

05;12

Магнитно-импульсная методика тестирования материалов при импульсном нагружении

© С.И. Кривошеев

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ksi@SK3153.spb.edu

(Поступило в Редакцию 26 мая 2004 г.)

Обоснована и разработана методика создания импульсов механического давления магнитно-импульсным способом. Проведено тестирование полиметилметакрилата (ПММА) и габродиабаза в различных схемах нагружения с использованием магнитно-импульсного способа создания нагрузок. Показана целесообразность использования для анализа экспериментальных данных структурно-временного подхода.

Разрушение материала — сложный процесс, происходящий на различных масштабных уровнях, что подтверждают многочисленные данные фрактографического и рентгеноструктурного анализа материала, подвергнутого разрушающим нагрузкам. Традиционно в статике для определения разрушающих нагрузок используются статическая прочность и трещиностойкость (коэффициент интенсивности) материала. При динамическом нагружении появляется еще одна характерная координата — время, которая делает описание процесса разрушения более сложным, так как требуется описание процесса разрушения не только на различных масштабных уровнях, но и их развитие во времени. В ряде работ показано, что традиционно используемые для описания разрушения скоростные зависимости прочности и трещиностойкости являются не только характеристикой материала, но и функцией реализованной схемы нагружения [1], что делает их использование для описания поведения материалов в других ситуациях необоснованным.

Процесс разрушения при динамическом нагружении может быть описан с использованием подхода, предложенного в [2]. В систему определяющих параметров наряду с прочностью и трещиностойкостью материала в статике вводится параметр, характеризующий развитие процесса при динамическом нагружении — инкубационное (структурное) время разрушения. Это время есть характерный для каждого материала временной интервал, в течение которого происходят рост поврежденности до критического уровня при пороговых нагрузках. В разных материалах могут проявляться различные физические процессы, предваряющие разрушение на макроуровне. Например, это может быть выход дислокаций на границу зерен (для металлов), разворот молекулярных глобул, образование пор и т.д. Так же как и в статических испытаниях, тестирование материала в динамике сводится к определению пороговых разрушающих на макроуровне образец нагрузок при известных параметрах импульса нагружения.

Обоснование методики магнитно-импульсного нагружения

Определяющим в изучении процесса разрушения материала при импульсном нагружении является знание параметров импульса давления, действующего на образец, и использование таких схем нагружения, напряженно-деформированное состояние может быть определено из решения соответствующих задач механики сплошной среды.

Существующие методы определения импульса давления в твердом теле по существу делятся на две группы. К первой можно отнести методы, основанные на определении параметров импульса нагружения по скорости движения свободной поверхности образца. Измерение скорости (или перемещения) свободной границы может производиться, например, лазерным интерферометром, с помощью емкостного или индукционного датчиков. К основным общим недостаткам методов этой группы можно отнести следующие: восстановление импульса давления по скорости движения свободной поверхности в предположении малых упругих возмущений в материале, реализуемых при нагружении (т.е. в акустическом приближении); необходимость использования специальных схем нагружения для определения напряженного состояния. Ко второй группе относятся методы с использованием датчиков давления, сигнал с которых определяется параметрами импульса давления, воздействующего на датчик. Сложная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) датчиков позволяет проводить достоверные измерения только в ограниченном временном и амплитудном диапазонах, поэтому для определения параметров импульса давления необходимо использовать набор датчиков, АЧХ которых позволяют проводить измерения на различных участках амплитудно-частотного спектра ожидаемого сигнала.

Изучение процесса разрушения может быть существенно упрощено, если для создания импульса нагрузки в образце использовать магнитно-импульсный способ.

Известно, что при протекании тока по токоведущим элементам, последние испытывают на себе действие механической силы, обусловленной взаимодействием протекающего по ним тока с создаваемым этим же током магнитным полем. В общем случае направление и распределение действующих сил определяются распределением тока по сечению токоведущих элементов и зависят от их геометрических размеров и взаимного расположения. При идеальной проводимости на единицу поверхности проводника действует направленная по нормали к ней сила (магнитное давление)

$$\bar{\mathbf{P}}_m = \frac{1}{2} [\bar{\mathbf{J}}, \bar{\mathbf{B}}], \quad (1)$$

где $\bar{\mathbf{J}}, \bar{\mathbf{B}}$ — поверхностная плотность тока и индукция магнитного поля в точке на поверхности.

