

05;12

Исследование взаимосвязи степени напряженно-деформированного состояния композиционных материалов с параметрами электромагнитного отклика на импульсное механическое возбуждение

© Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, Н.Н. Хорсов, К.Ю. Осипов

Томский политехнический университет,
634034 Томск, Россия
e-mail: fursa@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 21 апреля 2005 г.)

Исследовано влияние степени напряженно-деформированного состояния, создаваемого механическими и температурными полями, на параметры электромагнитной эмиссии в модельных образцах на основе цементно-песчаного вяжущего и единичных металлических включений. Показано, что характер трансформации электромагнитного отклика на импульсное механическое возбуждение образцов зависит от геометрии расположения включения относительно направления приложения механической нагрузки. Предложен механизм механоэлектрических преобразований в композиционных материалах при напряженно-деформированном состоянии.

PACS: 71.15.Qc, 77.84.Lf

Композиционные материалы часто используются в силовых конструкциях, подвергающихся воздействию высоких механических и температурных полей, поэтому высока вероятность их непредвиденного разрушения. В связи с этим особую актуальность приобретает оценка степени напряженно-деформированного состояния и прочностных характеристик композиционных материалов в процессе их эксплуатации. Использование обычных методов, в частности акустического, не дает достаточно хороших результатов в определении механических характеристик композиционных материалов.

Для решения этой задачи могут быть использованы механоэлектрические преобразования в диэлектрических конструкционных материалах, которые в течение нескольких лет изучаются в Томском политехническом университете. Установлено, что при ударном возбуждении композиционных диэлектрических материалов происходит акустическое возбуждение двойных электрических слоев на границах внутренних неоднородностей [1], параметры электромагнитного отклика на ударное возбуждение твердых тел связаны с их механическими характеристиками и дефектностью [2]. В композиционных материалах самыми слабыми являются зоны адгезионного контакта компонентов, составляющих данный композит, а параметры электромагнитного отклика наиболее точно отражают характер изменения состояния двойных электрических слоев, находящихся на границе их раздела. Напряженно-деформированное состояние приводит к изменению контакта компонентов в композиционных материалах, поэтому для определения напряжений, возникающих в материалах при механическом нагружении, также может использоваться явление механоэлектрических преобразований. В качестве физической модели двухкомпонентной композиционной

системы использовались цементно-песчаные образцы с единичными стальными включениями. Образцы имели вид параллелепипедов с размерами $50 \times 50 \times 100$ мм, стальные включения имели размеры $15 \times 15 \times 1$ мм. Для исследования были использованы образцы с различной геометрией расположения включений — параллельно, перпендикулярно и под углом 45° к большой плоскости образца.

Эксперимент проводился следующим образом: образец нагружался на сжатие вдоль большой плоскости с помощью прессы. Одновременно с нагружением производилось ударное возбуждение с помощью механического пистолета, ударным элементом которого являлся стальной шарик. Импульсное механическое возбуждение осуществлялось вдоль малой плоскости образца. Регистрация электрической составляющей электромагнитного отклика осуществлялась с помощью емкостного датчика, закрепленного на противоположной от точки удара поверхности образца. Электрический сигнал с емкостного датчика усиливался и регистрировался с помощью осциллографа „PC-Scope PSC-500“, совмещенного с ЭВМ.

Типичная амплитудно-частотная характеристика электромагнитного отклика из модельных образцов представлена на рис. 1. Спектральная характеристика имеет достаточно большое число составляющих, значительные по амплитуде максимумы которых находятся в области 20–40 кГц. Для исследования характера трансформации спектральных характеристик с изменением напряженно-деформированного состояния эта область спектра была более подробно проанализирована.

На рис. 2 приведены изменения спектральных характеристик при механическом нагружении образцов. Как видно из рисунка, с ростом нагрузки происходит пе-

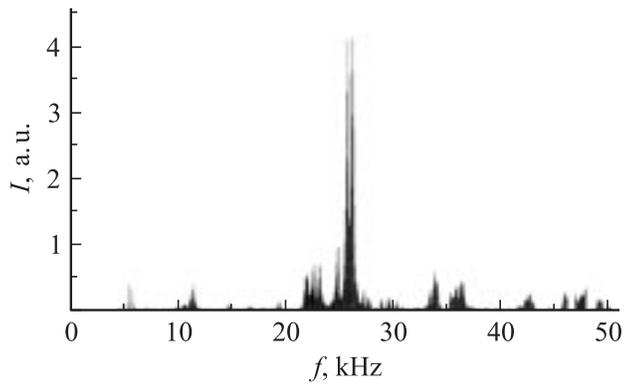


Рис. 1. Типичная форма электромагнитного отклика из цементно-песчаного образца со стальным единичным включением.

