

УДК 673.6.0

DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-87-90

В. А. Усынин, аспирант

А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СОЕДИНЕНИЙ С КОМПАУНДОМ

В данной научной статье проведен анализ различных методов неразрушающего контроля для обоснования их применения в качестве инструмента исследования прочности клеевых соединений с композиционными материалами. Приведены прочностные свойства соединений с натягом, в зону сопряжения которых введены компаунды, с плохо изученными адгезионными свойствами, проведены серии контрольных экспериментов на основе неразрушающих и разрушающих методов, дана оценка напряженному состоянию сопряжения и прилегающих к ней слоев. Необходимые свойства клеевого соединения зависят от множества факторов, одним из которых является взаимодействие с особыми участками склеиваемых поверхностей; другой – среднее значение контактного давления, которое требуется для максимального прилегания поверхностей.

Независимо от конструктивных параметров (соединение с зазором или соединение с натягом) способ сборки обеспечивает гарантированное заполнение пространства между сопрягаемыми деталями композиционным материалом, подаваемым в зону сопряжения различными способами. Для обеспечения дальнейшего применения соединений необходимо установить взаимосвязь прочности, определенной экспериментально, и показаний приборов при неразрушающем методе контроля. Такой подход позволит расширить область применения как клеевых соединений, так и соединений с прослойкой из наноструктурированного компаунда. Сборка соединений может осуществляться при относительном смещении собираемых деталей в условиях жидкостного трения, обеспеченного материалом клеевого компаунда.

Проведен выбор наиболее оптимального, с точки зрения практики, метода контроля клеевых соединений с натягом с композиционной прослойкой. Показано преимущество метода введения сегнетоэлектрических добавок в клеевой слой для оценки прочностных характеристик клеевых соединений при использовании акустоэлектромагнитного метода.

Ключевые слова: соединение, прочность, адгезия, велосимметрический метод, импульсный акустический метод, сплошность, корреляция, сегнетокерамика.

Для выяснения прочностных свойств соединений с натягом, в зону сопряжения которых введены компаунды [1] с плохо изученными адгезионными свойствами, необходимо провести серии контрольных экспериментов на основе неразрушающих и разрушающих методов, дать оценку напряженному состоянию границы сопряжения и прилегающих к ней слоев. Конечным решением задачи о контроле соединений является ее количественная оценка, получение по плоскости склейки топографии ее геометрической характеристики (рис. 1) с последующим переходом к изучению напряженно-деформированного состояния составных частей соединения и его прочности.

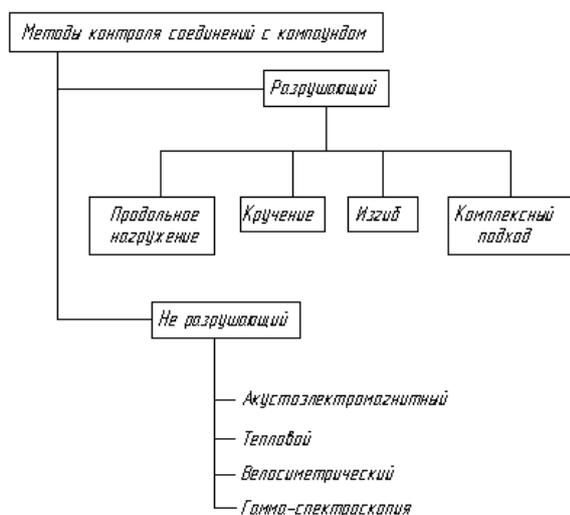


Рис. 1. Методы контроля соединений

В процессе создания соединения клеевой материал является составляющим для фиксации одной детали относительно другой, при этом он создает физические, химические и физико-химические связи. Необходимые свойства клеевого соединения зависят от множества факторов, одним из которых является взаимодействие с особыми участками склеиваемых поверхностей; другой – среднее значение контактного давления, которое требуется для максимального прилегания поверхностей.

Особенностью сборки таких соединений является то, что в качестве деталей применяется маложесткий полый цилиндр, выполненный из сплава алюминия, в качестве охватываемой детали могут выступать втулки, жесткость которых может в несколько раз превышать жесткость охватываемой детали или быть ей равной. Независимо от конструктивных параметров (соединение с зазором или соединение с натягом) способ сборки обеспечивает гарантированное заполнение пространства между сопрягаемыми деталями композиционным материалом, подаваемым в зону сопряжения различными способами [2]. После затвердения материала необходимо проконтролировать прочность композиционных клеевых соединений методами неразрушающего и разрушающего контроля. Такой подход обусловлен необходимостью сбора статистических данных и определения корреляционных зависимостей между данными методами. При разрушающем контроле эксперимент производится на разрывной машине РМ-50. Для обеспечения дальнейшего применения соединений необходимо установить взаимосвязь прочности, определенной экспериментально, и показаний приборов при неразрушающем методе контро-

ля. Исследования проводятся в соответствии с теорией планирования научного эксперимента. Такой подход позволит расширить область применения как клеевых соединений, так и соединений с прослойкой из наноструктурированного компаунда.

