

АКУСТОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Кузнецов В.П.¹, Кулешов В.К.², Фадеев Ю.А.¹

1. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева (КузГТУ)

Кемерово, Россия (650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28) vpk-51@mail.ru.

2. Национальный исследовательский Томский политехнический университет (НИ ТПУ)

Томск, Россия(634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30)

Приведены исследования электромагнитного излучения частиц сегнетокерамики, размещенных в клеевом слое изделия из композиционных материалов, излучение которых стимулировалось акустическими волнами и предварительной ориентацией частиц. Ориентация частиц выполнялась таким образом, чтобы суммарные дипольные моменты всех введенных частиц были ориентированы в одном направлении, преимущественно перпендикулярно клеевому слою. Показано, что электромагнитное излучение частиц сегнетокерамики зависит от остаточных напряжений в клеящем полимере и сильно коррелирует с адгезионной прочностью клеевого слоя. Такая зависимость позволяет измерять адгезионную прочность клеевого соединения без его разрушения.

Ключевые слова: адгезионная прочность, остаточные напряжения, клеящий полимер, клеевые соединения, сегнеточастицы, акустическое излучение, электромагнитное излучение, ориентация, дипольные моменты, домены.

AKUSTOELEKTROMAGNITNY METHOD OF NONDESTRUCTIVE TESTINGSTRENGTH BONDINGS

Kuznetsov V.P.¹, Kuleshov V.K.², Fadeev Yu.A.¹

1. Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev (KuzGTU)

Kemerovo, Russia (650000, Kemerovo, Ul. Spring, 28) vpk-51@mail.ru.

2. National Research Tomsk Polytechnic University (TPU OR)

Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Avenue, Building 30)

We present the study of electromagnetic radiation by particles of ferroelectric placed in the adhesive layer products made of composite materials whose emission was stimulated by acoustic waves and pre-orientation of the particles. The orientation of the particles was carried out in such a way that the total dipole moments of all particles were introduced in the same direction mainly perpendicular to the glue layer. It is shown that electromagnetic radiation of the particles depends on the ferroelectric residual stresses in the adhesive polymer and is strongly correlated with the adhesion strength of the adhesive layer. This dependence allows one to measure the adhesive strength of adhesive bonding without destroying it.

Key words: adhesive strength, residual stresses, the adhesive polymer adhesive compound segnetochastitsi, acoustic emission, electromagnetic radiation, the orientation of the dipole moments domains.

Полимеры нашли широкое применение в создании композиционных материалов, которые используются в автомобилестроении, самолетостроении, космонавтике, ядерной промышленности и других отраслях. При конструировании изделий на их основе возникает потребность в неразрушающем контроле соединений между слоями, а именно, выяснении прочности клеевых соединений. Очень часто в таких изделиях контролируемый клеевой слой имеет односторонний доступ, путь к которому преграждают аналогичные клеевые соединения, дефекты и анизотропия механических характеристик вышележащих слоев. В этом случае информация о контролируемом клеевом соединении маскируется и искажается. Следует заметить, что ультразвуковые рентгеновские и другие применяемые методы не контролируют адгезионную прочность и лишь способны определять дефекты типа: непроклей, отсутствие клея и степень полимеризации клея [7].

Известно, что прочность клеевых соединений $\sigma_{ад}$ зависит от остаточных напряжений в отвержденном клеем полимере σ_0 и когезионной прочности адгезива σ_k [4]. Если разрушение происходит по адгезиву, то прочность клеевых соединений описывается выражением:

$$\sigma_{ад} = (\sigma_k/\beta - \sigma_0)/\alpha, \quad (1)$$

где α, β – коэффициенты концентрации напряжений, обусловленные различием в механических свойствах адгезива с субстратом и макроскопической неоднородностью соответственно. Остаточные напряжения действуют против молекулярного сцепления (когезии), а также против адгезионных сил, поэтому они приравниваются к длительно действующей нагрузке [9]. В этих условиях разрушение клеевых соединений может быть вызвано внешними напряжениями совместно с остаточными напряжениями, составляющими 15 – 85 % мгновенного разрывного напряжения, что является одной из основных причин разрушения клеевых соединений при меньших эксплуатационных условиях и за более короткие сроки. Характер таких взаимодействий между остаточными напряжениями и адгезионной прочностью наглядно демонстрирует график, полученный в работе [5] для полиэфирциануратного эмаль – лака рис.1. При длительной температурной обработке температурой 220°C происходит уменьшение остаточных напряжений в полимерной пленке, вследствие чего наблюдается увеличение адгезионной прочности полимера к металлу. Этот эксперимент наглядно подтверждает справедливость выражения (1).

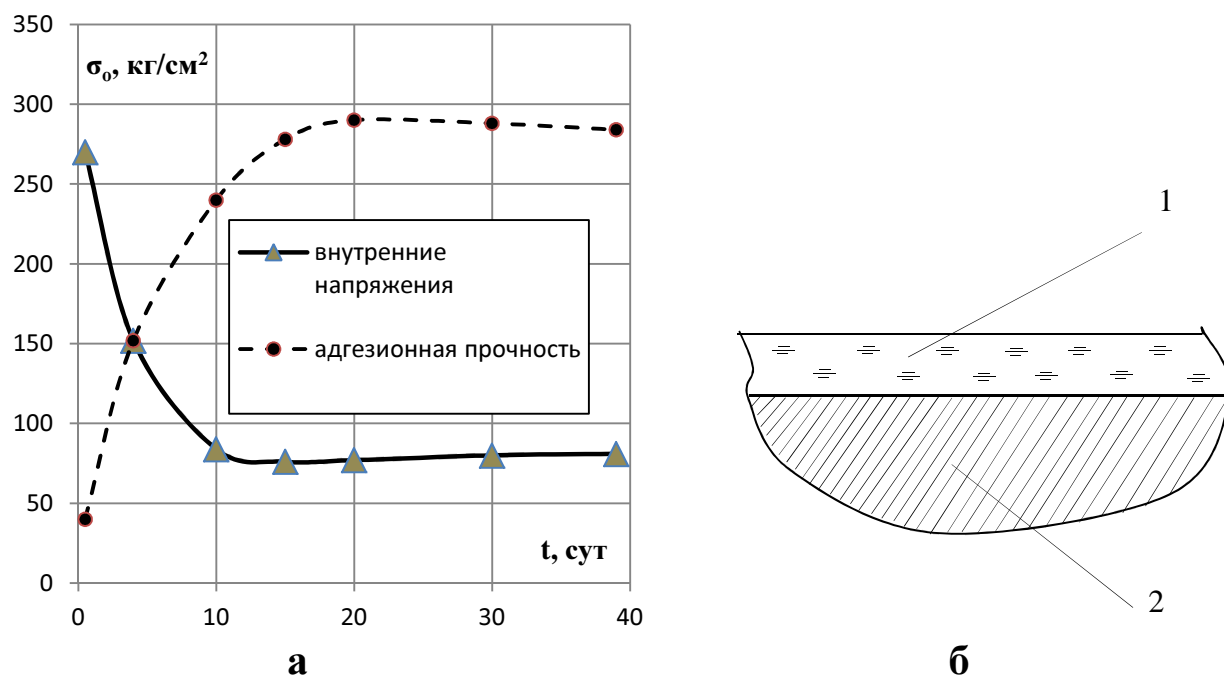


Рис. 1. **а** – Зависимость внутренних напряжений σ_0 и адгезионной прочности $\sigma_{ад}$ для образцов из полиэфирциануратного эмальлака-металл от продолжительности его старения. Старение ускорилось температурой 220 °С [5], **б** – конструкция образца: 1 – эмаль-лак, 2 – металл.

В тоже время известно [8], что сегнетоматериалы обладают высокой чувствительностью к механическим напряжениям, действующим на них. В первую очередь это относится зависимости пьезомодуля d_{33} от всестороннего сжатия, отвечающего за трансформацию акустических волн в электромагнитные волны. Согласно материалам [8] эта зависимость имеет вид рис.5, б. Было сделано предположение, что

введенные микроскопические частицы сегнетоматериала будут реагировать на остаточные напряжения в клеящем полимере.

