

05:09;12

Исследование взаимосвязи параметров электромагнитного отклика из диэлектрических материалов с характеристиками ударного возбуждения

© Т.В. Фурса, А.В. Савельев, К.Ю. Осипов

Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия,
e-mail: osipov@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 20 марта 2003 г.)

Проведены исследования влияния энергии и длительности ударного возбуждения на параметры электромагнитного отклика из бетона. Показано, что изменение энергии и длительности ударного возбуждения приводит к трансформации спектральных характеристик электромагнитного отклика из бетона. Установлено, что длительность первого импульса электромагнитного отклика определяет длительность активного этапа ударного возбуждения. Показано, что энергия ударного возбуждения выше $5 \cdot 10^{-2}$ Дж приводит к возникновению необратимых остаточных деформаций в бетоне.

Известно, что при механическом возбуждении диэлектрических материалов наблюдается возникновение электромагнитного сигнала [1]. В работах [2,3] приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований основных закономерностей, источников и механизмов механоэлектрических преобразований в бетонах. Показано [4], что регистрируемый в процессе ударного возбуждения композиционных материалов электромагнитный отклик является суперпозицией двух составляющих: первая — электризация материала в точке удара и вторая — механоэлектрические преобразования на границе раздела матрицы и заполнителя. Как первая, так и вторая составляющие электромагнитного отклика должны зависеть от энергии и длительности ударного возбуждения. Исследованию влияния этих факторов и посвящена данная работа.

Исследования проводились следующим образом. По поверхности объекта испытания производилось ударное возбуждение с помощью стального шарика, бросаемого с определенной высоты. В качестве приемника использовался емкостной датчик. Регистрация электромагнитного отклика осуществлялась с помощью специального прибора, совмещенного с персональным компьютером, позволяющего производить оцифровку электромагнитного отклика с определенным шагом дискретизации. В качестве объектов испытания были использованы образцы цементного камня и тяжелого бетона.

Известно [3], что при ударе сферическим ударным элементом по плоскости при любом радиусе закругления коэффициент нелинейности (n) силовой характеристики $\alpha = bP^n$, где α — величина местного смятия, b — коэффициент податливости материала, близок к единице, поэтому с достаточной степенью достоверности для описания процессов ударного возбуждения можно воспользоваться уравнениями для линейной силовой характеристики.

Из теории удара [3] известно, что длительность активного этапа удара в случае линейной силовой характери-

стики определяется по формуле

$$\tau_a = \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{2E_0 b}}{V_0}, \quad (1)$$

где E_0 — кинетическая энергия соударяющихся тел, b — коэффициент податливости материала, V_0 — скорость соударения.

Для нашего случая кинетическая энергия соударения определяется потенциальной энергией шарика, бросаемого с некоторой высоты. Следовательно, изменяя высоту падения шарика, можно в достаточно широких пределах изменять энергию удара при неизменной длительности удара, так как для линейной силовой характеристики длительность активного этапа удара не зависит от скорости соударения. Что касается длительности активного этапа удара (τ_a), то она может быть изменена путем возбуждения материала различными по массе шариками, так как из формулы (1) следует, что

$$\tau_a = \frac{\pi}{2} \sqrt{mb}, \quad (2)$$

где m — масса шарика.

При контакте двух разнородных материалов происходит формирование двойного электрического слоя на границе контакта, эффективность которого определяется величиной разделенных положительных и отрицательных зарядов на границе контакта. Характеристики формирующегося при контакте двух разнородных материалов двойного электрического слоя зависят от электрических характеристик контактирующих материалов, состояния их поверхности и площади контакта. В процессе вдавливания шарика в поверхность материала площадь контакта равна площади сегмента поверхности шарика, вдавливаемого в образец, которая определяется по формуле $S = 2\pi R h$, где R — радиус шарика, h — глубина вдавливания. Следовательно, если бы глубина вдавливания в процессе удара изменялась линейно, то так же линейно изменялась бы и площадь контакта.

