Правительство Российской федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»

Кафедра физической механики

Зайченко Ольга Константиновна

Использование магнитно-импульсного метода для исследования динамического нагружения материалов

Выпускная квалификационная работа

Научный руководитель:
профессор с возложенными
обязанностями заведующего кафедрой,
д.ф.-м.н, доцент, Морозов В.А.

Рецензент:
инженер-программист,
к.ф.-м.н., Кац В.М.

Санкт-Петербург

2016

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Mathematics and Mechanics Faculty

Department of Physical Mechanics

Zaychenko Olga

Investigation of dynamic loading material by magnetic pulse method

Graduation Qualification Paper

Scientific supervisor:
Dr.Sci (Phis.-Math), professor,
Morozov V.

Reviewer:
Software engineer,
PhD, Kats V.

Saint-Petersburg

2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
§1. Квазистатическая схема нагружения. Расчет силы Ампера 7
§2. Динамические схемы нагружения. Уравнение движения тонкого кольца ... 10
§3. Экспериментальные методы измерения радиального давления в кольце, тока в катушке и кольце. Измерение времени разрушения кольца 14
§4. Система уравнений, описывающих электромагнитные колебания в связанных контурах, и ее решение 16
§5. Результаты экспериментальных и расчетных данных. 18
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 24
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 25

ВВЕДЕНИЕ

Изучение механизмов деформации и разрушения твердых тел играет важную роль в различных областях научного знания, техники, геофизических и военных приложений. Наблюдаемое при дроблении, разрывах снарядов, образовании метеоритных кратеров разрушение крупных предметов на мелкие фрагменты может происходить при скоростях деформации порядка 10^4 $с^{-1}$. Появление реальных задач, связанных с деформированием материалов, влечет за собой создание методов моделирования нагружений для оценки параметров подобных процессов. **Актуальным** направлением является исследование электромагнитных методов высокоскоростного нагружения материалов, в частности, металлических колец.

Экспериментальное изучение деформации при скоростных нагрузках было начато Ниордсоном [1] который разработал схему электромагнитного нагружения для придания импульса металлическому кольцу.

Гради и Бенсоном [2] также исследовалась фрагментация при разрыве металлических колец. Была получена величина деформации при разрыве, которая возрастала почти как линейная функция от скорости расширения кольца.

Эксперименты по растяжению колец из алюминиевого сплава [3] выявили зависимость деформации от скорости и размеров образцов. Напряжение в кольцах с диаметром 25,4 мм было меньше, чем в кольцах диаметром 50,8 мм.

Касательно микроструктуры, которая образуется в результате ударного нагружения, было показано [4], что она зависит от длительности импульса. Авторы [5] утверждают, что образование дислокаций играет основную роль в пластическом поведении материала при ударном нагружении, а короткие ударные импульсы являются важным инструментом для исследования не только скорости их образования, но и пластической деформации в целом.

Механические напряжения в образцах из меди могут быть определены как функция скорости деформации [6], причем при скоростях деформации, превышающих 10^3 $с^{-1}$, скорость накопления дислокаций будет сильно зависеть от скорости деформации.

Для тонких металлических колец определялись скорости деформации и температуры образцов в зависимости от начального напряжения [7]. Было установлено, что для материалов с больших сопротивлением, чем у меди, расширение образцов будет более сложной задачей. Для решения этой проблемы были разработаны улучшенные методы нагружения металлических колец [8], что позволило деформировать образцы из материалов низкой проводимости.

Г.В. Степановым было показано [9], что количество разрушений в кольцевых образцах пропорционально скорости их расширения и не зависит от диаметра. Также было выявлено, что процесс деформирования идет равномерно по всему объему материала. Это позволяет определить равномерную деформацию, а не локализованную.

Исследования [10]-[12] показали, что при уменьшении длительности импульса от 4,3 до 1 мкс порог хрупкого разрушения возрастает.

К аналитическому описанию процесса разрушения металлических колец существует несколько подходов. Первый основан на работах Мотта [13], который выдвинул два положения об образовании шеек и разрушении пластических материалов. В этой модели каждая материальная точка кольца накапливает пластическую деформацию до тех пор, пока не произойдет разрыв или не наступит разгрузка. Это приводит ко второму постулату: в момент возникновения разрыва в слабейшем участке генерируется волна разгрузки, которая распространяется вдоль кольца, разгружая смежные участки кольца. Поскольку до момента первого разрыва все точки кольца обладали только радиальными скоростями, волны разгрузки должны вызывать тангенциальные скорости в смежных с разрывом регионах, что быстро замедляет их распространение. Мотт оценил скорость распространения волн при допущениях, что материал абсо-

лютно пластичен и разгруженный участок двигается как абсолютно твердое тело.

Параллельно с этой моделью производились многочисленные расчеты, связанные с моделью возмущений. Идея этих исследований заключается в следующем: во-первых, записываются уравнения неразрывности и закона сохранения импульса, которые описывают целостное расширение кольца, они уточняются с учетом деформационного упрочнения, термического размягчения и зависимости от скорости деформации. Затем, на решение системы уравнений накладывается небольшое периодическое возмущение, уравнения линеаризуются для получения выражений, описывающих эволюцию возмущений. Постулирование нетривиальности и незатухания возмущений дает условия для роста возмущений как функций от длины волны и скорости. Преобладающие возмущения выбираются как растущие с наибольшей скоростью. Все подобные исследования приводят к одному общему выводу: волны с высокой и низкой частотой отсеиваются за счет инерции и вязкости, и наблюдается доминирование волн со средней частотой. Результаты практически всех анализов довольно хорошо согласуются с зависимостью числа компонентов от скорости деформации, наблюдаемой Гради и Бенсоном [2].

Таким образом, два различных аналитических подхода оказываются дающими схожие прогнозы. В то время как разброс результатов хорошо объясняется постулатом Мотта о дисперсии деформации при разрыве, среднее количество наблюдаемых фрагментов согласуется с предсказаниями теории возмущений.

Для получения новых экспериментальных результатов К. Рави-Чандаром и Х. Жаном [14]-[17] была проведена серия экспериментов по высокоскоростному растяжению металлических колец. Было показано, что кольцо быстро разгоняется до скоростей около 100-250 м/с, а затем постепенно замедляется с падением силы тока и рассеиванием энергии в результате пластических деформаций. Оценка для скорости деформации дает приближенное значение в промежутке $5 \cdot 10^3 - 1{,}3 \cdot 10^4\ c^{-1}$. Важнейшим результатом данной серии экс-

периментов является информация, полученная из высокоскоростных фотографий: пространственно-временные детали образования шеек и фрагментации.

В недавних работах [18, 19] рассматриваются скорости деформации свыше $5 \cdot 10^3$ $с^{-1}$. Для получения таких значений коллективом авторов [19] было реализовано нагружение металлических кольцевых образцов методом прерванного электромагнитного импульса.