Сборка соединений может осуществляться при относительном смещении собираемых деталей в условиях жидкостного трения, обеспеченного материалом клеевого компаунда (таблица, рис. 2), или с зазором.

Случай сборки способов соединений

№ п/п	С клеевым контактом	№ п/п	Без клеевого контакта
1	F	5	F = 0
2	F + P2	6	P2
3	F + P1	7	P1
4	F + P1 + P2	8	P1 + P2

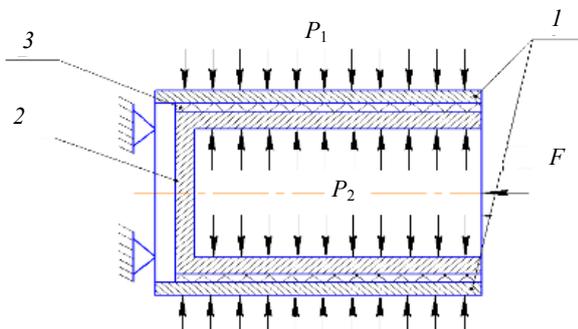


Рис. 2. Особенности сборки соединений с прослойкой: 1 – охватываемая деталь; 2 – охватываемая деталь; 3 – участок склеиваемых поверхностей; F – сила; P₁ и P₂ – давление

Для определения прочности рассматриваемой группы соединений необходимо провести анализ методов исследований адгезионных материалов.

Традиционным методом для изучения адгезионных материалов является акустоэлектромагнитный метод [3]. С помощью этого метода можно определить эффективность применения материалов для адгезионных соединений (композиционных материалов).

В более широком понятии этот метод можно назвать методом неразрушающего контроля, применяющим упругие акустические колебания, волны звуковых и ультразвуковых частот до 1 Гц.

Чувствительность физико-механических характеристик к изменению адгезии между компонентами рассматривается в литературе [4]. Результатом исследования является оценка по пятибалльной системе, оценивается выявляемость дефектов нарушения сплошности клеевых соединений; акустическим и радиоволновым методом – отлично; оптическим и тепловым – хорошо; радиационным – удовлетворительно. Эти результаты получены для простых композиционных материалов. Тепловые и радиоволновые методы не нашли своего применения по причине низкой статистической зависимости между двумя и более случайными величинами. Но эти недостатки имеются и у акустического метода [5]. В данной работе показана связь скорости распространения акустической волны v_0 с прочностью материала R в виде зависимости:

$$R = 0,25 \times \rho^2 \times \gamma \times v_0^4, \quad (1)$$

где $\rho = m/r_0^2$, m – масса вещества; r_0 – расстояние между атомами вещества; γ – коэффициент меж-атомного смещения. На основании сил межатомного взаимодействия, справедливого для идеальной среды, где нет дефектов, справедлива следующая зависимость:

$$f(x) = \beta x - \gamma x^2, \quad (2)$$

где β – жесткость системы; x – смещение атома.

Поскольку под воздействием акустической волны происходит некоторое смещение атомов вещества прослойки, то зависимости (2) и (1) становятся связанными между собой. Так как величина смещения незначительна, то при дифференцировании по времени выражения (2) получим v – скорость колебаний атомов материала прослойки, но эта скорость плохо коррелирует с v_0 из-за неравномерной жесткости конструкции и демпфирования колебаний материалом прослойки, что снижает в данном случае область применимости выражения (1). Поскольку в выражении (1) величина v_0 находится в 4-й степени, то корреляция между прочностью и акустическими параметрами значительно снижается.

Следующий рассматриваемый – импульсный акустический метод, основанный на измерении интервала времени между моментами подачи определенного импульса переменного тока и приема отраженного импульса от места повреждения [6]. В работе описан принцип и устройство установки для контроля адгезионной прочности материалов с акустическими показателями, а точнее – отсутствием многократного отражения ультразвука на пути к контролируемому клеевому слою, что дает более полные корреляционные зависимости. Чувствительность этих методов зависит от свойств соединений [7], где при контроле с применением жесткой подложки, на поверхность которой наклеен металлический лист толщиной 3,0 мм, имеющиеся дефекты более 40 мм не выявляются.