Но в процессе вдавливания контактная сила возрастает и достигает максимума по окончании его. Поэтому в процессе активного этапа удара должно наблюдаться ускоренное возрастание площади контакта, а следовательно, и величины заряда двойного электрического слоя в соответствии с изменением величины контактной силы.

Так как нами регистрируется переменный электрический ток, который в данном случае представляет собой скорость изменения заряда на границе контакта

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt},$$

то само изменение заряда во времени может быть определено путем интегрирования электромагнитного отклика

$$Q(t) = \int I(t) dt.$$

Возьмем цементный камень без заполнителя, в котором внутренние источники механоэлектрических преобразований, а именно двойные электрические слои, имеют малую величину, и проанализируем электромагнитный отклик, возникающий при его возбуждении. Для оценки взаимосвязи параметров электромагнитного отклика с длительностью импульса возбуждения был выполнен следующий эксперимент. На поверхность образца, по которой производится удар, была накатана на диэлектрическую смазку (литол) алюминиевая фольга. Фольга была заземлена, а на шарик и один вход измерительного прибора подавался небольшой потенциал от источника напряжения. В момент касания заряженного шарика заземленной поверхности регистрировалось падение напряжения до нуля, которое сохранялось до момента начала отлета шарика, т. е. по одному каналу регистрировалась полная длительность импульса возбуждения его активной и пассивной частей, а по другому — электромагнитный отклик. На рис. 1 приведены результаты по синхронной регистрации электромагнитного отклика (кривая 1) и длительности импульса возбуждения (кривая 2) при ударном возбуждении цементного камня. Чтобы получить изменение заряда на границе контакта диэлектрической смазки с образцом, было проведено численное интегрирование электромагнитного отклика (кривая 3). Нарастание переднего фронта связано с увеличением разделенных положительных и отрицательных зарядов на границе контакта в процессе вдавливания шарика в поверхность образца, т. е. определяет активный этап удара (τ_a), во время которого контактная сила возрастает и происходит нагружение. Этот промежуток времени (τ_a) и есть длительность первого импульса электромагнитного отклика (кривая 1). Следует заметить, что удар по поверхности того же образца без использования фольги приводит к появлению такого же одиночного электромагнитного отклика, совпадающего по форме, но несколько отличающегося по амплитудным значениям, что является следствием различий в электрических характеристиках бетона и литола.

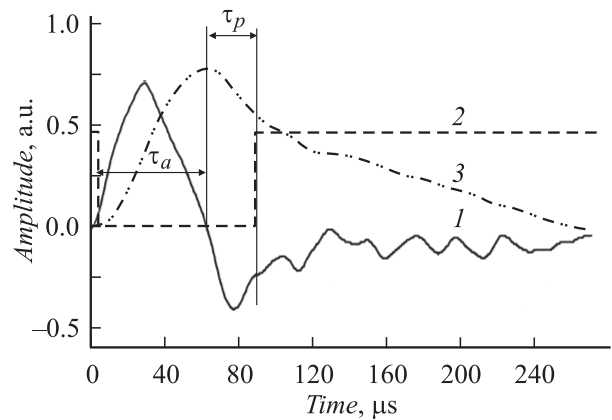


Рис. 1. Электромагнитный отклик, зарегистрированный при ударном возбуждении цементного камня (1), его интегральная характеристика (3) и изменение потенциала шарика при контакте с заземленной поверхностью (2).

Затем идет процесс разгрузки — пассивный этап удара. Во время пассивного этапа (τ_p) контактная сила уменьшается и наблюдается обратный ход в амплитудной зависимости импульса, связанный с изменением величины двойного электрического слоя за счет уменьшения площади контакта шарика с образцом, т. е. форма импульса, полученного в результате интегрирования электромагнитного отклика, отражает характер изменения силовой характеристики ударного возбуждения.

