

АДГЕЗИЯ В КЛЕЕВОМ СОЕДИНЕНИИ: МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кузнецов В. П.¹, Баумгартэн М. И.²

¹ ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: vpk-51@mail.ru.

² ФГОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева», г. Кемерово, Россия (650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: bmi45@mail.ru

Актуальность работы обусловлена проблемной ситуацией, возникающей при определении прочности клеевых соединений композиционных материалов методами неразрушающего контроля (НК). В связи с более широким применением клеевых конструктивных деталей в современном строительстве многие методы НК практически неприменимы. В литературе не всегда даются рекомендации по применению того или иного метода НК к конкретному изделию. В работе делается попытка заполнить этот пробел. Цель работы: сравнение различных методов НК для обоснования выбора метода исследования адгезионной прочности клеевых соединений в композиционных материалах; анализ некоторых видов исследований адгезионной прочности для применения в НК; выбор наиболее оптимального с точки зрения практики метода контроля клеевых композиционных соединений. Методы исследования: анализ методов исследований прочностных свойств клеевых соединений композиционных материалов, с выявлением недостатков каждого метода и области его использования; сравнение методов исследований на предмет их пригодности к определению прочностных свойств клеевых соединений композиционных материалов; синтез полученных при обзоре данных для вычленения наиболее пригодного метода оценки прочностных свойств клеевого соединения композиционных материалов; теоретическое обоснование преимуществ акустоэлектромагнитного метода по сравнению с другими. Результаты: проведен анализ различных методов исследований прочностных свойств клеевых соединений композиционных материалов при неразрушающем контроле, выявлены их положительные и отрицательные стороны; показано преимущество метода введения сегнетоэлектрических добавок в клеевой слой для оценки прочностных характеристик клеевых соединений при использовании акустоэлектромагнитного метода; показано, что для усиления информационной способности метода сегнетоэлектрические добавки предварительно поляризованы. Выводы: контроль прочности адгезионного соединения возможен через контроль механических напряжений, возникающих в процессе формирования адгезионного соединения; из рассмотренных методов НК наиболее информативными являются акустоэлектромагнитные с активацией адгезива частицами и создания в нем когерентной кооперативной системы из этих частиц.

Ключевые слова: композиционные материалы; остаточные напряжения; клеевое соединение; адгезия; неразрушающий контроль; акустоэлектромагнитный метод.

ADHESION OF ADHESIVE JOINTS: RESEARCH METHODS

Kuznetsov V. P.¹, Baumgarten M. I.²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Leninaave., 30), e-mail: vpk-51@mail.ru.

² Kuzbass State Technical University of T. F. Gorbachev, Kemerovo, Russia (650000, Kemerovo, str. Vesennaya, 28), e-mail: bmi45@mail.ru

Relevance of the work is due to a problem situation that arises in the determination of bond strength of composite materials by non-destructive testing (NDT). Due to the wider use of laminated structural components in modern construction methods, many NC virtually inapplicable. The literature is not always given guidance on the application of a method to NK specific product. The paper attempts to fill this gap. Objective: To compare the different NDT methods to justify the choice of research method of adhesive strength of adhesive joints in composite materials; and analysis of certain types of research adhesion strength for nondestructive testing for use in NC; choosing the most optimal from the point of view of the practice of the method of control of adhesive composite connections. Methods: analysis of the research methods of strength properties of adhesive joints of composite materials with identifying weaknesses of each method and field of use; comparison of research methods for their suitability to the determination of strength properties of adhesive joints of composite materials; synthesis of data obtained in the survey for the isolation of the most suitable method for assessing the strength properties of adhesive bonding of composite materials; theoretical justification benefits akustoelektromagnit's method compared with others. Results: The analysis of the various methods of research strength properties of adhesive joints of composite materials in non-destructive testing, revealed their positive and negative aspects; The advantage of the method of introduction of ferroelectric additives in the adhesive layer to evaluate the

strength characteristics of adhesive joints using akustoelektromagnit's method; shown that information to enhance the ability of the method of pre- polarized ferroelectric additives .Conclusions: The control of the strength of adhesive bonding is possible through the control of mechanical stresses arising in the process of adhesive bonding; of the considered NDT methods are most informative akustoelektromagnit'smetod with the activation of the adhesive particles and create in it a coherent cooperative system of these particles.

Keywords: composite materials; residual stresses; adhesive bonding; adhesion; non-destructive testing; akustoelektromagnit's method.

Традиционные методы исследования адгезионных соединений и композиционных материалов

Показанный методологический подход анализа места акустоэлектромагнитного метода [14,15] позволяет найти границы его применения, в рамках которых рассмотрим методы исследования, пригодные для адгезионных соединений, а значит и для композиционных материалов. Разработанные и разрабатываемые к настоящему времени методы и средства неразрушающего контроля клеевых соединений композиционных изделий позволяют выявлять главным образом зоны полного отсутствия склеивания или нулевой адгезии. Это связано с тем, что факторы, «зашумляющие» полезный сигнал в композиционных изделиях, превышают полезную информацию. Кроме того, многие методы просто не имеют функциональной (и даже, сколько-нибудь существенной корреляционной) связи с адгезионной прочностью. Так, например, в работах [9] по пятибалльной системе оценивается выявляемость дефектов типа нарушения сплошности клеевых соединений: акустическими и радиоволновыми методами – отлично; капиллярными, тепловыми и оптическими – хорошо; радиационными – удовлетворительно.