Существует и так называемый велосимметрический метод, который использует влияние дефектов на скорость распространения упругих волн в испытуемых образцах. Но эти волны не позволяют контролировать изменение адгезионной прочности. Аналогично при использовании методов свободных колебаний реверберационного эхоимпульсного метода невозможно получить зависимость сигнала отклика от адгезионной прочности [8]. Поэтому прогнозирование работоспособности этими методами затруднено.

Широкое распространение получили тензодатчики, фиксирующие деформацию подложки [9], по которой в дальнейшем оценивают напряжения.

Способы усиления соединений.

Измерения как экспериментальные процессы разнообразны. Это объясняется множеством экспериментальных величин, различным характером и методиками измерения величины. Эти измерения можно разделить на прямые и косвенные. К прямым методам можно отнести методы спектроскопии [10]. Этот метод применяется в дефектоскопии, за счет добавления в адгезив различных примесей, с помощью

него можно оценивать адгезионную прочность соединения, применяя акустоэлектромагнитный метод контроля прочности клеевых соединений [11]. К недостаткам косвенных методов можно отнести:

Отсутствие явно выраженных связей между измерительным прибором и механической прочностью.

Низкий коэффициент корреляции клеевого шва 0,10...0,15 мм.

Способ контроля соединений [12] получил перспективное решение, основанное на введении в клеевое соединение частиц, чувствительных к механическим напряжениям и способных преобразовывать энергию деформации в другие виды энергии пропорционально своему состоянию.

Физическая модель зависимости между прочностью соединения и электромагнитным излучением когерентной кооперативной системы модифицирующих адгезив частиц сегнетокерамики [13]. Зависимость была получена для связывания прочности клеевого соединения с излучением электромагнита:

$$\sigma_{ад.с} = (\sigma_{к.с}/\gamma_c \times \delta_c - A/\delta_c) - B/\delta_c \times E_0^2, \quad (3)$$

$$\sigma_{ад.э} = (\sigma_{к.э}/\gamma_э \times \delta_э + A/\delta_э) + B/\delta_э \times E_0^2, \quad (4)$$

где c – эпоксидный адгезив; $э$ – эластичный адгезив; γ – коэффициент концентрации напряжения, обусловленный различием в механических свойствах адгезива с субстратом; δ – коэффициент концентрации напряжений, обусловленный макроскопической неоднородностью субстрата; σ_k – когезионная прочность клеящего полимера. Коэффициенты концентрации напряжений, обусловленные макроскопической неоднородностью склеиваемых субстратов, равны и не зависят от типа адгезива ($\delta_c \approx \delta_э$, $\gamma_c \approx \gamma_э$).

$B = \frac{2\beta}{C(ab)^2} R^6$, $A = \left(\frac{\alpha' \Delta T}{C} \right)$ и представляют величины,

характеризующие свойства частиц кристаллитов сегнетокерамики КС, где $\alpha' = \frac{d\alpha}{dT}$ – постоянный

термодинамический коэффициент системы; C – теплоемкость материала кристаллита, $\Delta T = T - T_0$, а $T < T_0$, T_0 – температура фазового перехода частицы КС второго рода; β – термодинамическая постоянная (положительная величина); b – амплитуда ультразвуковых колебаний на диполе; a – заряд элементарной ячейки; R – расстояние от источника электромагнитного излучения ЭМИ до регистрирующего их датчика; E_0^2 – величина характеризует квадрат амплитуды ЭМИ, зависящий от α – остаточные напряжения в клеящем полимере.

Выражения показывают, что чем прочнее клеевое соединение, тем меньше амплитуда электромагнитного излучения. Для этого способа склеиваемые изделия выдерживают в электрическом поле в процессе полимеризации адгезива. Клеевой шов становится однородным, это позволяет диполям излучать ЭМИ когерентно и кооперативно, тем самым усиливать результирующие показания прибора, используя при этом акусто-электромагнитный метод неразрушающего контроля прочности клеевых соединений. При

проработке этого метода было доказано, что амплитуда электромагнитного излучения появляется при ориентации дипольных моментов. В дальнейшем были найдены другие способы создания кооперативного эффекта, связанного с созданием в макроскопических масштабах описываемой системы.

Проведенный анализ показал, что акустоэлектромагнитный метод с активацией адгезива частицами и создания в нем когерентной кооперативной системы этих частиц, на наш взгляд, является наиболее точным и может применяться для исследования свойств композиционных материалов в соединениях с натягом. Прочность адгезионного соединения возможно определить путем контроля механических напряжений, возникающих в процессе формирования адгезионных соединений.