Из рисунка видно, что длительность переднего фронта проинтегрированного сигнала, который мы связываем с длительностью активного этапа удара, равна $64 \mu s$. Оценим теоретически какова должна быть длительность пассивного этапа и сравним ее с экспериментально полученной по характеристикам электромагнитного отклика. Для этого воспользуемся основными формулами по теории удара из работы [3]. По длительности первого импульса электромагнитного отклика определим длительность пассивного этапа удара по формуле $\tau_p = 1.65 P_m^{-1/6} \sqrt{mb}$, где $P_m = V_0 \sqrt{m/b}$ — величина максимальной нагрузки; b — коэффициент податливости, который находится из формулы (1) по известной величине τ_a . Расчетная величина длительности пассивного этапа удара (τ_p) оказалась равной $27 \mu s$, а экспериментально полученная составляет $29 \mu s$, что служит еще одним доказательством правильности наших предположений.

В процессе ударного возбуждения наряду с процессом электризации за счет трибоэффекта происходит акустическое возбуждение двойных электрических слоев на границах внутренних неоднородностей [5]. На рис. 2 приведен типичный электромагнитный отклик, зарегистрированный при ударном возбуждении тяжелого бетона, имеющего крупные по площади границы адгезионного контакта цементной матрицы и заполнителя, а следовательно, и двойные электрические слои. В отличие от чистого цементного камня (рис. 1) при ударном возбуждении тяжелого бетона наблюдается хорошо выраженная

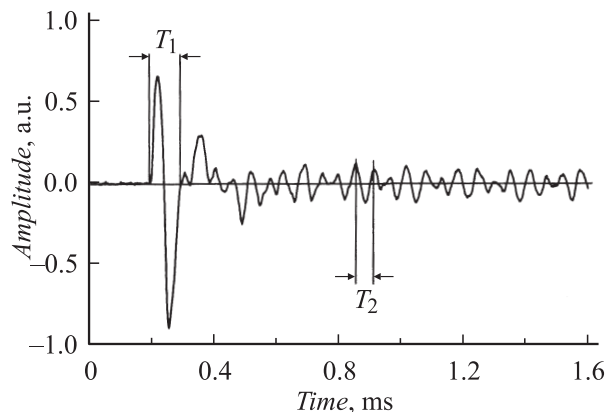


Рис. 2. Типичный электромагнитный отклик, зарегистрированный при ударном возбуждении тяжелого бетона.

колебательная картина электромагнитного отклика, связанная с акустическим возбуждением внутренних двойных электрических слоев. Из рис. 2 видно, что первый электромагнитный импульс отличается по периоду (T_1) от колебаний (T_2). Это различие является следствием того, что первый импульс связан с характеристиками удара, а последующие изменения электромагнитного отклика определяются собственными акустическими колебаниями, возбуждающими двойные электрические слои на границе матрицы и заполнителя.

Для исследования влияния длительности удара на параметры электромагнитного отклика были использованы стальные шарики массой 0.73, 1.45, 3.26 и 7.41 г. Чтобы исключить в данном эксперименте влияние энергии возбуждения, было осуществлено бросание этих шариков с разной высоты, чтобы энергия возбуждения была одинакова.

На рис. 3 приведена зависимость длительности первых импульсов электромагнитных откликов, зарегистрированных при ударе образца тяжелого бетона стальными шариками различной массы. Видно, что с увеличением

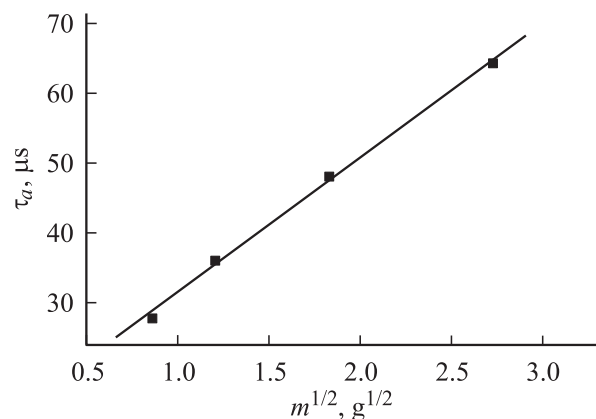


Рис. 3. Зависимость длительности τ_a первых импульсов электромагнитных откликов, зарегистрированных при ударе образца тяжелого бетона, от корня квадратного из массы m шариков.

