

На правах рукописи

ЗАЙЧЕНКО Ольга Константиновна

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ  
КОЛЬЦЕВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ  
МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2017 г.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
профессор МОРОЗОВ Виктор  
Александрович

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор  
БРАГОВ Анатолий Михайлович,  
заведующий лабораторией механики  
материалов НИИ механики ФГАУ ВО  
Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный  
университет им. Н.И.Лобачевского

кандидат физико-математических наук,  
СИНАНИ Альфред Борисович,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
динамики материалов отделения физики  
твердого тела ФГБУН Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Ведущая организация:

ФГБУН Институт проблем машиноведения  
Российской академии наук  
(Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года в \_\_\_\_ часов на заседании совета Д 212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., д. 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9 и на сайте: <https://dissler.spbu.ru/dissler/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dislist/details/14/1420.html>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета:

Е.В. Кустова

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** Экспериментальные исследования, проводимые в последнее время, показывают, что в поведении материала при квазистатических и динамических нагрузках имеют место значительные различия. Ввиду этого исследование подобных отличий является актуальной задачей современной механики.

Активное развитие технологий в настоящее время предъявляет высокие требования к прогнозированию поведения материала в быстроизменяющихся процессах. Поэтому описание прочностных характеристик материала в экстремальных условиях имеет большое значение в современной инженерной практике.

Магнитно-импульсные методы обладают значительными преимуществами: низкое энергопотребление, высокая производительность, экономичный расход сырья и экологическая чистота. Все это отвечает современным требованиям, предъявляемым к экспериментальным исследованиям. Только такие методы в лабораторных условиях позволяют получить высокие скорости деформирования материалов.

**Целью** работы является исследование разработанных электромагнитных методов и их применение для нагружения, деформирования и разрушения тонких металлических колец.

**Достоверность** результатов определяется использованием в работе известных физических принципов, качественным сравнением с альтернативными исследованиями, сопоставлением результатов, полученных с помощью математического аппарата электродинамики и теории упругости, с результатами экспериментальных исследований, проводимых с помощью устройств и измерительных средств, прошедших соответствующую проверку.

**Научная новизна работы.** В представленной диссертации получены новые результаты:

1. Модифицирован магнитно-импульсный метод деформирования и разрушения металлических кольцевых образцов для применения при временах нагружения более коротких по сравнению с известными.
2. В проведенных исследованиях использован новый оригинальный метод регистрации момента разрушения образца при динамических условиях нагружения.
3. Определена электромагнитная сила, действующая на образец, с учетом влияния всех витков катушки индуктивности.
4. Определено поведение функции окружного напряжения от времени при высокоскоростных нагрузках.

5. Разработан пьезоэлектрический датчик, при помощи которого измерены профили радиального давления, действующего на металлические образцы.

**Научная и практическая ценность.** Предложенные в диссертационной работе методы позволяют определить время разрушения образцов, рассчитать и измерить окружное напряжение в образце и скорость деформации в широком диапазоне высокоскоростного нагружения.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Апробация магнитно-импульсного метода деформирования и разрушения тонких металлических колец при временах нагружения более коротких по сравнению с известными.

2. Определение электромагнитной силы, действующей на образец.

3. Нахождение окружного напряжения и скорости деформации в тонких металлических кольцах при высокоскоростных нагрузках и их расчет.

4. Измерение окружного напряжения в тонких металлических кольцах с помощью пьезодатчика и сравнение измеренных характеристик с расчетными.

5. Расчет и измерение токов в металлических кольцах при высокоскоростном электромагнитном нагружении.

6. Метод регистрации времени момента разрушения кольцевых образцов.

**Апробация результатов.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих международных конференциях:

1. 13th International Conference on Fracture (ICF13). 2013. Beijing, China;

2. Международная конференция по механике «XXI Петербургские чтения по проблемам прочности. К 100-летию со дня рождения Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова» (Санкт-Петербург, 2014 г.);

3. Международная конференция по механике «Седьмые Поляховские чтения» (Санкт-Петербург, 2015 г.);

4. XXVI Международная конференция «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций» (Санкт-Петербург, 2015 г.);

5. Международная конференция по механике «XXI Петербургские чтения по проблемам прочности. К 110-летию со дня рождения академика С.Н. Журкова и 85-летию со дня рождения профессора В.А. Лихачева» (Санкт-Петербург, 2016 г.).

**Публикации.** Основные выводы и результаты диссертации опубликованы в работах [1-7]. Из них три ([1, 5, 7]) в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК. Список работ приведен в конце автореферата.

Личный вклад соискателя во всех работах состоит в непосредственном участии в проведении экспериментов, расчете действующей на образец электродинамической силы. Разработка математической модели в работах [1-7], определяющей функцию окружного напряжения, проводилась совместно с В.А. Морозовым. Аналитический метод определения токов в исследуемых образцах [4] был разработан совместно с В.А. Морозовым и Ю.Ф. Гунько. Используемые в работах [2, 3, 6, 7] программы расчета деформационных характеристик созданы совместно с А.А. Лукиным. Постановка экспериментов во всех работах принадлежит В.А. Морозову. Во всех работах совместно с соавторами проводился анализ результатов.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Каждая глава содержит краткую аннотацию, основные выводы приводятся в конце главы. Диссертация изложена на 88 страницах, содержит 52 рисунка, 3 таблицы и список литературы, включающий 32 наименования.

## Содержание работы

**Во введении** приводится краткая характеристика работы, обосновывается ее актуальность и достоверность. Представлен краткий исторический обзор развития магнитно-импульсных методов деформирования и разрушения материалов. Приводится структура диссертации и ее объем.

**Глава 1** посвящена анализу схем нагружения и деформирования металлических кольцевых образцов. Проанализирована электрическая схема квазистатического нагружения металлических кольцевых образцов (рис.1), с помощью которой реализуется гармоническое нагружение с периодом в интервале от 5,5 до 7,5 мкс.

