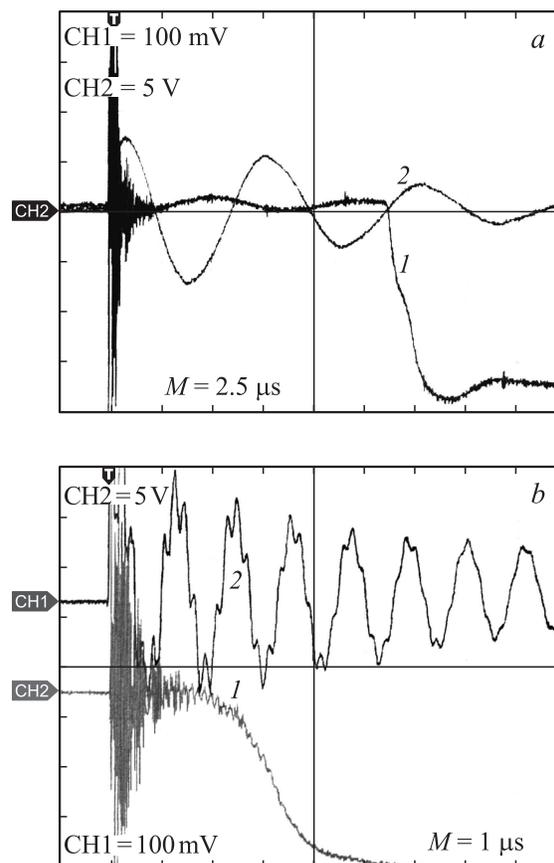


Рис. 5. Осциллограммы сигнала с фотодиода (*1*) и тока с пояса Роговского (*2*); *a* — при периоде тока $T = 7.4$; *b* — при $1 \mu\text{s}$. Размеры образца: $b = 1.0$, $h = 0.11 \text{ mm}$.

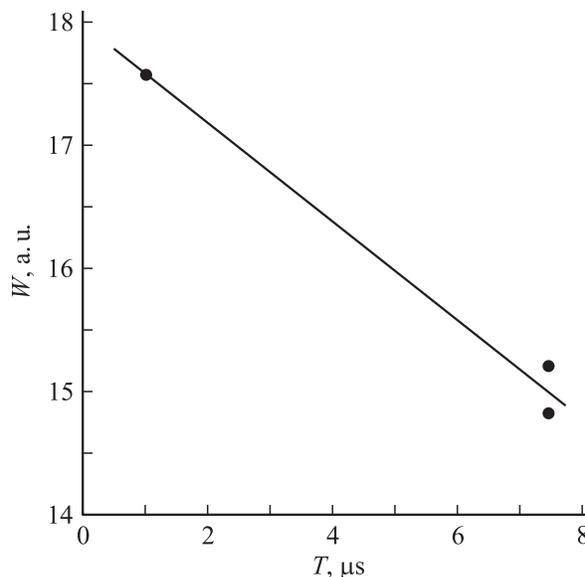


Рис. 6. Зависимость электромагнитной энергии разрушения кольца W от периода тока T .