массы шарика наблюдается возрастание длительности первого импульса пропорционально корню квадратному из массы шарика. Это находится в полном соответствии с теорией удара для линейной силовой характеристики

$$\tau_a = \frac{\pi}{2} \sqrt{mb}$$

и может служить доказательством того, что длительность первого импульса электромагнитного отклика определяет длительность активного этапа ударного возбуждения.

Следует заметить, что при ударе шариками малого диаметра можно не учитывать волновые процессы. Оценка времени соприкосновения шарика за счет волны возбуждения, например, для стального шарика диаметром 7 мм составляет $3 \mu\text{s}$, а время активного этапа удара для этого же шарика — $36 \mu\text{s}$.

Однако следует заметить, что после отлета шарика и даже на пассивном этапе удара произошедшее разделение зарядов может частично остаться и тогда задний фронт полученного с помощью численного интегрирования импульса может недостаточно точно отражать поведение силовой характеристики на пассивном этапе удара.

По нашим представлениям, механизм механоэлектрических преобразований при ударном возбуждении композиционных материалов заключается в изменении акустической волной ширины границы матрицы и включения, которое приводит к изменению дипольного момента двойного электрического слоя, находящегося на этой границе, т.е. к возникновению тока смещения, который и регистрируется измерительной системой. Такое смещение будет осуществляться акустическими колебаниями, формирующимися в образце при его ударном возбуждении.

Таким образом, при изменении длительности возбуждения, а следовательно, и его спектра мы должны наблюдать трансформацию спектральных характеристик электромагнитного отклика. На рис. 4 приведены спектральные характеристики электромагнитных откликов, зарегистрированных при ударном возбуждении различными по массе стальными шариками одного и того же образца тяжелого бетона. Видно, что изменение длительности удара приводит к трансформации спектра электромагнитного отклика, что свидетельствует в пользу предложенного выше механизма механоэлектрических преобразований в материалах.

Для исследования влияния энергии возбуждения на параметры электромагнитного отклика производилось изменение высоты падения стального шарика массой 7.41 г. Показано, что в зависимости от энергии ударного возбуждения при неизменной массе шарика длительность первого импульса электромагнитного отклика остается постоянной, а изменения наблюдаются в эффективности механоэлектрических преобразований, что также свидетельствует в пользу наших предположений.

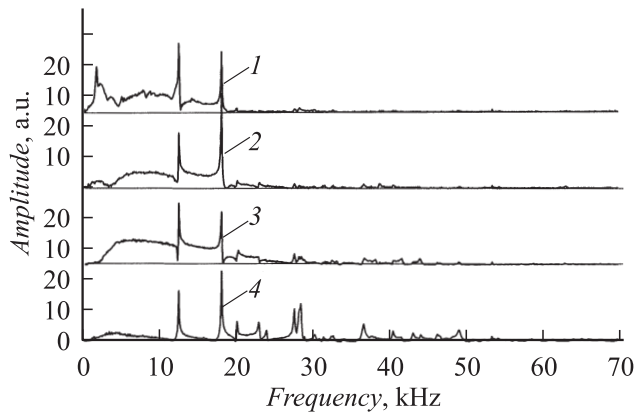


Рис. 4. Спектральные характеристики электромагнитных откликов при ударном возбуждении шариками массой: 1 — 7.41, 2 — 3.26, 3 — 1.75, 4 — 0.73 г.

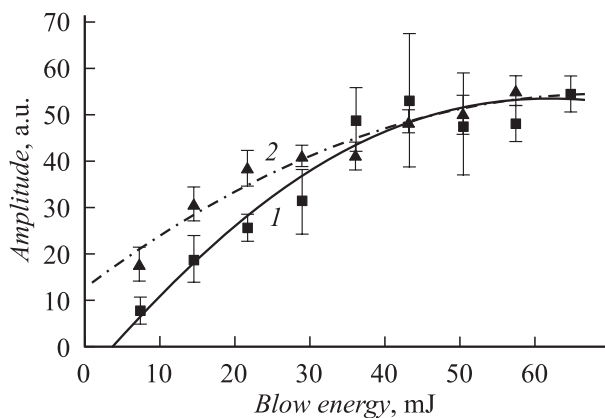


Рис. 5. Зависимость амплитуды основного максимума спектральной характеристики электромагнитного отклика от энергии ударного возбуждения.