Как показано в [3], для плоских параллельных шин толщиной s , зазор между которыми h существенно меньше их ширины b , с погрешностью порядка h/b можно пренебречь краевым эффектом и считать распределение тока, а следовательно и магнитного давления, однородным по ширине шин. При этом допущении мгновенное значение магнитного давления P_m определяется следующим образом:

$$P_m = \frac{1}{2} \frac{I}{b} B = \frac{1}{2} H \cdot \mu H = \frac{B^2}{2\mu}, \quad (2)$$

где B — индукция поля, для немагнитного материала $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м — магнитная постоянная.

Для снижения погрешности в определении величины передаваемого на образец импульса давления, обусловленной работой сжатия самих токоведущих шин, толщина последних минимизируется по интегралу тока

$$I_c = \int_0^{t_c} (I(t)/(s \cdot b))^2 dt, \quad (3)$$

где $I(t), t_c$ — ток и время его действия.

Предельное значение интеграла тока для меди, при котором последняя остается в твердой фазе, по данным [4], составляет $0.89 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4}$.

При определенном соотношении размеров можно обеспечить низкую индуктивность плоских шин, что является существенным для быстрого ввода энергии в магнитное поле системы.

Наиболее удобным и простым с точки зрения получения больших импульсных токов является прямой разряд конденсаторной батареи на малоиндуктивную нагрузку, например на систему плоских шин или одновитковый соленоид.

Форма импульса давления в выбранной конфигурации определяется формой тока, протекающего по плоским шинам. Переходной процесс в эквивалентной схеме генератора импульсных токов (рис. 1) при постоянной индуктивности описывается следующим уравнением:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{d(R \cdot I)}{dt} + \frac{1}{C} I = 0, \quad (4)$$

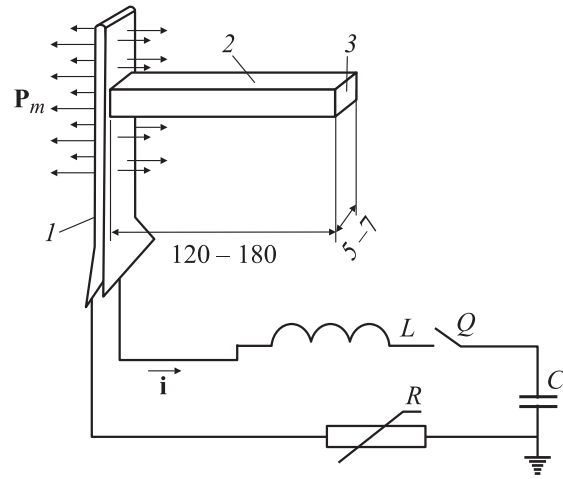


Рис. 1. Генератор импульсных токов и схема нагружения: 1 — нагрузочное устройство, 2 — исследуемый образец, 3 — зеркальная поверхность, L — индуктивность, C — емкость, R — нелинейное сопротивление.

которое решается при начальных условиях ($t = 0$) $I = 0$, $U = U_0$, $dI/dt = U_0/L$, где L, R и C — индуктивность, сопротивление и емкость соответственно; U_0 — зарядное напряжение на емкости; I — ток в контуре.

Введение в цепь протекания тока сопротивлений с нелинейными характеристиками сильно влияет на параметры импульса и позволяет сформировать, например, импульс тока униполярной формы. В технике сильных импульсных токов наиболее широко используются нелинейные сопротивления из вилита, тервита, окиси цинка [5–7].

В качестве источника импульсного тока в экспериментах использован специально разработанный генератор импульсных токов (ГИТ), обеспечивающий в индуктивной нагрузке 25 нГн формирование импульса тока с амплитудой до 1.2 МА и временем нарастания до максимума $1.5 \mu\text{s}$ [8]. Управление формой импульса осуществляется с помощью блока сопротивлений из вилитовых дисков диаметром 72 мм, высотой 16 мм. Используются предварительно откалиброванные сопротивления из одной партии, имеющие вольт-амперную характеристику вида

$$U_R = a_0 \cdot h_R \cdot \left| \frac{I}{S_R} \right|^\alpha \text{sign}(I), \quad (5)$$

где a_0 и α — параметры материала, h_R и S_R — соответственно высота и сечение сопротивления со следующими параметрами: $a_0 = 1100 [\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} (\text{A/s} \cdot \text{m}^2)^{-\alpha}]$ и $\alpha = 0.14 [\text{V} \cdot \text{A}^{-\alpha} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{2 \cdot \alpha - 1}]$.