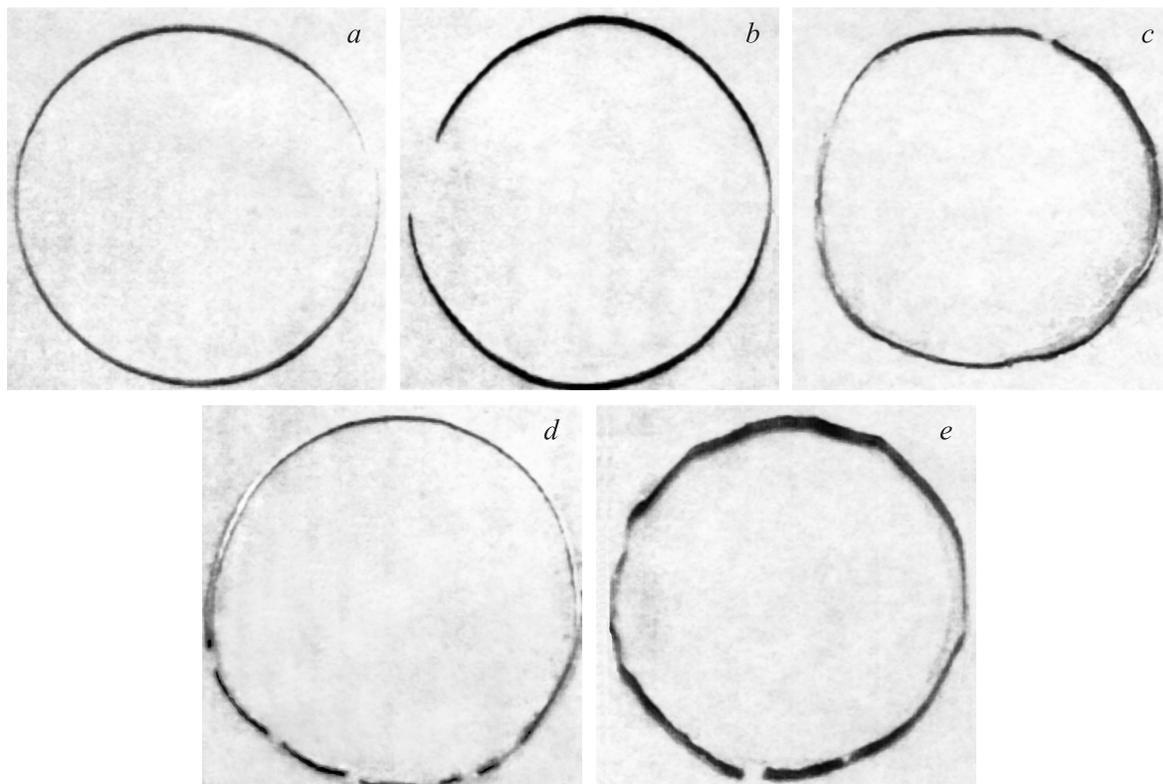


Рис. 7. Фотографии образцов: *a* — перед нагружением; *b* — разрушение при пороговом значении энергии, $T = 7.4 \mu\text{s}$; *c* — то же при $T = 1 \mu\text{s}$; *d* — разрушение при энергии значительно выше пороговой, $T = 7.4 \mu\text{s}$; *e* — разрушение образца из алюминиевой фольги толщиной 0.03 mm , $T = 1 \mu\text{s}$.

воздействию электрических напряжений с длинным периодом кольца имели толщину $0.11\text{--}0.40$ и ширину $0.5\text{--}1.0 \text{ mm}$. В случае малого периода — толщину 0.11 , ширину 1.0 mm . Были проведены также эксперименты на кольцах из фольги толщиной 0.03 и шириной $1.5\text{--}2.0 \text{ mm}$.

На рис. 5 изображены осциллограммы тока через катушку (2) и сигнал с фотодиода (I), фиксирующего момент разрыва образца, для двух вариантов испытаний: $T = 7.4$ и $1 \mu\text{s}$. В двух приведенных вариантах использовались одинаковые образцы. Из осциллограмм следует, что в обоих случаях разрушение образцов произошло в конце второго периода тока, протекающего через катушку.

По осциллограммам тока через катушку $I(t)$ численно определялась величина $\int_0^{t_c} I^2(\tau) d\tau$, где t_c — время от момента приложения напряжения до разрушения. Данная величина пропорциональна электромагнитной энергии разрушения образца W .

Результаты и их обсуждение

Для сравнения в табл. 1 приведены параметры двух вариантов испытаний.

Зависимость величины электромагнитной энергии разрушения образца W от периода тока в катушке T

приведена на рис. 6. Сравнение энергии заряда конденсатора и амплитуды тока через катушку для двух случаев нагружения приведено в табл. 1. Из таблицы видно, что при более коротких периодах тока требуется большая электромагнитная энергия разрушения, чем при длинных.

Таблица 1. Параметры испытаний

| Параметры испытаний | Вариант 1 | Вариант 2 |
|--|-----------|-----------|
| Напряжение заряда конденсатора, kV | 20 | 27 |
| Энергия заряженного конденсатора, J | 100 | 180 |
| Амплитуда тока через катушку, A | 1836 | 5275 |
| Период колебания тока в катушке, μs | 7.4 | 1 |
| Время до разрушения, μs | 13.4 | 2 |

Таблица 2. Процент волокна в изломе алюминиевых колец из сплава Д16

| № | $T, \mu\text{s}$ | $B, \%$ | L, mm | $\Delta, \%$ | ϵ | Примечание |
|---|------------------|---------|----------------|--------------|------------|--------------------------------------|
| 1 | 7.5 | 98.2 | 148 | 68.5 | 1.683 | Магнитно-импульсный метод разрушения |
| 2 | 1 | 91.5 | 89.03 | 1.4 | 1.013 | То же |
| 3 | 1.3 | 94.03 | — | — | — | Пневмокопер |