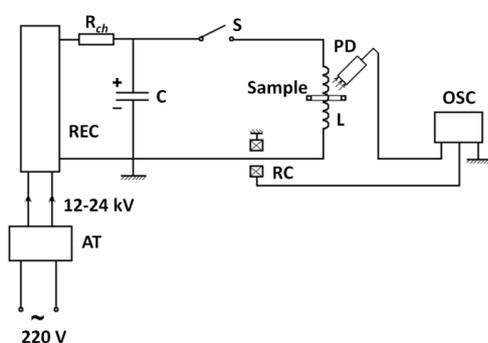


Рис. 1. Блок-схема установки при синусоидальной электромагнитной нагрузке с периодом (5-7) мкс. *AT* – автотрансформатор; *REC* – выпрямитель; *R<sub>ch</sub>* – зарядное сопротивление; *C* – конденсатор; *S* – разрядник; *L* – катушка индуктивности (соленоид без сердечника); *RC* – пояс Роговского; *Sample* – образец (металлическое кольцо); *PD* – фотодиод; *OSC* – осциллограф.

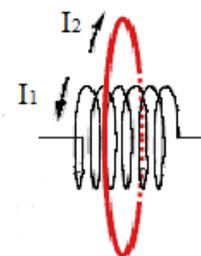


Рис. 2. Схема токов. Здесь  $I_1$  – ток, протекающий по виткам катушки индуктивности;  $I_2$  – ток, индуцированный в кольцевом образце.

Конденсатор  $C$  разряжается на катушку индуктивности  $L$  при включении разрядника  $S$ . В то время как по катушке индуктивности протекает ток  $I_1$  (рис. 2), поток вектора магнитной индукции, пронизывающий кольцевой образец, изменяется. Таким образом, в металлическом кольце индуцируется ток  $I_2$ . Согласно правилу Ленца, индукционный ток будет направлен таким образом, чтобы препятствовать изменению потока. Малые отрезки любого витка катушки индуктивности и кольцевого образца можно считать параллельными, и по закону Ампера между ними возникает сила отталкивания, которая создает давление на внутреннюю поверхность, что приводит к его деформации.

В диссертационной работе проанализировано, какой наименьший период электромагнитных колебаний может быть при использовании схемы, основанной на сосредоточенных параметрах ёмкости и индуктивности. Период колебаний контура, представленного на рис. 1, можно записать в виде:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (1)$$

Проведённая оценка показала, что для витка катушки индуктивности диаметром  $D \approx 30$  мм, радиус провода которой  $r \approx 0,5$  мм, а конденсатор ёмкостью  $C \approx 0,5$  мкФ минимальный период колебаний электрического тока будет порядка 1,1 мкс. В реальных условиях необходимо учитывать индуктивность проводов, подводящих напряжение к катушке от конденсатора, их ёмкость, а также собственную индуктивность конденсатора. При этом период электромагнитных колебаний может возрасти в несколько раз по сравнению с рассмотренным идеализированным случаем. Для существенного сокращения периода электромагнитных колебаний, тем самым повышения скорости нагружения и деформирования образцов, в настоящей работе предложены две принципиально новые схемы магнитно-импульсного нагружения.

С помощью первой динамической схемы (рис.3) реализуются электромагнитные колебания в катушке индуктивности с периодом  $T=1$  мкс. Используя вторую динамическую схему (рис. 4), можно получить аperiodический режим колебаний, тем самым реализуя импульсное нагружение образцов.

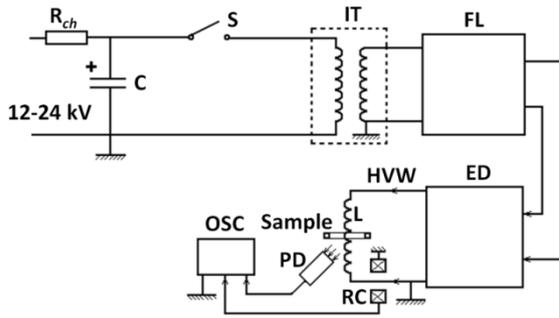


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки для случая синусоидальной электромагнитной нагрузки с периодом 1 мкс.  $R_{ch}$  – зарядное сопротивление;  $C$  – конденсатор;  $S$  – разрядник;  $IT$  – импульсный трансформатор;  $FL$  – формирующая линия;  $ED$  – выходное устройство;  $HVW$  – высоковольтный электрод;  $L$  – катушка (соленоид без сердечника);  $Sample$  – образец (металлическое кольцо);  $RC$  – пояс Роговского;  $PD$  – фотодиод;  $OSC$  – осциллограф.

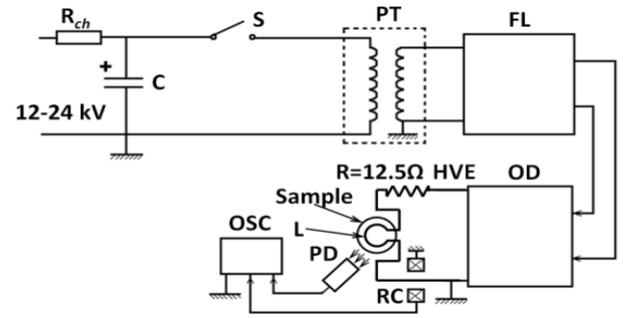


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки для случая импульсной электромагнитной нагрузки длительностью 80 нс.  $R_{ch}$  – зарядное сопротивление;  $C$  – конденсатор;  $S$  – разрядник;  $PT$  – импульсный трансформатор;  $FL$  – формирующая линия;  $OD$  – выходное устройство;  $HVE$  – высоковольтный электрод;  $L$  – катушка (соленоид без сердечника);  $RC$  – пояс Роговского;  $Sample$  – образец (металлическое кольцо);  $PD$  – фотодиод;  $OSC$  – осциллограф.