На рис. 5 приведена зависимость амплитуды основного максимума спектральной характеристики электромагнитного отклика от энергии возбуждения. Видно, что при увеличении энергии удара происходит также рост амплитуды электромагнитного отклика. Причем следует отметить, что вначале наблюдается линейное возрастание амплитуды электромагнитного отклика, а затем, при достижении энергии удара $3.5 \cdot 10^{-2}$ J, зависимость становится нелинейной (кривая 1). Наличие нелинейности может быть связано с процессом микропластической деформации. Проведенные исследования показали, что энергия ударного возбуждения выше $5 \cdot 10^{-2}$ J (кривая 2) уже приводит к возникновению необратимых остаточных деформаций в бетоне, на что указывает наличие гистерезиса на обратном ходе зависимости амплитуды электромагнитного отклика от энергии возбуждения.

На рис. 6 приведены спектральные характеристики электромагнитных откликов, соответствующих линейному участку зависимости (кривая 1), показанной на

рис. 5, и нелинейной области деформации (кривая 2). Из рисунка видно, что наряду с возрастанием амплитуды электромагнитного отклика при переходе в зону нелинейных деформаций в спектральной характеристике появляются дополнительные пики, которые могут быть связаны с процессом разрушения материала в точке удара.

Проанализируем влияние длительности первого импульса электромагнитного отклика на его спектральные характеристики. Следует заметить, что все ниже приведенные испытания были проведены на одном и том же образце тяжелого бетона при соблюдении одинаковой геометрии эксперимента. Принимая длительность импульса возбуждения равной длительности переднего фронта проинтегрированного электромагнитного сигнала, теоретически рассчитаем спектр возбуждения, аппроксимируя импульс возбуждения неправильным треугольником. Длительность пассивного этапа была рассчитана теоретически, по приведенной выше методике, так как наложение на электромагнитный импульс, связанный с трибоэффектом, сигнала, связанного с возбуждением внутренних источников, приводит к неоднозначности в ее (длительности пассивного этапа) определении.

На рис. 7 приведены спектры электромагнитных откликов (кривая 1) и рассчитанные исходя из длительности первого импульса спектры возбуждения (кривая 2) для случая с шариком 0.73 (a) и 7.41 г (b). Из рисунка видно, что практически весь спектр электромагнитного отклика расположен в рамках спектра возбуждения, рассчитанного по длительности первого импульса электромагнитного отклика. При уменьшении длительности возбуждения в спектре электромагнитного отклика появляются пики на более высоких частотах. В случае же, когда длительность переднего фронта остается постоянной, а изменяется энергия возбуждения, наблюдается изменение спектральной характеристики электромагнитного отклика, заключающееся в увеличении амплитуды спектральных максимумов. Следовательно, изменение

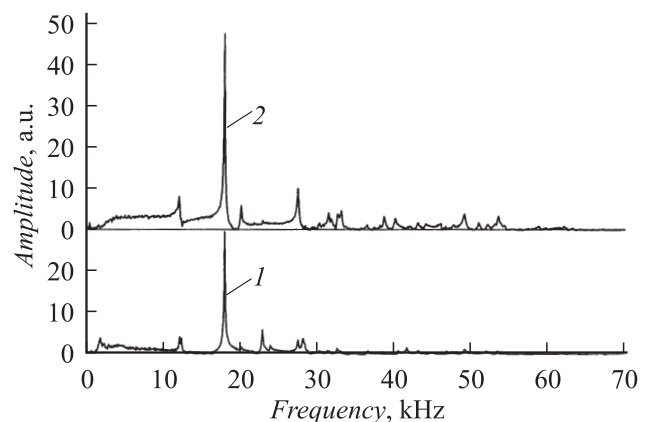


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики электромагнитных откликов, соответствующих линейной 1 и нелинейной области деформации 2 бетона.