Исходя из этих предпосылок, был предложен способ контроля соединений в многослойных конструкциях. Метод заключается в наделении ответственного клеящего соединения способностью трансформировать акустические волны, проходящие через него в электромагнитные волны. Согласно предложенному способу [3], это достигалось тем, что в клеящий полимер вместо установленных ГОСТом наполнителей ($CaCO_3$ – мел, TiO_2 – двуокись титана, стандартный наполнитель для эпоксидных клеев, SiO_2 – песок, Al_2O_3 – корунд и т.п.) вводят сегнеточастицы керамического материала марки ЦТС –23, склеивают этим клеем детали конструкции, дают клеящему полимеру полностью сформироваться. Далее при контроле прочности адгезии в зону контроля излучают узконаправленное акустическое волны, регистрируют электромагнитное излучение сегнеточастиц, помещенных в клеящий полимер, и по этим электромагнитным волнам оценивают адгезионную прочность.

Результаты экспериментов показывают, что электромагнитное излучение от таких клеящих соединений отсутствуют. Этот факт отражает рис. 2 а. Из рисунка видно, что регистрируемое электромагнитное излучение представляет собой так называемый «белый шум». Объяснение этому факту можно дать, если учесть, что электромагнитное излучение от разных сегнеточастиц накладывается в противофазе и взаимно уничтожается, так как суммарные дипольные моменты частиц хаотически ориентированы, это приводит к отсутствию полезного регистрируемого сигнала (см. рис. 2 б).