**Глава 2** посвящена аналитическому описанию процессов электромагнитного нагружения кольцевых металлических образцов. Анализируются электромагнитные колебания в двух индуктивно связанных контурах (рис.1), которые описываются системой уравнений:

$$U_c + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 + L_{12} \frac{di_2}{dt} = 0, \quad (2)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2 + L_{21} \frac{di_1}{dt} = 0, \quad (3)$$

где  $U_c$  – напряжение заряженного конденсатора;  $L_1$  и  $L_2$  – индуктивности контура соленоида и кольцевого образца;  $R_1$  и  $R_2$  – сопротивление контура соленоида и кольцевого образца;  $L_{12} = L_{21}$  – взаимная индукция;  $i_1$  и  $i_2$  – токи в контуре и кольце, соответственно. Решение этой системы, дает выражения для определения силы тока в катушке индуктивности и индуктивно связанном с ней металлическим кольцевым образцом.

$$i_1 = i_{10} e^{-pt} \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$i_2 = A e^{-pt} \sin \omega t + B e^{-pt} \cos \omega t \quad (5)$$

Здесь  $i_{10} = U_c / L_1 \omega$  ;  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - p^2}$  , где  $\omega_0 = 1 / \sqrt{L_1 C}$  , а  $p = R_1 / 2L_1$  ,  
 $A = i_{10} L_{12} (-L_2(p^2 + \omega^2) + R_2 p) / ((R_2 - L_2 p)^2 + \omega^2 L_2^2)$ ,  
 $B = -i_{10} L_{12} R_2 \omega / ((R_2 - L_2 p)^2 + \omega^2 L_2^2)$ .

Расчет силы производился по предложенному методу, включающему влияние всех витков соленоида на исследуемый образец (рис.5).

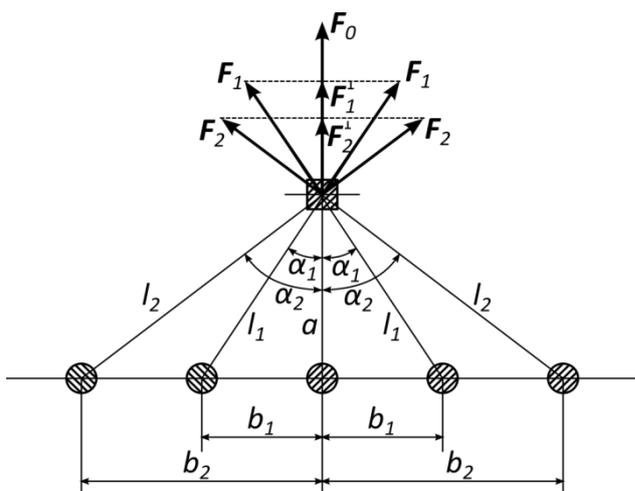


Рис. 5. Схема расчета общей силы, действующей на кольцевой образец.  $F_i$  и  $l_i$  – сила и расстояние между  $i$ -м витком катушки и кольцом;  $a$  – кратчайшее расстояние от катушки до кольца;  $\alpha_i$  – угол между  $l_i$  и  $a$ ;  $b_i$  – расстояние между центральным и  $i$ -м витками катушки

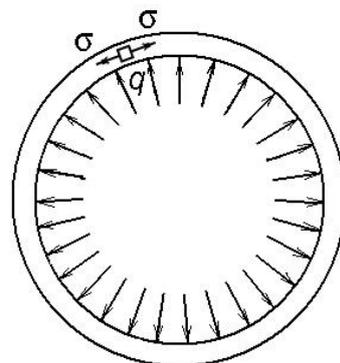


Рис. 6. Схема нагружения кольца. Здесь  $q$  – давление на внутренней поверхности кольца;  $\sigma$  – окружное напряжение кольца.

$$F(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1(t)I_2(t)}{a} + 2 \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1(t)I_2(t)}{l_1} \cos\alpha_1 + 2 \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1(t)I_2(t)}{l_2} \cos\alpha_2, \quad (6)$$

где  $I_1(t)$  – сила тока в катушке индуктивности,  $I_2(t)$  – сила тока в металлическом образце,  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Распределенную нагрузку, действующую на внутреннюю поверхность кольцевого образца (рис.6), можно рассчитать по формуле:

$$q(t) = \frac{F(t)l}{s} = \frac{F(t)l}{lc} = \frac{F(t)}{c}, \quad (7)$$

где  $F$  – сила Ампера,  $l$  – длина кольцевого образца,  $s$  – площадь внутренней поверхности образца,  $c$  – ширина кольца.

В данной главе приводятся конкретные расчеты силы Ампера, действующей на внутреннюю поверхность металлического кольца, для случаев разной энергии заряда конденсатора (рис.7), различных материалов (рис.9) и размеров металлических образцов (рис.8).

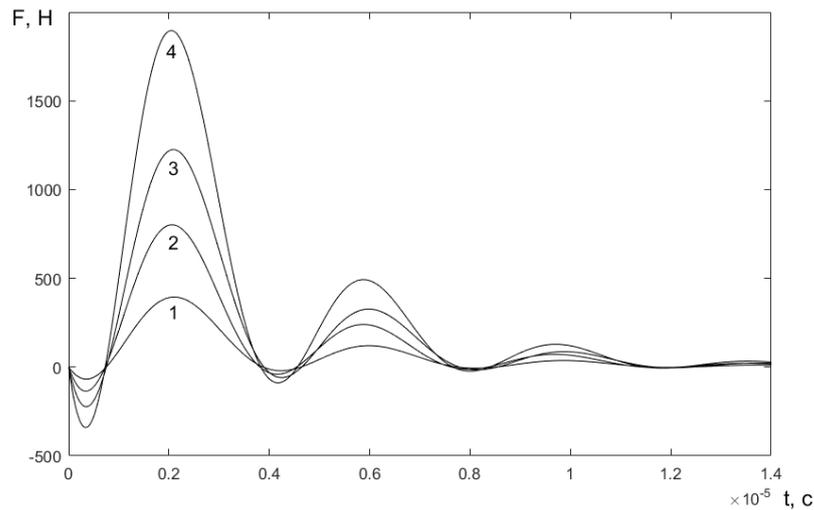


Рис. 7. График зависимости силы Ампера от времени  $F(t)$ .