Авторами [20] была разработана модель расширения цилиндра, которая позволила определить прочность при скоростях деформации свыше 10^5 $с^{-1}$.

Целью данной работы является исследование деформационно-прочностных характеристик тонких кольцевых образцов при высокоскоростном нагружении магнитно-импульсным методом. Были разработаны три схемы магнитно-импульсного метода, реализующие гармоническую нагрузку с периодами 5,5мкс и 1 мкс и импульсную нагрузку длительностью 100 нс. В результате проделанной работы стало возможным оценить деформационно-прочностные характеристики образцов в широком диапазоне скоростей деформации.

§1. Квазистатическая схема нагружения. Расчет силы Ампера

Модификация магнитно-импульсного метода нагружения металлических колец была реализована [21] на базе генератора коротких высоковольтных импульсов ГКВИ-300, обеспечивающего формирование электрических напряжений с амплитудой (10-300) кВ.

Электрическая блок-схема установки приведена на рис.1.

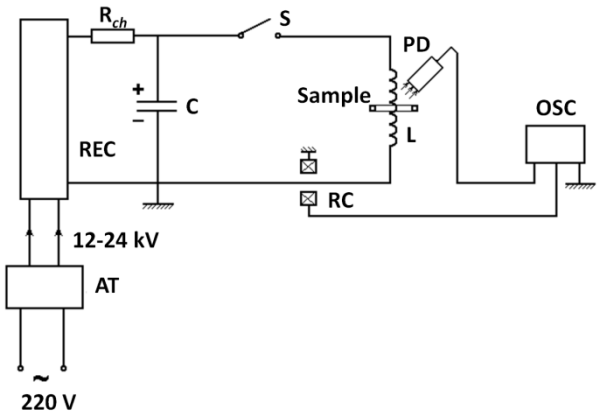


Рис.1. Блок-схема установки при воздействии синусоидальной электромагнитной нагрузки с периодом 5.5 мкс. *AT* – автотрансформатор; *REC* – выпрямитель; R_{ch} – зарядное сопротивление; *C* – конденсатор; *S* – разрядник; *RC* – пояс Роговского; *L* – катушка (соленоид без сердечника); Sample - образец (металлическое кольцо); *PD* – фотодиод; *OSC* - осциллограф.

При испытании кольцевых образцов с периодом синусоидального тока T=5,5 мкс (рис. 1) заряд конденсатора (C) осуществлялся от выпрямительного устройства (*REC*) с регулируемым напряжением от 12 до 24 кВ. Далее производился разряд конденсатора (C) через катушку (L) с помощью высоковольтного разрядника (S).

Образец представляет собой тонкое круглое кольцо радиуса R_0 с поперечными размерами c и h, малыми по отношению к радиусу. Это кольцо помещается снаружи соленоида, состоящего из n витков, без сердечника

Когда по соленоиду протекает ток I_1, в образце возникает индуцированный ток I_2 (рис.2). Взаимодействие токов порождает силу отталкивания (силу

Ампера) между соленоидом и кольцом. Под действием этой силы кольцо радиально расширяется. Ток в цепи генерируется разрядкой конденсатора С.

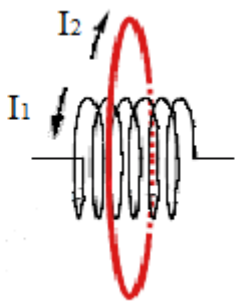


Рис.2. Схема токов.

Ток в кольце I_1 измеряется поясом Роговского, согласно схеме на рис.1.

Расчет сил, действующих на кольцо, производился по схеме, описанной в работе [22] и приведенной на рис. 3.

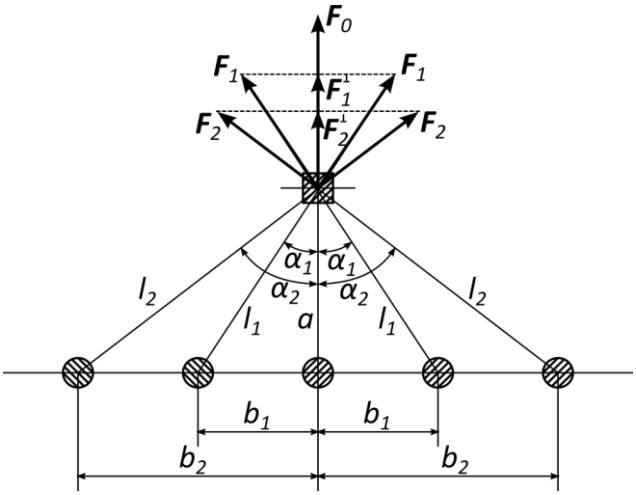


Рис. 3. Схема расчета силы, действующей на кольцо. F_i и l_i– сила и расстояние между i-м витком катушки и кольцом; a – кратчайшее расстояние от катушки до кольца; α_i – угол между l_i и a; b_i – расстояние между центральным и i-м витками катушки.

Общая сила, действующая на кольцо, складывается из основной силы от витка катушки, расположенного в плоскости кольца соосно с ним, и от четырех боковых витков:

$$F(t) = F_0(t) + 2F_1^{\perp}(t) + 2F_2^{\perp}(t), \tag{1}$$

$$F_0(t) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I_1(t)I_2(t)}{a}, \tag{2}$$

$$F_1^{\perp}(t) = F_1(t)cos\alpha_1 = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I_1(t)I_2(t)}{l_1}cos\alpha_1, \quad (3)$$

$$F_2^{\perp}(t) = F_2(t)cos\alpha_2 = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I_1(t)I_2(t)}{l_2}cos\alpha_2. \quad (4)$$

Здесь μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Сила Ампера $F(t)$, действующая на внутреннюю поверхность кольца, приводит к его деформированию.

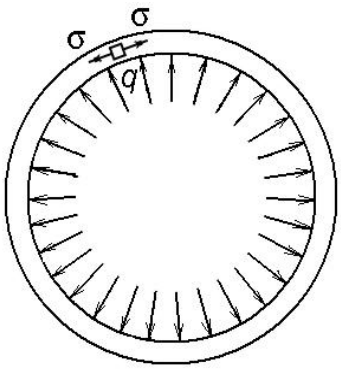


Рис.4. Схема нагружения кольца. q – давление на внутренней поверхности кольца; σ – окружное напряжение кольца.

Распределенную нагрузку, действующую на внутреннюю поверхность кольца (рис.4), можно записать в виде:

$$q(t) = \frac{F(t)}{\text{c}}, \quad (5)$$

где c – ширина кольца.

§2. Динамические схемы нагружения. Уравнение движения тонкого кольца

Динамические схемы нагружения. Для перехода к нагружению с большей частотой был разработан метод, основанный на работе формирующей линии FL с распределёнными параметрами емкости и индуктивности (рис.5).