С целью снижения индуктивности блока использовано 4 параллельно включенные ветви по 2 таблетки в каждой.

Интерферометрический тест

В случае равномерного токораспределения по шинам шириной b параметры импульса давления, действующего на них, однозначно связаны с параметрами импульса тока и определяется выражением (2).

Для проверки соответствия импульсу магнитного давления импульсу давления, передаваемого в образец, использован метод лазерной интерферометрии. На тестовый образец наносится отражающая поверхность путем вакуумного напыления алюминия. С противоположной стороны образца устанавливается грузочное устройство в виде плоских шин и осуществляется плотный его прижим к образцу. Для улучшения акустического контакта использовано касторовое масло. Размеры грузочного устройства обеспечивали формирование в образце плоской волны сжатия, а размеры образца исключали приход поверхностных волн в зону регистрации в течение всего процесса измерения.

Интерферометр собран по схеме Майкельсона и измеряет перемещение отражающей поверхности [9]. Использован двухконтурный вариант интерферометра. Регистрация сигнала производится на осциллографе TDS-457C.

Использование лазерной методики позволяет не только проконтролировать форму импульса нагружения, но и измерить скорость распространения продольной волны в материале. На рис. 2 приведены импульс тока и смещение свободной поверхности в образце для сферопластика, восстановленное по интерферограмме.

Известно, что в акустическом приближении можно считать скорость смещения границы равной удвоенной массовой скорости частиц в падающей волне [10]. Дифференцируя зависимость смещения свободной поверхности от времени, можно определить массовую скорость частиц и восстановить импульс давления, дошедший до свободной границы образца, воспользовавшись простым

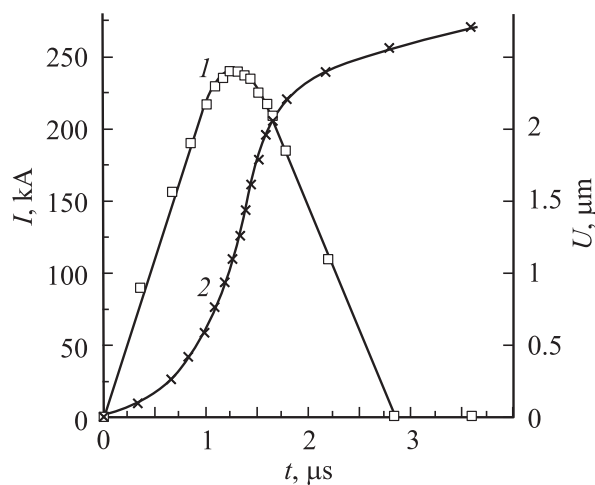


Рис. 2. Ток в нагрузке I (1) и смещение U (2) свободной поверхности образца (сферопластик).

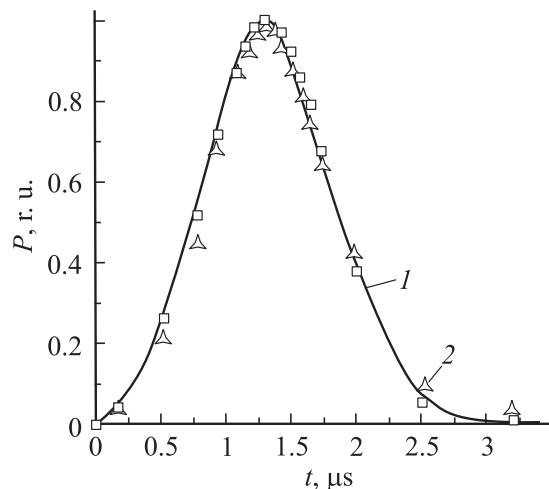


Рис. 3. Импульс магнитного давления (1) и импульс давления, восстановленный из измерений скорости свободной границы (2).

соотношением

$$P = \rho C_1 \cdot u/2, \quad (6)$$

где ρ_0 — плотность материала, C_1 — скорость звука в материале, u — скорость свободной поверхности.