Кривая (1) – при энергии заряженного конденсатора 25 Дж; (2) – при энергии заряженного конденсатора 49 Дж; (3) – при энергии заряженного конденсатора 81 Дж; (4) – при энергии заряженного конденсатора 121 Дж

Для сравнения сил, действующих на кольцевые образцы из разных металлов, была проведена серия экспериментов по деформированию тонких колец, изготовленных из меди и алюминия.

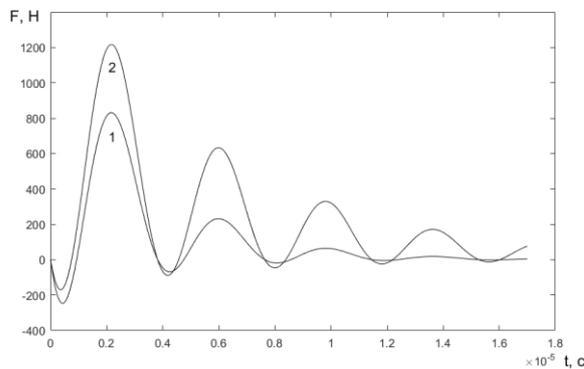


Рис.8. График зависимости силы Ампера от времени  $F(t)$  для металлических образцов из алюминия (1) – шириной 3 мм, (2) – шириной 5 мм.

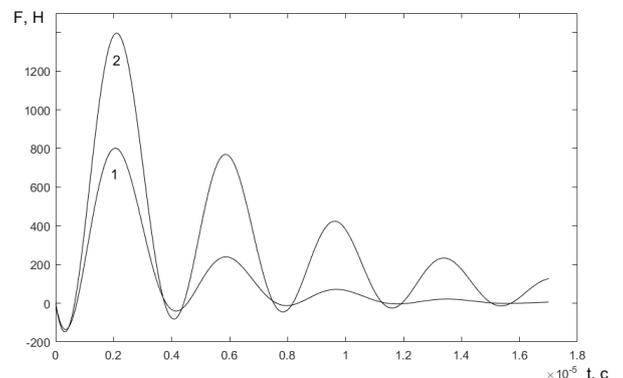


Рис.9. Графики зависимости силы Ампера от времени  $F(t)$  для металлических образцов из алюминия шириной 3 мм (1) и меди шириной 3,1 мм (2).

Графики зависимостей, приведенные на рис. 8-9, показывают, что с увеличением ширины кольцевого образца, как алюминиевого, так и медного, повышается значение силы Ампера  $F(t)$  вследствие уменьшения электрического сопротивления. Видно, что значение силы в алюминиевых образцах значительно меньше, чем в медных в связи с тем, что проводимость меди выше.

В работе выведено уравнение движения кольца с помощью соотношения энергетического баланса (на основе идеи д.ф.-м.н., проф. А.А. Груздкова). Это позволило получить дифференциальное уравнение для окружного напряжения:

$$\frac{d^2\sigma}{dt^2} + \frac{1}{2E} \left( \frac{d\sigma}{dt} \right)^2 + \omega^2\sigma = \omega^2 R_0 \frac{q(t)}{h}, \quad (8)$$

где  $\omega = 1/R_0 \sqrt{E/\rho}$  – частота собственных колебаний кольца, где  $E$  – модуль Юнга. Это уравнение решается при начальных условиях:

$$\begin{aligned} \sigma(t_0) &= A \\ \left. \frac{\partial \sigma}{\partial t} \right|_{t=t_0} &= B \end{aligned} \quad (9)$$

Обычно для расчета напряжений в статическом случае используется формула Лапласа:

$$\sigma(t) = \frac{R_0 q(t)}{h}, \quad (10)$$

где  $R_0$  – начальный радиус кольцевого образца,  $h$  – толщина кольцевого образца.

Сравнение величины окружного напряжения, рассчитанного разными методами (рис.10), показывает, что уже для случая квазистатического нагружения формула Лапласа (10) не годится.

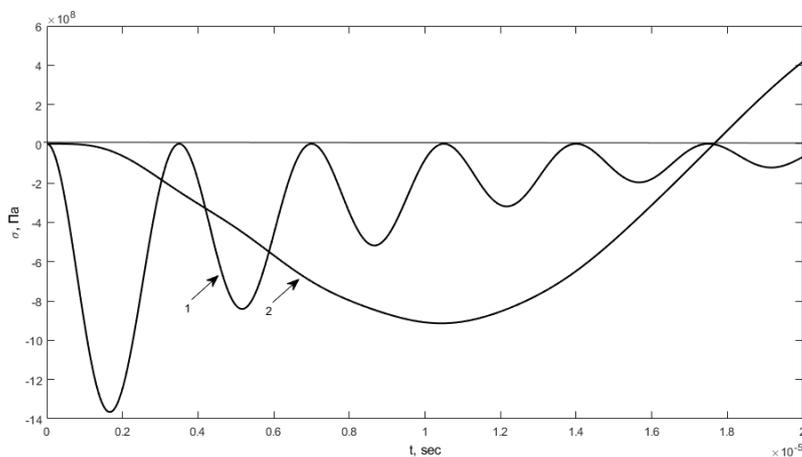


Рис. 10. Зависимость окружного напряжения от времени, рассчитанная по формуле (10) – 1, по выражению (8) – 2.

Для оценки влияния энергии заряженного конденсатора на величину окружного напряжения были рассчитаны значения  $\sigma(t)$  для медных и алюминиевых колец различной ширины при разных значениях энергии. На рис. 11 представлены расчетные значения окружного напряжения  $\sigma(t)$  для медного кольца шириной 1,5 мм при варьировании энергии заряженного конденсатора от 25 Дж до 121 Дж.