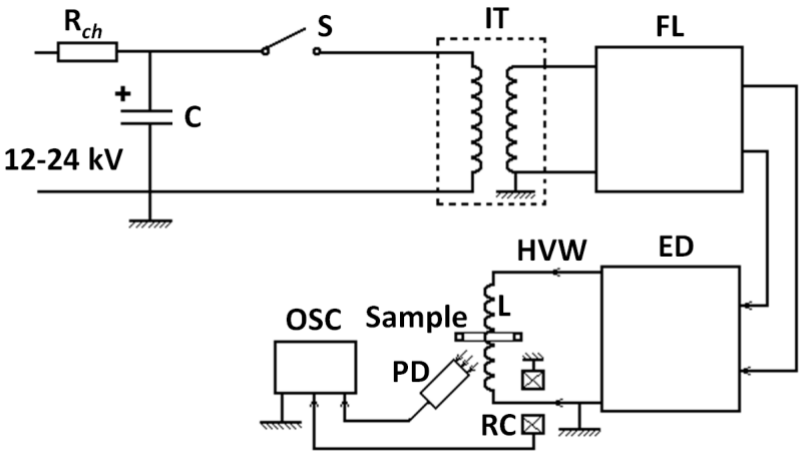


Рис.5. Блок-схема установки при воздействии синусоидальной электромагнитной нагрузки с периодом 1 мкс. R_{ch} – зарядное сопротивление; *C* – конденсатор; *S* – разрядник; *RC* – пояс Роговского; *L* – катушка (соленоид без сердечника); Sample - образец (металлическое кольцо); *PD* – фотодиод; *OSC* – осциллограф, *PT* – импульсный трансформатор; *FL* – формирующая линия; *OD* – выходное устройство; *HVE* – высоковольтный электрод.

Благодаря схеме, представленной на рис.5, напряжение гармонического сигнала в контуре удалось увеличить в 10 раз по сравнению со схемой нагружения с периодом *T*=5,5 мкс (рис.1) за счет импульсного трансформатора (IT) и формирующей линии (FL). Это напряжение через входное устройство (ED) передается на катушку (L), но в этом случае период колебаний тока в ней *T*=1мкс.

Разработанная нами схема нагружения кольцевых образцов [23], представленная на рис. 6, позволила перейти к кратковременному импульсному воздействию с длительностью порядка 100 нс.

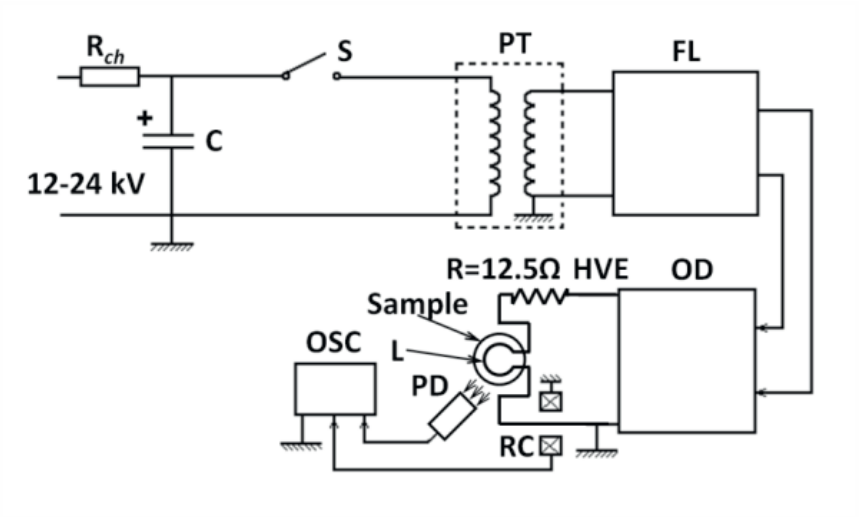


Рис.6. Блок-схема установки при воздействии импульсной нагрузки с длительностью ~100 нс. R_{ch} – зарядное сопротивление; *C* – конденсатор; *S* – разрядник; *RC* – пояс Роговского; *L* – катушка (соленоид без сердечника); Sample - образец (металлическое кольцо); *PD* – фотодиод; *OSC* – осциллограф, *PT* – импульсный трансформатор; *FL* – формирующая линия; *OD* – выходное устройство; R – сопротивление; *HVE* – высоковольтный электрод.

В представленой схеме катушка индуктивности (L) состоит из одного витка, а последовательно с ней в цепь включено сопротивление (R), благодаря которому в системе связанных контуров катушка-кольцо реализуется апериодических режим колебаний. Тем самым тот в кольце формируется в виде остроугольно импульса с длительностью на половине амплитуды τ=80нс.

Уравнение движения тонкого кольца. Запишем уравнение энергетического баланса при деформировании кольца в приращениях:

$$dK + d\Pi = dW, \tag{6}$$

где dK – приращение кинетической энергии; $d\Pi$ – приращение внутренней энергии; dW – работа внешних сил.

$$dK = d\left(2\pi Rhc\rho\frac{\dot{R}^2}{2}\right) = \pi hc\rho\left(\dot{R}^2 dR + 2R\dot{R}\ddot{R}dt\right), \tag{7}$$

где R – радиус кольца; h - толщина кольца; c – ширина кольца; ρ – плотность материала кольца.

Приращение внутренней энергии или изменение энергии, связанное с изменением деформированного состояния $\delta(\Delta W)$, можно представить уравнением:

$$d\Pi = \delta(\Delta W) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\sigma_{ik}\delta\xi_k)\Delta V = \left(\frac{\partial\sigma_{ik}}{\partial x_i}\delta\xi_k + \frac{\partial(\delta\xi_k)}{\partial x_i}\sigma_{ik}\right)\Delta V. \quad (8)$$

Если на элемент объема не действуют внешние силы f_k, то $\partial\sigma_i/\partial x_i = 0$. В противном случае первое слагаемое данного уравнения представляет энергию, которую затрачивают внешние силы на конечное смещение $\delta\xi$. Если пренебречь влиянием внешних сил, то получим изменение энергии в виде:

$$d\Pi = \delta(\Delta W) = \sigma_{ik}\delta\left(\frac{\partial\xi_k}{\partial x_i}\right)\Delta V = \sigma_{ik}\delta(\varepsilon_{ik})\Delta V, \quad (9)$$

где σ_{ik} - элементы тензора напряжения; ε_{ik} - элементы тензора деформации.

Таким образом, можно записать:

$$d\Pi = 2\pi Rhc\sigma d\varepsilon = 2\pi hc\sigma dR, \quad (10)$$

$$dW = 2\pi Rcq\, dR, \quad (11)$$

где σ – окружное напряжение в кольце; ε – деформация кольца; q – давление на внутреннюю поверхность кольца.