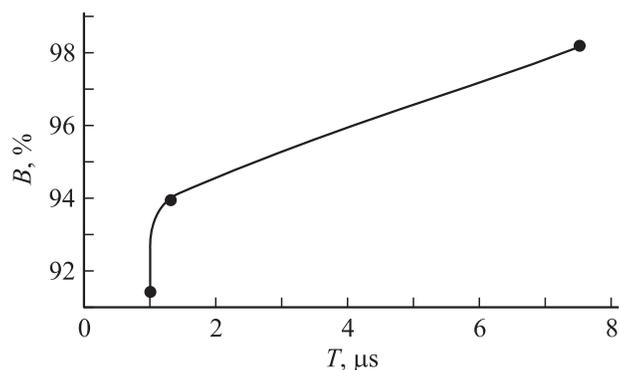


Рис. 8. Зависимость вязкой составляющей в изломе от длительности нагружающего импульса.

Из осциллограмм следует, что в обоих случаях разрушение образцов произошло в конце второго периода тока, протекающего через катушку.

На рис. 7 представлены образцы в исходном (до испытания) состоянии и после нагружения в различных режимах. Из рисунка видно, что разрушение происходит в одном месте как для импульса $7.4 \mu s$, так и для импульса $1 \mu s$ (рис. 7, *b*, 7, *c*), но при более коротком импульсе (рис. 7, *c*) видны множественные шейки. При увеличении энергии с импульсом $7.4 \mu s$ (рис. 7, *d*) увеличивается количество фрагментов разрушения. При нагружении образца из фольги более коротким импульсом $1 \mu s$ (рис. 7, *e*) помимо фрагментации появляются шейки.

Результаты измерения вязкой составляющей в изломе образцов приведены в табл. 2 и на рис. 8. В табл. 2 приняты следующие обозначения: T — длительность импульса, L — длина образца (кольца), Δ — расширение кольца, ε — степень деформации. Видно, что с укорочением импульса доля волокна в изломе монотонно уменьшается, т.е. образцы становятся более хрупкими.

Данные показывают, что кольцо расширяется при воздействии длинным импульсом на 68.5%, а коротким — всего на 1.4%. Степень деформации образца в 1.5 раза больше при нагружении более длинным импульсом.

Для сравнения в табл. 2 приведены данные по нагружению сплава D16 на пневмогазовой пушке с промежуточной длительностью импульса $1.3 \mu s$. Результаты исследования поверхностей разрушения приведены в табл. 2 и на фотографиях микроструктур [9].

Видно, что при большой длительности импульса образцы разрушаются более вязко, т.е. оказываются более пластичными, чем при более коротких импульсах.

Из фотографий структур видно, что при воздействии более длинного импульса наблюдается (рис. 9, *a, b*) практически полностью вязкий излом, в то время как при укорочении импульса (рис. 9, *c, d*) количество волокна в изломе уменьшается, и при сочетании вязкого чашечного излома с хрупким кристаллическим видны трещины, иногда довольно глубокие. Кроме того, при уменьшении длительности импульса наблюдается двойникование (рис. 9, *c*), что удивительно для алюминиевых сплавов с высокой энергией дефектов упаковки. Двойни-