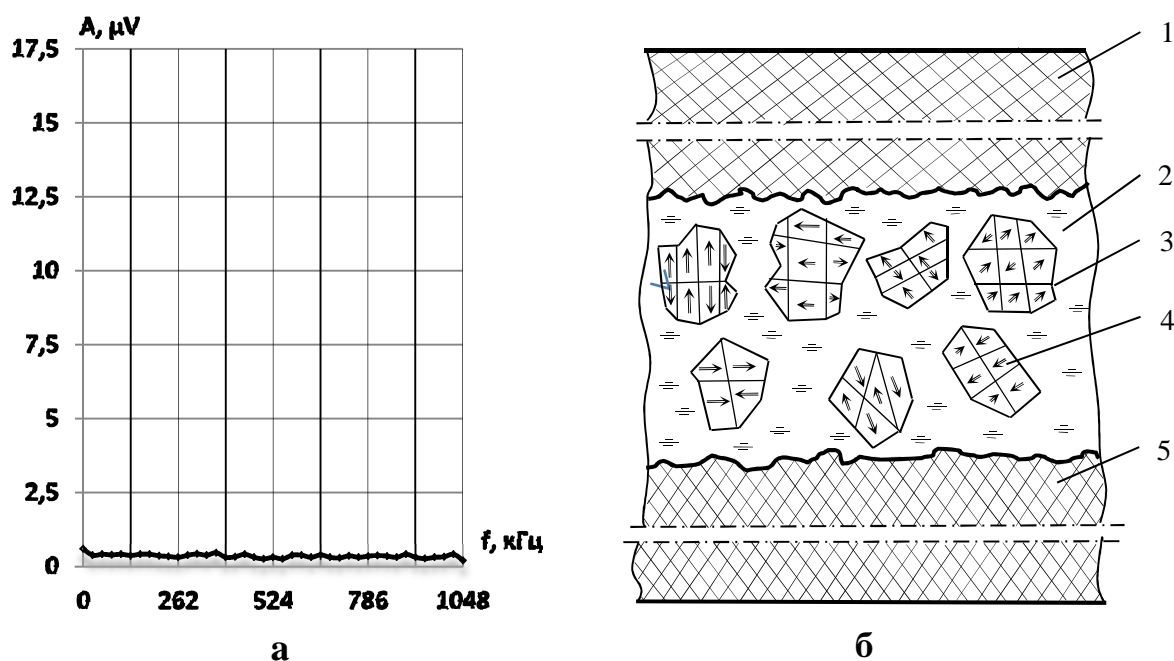


Рис. 2. а – Спектрограмма электромагнитного излучения клеящего полимера, активированного кристаллитами сегнетокерамики без дальнейшей их ориентации, б – Модель клеящего шва, полученного склеиванием изделий 1,5 клеящим полимером 2, активированным кристаллитами сегнетокерамики, 3 структура которых разбита на доменные области, характеризующиеся дипольными моментами 4 и ориентированными хаотично.

Для преодоления возникшей проблемы было предложено ориентировать вводимые в клеящий полимер кристаллиты сегнетокерамики [2]. Ориентация позволяла поворачивать сегнеточастицы таким образом, что суммарный дипольный момент каждого кристаллита ориентировался в одном направлении перпендикулярно клеящему соединению. В качестве инструмента для ориентации суммарного дипольного момента

частиц применили постоянное электрическое поле, поданное между склеиваемыми частями композиционного материала. Ориентацию кристаллитов проводили до полной полимеризации клеящего полимера. В результате частицы выстраивали в клеящем полимере таким образом, что их средний дипольный момент ориентировался перпендикулярно клеевому слою (см. рис. 3 б). Это позволило при возбуждении упругих волн в композиционной конструкции получить сигнал отклика от активированного клеющего слоя в виде электромагнитного излучения. Рис.3 а отражает характерный электромагнитный сигнал такого клеющего соединения.

