

УДК 539.382.4, 539.42
DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1173-1175

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ

© В.А. Морозов¹⁾, Г.Г. Савенков²⁾, А.А. Лукин¹⁾

¹⁾ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: viktor.morozov@math.spbu.ru

²⁾ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: Sav-georgii@yandex.ru

Предложен метод деформирования и разрушения кольцевых образцов с помощью электрического взрыва проводников в эластомерах цилиндрической формы. Проанализированы достоинства и недостатки предложенного метода по сравнению с магнитно-импульсным методом разрыва металлических колец. Приведены сравнительные характеристики двух методов. Проведен выбор материала эластомеров с точки зрения его деформационных и прочностных характеристик.

Ключевые слова: разрушение; кольцевые образцы; электрический взрыв проводников.

К настоящему времени разработано достаточно много методов по высокоскоростному нагружению, деформированию и разрушению конструкционных материалов. Среди них можно выделить применяемые в последнее время электрофизические методы, основанные либо на электромагнитном воздействии [1–3], либо на электрическом взрыве проводников [4]. Механизмы, приводящие к повышению качества обработки материалов при высоких скоростях деформирования, пока не до конца изучены, что значительно ограничивает возможность является по моделированию этих процессов. Для лучшего понимания механизмов высокоскоростного деформирования материалов и разработки точных моделей необходимы экспериментальные исследования, позволяющие получать надежные данные о напряженно-деформированном состоянии материалов при высоких скоростях деформирования. Предметом данной работы является разработка метода нагружения и деформирования кольцевых образцов с помощью электрического взрыва проводников и его сопоставление с магнитно-импульсным методом.

В методике взрыва проводника в эластомер цилиндрической формы помещается проводник, который затем испаряется при прохождении по нему электрического тока от зарядного устройства. При этом энергия расширяющейся плазмы передается кольцевому образцу через эластомер, в котором формируется цилиндрическая ударная волна. В данном методе нагружения сложность заключается в определении радиального давления на внутреннюю поверхность кольца. В настоящей работе эта трудность преодолевается за счет измерения указанного давления с помощью специально разработанного пьезодатчика.

В качестве испытуемых образцов применялись алюминиевые кольца различной толщины и ширины.

Ограничением данного метода является срок службы эластомера, т. е. его разрушение при электрическом

взрыве проводника. С этой целью подбирался материал эластомера, выдерживающий несколько экспозиций. Были выбраны три материала: капролактан, фторопласт и полиметилметакрилат (ПММА). Наиболее перспективным материалом оказался фторопласт.

Эксперименты проводились на генераторе коротких высоковольтных импульсов, который обеспечивал формирование электрических напряжений с амплитудами (10–22) кв.

На рис. 1 представлена электрическая схема нагружения образцов. Емкость заряжаемого конденсатора составляла 0,5 мкф. В качестве взрывающего проводника использовалась медная проволока диаметром 75 мкм, длиной 40 мм, которая вставлялась в цилиндрический эластомер диаметром 17 мм и длиной 30 мм. С помощью пьезодатчика определялось давление на внешней поверхности цилиндрического эластомера и на внешней поверхности кольца. Таким образом можно было определить давление в кольце $p(t)$, а по формуле Лапласа $\sigma(t) = (p(t) \cdot R)/h$ (где R – радиус кольца, h – его толщина) – окружное напряжение $\sigma(t)$. Определялось пороговое напряжение разрушения кольца, когда имел место один разрыв. Скорость деформации $d\varepsilon/dt$, определялась на фронте импульса напряжения.

Электрический взрыв проводника (ЭВП) контролировался по осциллограмме тока. На рис. 2 приведена характерная осциллограмма тока, протекающего по проводнику при ЭВП, и соответствующий взрыву проводника импульс давления.

Испытанию на разрушение подвергались три алюминиевых кольца: 1 – внешний диаметр 18,1 мм, внутренний диаметр 17,5 мм, ширина 1,5 мм (взрыв проводника в капролактановом цилиндре); 2 – внешний диаметр 19,0 мм, внутренний диаметр 18,2 мм, ширина 1,0 мм (взрыв проводника в цилиндре из ПММА); 3 – внешний диаметр 17,4 мм, внутренний диаметр 16,9 мм, ширина 1,2 мм (взрыв проводника во фторопласте).