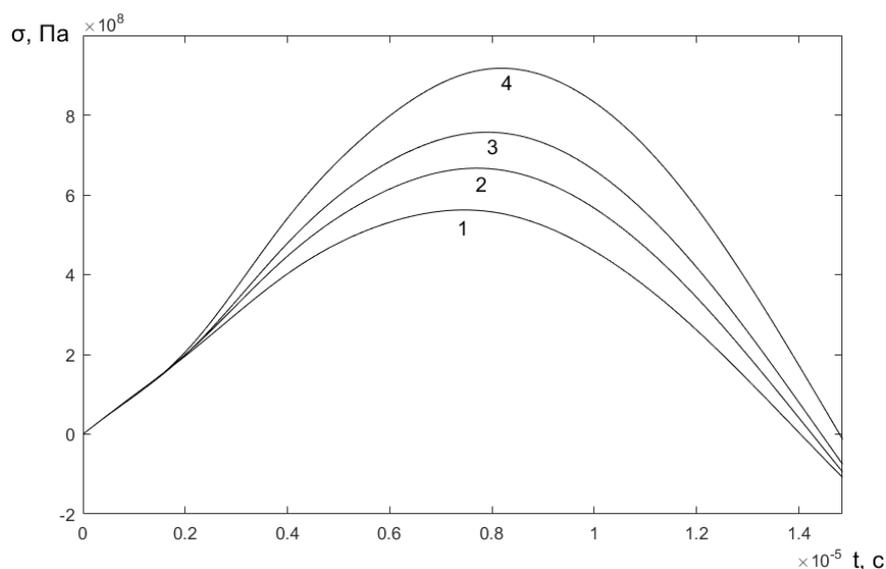


Рис. 11. Зависимости окружного напряжения от времени  $\sigma(t)$ : (1) – при энергии заряженного конденсатора 36 Дж; (2) – при энергии заряженного конденсатора 64 Дж; (3) – при энергии заряженного конденсатора 100 Дж; (4) – при энергии заряженного конденсатора 121 Дж.

С увеличением энергии амплитуда напряжения растет, причем нелинейно.

Для сравнения величины окружного напряжения для образцов с различными параметрами были проведены расчеты деформирования кольцевых образцов, изготовленных из меди и алюминия при одной энергии заряда конденсатора  $E=49$  Дж (рис.12, 13).

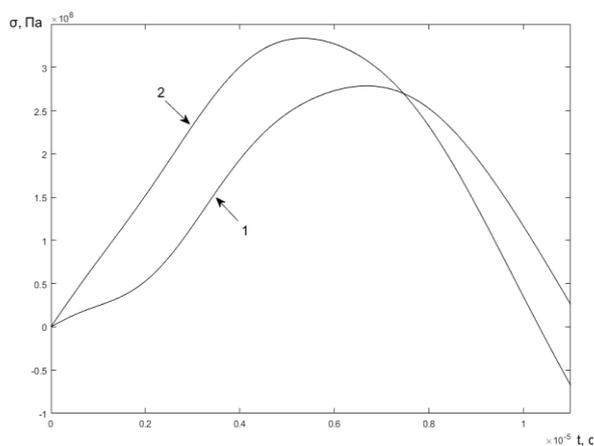


Рис. 12. Зависимость окружного напряжения от времени  $\sigma(t)$  для металлического образца из алюминия (1) – шириной 3 мм, (2) – шириной 5 мм.

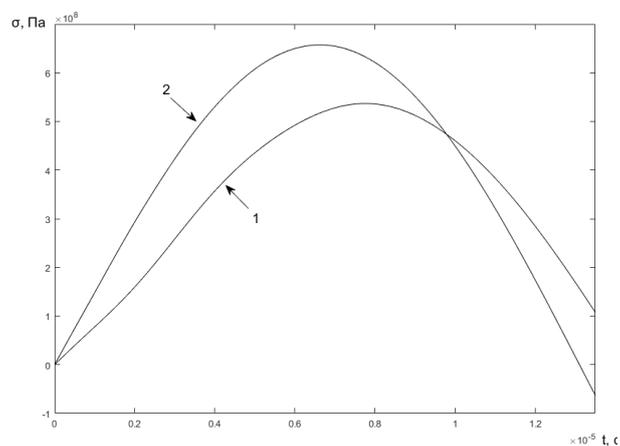


Рис. 13 Зависимость окружного напряжения от времени  $\sigma(t)$  для металлического образца из меди (1) – шириной 1,5 мм, (2) – шириной 3,1 мм.

Из представленных рисунков видно, что с увеличением ширины образца растет окружное напряжение в нем. Это объясняется тем, что с увеличением ширины проводника уменьшается его сопротивление, что влечет за собой увеличение силы тока.

**Глава 3** посвящена вопросам экспериментального исследования нагружения, деформирования и разрушения металлических кольцевых образцов. Представлены две экспериментальные методики определения токов в кольцевых образцах. Первый метод предусматривает измерение тока с помощью пояса Роговского в катушке индуктивности без образца и с помещенным на нее кольцевым образцом. Второй метод основан на непосредственном измерении тока в кольцевом образце. Результаты измерений токов двумя способами представлены на рис. 14.

Приведенные графики показывают, во-первых, линейную зависимость тока от напряжения заряда конденсатора, во-вторых, по мере увеличения ширины кольцевого образца значение тока в нем возрастает, приближаясь к значению тока в катушке.

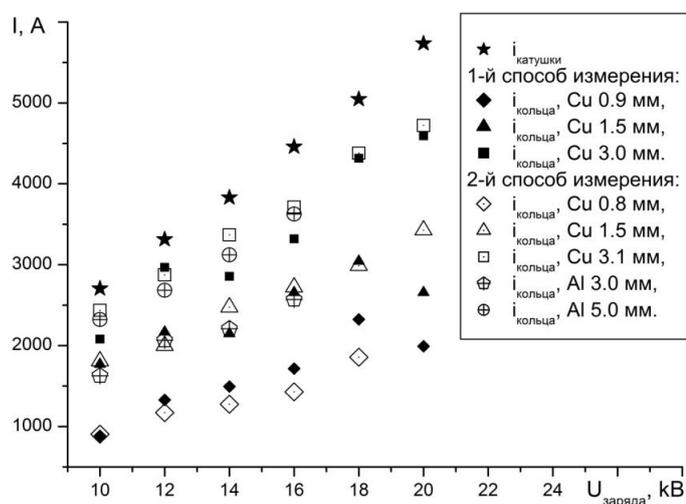


Рис. 14. Зависимость тока в кольце от напряжения заряда конденсатора.