Подставляя (7), (10) и (11) в соотношение баланса энергии (6), получим:

$$\rho\left(\frac{\dot{R}^2}{2R} + \ddot{R}\right) + \frac{\sigma}{R} = \frac{q}{h}. \quad (12)$$

В случае $\ddot{R} \gg \dot{R}^2/2R$ уравнение движения тонкого кольца (12), будет:

$$\rho\frac{d^2R}{dt^2} + \frac{\sigma}{R} = \frac{q(t)}{h}. \quad (13)$$

Связь между напряжением и деформацией кольца определяется законом Гука:

$$\sigma = E\frac{R - R_0}{R_0}, \quad (14)$$

где E - модуль Юнга; R_0 - начальный радиус кольца.

Из (14) получаем:

$$R = \frac{R_0}{E}\sigma + R_0, \quad (15)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R_0}{E}\frac{d\sigma}{dt}, \quad (16)$$

$$\frac{d^2R}{dt^2} = \frac{R_0}{E}\frac{d^2\sigma}{dt^2}. \tag{17}$$

С учетом (15), (16) и (17) из уравнения движения (13) можно получить:

$$\frac{d^2\sigma}{dt^2} + \omega^2\sigma = \omega^2 R_0 \frac{q(t)}{h}, \tag{18}$$

где $\omega = 1/R_0\sqrt{E/\rho}$ – частота собственных колебаний кольца.

Решение уравнения (18) имеет вид:

$$\sigma(t) = \dot{\sigma}\,|_{t=0} \cdot \frac{1}{\omega} Sin\,\omega t + \omega \frac{R_0}{h}\int_0^t q(\tau)\,Sin\,\omega(t-\tau)d\tau\,, \tag{19}$$

где $\dot{\sigma}\,|_{t=0}$ находится из эксперимента.

§3 Экспериментальные методы измерения радиального давления в кольце, тока в катушке и кольце. Измерение времени разрушения кольца

Экспериментальное измерение радиального давления q производилось с помощью пьезодатчика согласно схеме представленной на рис. 7.

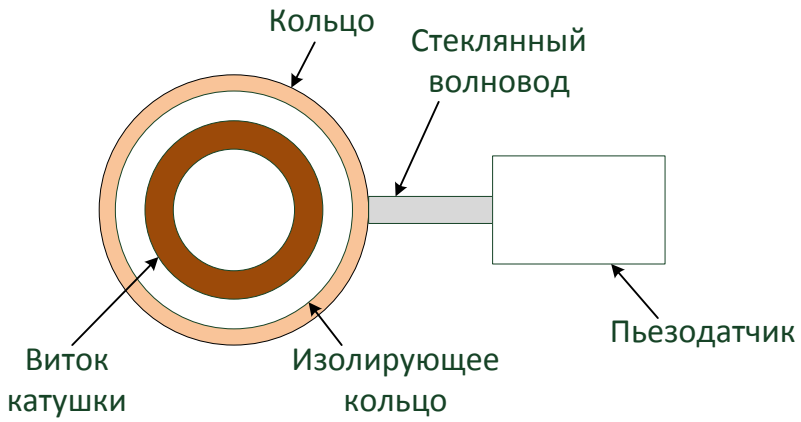


Рис.7. Схема измерения давления.

Для измерения тока в кольце были разработаны и реализованы два метода. Первый метод осуществлялся по схеме, представленной на рис. 8.

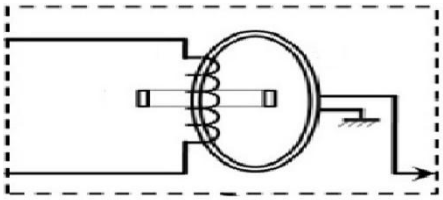


Рис.8. Схема измерения тока катушки и кольца.

Пояс Роговского проходит внутри катушки с соосно надетым на нее кольцом или без него. Измерялось напряжение с пояса Роговского $U_{ПР}$ при охвате 5-ти витков катушки без кольца:

$$U_{\text{пр1}} = k_1 B_1 = k_1 k_2 \left(5 I_{\text{катушки}}\right), \tag{16}$$

где B_1 индукция магнитного поля катушки без кольца; k_1, k_2 – тарировочные постоянные пояса Роговского; $I_{\text{катушки}}$ - ток в катушке.

Затем измерялось напряжение с пояса Роговского при охвате 5-ти витков катушки с кольцом:

$$U_{\text{пр2}} = k_1 B = k_1(B_1 - B_2) = k_1 k_2 \left(5I_{\text{катушки}} - I_{\text{кольца}}\right), \tag{17}$$

где B_2 индукция магнитного поля кольца.

По разности напряжений $U_{ПР1}$ и $U_{ПР2}$ определялся ток в кольце:

$$I_{\text{кольца}} = \frac{U_{\text{пр1}} - U_{\text{пр2}}}{k_1 k_2} \quad . \tag{18}$$

Второй метод заключается в непосредственном измерении поясом Роговского тока в кольце (рис. 9).

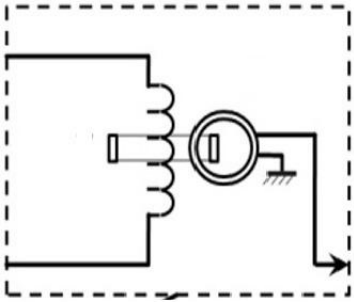


Рис.9. Схема измерения тока в кольце.

В момент разрушения кольца возникает искра, которая фиксируется фотодиодом PD (рис.1,5,6). Тем самым определяется время от начала процесса до разрушения образца.

На рис. 10 приведены осциллограммы тока через катушку (1) и сигнал с фотодиода (2), фиксирующего момент разрыва образца.

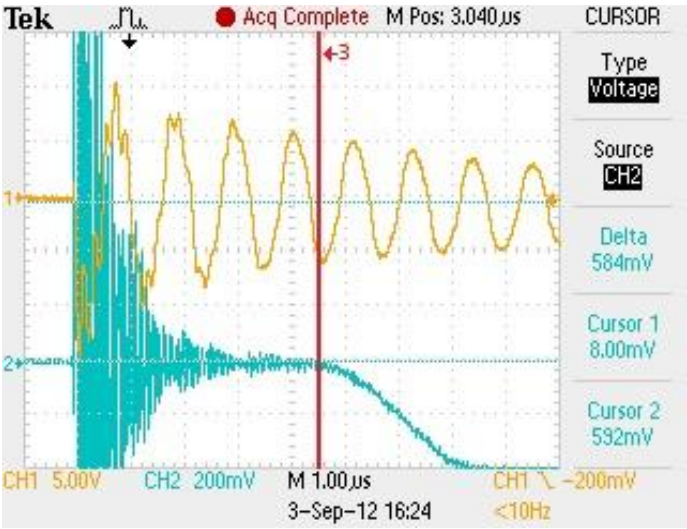


Рис.10. Схема измерения времени разрушения образца. 1-ток, протекающий по виткам катушки, 2-сигнал с фотодиода, 3- время разрушения.