Следует отметить, что эти оценки даны для контроля немногослойных изделий или простых композиционных материалов. Выявляемость дефектов типа непрочекля в работе [26] акустическими методами оценивается только хорошо, другими методами этот вид дефектов не выявляется. По этой же системе применимости различных видов неразрушающего контроля для оценки физико-механических свойств клеевых соединений в многочисленной литературе [20, 26] приводятся удовлетворительные результаты, полученные с помощью тепловых, радиоволновых и акустических методов. Следует отметить, что тепловые и радиоволновые методы не нашли широкого применения из-за низких корреляционных соотношений между механическими свойствами адгезионных соединений и измеряемыми в методах параметрами [19]. Этими недостатками страдают акустические методы, для которых в публикации [30] показана связь скорости распространения акустических волн v_0 с прочностью материала R в виде:

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

где $\rho = m/r_0^2$, m – масса вещества, r_0 – расстояние между атомами вещества, γ – коэффициент ангармоничности межатомного смещения.

Необходимо учесть, что эти выражения, полученные на основании гипотезы прочности и на основании учета сил межатомного или межмолекулярного взаимодействия, справедливы для случая идеальной среды, где нет дефектов и явлений, описанных в работе [5], искажающих зависимость:

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

где β – жесткость системы, x – смещение атома, что соответственно для неидеальной среды делает выражение (1) неработающим и снижает корреляцию между прочностью и акустическими параметрами до минимально возможной отметки.

Так, например, импульсный акустический метод позволяет выявлять, главным образом, дефекты типа непроклея. В работе [6] описан способ и установка для контроля адгезионной прочности материалов с хорошими акустическими показателями, а именно, отсутствием многократного отражения ультразвука на пути к контролируемому клеевому слою, что соответственно дает хорошие корреляционные зависимости. Кроме того, чувствительность этих методов зависит от свойств контролируемых конструкций [21], где при контроле в случае с абсолютно жесткой подложкой, на которую наклеен алюминиевый лист толщиной более 2,5 мм, дефекты диаметром 30 мм уже не выявляются, для стальных листов этот предел еще меньше – 1,5 мм. При контроле конструкции с подложкой небольшой жесткости или из материалов с малым модулем упругости, например, пенопласты, предельная толщина наклеиваемого листа, через который осуществляется контроль наличия непроклеев, существенно меньше [11].

Другие, например, велосиметрический метод, использующий влияние дефектов на скорость распространения упругих волн в изделии, не позволяют контролировать изменение адгезионной прочности, так как не происходит изменения пути распространения ультразвука [31]. Аналогично при применении методов свободных колебаний реверберационного эхо-импульсного метода, акустической эмиссии и т.п. невозможно получить зависимость сигнала отклика от адгезионной прочности в реальных и модельных изделиях [23]. Поэтому прогнозирование работоспособности этими методами композиционных материалов и изделий на их основе не представляется возможным, по причине невозможности получения топографии адгезионной прочности по плоскости их склейки. Как следствие этой неудачи, требуется изучение адгезии как явления с целью выявления эффектов, влияющих на адгезионную прочность во всем многообразии этих соединений.

Способы измерения остаточных механических напряжений как методы неразрушающего контроля

Остаточные напряжения в прозрачных изделиях определяют оптическими [27] методами, сущность которых заключается в том, что под действием напряжений возникают

деформации, приводящие к изменению межатомных расстояний и, как следствие этого, к изменению оптических характеристик изделия.

Эти методы не нашли широкого применения, т.к. для их реализации требуются только прозрачные изделия, которых практически нет среди композиционных материалов. Поэтому в непрозрачных изделиях остаточные напряжения регистрируют по изменению параметров кристаллической решетки рентгенографическими и электроннографическими методами. Эти методы способны измерять механические напряжения только в кристаллических субстратах, склеиваемых любыми клеями, подчеркнем, на небольших глубинах [4].

Широкое распространение получили тензометрические метод, либо тензодатчики, которые фиксируют деформацию подложки и соответственно оценивают по ним напряжения [24]. Не менее интересными являются акустические методы, основанные на измерении соотношения скоростей продольных и поперечных волн при распространении в напряженных кристаллических телах [2].

Но, несмотря на кажущуюся простоту, ни один из этих методов не нашел сколько-нибудь широкого применения при контроле адгезионных соединений, т.к. реальные изделия обладают большими отклонениями от идеальной структуры кристаллов. Реальные изделия зачастую имеют значительную глубину залегания контролируемого слоя от доступной поверхности и на пути к контролируемому клеевому слою бывают различные отклонения, вызванные отступлениями от технологии при изготовлении. Поэтому все эти методы неприменимы для контроля реальных изделий и требуют дальнейшего совершенствования.