При разрушении кольцевого образца ток в нем мгновенно остановиться не может, следовательно, в момент разрушения в месте разрыва образца появляется искра между разорванными частями. Эту вспышку можно зафиксировать с помощью фотодиода (рис.15).

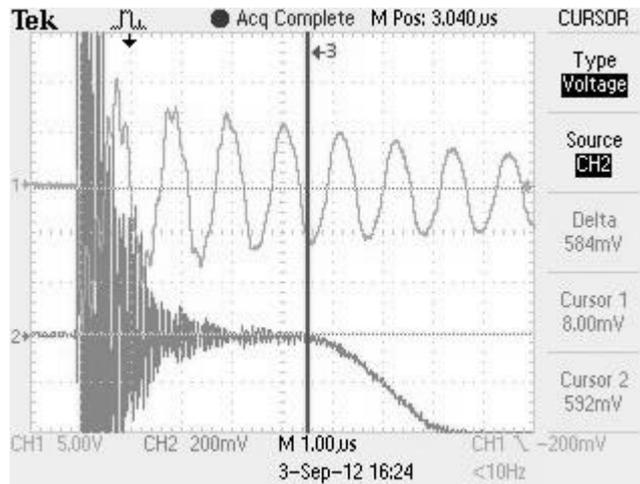


Рис. 15. Определение времени разрушения при периоде тока в соленоиде  $T=1$  мкс: осциллограмма тока в соленоиде (1), сигнала с фотодиода (2), время разрушения (3).

Этот новый оригинальный способ позволяет определить время разрушения металлического кольца, что является весьма важной проблемой в механике динамического разрушения материалов.

Заметим, что при гармоническом нагружении образцов их разрушение наступает через несколько периодов тока в катушке. Для схемы, реализующей импульсное нагружение, также было измерено время разрушения (рис. 16). При таком нагружении разрушение может наступить либо на фронте импульса тока, либо на его спаде. Последний факт является существенным при высокоскоростном импульсном нагружении материалов. Данное обстоятельство при разрушении тонких металлических колец электромагнитным способом было зафиксировано нами впервые.

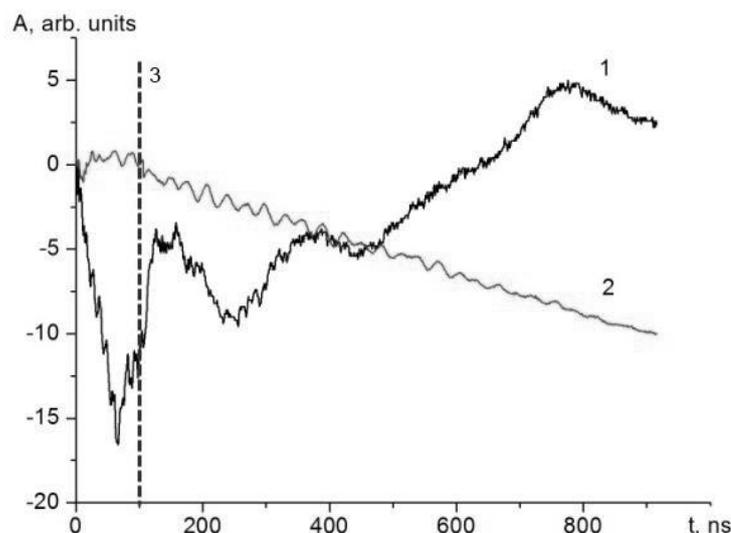


Рис. 16. Определение времени разрушения при импульсном нагружении с длительностью импульса тока в соленоиде  $\tau = 80$  нс: осциллограмма тока в соленоиде (1), сигнал с фотодиода (2), время разрушения (3).

Измерение давлений на кольцевые образцы проводились с помощью пьезодатчика.

По измеренным давлениям определялись величины окружного напряжения (рис.17, 18).

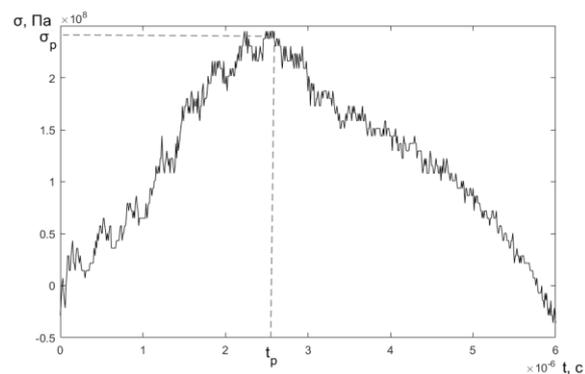
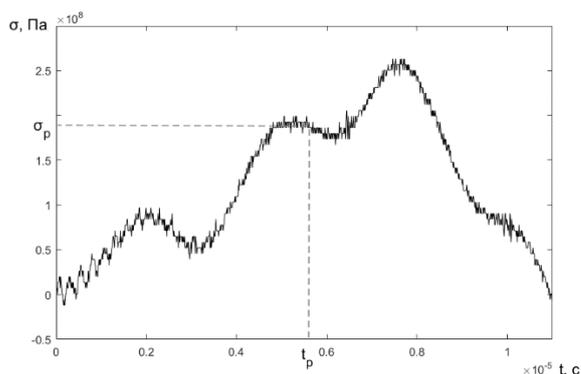
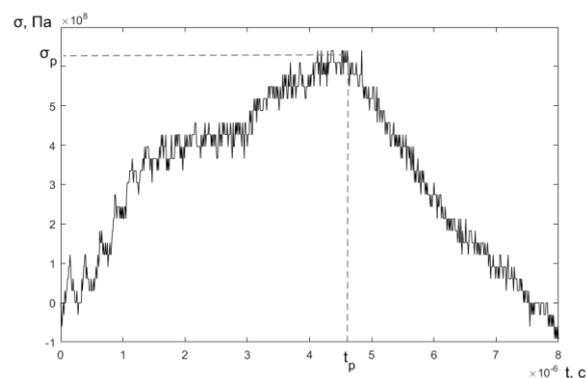
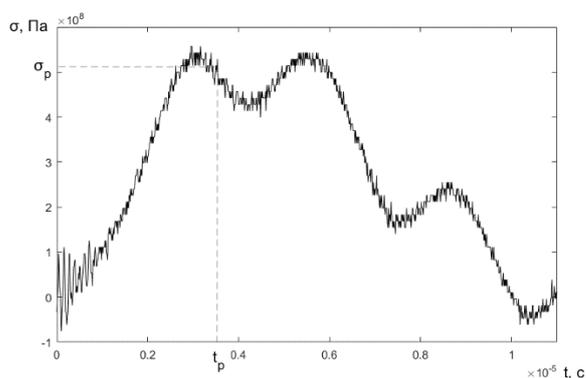