§4 . Система уравнений, описывающих электромагнитные колебания в связанных контурах, и ее решение

Представленное на рис. 1 устройство можно рассмотреть, как два индуктивно связанных контура (рис. 11)

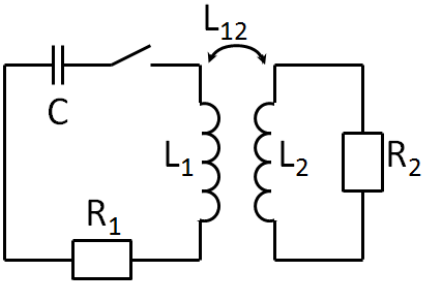


Рис.11. Эквивалентная электрическая схема.

Такая система описывается уравнениями:

$$U_c + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 + L_{12} \frac{di_2}{dt} = 0, \tag{19}$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2 + L_{21} \frac{di_1}{dt} = 0, \tag{20}$$

где U_c - напряжение заряженного конденсатора; L_1 и L_2 - индуктивности контура катушки и кольца; R_1 и R_2 - сопротивление контура катушки и кольца; $L_{12} = L_{21}$ - взаимная индукция; i_1 и i_2 - токи в контуре и кольце.

Проведенный расчет коэффициента взаимной индукции L_{12} и индуктивности катушки L_1 показал, что $L_{12} << L_1$. С учетом этого уравнение (19) принимает вид

$$U_c + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 = 0. \tag{21}$$

Его решение:

$$i_1 = i_{10} e^{-pt} \sin(\omega t + \alpha), \tag{22}$$

где $i_{10} = U_c/(L_1\omega)$; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - p^2}$ $(\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C}; p = R_1/(2L_1))$.

Из начальных условий следует, что $\alpha = 0$.

Решением уравнения (20) будет:

$$i_2 = Ae^{-pt}\sin\omega t + Be^{-pt}\cos\omega t, \tag{23}$$

где $A = i_{10}L_{12}(-L_2(p^2+\omega^2)+R_2p)/((R_2-L_2p^2)^2+\omega^2L_2^2)$;

а $B = -i_{10}L_{12}(R_2\omega)/((R_2-L_2p^2)^2+\omega^2L_2^2)$.

§5. Результаты экспериментальных и расчетных данных.

Экспериментальные исследования были проведены на базе генератора высоковольтных импульсов, обеспечивающего формирование электрических напряжений с амплитудами 10 – 300 кВ.

Рассматривались гармонические нагружения с периодами тока T=5,5 мкс и T=1мкс, а также импульсное нагружение длительностью ~100нс. Они реализовывались в кольце, коаксиально закрепленном на середине катушки, по которой пропускался электрический ток от зарядного устройства.

Эксперименты проводились на кольцах из алюминиевых и медных фольг толщиной 0,015мм и шириной 0,8 – 5,0 мм.

На рис. 12 приведены графики зависимости тока в кольце, измеренного двумя способами (см. §3) для колец из меди и алюминия разной ширины, в зависимости от напряжения заряда конденсатора для T=5,5мкс.

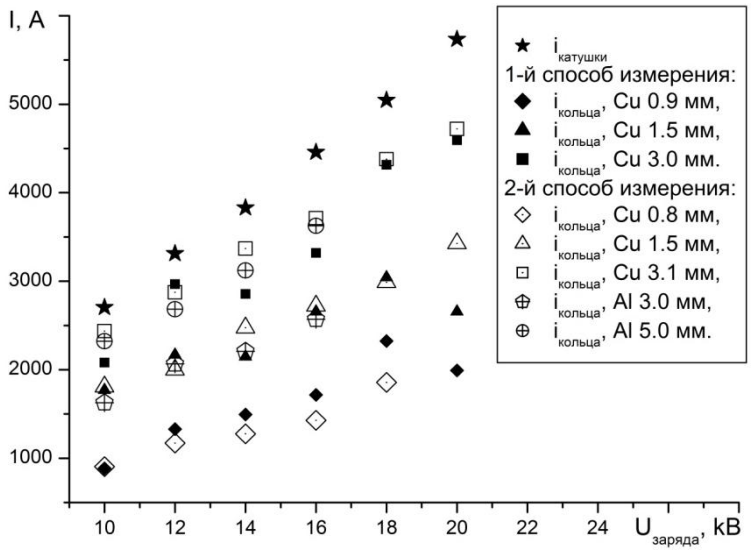


Рис. 12. Зависимость тока в кольце от напряжения заряда конденсатора.

Приведенные графики показывают, во-первых, линейную зависимость, во-вторых, по мере увеличения ширины кольца ток в нем возрастает, приближаясь к току в катушке. Данное обстоятельство можно объяснить уменьшением сопротивления кольца.

На рис. 13 проиллюстрированы осциллограммы токов в катушке и в кольце, измеренные экспериментально и рассчитанные по выражению (23), в качестве примера для медного кольца шириной 1,5 мм. Подобные осциллограммы были получены для колец из меди шириной 0,8 и 3 мм, а также алюминиевых колец шириной 3 и 5 мм.

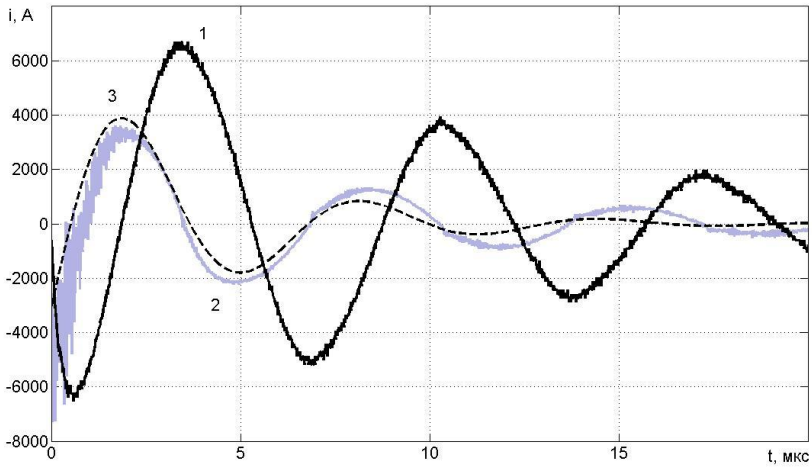
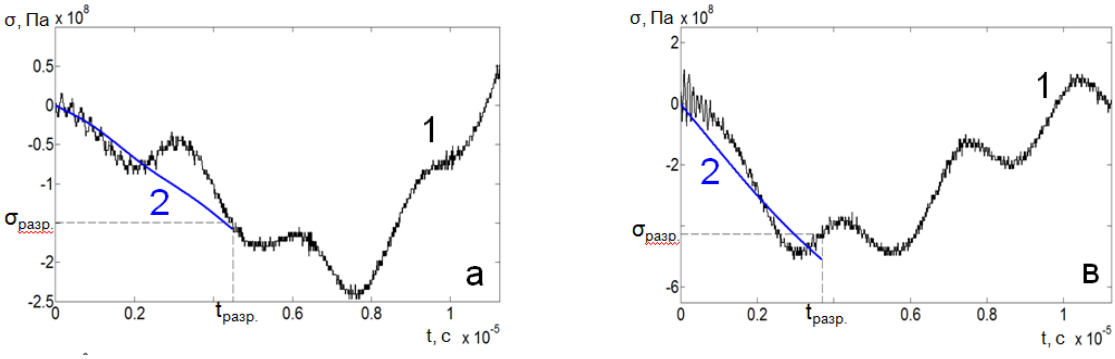


Рис. 13. Осциллограммы токов в катушке (1) и кольце: (2) – эксперимент, (3) – расчет.