На рис. 3 приведены импульсы магнитного давления, соответствующего току на рис. 2, и восстановленный описанным выше способом по приведенной на том же рисунке зависимости перемещения свободной поверхности от времени импульс механического давления. Проверка проводилась на образцах из ПММА и сферопластика. Расхождение в амплитудах импульсов составило 5–7%, что, возможно, связано с трудностью дифференцирования, определяемого по конечному числу точек из интерферограммы зависимости смещения свободной поверхности от времени при определении ее скорости затуханием волны в материале и погрешностью акустического приближения.

Экспериментальные методы определения пороговых разрушающих нагрузок

Очевидно, что процесс разрушения состоит из нескольких фаз: формирование напряженно-деформированного состояния, способного вызвать появление и рост поврежденности в материале, старт трещины и ее рост. Целесообразно проводить изучение процесса разрушения при минимальных разрушающих нагрузках. В этом случае исключается необходимость анализа распределения энергии, идущей на формирование условий старта и на продвижение трещины. При этом до старта трещины анализ напряженно-деформированного состояния возможен в рамках механики сплошной среды и линейной механики разрушения. При планировании

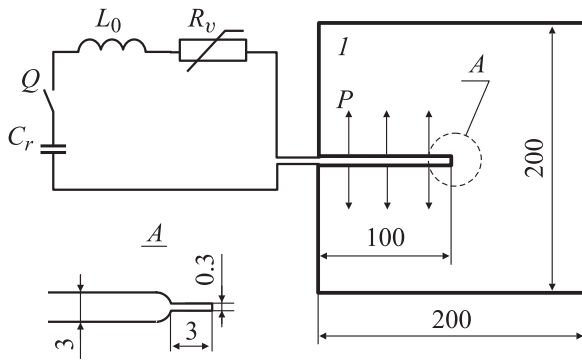


Рис. 4. Принципиальная схема установки и схема нагружения образца. C_r , L_0 — накопительная емкость и собственная индуктивность генератора импульсных токов; Q — высоковольтный коммутатор; R_v — нелинейное сопротивление; I — исследуемый образец. Размеры приведены в мм.

эксперимента целесообразно учитывать возможность определения напряженно-деформированного состояния образца на основе аналитического, что предпочтительнее, или численного анализа.

Магнитно-импульсный способ формирования нагрузки позволяет проводить эксперименты с использованием схем нагружения, в которых реализуются различные режимы нагружения материала [11].

а) Волновой режим нагружения в образцах с макродефектами типа трещин. Для исследования разрушения образцов с макродефектами типа трещин магнитно-импульсный способ формирования давления позволяет реализовать следующую схему (рис. 4). В плоском образце производится пропил шириной 2–3 мм, в вершине которого изготавливается паз длиной 2–3 мм и шириной 0.2 мм. В пропилю устанавливаются тонкие медные шины, ширина которых равна толщине образца, и обеспечивается их акустический контакт с берегами пропила. При протекании тока по шинам на берега пропила действует равномерно распределенное по всей длине пропила давление, равное магнитному. Определение пороговых разрушающих нагрузок может проводиться при различной длительности импульса. Результаты тестирования некоторых материалов приведены на рис. 5, 6. Пороговые разрушающие нагрузки P_{lr} определялись путем экстраполяции длины проросшей трещины L_{cr} в область $L_{cr} \rightarrow 0$.

б) Тестирование образцов с квазистатической стабилизацией волнового поля. Очевидно, что волновой характер напряженно-деформированного состояния не может формироваться в тех случаях, когда размеры образцов существенно меньше длины волны импульса нагрузки, т.е. если выполняется условие

$$c_1 \cdot T \gg D_u, \quad (7)$$

где c_1 — скорость распространения волны в материале, T — длительность импульса давления, D_u — характерный размер образца.

Поэтому использование в экспериментах образцов малых размеров, удовлетворяющих этому условию, позволяет производить испытания в условиях быстрого роста нагрузки без учета волнового характера процесса нагружения. В этом случае напряженно-деформированное состояние определяется из решения соответствующих статических задач.