Рис. 17. Экспериментальный профиль окружного напряжения для медного (1), алюминиевого (2) образцов при периоде нагружения  $T=7,5$  мкс.  $t_p$  – время разрушения;  $\sigma_p$  – напряжение разрушения.

Рис. 18. Экспериментальный профиль окружного напряжения для медного (1), алюминиевого (2) образцов при периоде нагружения  $T=1$  мкс.  $t_p$  – время разрушения;  $\sigma_p$  – напряжение разрушения.

Из рисунков видно, что при квазистатическом нагружении (рис.17) на профилях окружного напряжения еще просматриваются колебания, в то время как при динамическом нагружении образцов (рис.18) инерция деформирования материала уже значительно сглаживает эти колебания.

С помощью описанных экспериментальных методов в настоящей главе проводится определение окружных напряжений, скоростей деформации и напряжений в момент разрушения исследуемых образцов для разных случаев нагружения. Результаты экспериментов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Измеренные значения радиальных давлений, окружных напряжений и скоростей деформации.

№ опыта	Длительность временного интервала $\Delta t$ , мкс	Радиальное давление $\Delta p$ , МПа	Окружное напряжение $\Delta \sigma$ , ГПа	Скорость деформации $\dot{\epsilon}$ , с <sup>-1</sup>
Al, T=7 мкс				
1	1,5	0,17	0,15	$0,78 \cdot 10^4$
2	0,75	0,17	0,16	$1,63 \cdot 10^4$
3	0,5	0,17	0,16	$2,42 \cdot 10^4$
Cu, T=7 мкс				
1	1,5	0,56	0,52	$0,9 \cdot 10^4$
2	1,75	0,41	0,38	$0,57 \cdot 10^4$
3	1,5	1,1	1,04	$1,82 \cdot 10^4$
Al, T=1 мкс				
1	1,0	0,51	0,47	$0,36 \cdot 10^5$
2	1,5	0,41	0,38	$0,19 \cdot 10^5$
3	1,0	0,1	0,09	$0,7 \cdot 10^4$
Cu, T=1 мкс				
1	1,5	0,3	0,28	$0,5 \cdot 10^4$
2	2	0,51	0,47	$0,6 \cdot 10^4$
3	1,75	0,71	0,66	$1,0 \cdot 10^4$

В заключительной части данной главы приводится сравнение расчетных и экспериментальных данных. Сравниваются экспериментальные осциллограммы токов в катушке индуктивности (рис.19) и в металлическом кольце (рис.20) и рассчитанные по предложенным выражениям (4) и (5) соответственно.

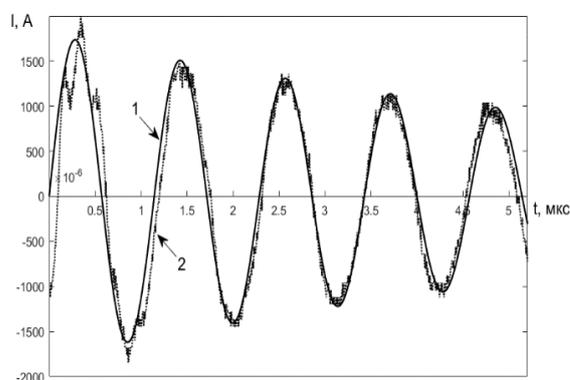


Рис. 19. Осциллограмма тока в соленоиде (2) в сравнении с расчётной кривой (1).

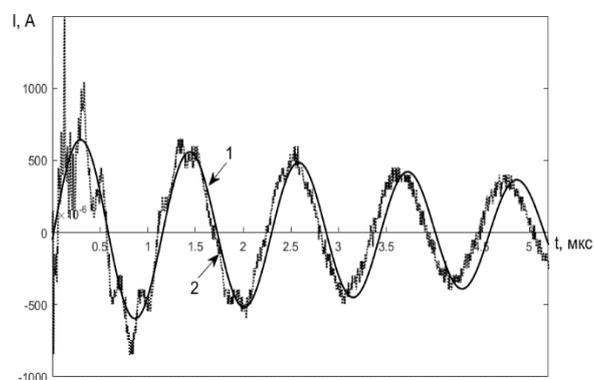


Рис. 20. Осциллограмма тока в медном кольце (2) в сравнении с расчетной кривой (1).

Проведено сравнение (рис.21) профилей растягивающего напряжения, полученного с помощью эксперимента, и рассчитанного из уравнения (8).