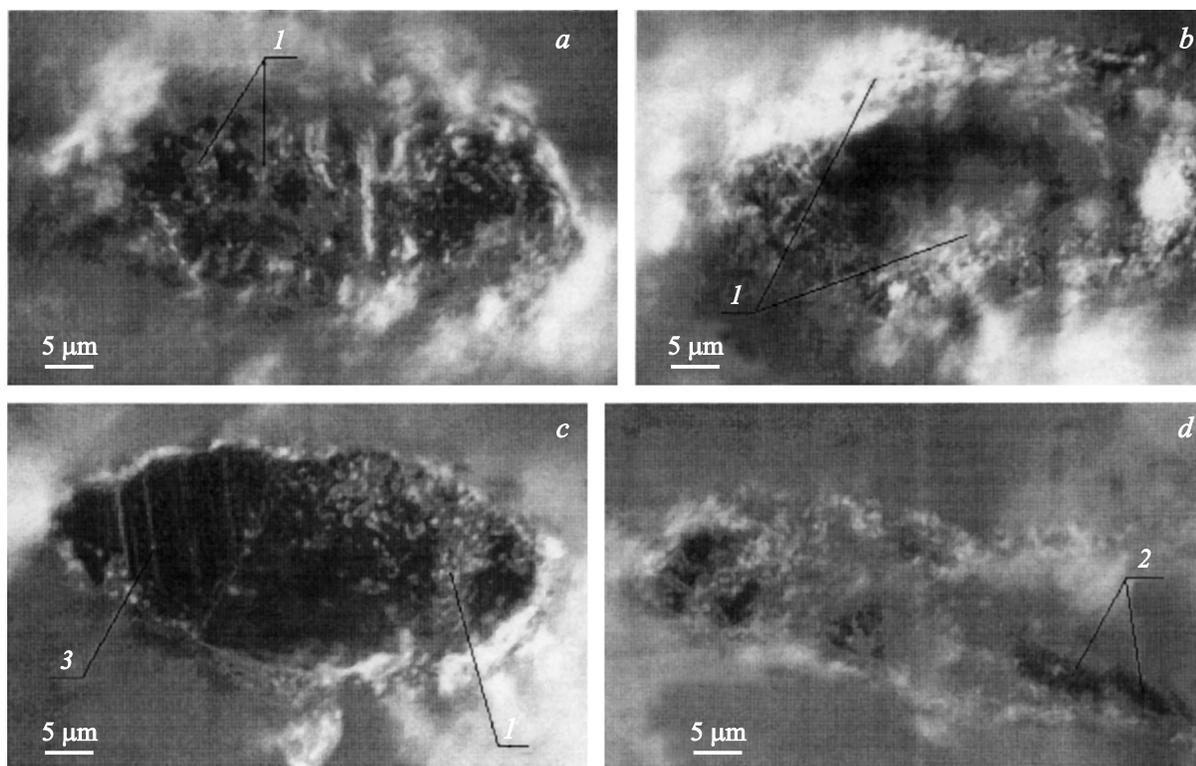


Рис. 9. Поверхности разрушения образца 1 ($7.5 \mu s$) (*a, b*) и образца 2 ($1 \mu s$) (*c, d*). 1 — волокно в изломе, 2 — трещины, 3 — двойники.

кование — типичный при высокоскоростном нагружении механизм деформации для сплавов с низкой и средней энергией дефекта упаковки. Что касается материалов с высокой энергией дефектов упаковки, они двойниваются только при высокой нагрузке (выше порога двойникования) или достаточно высокой скорости.

Заключение

1. Разработан и апробирован магнитно-импульсный метод разрушения и фоторегистрации момента разрушения кольцевых металлических образцов при существенно коротких импульсах нагружения.

2. Установлено, что с уменьшением воздействия энергия, требуемая для разрушения образца, возрастает, а образцы разрушаются более хрупко. Доля вязкой составляющей в изломе уменьшается со снижением длительности импульса. Материал проявляет способность к двойникованию.

3. Метод может быть использован для тестирования прочностных свойств проводящих материалов, проволок и фольг при коротких интенсивных воздействиях.

Работа проводилась при финансовой поддержке грантов РФФИ № 08-01-006646-а, 08-01-92201-ГФЕН_а, 09-02-00693_а, 10-08-00966_а, госконтракт № 02.740.11.5171 ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг.

Список литературы

- [1] Zhang O.H., Ravi-Chandar K. // Int. J. Fract. 2006. Vol. 142. P. 183.
- [2] Zhang O.H., Ravi-Chandar K. // Int. J. Fract. 2008. Vol. 150. P. 3.
- [3] Zhang O.H., Liechti K.M., Ravi-Chandar K. // Int. J. Fract. 2009. Vol. 155. P. 101.
- [4] Zhang O.H., Ravi-Chandar K. // Int. J. Fract. 2010. Vol. 163. P. 41.
- [5] Carden A.E., Williams P.E., Karpp R.R. // Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals / Ed. by M.A. Meyers, L.E. Murr. NY–London: Plenum Press, 1984. Vol. 1. P. 51.
- [6] Murr L.E. // Ibid. Vol. 3. P. 260.
- [7] Wright R.N., Mikkola d.E., LaRouche S. // Ibid. Vol. 3. P. 353.
- [8] Степанов Г.В. Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. Киев: Наук. думка, 1991. 288 с.
- [9] Кривошеев С.И., Петров Ю.В. Экспериментальная установка и методика исследования пороговых разрушающих нагрузок для образцов с макротрещинами при кратковременных ударных воздействиях, создаваемых импульсным магнитным полем. Препринт № 142. СПб.: ИПМаш РАН, 1997. 32 с.
- [10] Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров А.Ю. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 52.

- [11] Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров А.Ю., Уткин А.А., Федоровский Г.Д. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 12. С. 54.
- [12] Klepaczko J.R., Petrov Y.V., Atroshenko S.A., Chevrier P., Fedorovsky G.D., Krivosheev S.I., Utkin A.A. // Eng. Fract. Mech. 2008. Vol. 75. P. 136.