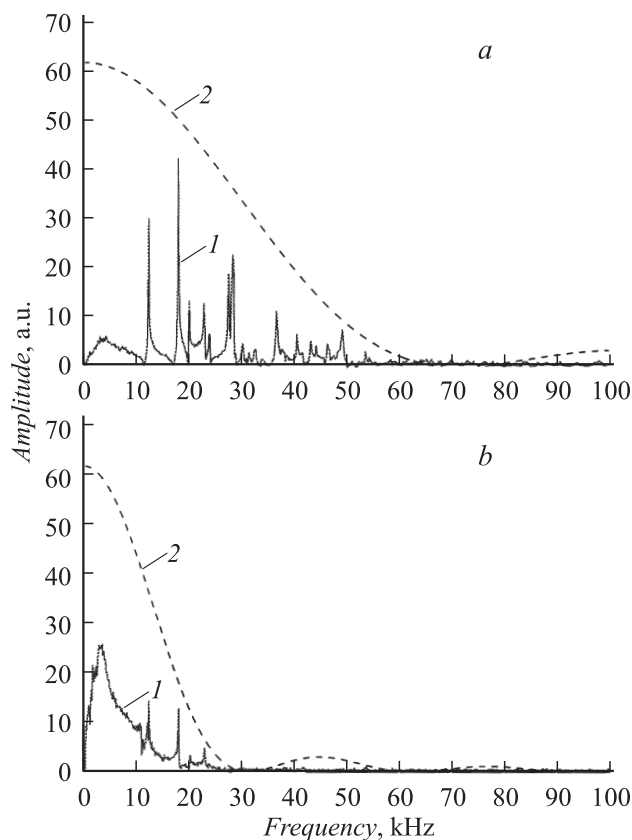


Рис. 7. Спектры электромагнитных откликов *1* и рассчитанные по длительности первого электромагнитного сигнала спектры возбуждения *2* при ударе шариками массой: *a* — 0.73, *b* — 7.41 g.

энергии и длительности удара приводит к трансформации спектральных характеристик электромагнитного отклика из бетона.

Кроме того, результаты проведенных исследований могут быть использованы для определения таких динамических характеристик ударного процесса, как коэффициент податливости материала и коэффициент, характеризующий степень нелинейности силовой характеристики с учетом динамичности нагружения. Нахождение коэффициента нелинейности (*n*) заключается в аппроксимации с помощью стандартной программы персонального компьютера переднего фронта проинтегрированного электромагнитного отклика степенной функцией. Показатель степени в этой функции и будет определять величину коэффициента *n*. Что касается коэффициента *b*, то он определяется по формуле

$$b = \frac{4\tau^2}{m\pi^2},$$

где τ — длительность первого импульса электромагнитного отклика, m — масса шарика.

Следовательно, по параметрам электромагнитного отклика на ударное возбуждение принципиально возможно определить эмпирические коэффициенты, характеризующие упругопластические характеристики материалов.

Проведенные исследования показывают, что для повышения точности разрабатываемого в Томском политехническом университете неразрушающего метода контроля прочности материалов, основанного на использовании амплитудно-частотных характеристик электромагнитного отклика на ударное возбуждение [6], необходимо учитывать энергию и спектр импульсного возбуждения. Разработка конкретного алгоритма электромагнитного контроля качества материалов с учетом приведенных экспериментальных данных является задачей дальнейших исследований.

Список литературы

- [1] Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Дмитриев В.П., Смирнов В.А., Фурса Т.В., Ульченко В.И. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 336–341.
- [2] Чахлов В.Л., Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Фурса Т.В., Чахлов Б.В., Картопольцев В.М. // Изв. вузов. Строительство. 1995. № 5–6. С. 54–58.
- [3] Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. Инженерные методы исследования ударных процессов. М.: Машиностроение, 1977. 240 с.
- [4] Фурса Т.В. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 7. С. 53–56.
- [5] Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батурин Е.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 10. С. 51–55.
- [6] Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. // Дефектоскопия. 2000. № 2. С. 68–71.