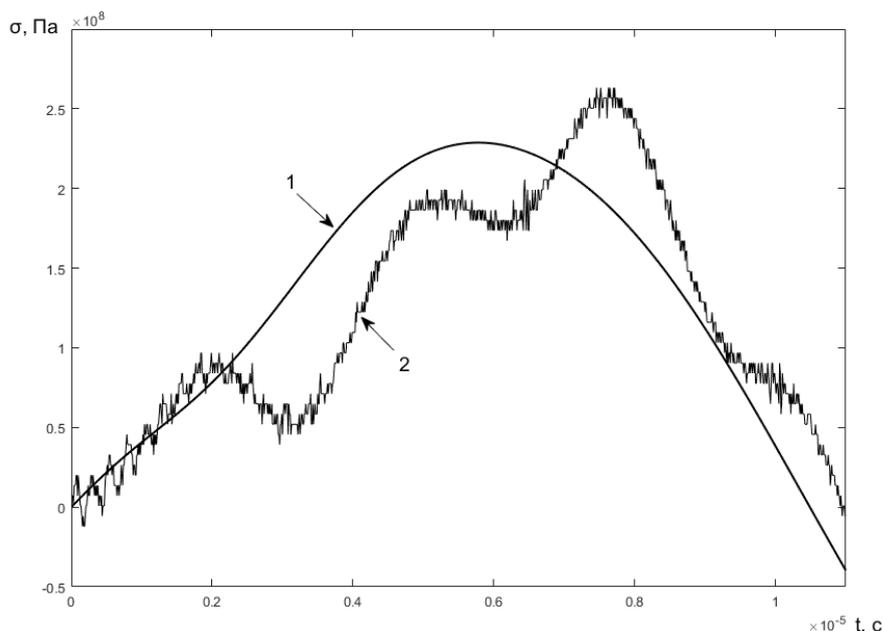


Рис. 21. Профили окружного напряжения  $\sigma(t)$  в алюминиевом образце, (1) – расчётный, (2) – экспериментальный.

## Заключение

В настоящей диссертации рассматриваются магнитно-импульсные методы нагружения, деформирования и разрушения металлических кольцевых образцов. Представлены и апробированы три метода нагружения медных и алюминиевых колец в виде тонких лент: квазистатический, реализующий синусоидальную нагрузку с периодом колебаний тока  $T=7,5$  мкс, динамический, обеспечивающий синусоидальную нагрузку с периодом колебаний электрического тока  $T=1$  мкс, динамический, реализующий импульсное нагружение с длительностью импульса  $T=80$  нс.

В работе проведен анализ электромагнитных колебаний, возникающих в связанных контурах соленоида и металлического кольцевого образца, который позволил вывести выражение для определения силы тока в соленоиде и образце. Предложен метод определения радиальной силы и радиального давления на внутреннюю поверхность кольцевого образца, а также метод определения окружного напряжения при деформации и разрушении металлических колец.

В диссертационной работе предложен метод фоторегистрации момента разрушения металлических колец. С помощью этого метода было выявлено, что при

высокоскоростном импульсном нагружении кольцевых образцов их разрушение происходит не только на фронте импульса, но и на его спаде.

Для исследования токов в связанных контурах катушки индуктивности и металлического кольца были разработаны и реализованы два экспериментальных метода измерения тока в кольцевом образце. Полученные экспериментальные данные позволили оценить соответствие предложенной математической модели определения тока в металлическом кольце реальному току в образце.

В диссертации описан экспериментальный метод измерения профилей давления на металлические кольцевые образцы, по которым определялись растягивающие окружные напряжения. Было обнаружено, что окружное напряжение не является пульсирующим в отличие от силы Ампера, которая зависит от токов, совершающих колебания с определенным периодом. Данное обстоятельство связано с тем, что из-за инерции деформирования кольцевого образца колебания сглаживаются. Кроме того, в силу инерции процесс роста напряжения и его максимум сильно сдвинуты от начала воздействия силы на кольцевой образец и ее максимального значения.

В работе предложен метод расчета силы, действующей на металлические кольца, и возникающего в них окружного напряжения. Рассчитанная по предложенной модели функция напряжения является гладкой, в то время как функция силы, вызывающей деформацию образца является пульсирующей, что согласуется с полученными экспериментальными данными.

Представленные в настоящей диссертации результаты позволяют оценить деформационные и прочностные характеристики материалов в широком диапазоне изменения энергетических параметров и скоростей деформации.

## Список публикаций

1. V.A. Morozov, Yu.V. Petrov, A.A. Lukin, V.M. Kats, S.A. Atroshenko, G.D. Fedorovskii, D.A. Griбанov, O.K. Zaichenko. Fracture of Metallic Ring Samples under static and dynamic loading // 13th International Conference on Fracture (ICF13), June 16-21, 2013, Beijing, China, ICF13 Proceedings, Physical Aspects (S17-043).
2. Зайченко О.К., Лукин А.А., Морозов В.А. Деформирование и разрушение кольцевых образцов магнитно-импульсным методом // XXI Петербургские чтения по проблемам прочности. К 100-летию со дня рождения Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова. Санкт-Петербург, 15-17 апреля 2014 г.: сборник материалов. СПб., 2014. С. 155-157.
3. Зайченко О.К., Лукин А.А., Морозов В.А. Динамическое деформирование и разрушение тонких металлических кольцевых образцов магнитно-импульсным методом // XXVI Международная конференция «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций». Тезисы докладов. 2015. С. 143.
4. Н.А. Гунько, Ю.Ф. Гунько, О.К. Зайченко, А.А. Лукин, В.А. Морозов. Деформирование и разрушение тонких кольцевых образцов из меди и алюминия магнитно-импульсным методом // Седьмые Поляховские чтения: Тезисы докладов международной научной конференции по механике. 2015. С. 256.
5. Gunko Y.F., Zaychenko O.K., Lukin A.A., Morozov V.A., Gunko N.A. Deformation and fracture of thin ring samples of copper and aluminium by magnetic pulse method // 2015 International Conference on Mechanics - Seventh Polyakhov's Reading; Saint Petersburg State University, St. Petersburg; Russian Federation; 2 February 2015 through 6 February 2015; Category number CFP15A24-ART; Code 112290, Article number 7106734, 2015.
6. Зайченко О.К., Лукин А.А., Морозов В.А. Сравнение ударноволновых характеристик кольцевых образцов при магнитно-импульсном нагружении с разной скоростью деформации // XXII Петербургские чтения по проблемам прочности. К 110-летию со дня рождения профессора В.А. Лихачёва. Санкт-Петербург, 12-14 апреля 2016г.: сборник материалов. СПб., 2016. С. 290-292.
7. Zaychenko O.K., Lukin A.A., Morozov V.A. Dynamic deformation and fracture of thin metal ring samples under magnetic pulse loading // Material Physics and Mechanics, Volume 26, Issue 1, 2016, pp. 81-84.