Данные экспериментов

Материал эластомера	Расстояние от оси цилиндра, мм	Радиальное давление в эластомере, МПа	Окружное напряжение в эластомере, МПа	Окружное давление в кольце, МПа	Скорость деформации $d\varepsilon/dt$, $10^4 1/c$
ПММА	29,5	56,1	2553,0	–	2,9
	37,5	40,3	1830,0	–	1,8
	51,5	22,7	1037,0	–	0,99
	38,5	39,7	–	181,1	0,4 (в кольце)
Фторопласт	16,5	149,0	10000,0	–	7,5
	25,2	119,0	8083,0	–	6,0
	34,0	80,9	5467,0	–	3,8
	25,0	14,5	–	981,3	0,9 (в кольце)

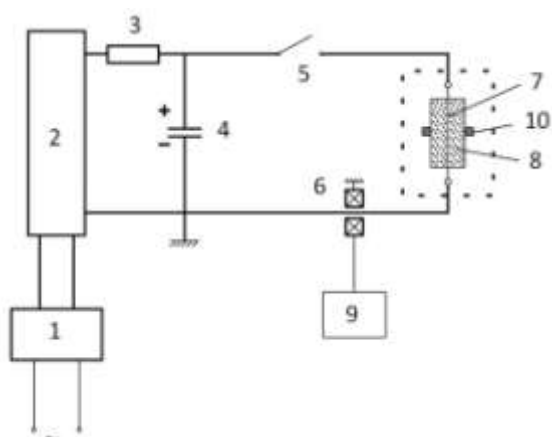


Рис. 1. Схема установки: 1 – автотрансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – зарядное сопротивление; 4 – конденсатор; 5 – разрядник; 6 – пояс Роговского; 7 – взрываемый проводник; 8 – эластомер; 9 – осциллограф; 10 – кольцевой образец

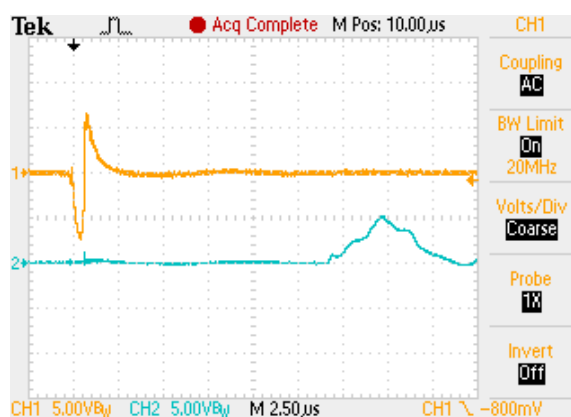


Рис. 2. Характерные осциллограммы тока (1), проходящего по взрываемому проводнику и сигнала с пьезопреобразователя (2) при ЭВП в ПММА

В табл. 1 сведены данные экспериментов по амплитудным значениям радиального давления и окружного

напряжения в эластомере на различных расстояниях от оси цилиндра, а также скорости деформации в эластомере и алюминиевом кольце.

Приведем некоторые сравнительные характеристики использования метода электрического взрыва проводников (настоящая работа) и магнитно-импульсного метода [3] для деформирования и разрушения кольцевых образцов. Метод ЭВП позволяет деформировать и разрушать образцы большего сечения по сравнению с магнитно-импульсным методом из-за генерирования больших механических напряжений. Однако цилиндрические эластомеры выдерживают либо одну экспозицию (ПММА, капролактан), либо несколько (фторопласт), что требует их частой замены. К недостатку метода ЭВП следует отнести трудность определения момента разрушения образцов, что важно при динамических испытаниях материалов.