Схема эксперимента с малыми образцами приведена на рис. 7. Образец сечением 5×6 мм, длиной 24 мм с разрезом глубиной 2 мм и шириной 0.2 мм в цен-

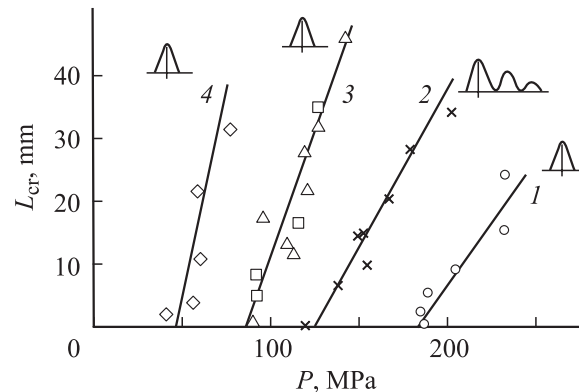


Рис. 5. Экспериментальные результаты по исследованию порога хрупкого разрушения оргстеклянных образцов толщиной 10 мм. Время нарастания до максимума: 1, 2 — 1.0; 3 — 2.0; 4 — 4.3 μ s. \square — данные, полученные на установке « ξ -2».

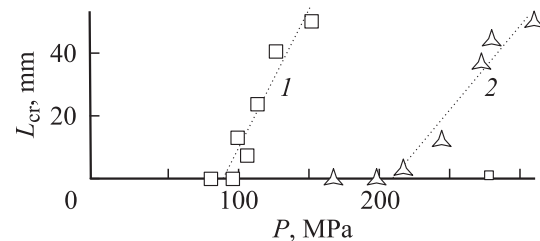


Рис. 6. Экспериментальные результаты по исследованию порога хрупкого разрушения образцов из габбродиорита 12 мм при нагружении одиночным импульсом различной длительности: 1 — 8.2, 2 — 3.6 μ s.

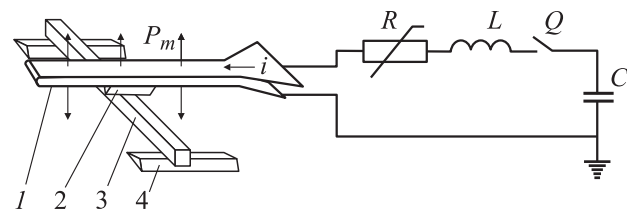


Рис. 7. Эквивалентная электрическая схема магнитно-импульсной установки и схема нагружения. P_m — магнитное давление, i — ток, C — емкость батареи, Q — коммутатор, R — формирующее витковое сопротивление, L — собственная индуктивность батареи. 1 — нагружающее устройство (медные шины), 2 — боек, 3 — испытуемый образец, 4 — неподвижные опоры.

тральной части образца устанавливается на жесткие опоры. Нагрузка на образец передается бойком, имеющим акустический контакт с тоководущими шинами. Магнитное давление, создаваемое при протекании тока, трансформируется в усилие, передаваемое на боек, пропорциональное площади контактной поверхности бойка и магнитному давлению. Это усилие передается бойком на образец. Таким образом реализуется динамическое нагружение по трехточечной схеме, напряженно-деформированное состояние образца в которой хорошо известно.

По описанной схеме определены пороговые разрушающие нагрузки для образцов из габродиабаз и ПММА, размеры которых удовлетворяют условию (8).

Статические испытания проведены на испытательных машинах Р-0.5 и РМУ-0.05. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

с) Волновой режим нагружения в бездефектных образцах. Для исследования разрушения бездефектных образцов традиционно используется откольная схема нагружения. Импульс сжатия создается на одном конце образца в результате взаимодействия последнего с ускоренным тем или иным способом бойком. После прохождения импульса сжатия по образцу он отражается от свободного торца и возвращается в образец в виде волны растяжения. Параметры импульса действующего давления восстанавливаются по скорости движения свободной поверхности образца и зависят от свойств материала бойка, его скорости и размеров.

В нашем случае в качестве загрузочного устройства использовались плоские шины различной ширины, конфигурация которых для определения параметров импульса давления позволяла использовать соотношение (2). Ударному нагружению подвергались образцы из габродиабаз и ПММА в виде стержней сечением $5 \times 6 \text{ mm}$ и длиной 180 mm . Шины приклеивались мономолекулярным клеем к отшлифованному торцу стержня и производился разряд ГИТ. Схема нагружения приведена на рис. 1. Амплитуда пороговой разрушающей нагрузки определялась путем увеличения нагрузки до разрушения образца. Каждый образец подвергался однократно нагружению.

Следует отметить, что данные эксперименты были ориентированы на определение динамической прочности разрушения на макроуровне. Определялось пороговое значение амплитуды импульса давления, ниже которого не происходило разрушения образца на две части, т.е.