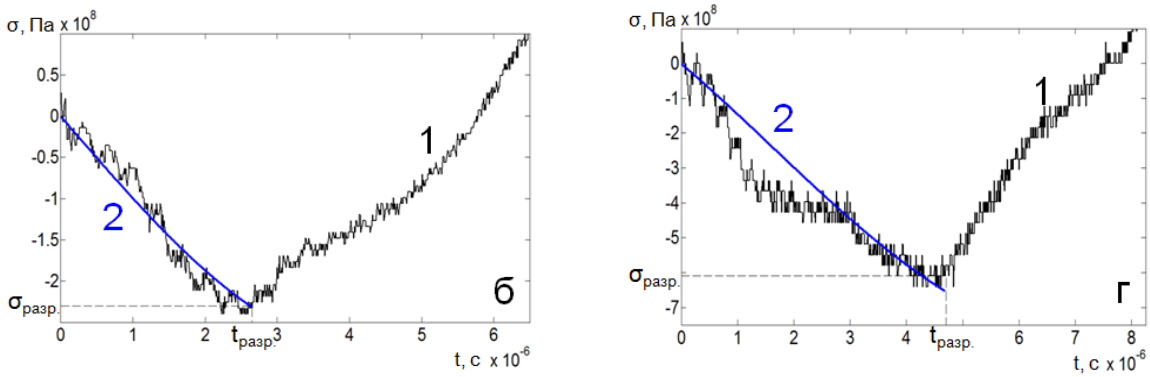
С помощью разработанного нами пьезодатчика проводились измерения радиального давления в кольце $q(t)$. На рис. 14 приведены экспериментально измеренные и рассчитанные по формуле (19) до времени разрушения профили давления для алюминиевых и медных колец при периоде тока в катушке T=5,5 мкс. Эти данные соответствуют схеме нагружения, приведенной на рис. 1. На рис. 14 еще просматриваются колебания давления, но они уже существенно сглажены за счет инерции кольца.



а б

Рис. 14. Экспериментальный (1) и расчетный (2) профили давления при периоде тока в катушке T=5,5 мкс. для образца из алюминия (а), образца из меди (б).

$\sigma_{разр}$, $t_{разр}$ – напряжение и время разрушения, соответственно.



а б

Рис. 15. Экспериментальный (1) и расчетный (2) профили давления при периоде тока в катушке T=1 мкс для образца из алюминия (а), образца из меди (б).

$\sigma_{разр}$, $t_{разр}$ – напряжение и время разрушения, соответственно.

Практически незаметные колебания на профиле давления иллюстрируются на рис. 15. Этот рисунок соответствует модернизированной схеме нагружения (рис. 5), где период тока в катушке T=1 мкс.

С помощью измеренных токов в катушке и кольце были определены $F(t)$ и $\sigma(t)$ для медных и алюминиевых колец различной ширины при разных значениях напряжения заряда конденсатора, тем самым приложенной энергии. В качестве иллюстрации на рис. 16 приведены графики зависимости силы, а на рис. 17 окружного напряжения, при разных энергиях заряженного конденсатора для медного кольца шириной 1,5 мм.

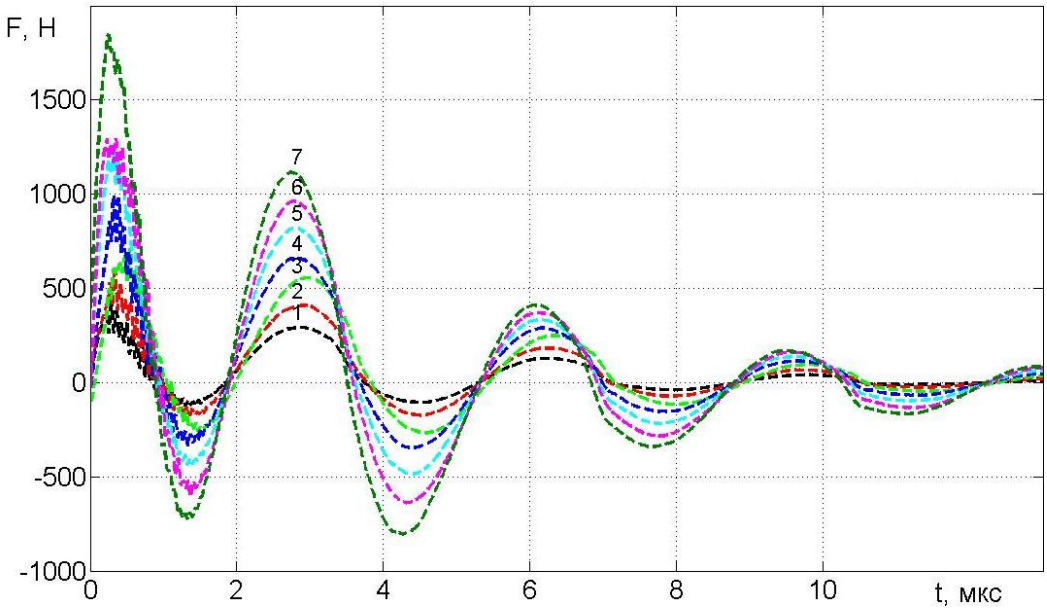


Рис.16 Графики зависимости силы $F(t)$ при разных энергиях заряженного конденсатора (1 – 25 Дж ,2 – 36 Дж, 3 – 49 Дж, 4 – 64 Дж, 5 – 81 Дж, 6 – 100 Дж, 7 – 121 Дж)

Для каждой из полученных сил были рассчитаны напряжения:

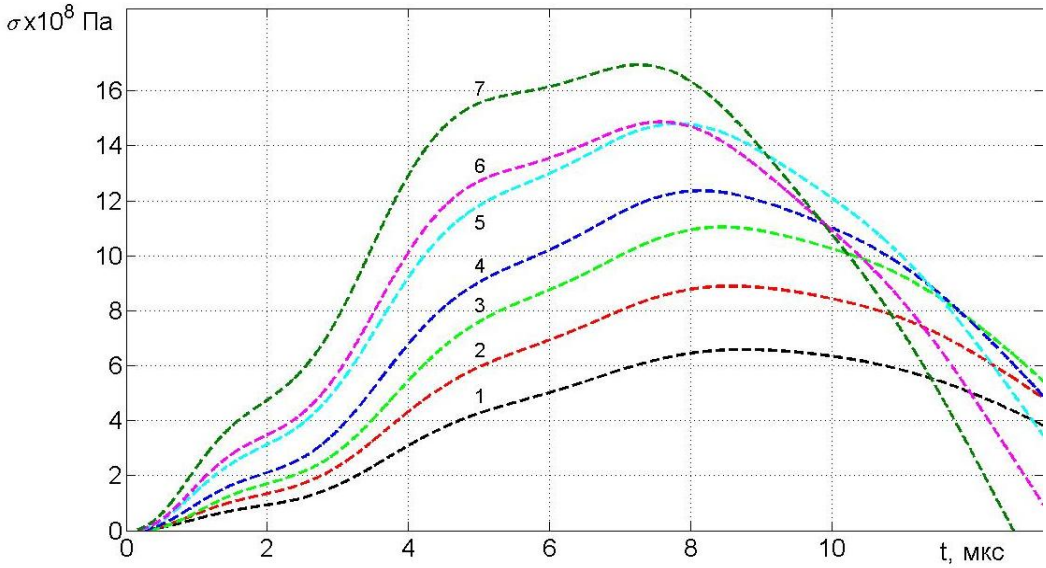


Рис.17 Графики зависимости окружного напряжениея $\sigma(t)$ при разных энергиях заряженного конденсатора 1 – 25 Дж, 2 – 36 Дж, 3 – 49 Дж, 4 – 64 Дж, 5 – 81 Дж, 6 – 100 Дж, 7 – 121 Дж).

С целью сравнения зависимостей $F(t)$ и $\sigma(t)$ для разных материалов (медь, алюминий) на рис. 18 приведены эти зависимости для одной энергии заряда конденсатора E = 49 Дж.

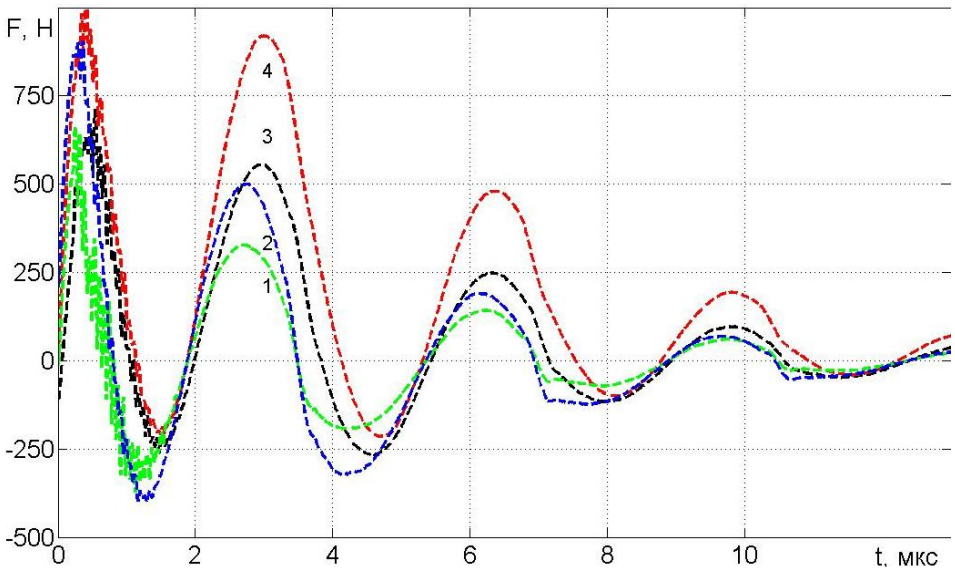


Рис. 18 Графики зависимости силы $F(t)$ для разных материалов (1 – Al шириной 3 мм, 2 – Al шириной 5 мм, 3 – Cu шириной 1,5 мм, 4 – Cu шириной 3,1 мм)

Для выбранных колец также были построены зависимости окружного напряжения от времени.

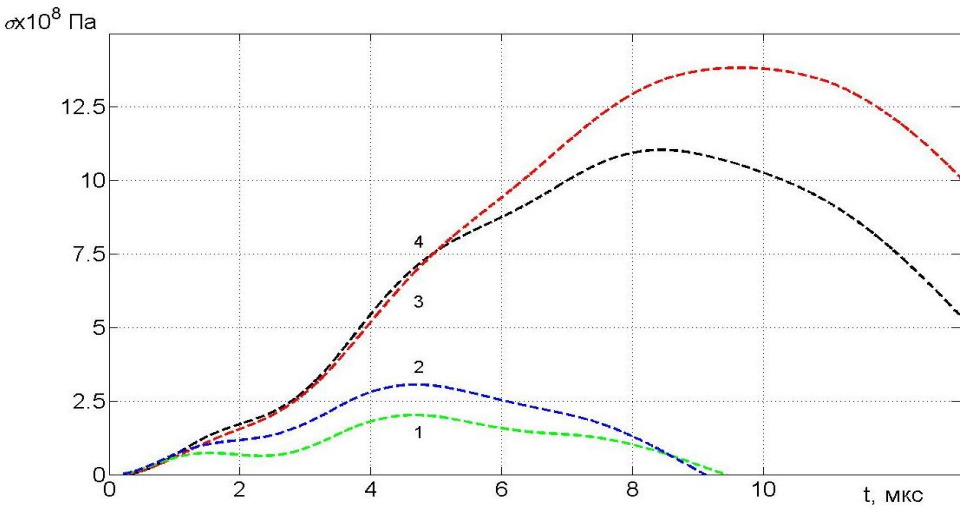


Рис. 18 Графики зависимости окружного напряжения $\sigma(t)$ для разных материалов (1 – Al шириной 3 мм, 2 – Al шириной 5 мм, 3 – Cu шириной 1,5 мм, 4 – Cu шириной 3,1 мм)

Графики зависимостей, приведенные на рис.18,19 показывают:

1) амплитуды силы F(t) и σ(t) растут с возрастанием энергии заряженного конденсатора;

2) с увеличением ширины кольца (как алюминиевого, так и медного) повышаются значения F(t) и σ(t);

3) для алюминиевых колец амплитуды силы и напряжения существенно меньше, чем для медных. Два последних вывода можно объяснить снижением сопротивления колец с увеличением их ширины и, следовательно, возрастанием тока в них.

Отметим, что при гармоническом воздействии разрушение кольцевых образцов происходило, как правило, на первых периодах тока в катушке, что соответствует известным литературным источникам [14]-[17].

На рис.19 изображены осциллограммы тока в кольце при импульсном нагружении длительностью порядка 100 нс, согласно схеме, представленной на рис.6.