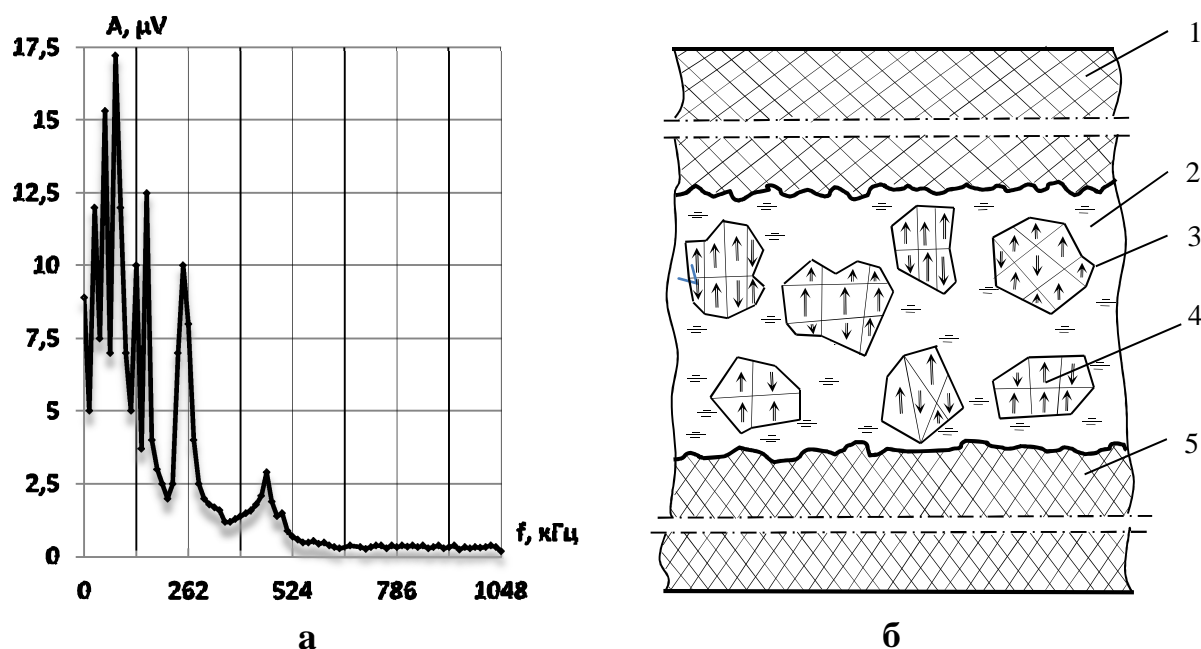


Рис. 3 а – Спектрограмма электромагнитного излучения клеющего полимера, активированного кристаллитами сегнетокерамики, средние дипольные моменты которых ориентированы постоянным электрическим полем и «заморожены» полимеризацией клеящего полимера. б – Модель клеющего шва, полученного склеиванием изделий 1,5 клеющим полимером 2, активированным кристаллитами сегнетокерамики 3, структура которых разбита на доменные области, характеризующиеся дипольными моментами 4 и ориентированными в одном направлении напряженностью электрического поля, приложенного к склеиваемым деталям.

Клеевое соединение получено склеиванием стальных пуансонов эпоксидным клеем марки ЭД – 20 представлены зависимостью 1 (рис.5) а и эластомером марки Н88 зависимостью 2 (рис. 5 а).

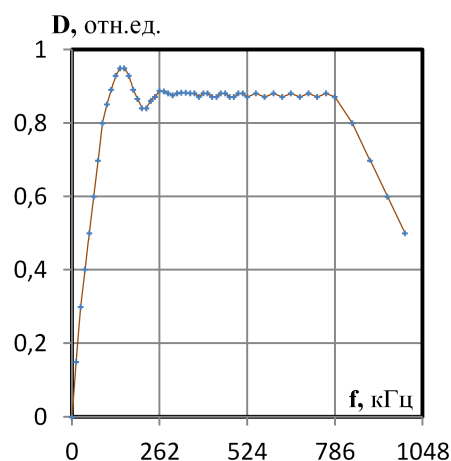
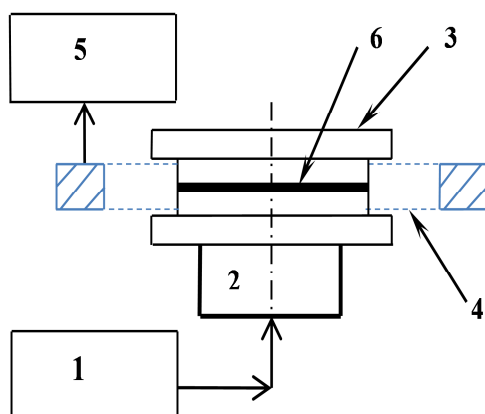
Исследования зависимости электромагнитного излучения от прочности клеющего соединения проводились на установке [1] (рис. 4 а).

Установка состоит из акустической – возбуждающей и электромагнитной – регистрирующей частей. Акустическая часть установки представляет собой генератор прямоугольных электрических импульсов, нагруженный акустическим широкополосным импульсным пьезопреобразователем. Электрические импульсы имеют амплитуду, равную 250 В, частота следования импульсов 50 Гц. Импульсы характеризуются длительностью $1,6 \cdot 10^{-6}$ с и имеют передний фронт 10^{-7} с. Широкополосный пьезопреобразователь подбирали таким образом, чтобы коэффициент двойного электромеханического преобразования D (рис.4 б) имел зависимость от частоты акустического поля, перекрывающей частотный диапазон образца.

Электромагнитный сигнал регистрировали магнитной антенной. Для исключения регистрации электромагнитных помех использовали магнитную антенну, коаксиально расположенную по отношению к образцу. Такое расположение антенны позволяло

регистрировать только электромагнитное излучение образца, так как все остальные сигналы взаимно уничтожались. Отображение информации выполняли на осциллографе или анализаторе спектра. Осциллограммы или спектрограммы (рис.3.а) документировались для последующей математической обработки.

Образцы, прошедшие акустоэлектромагнитное тестирование, подвергались механическим испытаниям на прочность клеевого соединения. Механические испытания заключались в разрушении клеевого соединения растягивающим механическим напряжением. Полученные результаты регистрировались и сопоставлялись с результатами акустоэлектромагнитного тестирования.