Таблица 1. Экспериментальные данные по разрушению малых образцов

	Глубина разреза, mm	Длительность импульса, μs	Разрушающая сила N
ПММА	2.5 ± 0.1	Статика	68 ± 6
ПММА	2.5 ± 0.1	7.0	805 ± 40
Габро	2 ± 0.1	Статика	195 ± 6
Габро	2 ± 0.1	4.1	3920 ± 30

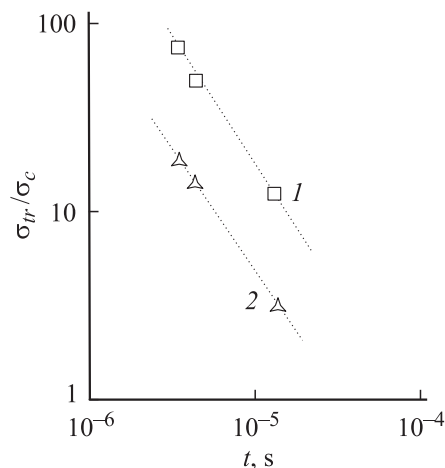


Рис. 8. Зависимость разрушающего напряжения от длительности импульса. σ_{tr}, σ_c — динамическая и статическая прочность. 1 — габродиабаз, 2 — ПММА.

фиксировался порог, соответствующий макроразрушению образца. Форма импульса тока определялась нелинейным сопротивлением и соответствовала первому полупериоду синусоиды. Зависимость амплитуды разрушающей нагрузки от длительности импульса воздействия приведена на рис. 8.

Структурно-временной подход к анализу экспериментов

Анализ экспериментальных данных сводится к определению напряженно-деформированного состояния образца и выбора соответствующего критерия разрушения. Наиболее удобным для описания экспериментов является структурно-временной критерий, в общем случае учитывающий пространственно-временные неоднородности поля напряжений в образце.

Структурно-временной критерий впервые был предложен в [2] и для общего случая имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{1}{d} \int_0^d \sigma(r, \theta, t') dr dt' \leq \sigma_c. \quad (8)$$

Здесь d и τ — структурный размер и структурное время разрушения; r, θ — полярные координаты; σ_c — статическая прочность материала; $\sigma(r, \theta, t)$ — растягивающее напряжение у вершины трещины ($r = 0$). Критерий (8) позволяет осуществить обобщение принципов линейной механики разрушения на динамику. Структурный размер d определяется по данным квазистатических испытаний образцов с трещинами и в случае плоского напряженного состояния может быть выражен через квазистатическую вязкость (критический коэффициент интенсивности) разрушения и прочность по простой формуле [1]: $d = 2K_{Ic}^2 / (\pi\sigma_c^2)$. В соответствии с данным

подходом σ_c , K_{1c} и τ образуют систему определяющих параметров, описывающих прочностные свойства материала. Введенный критерий позволяет с единой точки зрения исследовать динамическое разрушение как „бездефектных“ сред, так и сред с макродефектами типа трещин. Проведем анализ экспериментальных данных на основе решения соответствующих задач с использованием структурно-временного критерия.

а) В [12,13] показано, что условия эксперимента до момента прихода отраженных от границ образца волн соответствует следующей задаче. Бесконечная упругая плоскость, содержащая полубесконечный разрез $R^2 \setminus \{(x, y) : x \leq 0, y = 0\}$, подвергается ударному воздействию, приложенному к его берегам $\sigma_y = -p(t)$, $\sigma_{xy} = 0$, при начальном условии $U|_{t \leq 0} = 0$ и условии, обеспечивающем однозначность решения задачи $\forall t > 0 : U = \text{const} + O(r^\beta)$, $r \rightarrow 0$, $\beta > 0$. В экспериментах было реализовано импульсное нагружение $p(t) = P_m \cdot O(t)$ в виде униполярных импульсов.

Структурно-временной критерий для образцов с макродефектами типа трещин может быть преобразован к виду

$$\int_{t-\tau}^t K_1(s) ds \leq K_{1c} \tau, \quad (9)$$

где $K_1(t)$ — текущий коэффициент интенсивности, τ — структурное (инкубационное) время разрушения материала.