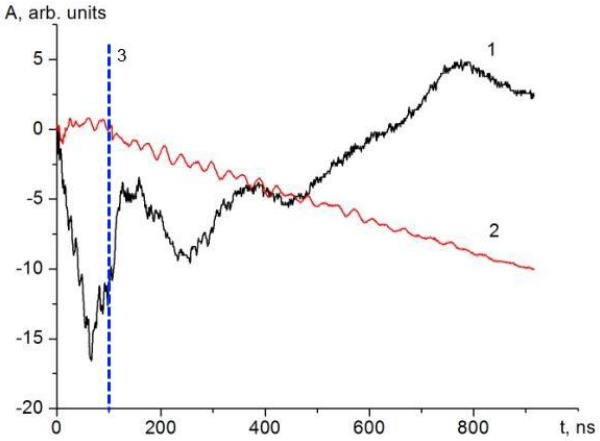


Рис. 19 Осциллограмма тока в кольце (1), сигнал с фотодиода (2), момент разрыва кольцевого образца (3).

При кратковременном импульсном нагружении (схема рис.6) важно отметить, что разрушение колец происходит не только на фронте или вершине импульса, но и на его спаде, что иллюстрируется на рис.19. Последнее обстоятельство указывает на подготовительный (скрытый) период разрушения, что характерно для высокоскоростных импульсных воздействий.

По полученным профилям окружного напряжения $\sigma(t)$ (рис.14,15) на переднем фронте на интервале времени Δt определялось значение $\Delta\sigma$. Следуя закону Гука $\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon$ (E- модуль Юнга), на выбранном интервале Δt определялась скорость деформации:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} = \frac{1}{E}\frac{\Delta\sigma}{\Delta t}, \tag{24}$$

Результаты измерений для трех схем нагружения находятся в интервале: для алюминиевых фольг $(0.78\cdot 10^4 - 10^7)c^{-1}$, для медных фольг $(0.57\cdot 10^4 - 10^7)c^{-1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан и апробирован магнитно-импульсный метод разрушения и фоторегистрации момента разрушения кольцевых металлических образцов при более коротких временах нагружения по сравнению с известными.

2. Представлены и проанализированы три схемы с различными временами нагружения кольцевых образцов из меди и алюминия в виде тонких лент.

3. Предложен метод определения радиальной силы, радиального давления и растягивающего напряжения при разрыве кольца.

4. Измерены профили радиального давления в кольцевых образцах, по которым определяется окружное растягивающее напряжение.

5. Показано, что инерция кольца при высоких скоростях деформации существенно сглаживает осцилляционные напряжения в кольце.

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

7. Дан анализ уравнений, описывающих электромагнитные колебания в связанных контурах катушки и кольца, на основе которых выведено уравнение для определения тока в кольце.

8. Разработаны и реализованы два экспериментальных способа определения тока в кольце

9. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

10. Полученные данные позволяют оценить деформационные и прочностные характеристики материалов в широком диапазоне изменения энергетических параметров и скорости деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Niordson F.I.* A Unit for Testing Materials at High Strain Rates // Experimental Mechanics. 1965. 5 (1). Pp. 29–32.
2. *Grady D.E., Benson D.A.* Fragmentation of metal rings by electromagnetic loading - fragmentation studies on rapidly expanding metal rings are performed with electromagnetic loading. dynamic-fracture strain and fragment-size measurements are reported for aluminum and copper // Experimental Mechanics. 1983. 23(4). Pp. 393-400.
3. *Carden A.E., Williams P.E., Karpp R.R.* Comparison of the Flow Curves of 6061 Aluminum Alloy at High and Low Strain Rates // Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals. Ed. by M.A. Meyers, L.E. Murr. NY–London: Plenum Press. 1981. Vol. 1. Pp. 37-50.
4. *Murr L.E.* Residual Microstructure - Mechanical Property Relationships in Shock-Loaded Metals and Alloys // Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals. Ed. by M.A. Meyers, L.E. Murr. NY–London: Plenum Press. 1981 Vol. 3. Pp. 607-673.
5. *Wright R.N., Mikkola d.E.* LaRouche S. Short Duration Shock Pulses as a Tool to Study the Time Dependence of Plastic Deformation // Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals. Ed. by M.A. Meyers, L.E. Murr. NY–London: Plenum Press. 1981 Vol. 3. Pp. 703-716.
6. *Follansbee P.S., Kocks U.F.* A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable // Acta Metallurgica. 1988. 36(1). Pp. 81-93.
7. *Gourdin W.H.* Analysis and assessment of electromagnetic ring expansion as a high-strain-rate test // Journal of Applied Physics. 1989. 65(2). Pp. 411-422.

8. *Gourdin W.H., Weinland S.L., Boling R.M.* Development of the electromagnetically launched expanding ring as a high-strain-rate test technique // Rev Sci Instrum. 1989. 60(3). 427-432.
9. *Степанов Г.В.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. Киев: Наук.думка. 1991. 288 с.
10. *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.
11. *Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров А.Ю.* Распространение трещины при динамическом разрушении полиметилметакристалата // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 52.
12. *Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров А.Ю., Уткин А.А., Федоровский Г.Д.* Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 12.С. 54-58.
13. *Mott N.F.* Fragmentation of shell cases // Proc Roy Soc Lond. 1947. Series A 189:300–308.
14. *Zhang O.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. Pp. 183-217.
15. *Zhang O.H., Ravi-Chandar K.* On the dynamics of necking and fragmentation—II. Effect of material properties, geometrical constraints and absolute size // Int. J. Fract. 2008. Vol. 150. Pp. 3-36.
16. *Zhang O.H., Liechti K.M., Ravi-Chandar K.* On the dynamics of localization and fragmentation—III. Effect of cladding with a polymer // Int. J. Fract.2009. Vol. 155. Pp. 101-118.
17. *Zhang O.H., Pavi-Chandar K.* On the dynamics of localization and fragmentation-IV. Expansion of Al 6061-O tubes // Int. J. Fract. 2010. Vol. 163. Pp. 41-65.

18. *Imbert J., Worswick M.J.* Reduction of a pre-formed radius in aluminium sheet using electromagnetic and conventional forming // J. Mat. Proc. Tech. 2012. 212-9. Pp. 1963-1972.
19. *Imbert J., Rahmaan T., Worswick M.* Interrupted pulse electromagnetic expanding ring test for sheet metal // EPJ Web of Conferences. 2015. 94 p.
20. *Lovinger Z., Nemirovsky R., Avriel E., Dorogoy A., Ashuach Y., Rittel D.* Investigating strength of materials at very high strain rates using magnetically driven expanding cylinders // EPJ Web of Conferences. 2015. 94 p.
21. *Morozov V.A., Petrov Yu.V., Lukin A.A., Kats V.M., Atroshenko S.A., Fedorovskii G.D., Gribanov D.A., Zaichenko O.K.* Fracture of Metallic Ring Samples under static and dynamic loading // 13th International Conference on Fracture (ICF13). 2013. Beijing, China, ICF13 Proceedings, Physical Aspects (S17-043).
22. *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. 2014. СПб. С. 155-157.
23. *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 UniversitySt. Petersburg; Russian Federation. 2015 Article number 7106734, 2015.