аб

Рис. 4 а – Схема установки для изучения акустоэлектромагнитного метода, не разрушающего контроля клеевых соединений. 1 – генератор электрических импульсов, 2 – излучатель акустических волн, 3 – образец склеенный из двух пуансонов, 4 – антенна, регистрирующая электромагнитное излучение, 5 – регистрирующее и отображающее устройство, 6 – клеевой слой активированный кристаллитами сегнетокерамики, б – зависимость коэффициента двойного электромеханического преобразования D от частоты акустического поля излучаемого излучателем акустических колебаний, б – зависимость коэффициента двойного электромеханического преобразования D от частоты акустического поля, применяемой в работе излучателей упругих волн.

На основании экспериментальных результатов исследовалась зависимость между электромагнитным излучением и прочностью на разрыв активированного клеевого соединения. Приняли в качестве независимого аргумента прочность при растяжении и исследовали зависимую величину, площадь спектра электромагнитного излучения. На рис.5 а представлены результаты испытаний 100 образцов. 50 образцов (рис.5 а) (зависимость 2) были склеены эпоксидным полимером марки ЭД – 20, активированным кристаллитами сегнетокерамики марки ЦТС – 23, которые были предварительно ориентированы постоянным электрическим полем и зафиксированы в таком положении полимеризацией клеящего полимера. 50 других образцов (рис.5 а) (зависимость 1) были склеены эластомером марки Н88, активированным кристаллитами сегнетокерамики марки ЦТС – 23, которые были ориентированы постоянным электрическим полем и зафиксированы в таком положении полимеризацией клеящего полимера. Из большого многообразия характеристик электромагнитного сигнала выбрали площадь его спектров качества зависимой величины.

Регрессионный анализ показал, что коэффициент корреляции для эластичного клеящего полимера составил не ниже 0,6, а уравнение регрессии имеет слабо выраженную нелинейность. Зависимость носит нарастающий характер, т.е. с увеличением прочности на разрыв увеличивается площадь спектра электромагнитного сигнала. Для клеящих

полимеров с низким коэффициентом эластичности (ЭД –20) коэффициент корреляции составил не ниже 0,66 и имел сильно выраженную обратную квадратичную зависимость.