Из (9) следует, что минимальная разрушающая (пороговая) амплитуда импульса определяется по формуле

$$P = \tau K_{1c} / \varphi(c_1, c_2) \max \int_{t-\tau}^t f(s) ds, \quad (10)$$

где

$$\varphi(c_1, c_2) = 4c_2 \sqrt{c_1^2 - c_2^2} / (c_1 \sqrt{\pi c_1})$$

— функция скоростей продольных и сдвиговых волн,

$$f(t) = \int_0^t Q(s) f_0(t-s) ds, \quad f_0(t) = 1/2 \cdot t^{-1/2}$$

находится из решения динамической начально-краевой задачи.

Значения пороговых разрушающих нагрузок определяются из экспериментальных зависимостей. С использованием соотношения (10) может быть определено структурное время разрушения материала. Для ПММА это значение составило $32 \mu\text{s}$. Для габродиабаза структурное (инкубационное) время разрушения, определенное по (10), дает значения $\tau = 130 \mu\text{s}$. Это время существенно больше времени пробега волной нагрузки двойного расстояния от берегов трещины до границ образца $2 \cdot l/c_1$. Следовательно, к моменту разрушения напряженное состояние уже не соответствует условиям задачи в отличие от ПММА [12,13] и параметр τ ,

определенный по (10) для габродиабаза, не соответствует условиям эксперимента. Можно утверждать, что величина данного параметра для габродиабаза лежит в диапазоне $2l/c_1 < \tau \leq 130 \mu\text{s}$.

б) В данном виде испытаний нагрузка передавалась через ударник (стальную призму), находящийся в непосредственном контакте с исследуемым образцом и токоведущими шинами. К ударнику прикладывалось импульсное воздействие: $F(t) = P(t) \cdot s$ — сила, действующая на ударник, $P = P_m (\sin(\omega t))^2$ — давление токоведущих шин, действующее на площадь основания ударника s , длительностью t_1 .

В [14] показано, что инерционные свойства системы существенно влияют на параметры импульса нагрузки, действующей на образец. В линейно-упругом приближении усилие, переданное на образец, определяется из следующего соотношения:

$$G(t) = \begin{cases} \frac{A}{\omega^2 - \nu^2} \left(\omega^2 \sin^2 \frac{\omega t}{2} - \nu^2 \sin^2 \frac{\omega t}{2} \right) & \text{при } 0 \leq t \leq t_1, \\ \frac{A}{1 - (\nu/\omega)^2} \sin \frac{\nu t_1}{2} \sin \nu \left(t - \frac{t_1}{2} \right) & \text{при } t > t_1, \end{cases} \quad (11)$$

где $\nu = \sqrt{k/m}$ — собственная частота колебаний системы, m — масса ударника, k — жесткость балки, A — амплитуда.

Из (11) следует, что продолжительность и амплитуда импульса, действующего на образец, равны соответственно

$$t_2 = \frac{\pi}{\nu} + \frac{t_1}{2}, \quad G_{\max} = \frac{A}{1 - (\nu/\omega)^2} \sin \frac{\nu t_1}{2}. \quad (12)$$

Очевидно, что имеет место существенное влияние инерционных свойств элементов схемы нагружения (ударника) на параметры действующей на образец силы. Это проявляется в снижении амплитуды и увеличении длительности импульса. Так, импульс длительностью $12.7 \mu\text{s}$ трансформируется в импульс длительностью $217 \mu\text{s}$.

Так как в этом случае реализуется режим квазистатической стабилизации поля напряжений в образце, то коэффициент интенсивности пропорционален действующей на образец нагрузке и может быть определен следующим образом:

$$K_1(t) = \frac{K_{1c}}{G_c} G(t), \quad (13)$$

где G_c — усилие, разрушающая образец при статическом нагружении.

Структурное время разрушения определяется из соотношений (10), (11), (13).