Библиографические ссылки

1. Теория и технология гидропрессовых соединений : монография / А. В. Щенятский, И. В. Абрамов, Э. В. Сонович и др. – Ижевск : Изд-во ИЖГТУ, 2012. – 496 с. : ил.
2. Усынин В. А., Щенятский А. В. Многослойные прессовые соединения с прослойкой из компаунда // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2. – С. 55–58.
3. Кузнецов В. П. Акустоэлектромагнитный метод контроля прочности клеевых соединений : дис. ... канд. техн. наук. – Томск : Томский политехнический институт, 1989. – 155 с.
4. Зинченко В. Ф. Чувствительность некоторых физико-механических характеристик к изменению адгезии между компонентами стеклопластика // Механика композиционных материалов. – 1983. – № 3. – С. 395–399.
5. Wand S., Andler H. Ultrasonic studies of strength – related properties of graphite/ S.Wand, H. Andler // Rev. Progr. Quant. Nondestruct. Evol. Prac. 10 Annu. Rev., Sata Cruz, Cofif, Aug. 7-12, 1983, Vol 3B. New-Jork, London. – 1984. – P. 1211–1219.
6. Голобородько М. Н. Ультразвуковой контроль прочности углерод-углеродных композиционных материалов / М.Н. Голобородько, В. К. Капралов, В. А. Челноков // Заводская лаборатория. – 1983. – № 1. – С. 48–49.
7. Ланге Ю. В. Фазовый вариант акустического импеданского метода дефектоскопии // Дефектоскопия. – 1968. – № 3. – С. 1–9.
8. Wuich W. Problem der UltraschallpZufung von Kunststoffen und Klebeverbindungen// Massen und Prüfen, 1985, No. 7, p. 392; No. 8, pp. 394–395.
9. Путькин Л. Н., Драновский М. Г., Поркмеян Х. Р. Клеи и их применение в электротехнике. – М. : Энергоиздат, 1983. – 136 с.
10. Chapman G. B. Anon destructive meyhod of evaluating adhesive bond strength in Liber glass rlihreford plastic assembles // Joining composite Mater. Symp., Minneapolis, Minn., 16 Apr., 1980, Philadelphia, Pa, 1981, pp. 32–60.
11. А. с. 97998 СССР, МКИ³. Способ контроля соединений в многослойных конструкциях / Б. И. Ворожцов, М. П. Тонконогов, К. М. Омаров. – 3 с.
12. Кузнецов В. П. Физическая модель зависимости между прочностью адгезионного соединения и электромагнитным излучением когерентной кооперативной системы модифицирующих адгезив частиц сегнетокерамики // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5. Ч. 3. – С. 497–502.
13. Кузнецов В. П., Фадеев Ю. А., Кулешов В. К. Акустоэлектромагнитный метод неразрушающего контроля прочности клеевых соединений // Современные проблемы науки и образования. – 2011.

* * *

V. A. Usynin, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

A. V. Shchenyatsky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

Methods for Research of Joints with Composite Materials

This scientific paper deals with the analysis of various non-destructive testing methods in order to justify their application as the tool for investigating the strength of adhesive joints in composite materials. Strength characteristics are given for the press-fit joints with composites having poorly studied adhesive properties. A number of test experiments is carried out by destructive and non-destructive methods; the stressed state of the joint area and its adjacent areas is assessed. Necessary properties of the adhesive joint depend on the variety of factors, one of them is the interaction with specific areas of the adhesive surfaces, the other one is the average value of contact pressure that is required for the maximum contact of surfaces.

Independently on the design parameters (clearance joint or press-fit joint), the assembly method provides for the guaranteed filling of the space between contacting parts by the composite material supplied into the contact zone by various methods. In order to provide the further application of joints, it is necessary to establish the interaction between the strength that is determined experimentally and readings of devices at non-destructive testing. Such an approach will allow for extending the application area of both adhesive joints and joints with the layer of nano-structured composite. The assembly of joints can be carried out at a relative shift of the parts to be assembled under liquid friction provided by the adhesive composite.

The method for controlling the adhesive press-fit joints with the composite layer which is optimal from the practical point of view has been chosen.

The advantage of the method for introducing the ferroelectric additives into the adhesive layer is shown when assessing the strength characteristics of adhesive joints at application of the acoustic electromagnetic method.

Keywords: joint, strength, adhesion, cyclic symmetrical method, pulse-acoustic method, continuity, correlation, ferroelectric ceramics.

Получено: 20.02.17