Таким образом, проведенное исследование показало следующее:

- 1) электрический взрыв проводников вполне пригоден для исследования деформирования и разрушения кольцевых образцов при скоростях деформирования $\sim 10^4 1/c$;
- 2) из трех примененных материалов, в которых производился электрический взрыв проводников, наиболее пригодным оказался фторопласт как с точки зрения многократного использования, так и для генерирования импульсов напряжения большей амплитуды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang H., Ravi-Chandar K. On the dynamics of necking and fragmentation – I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O // Int J Fract. 2006. V. 142. № 3. P. 183-217.
2. Морозов В.А., Петров Ю.В., Луккин А.А., Кац В.М., Удовик А.Г., Атрошенко С.А., Федоровский Г.Д. Растяжение металлических колец при ударном воздействии магнитно-импульсным методом // ДАН. 2011. Т. 439. № 6. С. 761-763.
3. Морозов В.А., Петров Ю.В., Луккин А.А., Кац В.М., Удовик А.Г., Атрошенко С.А., Федоровский Г.Д. Исследование разрушения металлических колец при ударном воздействии магнитно-импульсным методом // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 6. С. 51-56.
4. Imbert J., Rahmaan T., Worswick M. Interrupted pulse electromagnetic expanding ring test for sheet metal // EPJ Web of Conferences. 2015. V. 94. P. 01048.

Поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

UDC 539.382.4, 539.42
DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1173-1175

STUDY OF THE POSSIBILITY OF APPLYING ELECTRICAL EXPLOSION OF CONDUCTORS TO DEFORM AND DESTRUCTION OF ANNULAR SPECIMENS

© V.A. Morozov¹⁾, G.G. Savenkov²⁾, A.A. Lukin¹⁾

¹⁾ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation,
e-mail: viktor.morozov@math.spbu.ru

²⁾ Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University),
Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: Sav-georgii@yandex.ru

A method of deformation and destruction of annular specimens by electric conductors explosion in elastomers cylindrical shape was proposed. The advantages and disadvantages of the proposed method in comparison with the magnetic pulse method was analyzed. Comparative characteristics of the two methods was presented. A selection of elastomer material in terms of its deformation and strength characteristics was made.

Key words: destruction; annular specimens; electric explosion of conductors.

REFERENCES

1. Zhang H., Ravi-Chandar K. On the dynamics of necking and fragmentation – I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O. *Int J Fract.*, 2006, vol. 142, no. 3, pp. 183-217.
2. Morozov V.A., Petrov Yu.V., Lukin A.A., Kats V.M., Udovik A.G., Atroshenko S.A., Fedorovskiy G.D. Rastyazhenie metallicheskih kolets pri udarnom vozdeystvii magnitno-impul'snym metodom. *Doklady Akademii nauk – Proceedings of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 439, no. 6, pp. 761-763.
3. Morozov V.A., Petrov Yu.V., Lukin A.A., Kats V.M., Udovik A.G., Atroshenko S.A., Fedorovskiy G.D. Issledovanie razrusheniya metallicheskih kolets pri udarnom vozdeystvii magnitno-impul'snym metodom. *Zhurnal tehnichejskoj fiziki – Technical Physics*, 2011, vol. 81, no. 6, pp. 51-56.
4. Imbert J., Rahmaan T., Worswick M. Interrupted pulse electromagnetic expanding ring test for sheet metal. *EPJ Web of Conferences*, 2015, vol. 94, p. 01048.

Received 10 April 2016

Морозов Виктор Александрович, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, доцент, профессор с возложенными обязанностями заведующего кафедрой физической механики, e-mail: viktor.morozov@math.spbu.ru

Morozov Viktor Aleksandrovich, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Professor acting as Head of Physical Mechanics Department, e-mail: viktor.morozov@math.spbu.ru

Савенков Георгий Георгиевич, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор кафедры химической энергетики, e-mail: Sav-georgii@yandex.ru

Savenkov Georgiy Georgievich, Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint-Petersburg, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor of Chemical Energy Department, e-mail: Sav-georgii@yandex.ru

Лукин Антон Александрович, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, научный сотрудник, e-mail: viktor.morozov@math.spbu.ru

Lukin Anton Aleksandrovich, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation, Research Worker, e-mail: viktor.morozov@math.spbu.ru