с) Откольное нагружение позволяет осуществить импульсное растягивающее напряжение, создаваемое волной растяжения, возникающей в результате отражения от свободного торца образца волны сжатия. В такой ситуации ответственным за разрушение кроме характеристик материала являются амплитуда, форма и длительность импульса. Напряженное состояние в этих

Таблица 2. Некоторые характеристики габродиабаза и ПММА

Величина	ПММА	Габро
σ_c — статическая прочность, МПа	72	17.54
K_{Ic} — статическая трещиностойкость, МПа · \sqrt{m}	1.1	2.4
τ — структурное время разрушения, определенное из опытов а), μs	32 ± 3	130 ± 5
τ — структурное время разрушения, определенное из опытов б), μs	34 ± 5	77 ± 5
τ — структурное время разрушения, определенное из опытов в), μs	32 ± 3	72 ± 5
c_1 — скорость продольной волны, m/s	2350	5630
c_p — скорость стержневой волны, m/s	2130	5000
ρ_0 — плотность, kg/m^3	1180	2890

экспериментах наиболее простое для анализа, так как полностью определяется волной растяжения. Для разрушения образцов в этих условиях структурно-временной критерий преобразуется к виду

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(s, x) ds \leq \sigma_c, \quad (14)$$

где $\sigma(s, x)$ — напряжение в точке с координатой x в момент времени s , τ — структурное время разрушения, σ_c — прочность материала в статике.

При магнитно-импульсном способе формирования импульса нагрузки параметры последнего точно известны, что позволяет при известном пороговом значении амплитуды импульса определить структурное время материала.

В табл. 2 приведены некоторые физико-механические характеристики исследованных материалов, значения структурного времени разрушения, определенные по экспериментальным данным. Эксперименты по динамическому разрушению материалов проводилось в СПбГПУ на кафедре ИЭ и ТВН с использованием установки ГИТ-50/250 и в ЦКП „Динамика“ СПбГУ на установке ξ -2.

Выводы

Использование магнитно-импульсного способа нагружения позволяет существенно упростить процесс проведения экспериментов и с погрешностью, не превышающей 5%, определить параметры импульса давления, передаваемого в образец.

Однозначная связь параметров импульса давления с токораспределением в нагрузочном устройстве обосновывает возможность формирования требуемого распределения нагрузки в образцах различной конфигурации.

Проведенные эксперименты выявили пороговый характер разрушения и увеличение амплитуды разрушающих нагрузок с уменьшением их длительности.

Анализ экспериментальных данных с использованием структурно-временного подхода выявил практическое совпадение структурного времени разрушения, определенного из опытов с принципиально разными схемами нагружения, что обосновывает введение структурного времени разрушения в систему определяющих параметров материала.

Экспериментально определенные характеристики материала (статические прочность и трещиностойкость, структурное время разрушения и др.) и структурно-временной подход дают возможность прогнозирования поведения материалов в любых ситуациях импульсного нагружения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 02-01-01035, 03-01-39010) и конкурсного центра Минобразования (грант № E02-4.0-90)

Список литературы

- [1] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Проблемы динамики разрушения твердых тел. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. 132 с.
- [2] Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. // ДАН СССР. 1990. Т. 313. № 2. С. 276–279.
- [3] Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. М., Энергоатомиздат, 1992. 416 с.
- [4] Кнорфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.
- [5] Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Камельков В.С. и др. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. М.: Атомиздат, 1979.
- [6] Афанасьев А.И., Богатенков И.М., Фейзулаев Н.И. Аппараты для ограничения перенапряжений в высоковольтных цепях. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. 164 с.
- [7] Афанасьев А.И., Богатенков И.М. Высоковольтные испытания электрических аппаратов. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. 136 с.
- [8] Adamian Y.E., Krivosheev S.I., Vasilevsky V.M., Nenashev A.P. // Proc. 1st Intern. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials. Tomsk. 2000.
- [9] Иванов В.А., Привалов В.Е. Применение лазеров в приборах точной механики. СПб.: Политехника, 1993. 216 с.
- [10] Забабахин Е.И. Кумуляция и неустойчивость. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. 110 с.
- [11] Кривошеев С.И., Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Федоровский Г.Д., Шнеерсон Г.А. // Тр. Междунар. науч. конф. „Забабахинские научные чтения-98“. Снежинск: Федеральный ядерный центр, 1998.
- [12] Кривошеев С.И., Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Шнеерсон Г.А. // Изв. АН. 1999. № 5. С. 165–172.
- [13] Кривошеев С.И., Петров Ю.В. Препринт ИПМАН РАН. № 142. СПб., 1997.
- [14] Груздков А.А., Кривошеев С.И., Разов А.И., Петров А.А., Петров Ю.В., Федоровский Г.Д. // Структура и свойства перспективных металлов и сплавов. Тр. LX Междунар. семинара „Актуальные проблемы прочности“. Великий Новгород: НГУ, 2002.