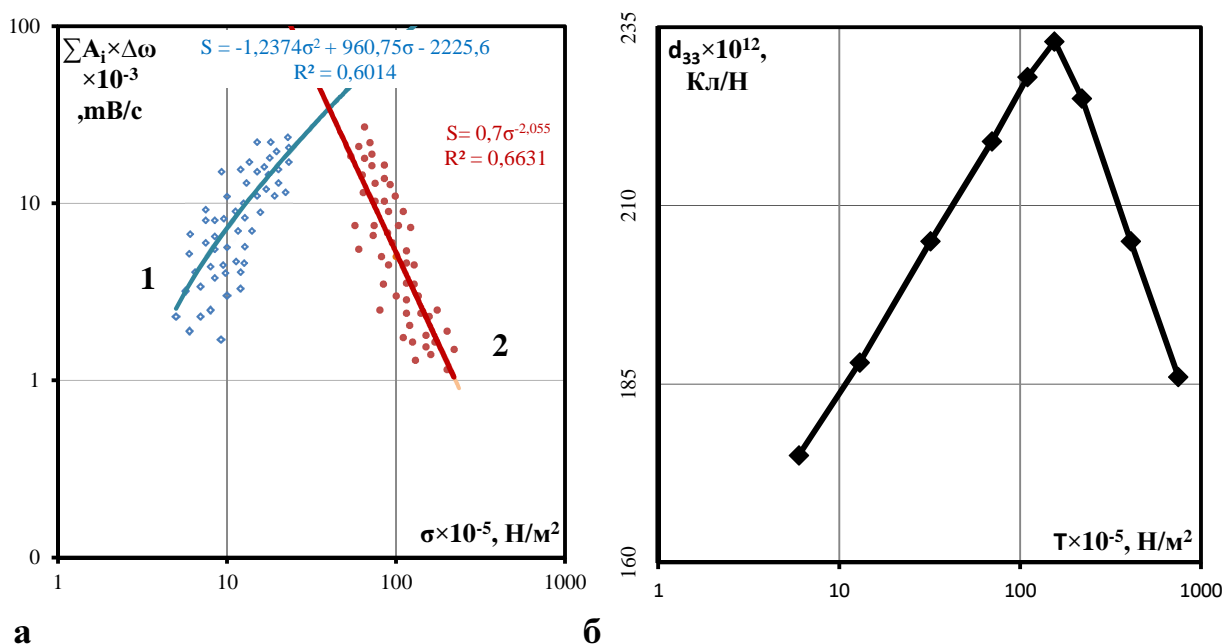


Рис. 5 **а** – Результаты экспериментальных исследований, выполненных акустоэлектромагнитным методом, для эластомера типа Н88 – левая линия и стеклополимера типа ЭД – 20 . **б** – результаты исследований зависимости пьезомодуля от всестороннего сжатия сегнетокерамики эластомера марки ЦТС – 23, выполненные в работе [8].

В заключение можно отметить, что такое поведение зависимости электромагнитного сигнала от прочности клеевого соединения можно объяснить свойствами кристаллитов сегнетокерамики марки ЦТС – 23.

Сопоставляя экспериментальные результаты всестороннего сжатия сегнетокерамических материалов марки ЦТС – 23, где зависимой величиной является пьезомодуль d_{33} (аналог площади спектра электромагнитного излучения), от всестороннего сжатия, что является полным аналогом остаточных напряжений в клеящем полимере, можно прийти к заключению, что полученные нами экспериментальные результаты сопоставимы, как по масштабу, так и по физической природе, с наблюдаемым явлением.

Следовательно, изучение остаточных напряжений акустоэлектромагнитным методом презентабельно и дает хорошие результаты для прогноза адгезионной прочности клеевых соединений с широким классом клеящих полимеров.

Список литературы

1. А. с. СССР № 1352348, МКИЗ G01N29/04. Способ контроля клеевых соединений композиционных конструкций. – Кузнецов В.П. – Оpubл. БИ 1985 г. № 42/ (СССР).
2. А. с. СССР № 1054769, МПК⁵G01N29/04/ Способ контроля клеевых соединений в многослойных неметаллических конструкциях. Боровиков А.К., Ворожцов Б.И., Кузнецов В.П., Омаров К.М., Тонконогов М.П., Шилин П.Е. – Оpubл. БИ 1983 г. № 42/(СССР).
3. А. с. СССР № 979987, МПК⁵G01N29/04/ Способ контроля соединений в многослойных конструкциях. Тонконогов М.П., Омаров К.М., Ворожцов Б.И. – Оpubл. По заявке №3297364 08.06.1981.

4. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. – М.: Химия, 1974. – 392 с.
5. Дерягин Б.В. Адгезия твердых тел. – М.: Наука, 1983. – 279 с.
6. Кузнецов В.П. Акустоэлектромагнитный метод контроля прочности клеевых соединений / Дис. на соис. уч. степ. к.т.н. – ТПИ, Томск, 1989. – 155с. : ил. <http://www.twirpx.com/file/272241/>, <http://www.vpk555.narod.ru/akustoelektro.html/>.
7. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.: ил.
8. Сложевская Е.Г. и др. Пьезоэлектрическая керамика. – И.: Сов. Радио, 1971.– 200 с.
9. Vikerman J.J., The Science of Adhesive joints New. – Academic Press New-York and London: Library of Congress Catalog Card. Wamber 60-16906 Prinfind in the Unifed Stafes of Amerika. 1961.

Рецензенты:

Поплавной А.С., д.ф.-м.н., профессор, заслуженный деятель наук РФ, зав. кафедрой теоретической физики «Кемеровского государственного университета», г. Кемерово.

Хмелев В.Н., д.т.н., профессор, Заслуженный изобретатель РФ, Заместитель директора по научной работе Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, г. Бийск. Алтайский край.