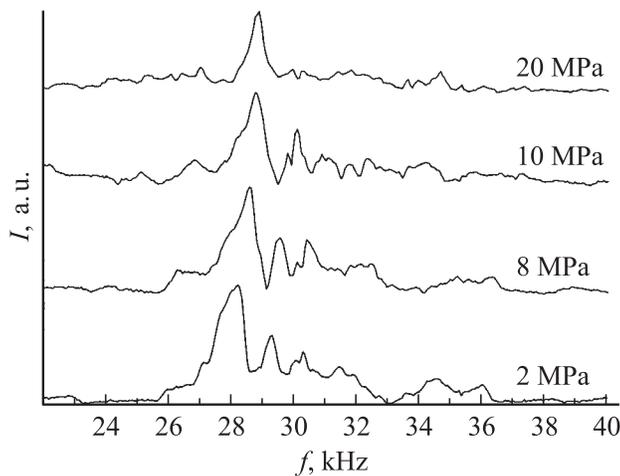


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики электромагнитных откликов, зарегистрированных при различных уровнях механического напряжения.

пераспределение энергии спектральных составляющих и смещение центра тяжести спектра в низкочастотную область, в то время как основные спектральные максимумы смещаются в высокочастотную область. При нагружении образцов изменяются как условия прохождения акустических волн через материал, так и состояние адгезионного контакта компонентов, составляющих композиционную систему, что и отражается на характеристиках электромагнитного отклика в соответствии с механизмом смещения зарядов двойных электрических слоев при прохождении через них акустической волны [1].

Для количественной оценки произошедших в электромагнитном отклике изменений в зависимости от степени напряженно-деформированного состояния был использован метод корреляционного анализа, с помощью которого сравнивались формы временных зависимостей электромагнитных откликов, зарегистрированных

на различных этапах нагружения образцов с откликом при нагрузке 15–20% от разрушающей (≈ 4 МПа). Эта нагрузка была выбрана в качестве опорной, так как при ней завершается этап установления формы образцов, вносящий дополнительные погрешности в измерения.

На рис. 3 приведены значения максимальных коэффициентов корреляции в зависимости от прикладываемой внешней нагрузки. Видно, что с увеличением нагрузки, а следовательно, и степени напряженно-деформированного состояния происходит уменьшение коэффициента взаимной корреляции сигналов. Зависимость ко-

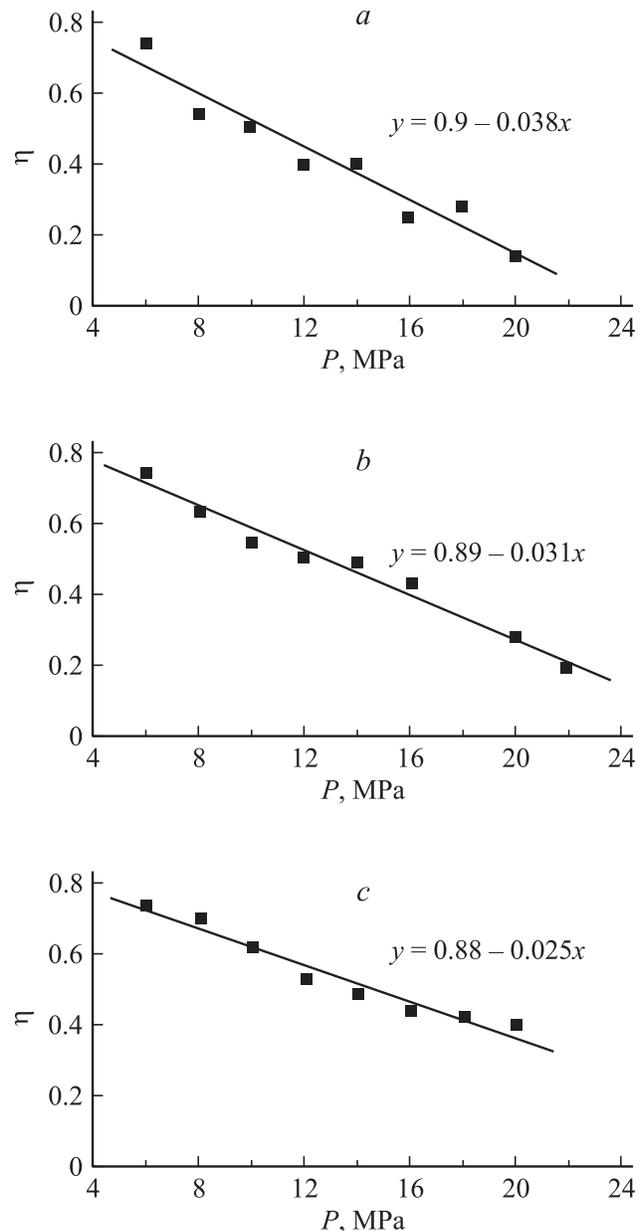


Рис. 3. Зависимость максимальных коэффициентов корреляции электромагнитных откликов от прикладываемой внешней нагрузки.

эфициента корреляции от нагрузки после достижения 6 МПа подчиняется примерно линейному закону. В зависимости от геометрии расположения включения относительно плоскости нагружения наблюдается изменение угла наклона коэффициента корреляции откликов от нагрузки при аппроксимации прямыми линиями. Об изменении угла наклона можно судить по коэффициентам пропорциональности из уравнений регрессии, приведенных на графиках. Самый большой угол наклона зависимости коэффициента корреляции откликов от величины прикладываемой внешней механической нагрузки наблюдается на модельном образце, включение в котором расположено под углом 45° к оси нагружения (рис. 3, *a*), затем идет образец, в котором включение расположено параллельно плоскости сжатия (рис. 3, *b*) и самый маленький угол наклона у образца с включением, расположенным перпендикулярно оси нагружения (рис. 3, *c*).

Следовательно, геометрия расположения включений относительно оси сжатия образца влияет на изменение параметров электромагнитного отклика на ударное возбуждение в соответствии с характером напряженно-деформированного состояния у границы матрицы и включения.

Кроме того, были проведены исследования механо-электрических преобразований в образцах, состоящих из цементно-песчаной матрицы и единичного стального включения, при их нагревании с целью установления аналогий и различий в характере изменения параметров электрического отклика при механическом нагружении и температурном возбуждении. Геометрия расположения приемного датчика относительно точки импульсного ударного возбуждения была такой же, как и при механическом нагружении образцов, то есть возбуждение образца производилось в направлении малой плоскости, а приемный емкостный датчик располагался с противоположной от точки удара стороны. На рис. 4 приведены спектральные характеристики электромагнитных откликов, зарегистрированные при импульсном возбуждении образца на различных этапах температурного возбуждения. Из рисунка видно, что при статическом сжатии с увеличением механической нагрузки основные спектральные максимумы смещаются в сторону более высоких частот, при нагревании — в сторону низких. При температурном возбуждении происходит изменение как геометрических размеров образцов, так и скорости звука. Исследовалась зависимость изменения скорости звука в материалах от температуры отжига. Установлено, что с увеличением температуры образцов происходит уменьшение скорости продольных акустических колебаний. Расширение цементно-песчаных образцов, обладающих высокой пористостью, приводит к увеличению размера пор, что и вызывает уменьшение скорости звука. При механическом нагружении происходит сжатие образцов, которое приводит к увеличению скорости звука за счет уменьшения размера

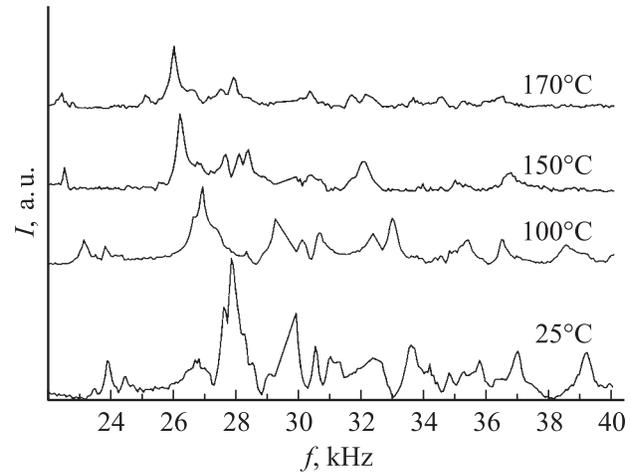


Рис. 4. Спектральные характеристики электромагнитных откликов, зарегистрированных на различных этапах температурного отжига.

пор. И тогда частота собственных акустических колебаний должна уменьшаться пропорционально изменению скорости звука и обратно пропорционально увеличению геометрических размеров образцов по формуле: $f = nV/2L$, где f — частота собственных акустических колебаний, V — скорость звука, L — размер образца в направлении акустического возбуждения, n — номер гармоники.

При достижении определенных напряжений происходит существенное изменение спектральных характеристик электромагнитного отклика, выражающееся в снижении доли высокочастотных составляющих спектра.

Проведенные исследования позволяют предложить следующую модель механоэлектрических преобразований в гетерогенных материалах в условиях напряженно-деформированного состояния, которая заключается в следующем. Как при механическом, так и при температурном воздействии происходит изменение геометрических размеров материалов и скорости звука в образце, что приводит к изменению частот собственных акустических колебаний образца, а это ведет к смещению основных спектральных максимумов электромагнитного отклика, который является следствием смещения зарядов двойных электрических слоев на границах компонентов при прохождении через них акустических волн. При механическом сжатии смещение основных спектральных полос происходит в высокочастотную область, а при температурном расширении в низкочастотную. Кроме того, возникающие внутренние механические напряжения, по-видимому, изменяют амплитуду колебаний границ адгезионного контакта для определенного типа акустических волн, что приводит к изменению величины спектральных максимумов электромагнитного отклика. В области значительных механических напряжений, когда начинается процесс разрушения адгезион-

ного контакта на границе раздела разнородных материалов и интенсивное образование и развитие микротрещин, происходит активное поглощение коротковолновой составляющей механического возбуждения, что проявляется в затухании высокочастотных составляющих спектра.

Список литературы

- [1] *Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батулин Е.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 10. С. 51–55.*
- [2] *Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. // Дефектоскопия. 2000. № 2. С. 68–71.*