Методы активации клеевых соединений добавками

В зависимости от информации, получаемой в методах неразрушающего контроля, их можно разделить на – косвенные и прямые. К косвенным относятся методы, в которых о прочности адгезионного соединения судят по акустическим свойствам, диэлектрическим характеристикам, другим физическим величинам, косвенно связанным с энергией и силой связи между молекулами субстрата и адгезива. Молекулы субстрата и адгезива находятся в силовом поле соседних молекул. В зависимости от состава и силового поля соседних молекул силовые характеристики молекул будут меняться [12]. К прямым методам можно отнести рассматриваемые в [29] методы ядерной гамма-спектроскопии (Мёссбауэровская спектроскопия) и радиоспектроскопии с помощью электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). В основу этих способов, применительно к дефектоскопии, положено введение различного рода добавок в состав адгезива. Если добавкой является некоторое количество атомов Мёссбауэровского изотопа, то, изучая резонансные спектры поглощения, можно судить об адгезионной прочности [16], как по силе межмолекулярной связи (Ван-дер-Ваальсовской, химической, полимерной), так и по глубине диффузии молекул клея. Кроме

того, по интенсивности излучения с площади контроля можно судить о толщине клеевого слоя, что позволяет получать дополнительную косвенную информацию, по которой можно судить об адгезионной прочности.

В случае ЭПР возможным становится распределение в области клеевого шва не изотопных ядер, а парамагнитных частиц и их свободных радикалов.

К недостаткам косвенных методов можно отнести отсутствие однозначной связи между механической прочностью и измеренными прибором акустическими, диэлектрическими и другими параметрами клеевого шва с низкими коэффициентами корреляции 0,10–0,15. Хотя следует обратить внимание, что методов измерения механической прочности, сопоставимых с адгезионной прочностью, в настоящее время нет [8, 10, 13, 17].

К недостаткам прямых методов можно отнести отсутствие информации о реализации их, хотя бы для модельных образцов, имитирующих реальные изделия. Мёссбауэровская спектроскопия сдерживается сильным поглощением Мёссбауэровских квантов (имеющих энергию $E=14,4$ кЭв), способных в нормальных условиях давать полезную информацию, а также длительностью измерения одной точки контроля, не говоря о получении топографии адгезионной прочности. Аналогичные недостатки имеет ЭПР-спектроскопия.

В этой связи, с учетом того, что самым информативным параметром об адгезионной прочности является остаточное напряжение и дефекты, наиболее перспективными являются методы введения в клеевое соединение микротензодатчиков. Изготовление и введение в адгезионное соединение микротензодатчиков традиционной технологией не представляется реальным не только для массового производства, но и для штучных изделий, так как требует ювелирной технологии их изготовления и введения в больших количествах. С другой стороны, их применение в таком виде существенно удорожает технологию изготовления изделия и уничтожает экономический и т.п. эффект от применения адгезионных соединений, делая их в сравнении с традиционными неконкурентоспособными.

Поэтому, наиболее перспективными в этом отношении оказались методы введения в клеевое соединение частиц, чувствительных к механическим напряжениям и способным трансформировать зондирующую энергию в другой вид энергии пропорционально своему состоянию, т.е. действию на них механических напряжений [1]. К таким добавкам можно отнести ферроматериалы, сегнетоматериалы [3] и другие материалы, чувствительные к механическому напряжению.

Метод, основанный на введении в адгезив хаотически ориентированных кристаллитов сегнетокерамики, описанный в работе [1], по результатам экспериментальных исследований оказался непригоден из-за отсутствия отклика от такой системы частиц. Этот эффект можно

объяснить хаотическим наложением электромагнитного излучения частиц с самопроизвольным ориентированием дипольных моментов их кристаллитов, введенных в адгезив и возбуждаемых гармоническими акустическими волнами [17]. Этот хаос приводит к уничтожению полезного сигнала и регистрации шума. То, что полезный сигнал из клеевой среды, активированной частицами кристаллитов сегнетокерамики и предварительно созданной из них когерентной кооперативной системы, который содержит информацию об остаточных напряжениях в адгезиве, может быть получен при излучении в изделие акустических колебаний, показано теоретически и экспериментально в работах [16,17].

Была получена зависимость [17], связывающая прочность клеевого соединения с его электромагнитным излучением, стимулированным акустическими колебаниями:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{адс}} &= (\sigma_{\text{кс}}/\gamma_{\text{с}}\delta_{\text{с}} - A/\delta_{\text{с}}) - B/\delta_{\text{с}} E_{\theta_{\text{с}}}^2, & (3') \\ \sigma_{\text{адэ}} &= (\sigma_{\text{кэ}}/\gamma_{\text{э}}\delta_{\text{э}} + A/\delta_{\text{э}}) + B/\delta_{\text{э}} E_{\theta_{\text{э}}}^2. & (3)\end{aligned}$$

Индексы: с – эпоксидный адгезив, э – эластичный адгезив, γ – коэффициент концентрации напряжений, обусловленный различием в механических свойствах адгезива с субстратом и δ – коэффициент концентрации напряжений, обусловленный макроскопической неоднородностью субстрата, $\sigma_{\text{к}}$ – когезионная (истинная) прочность клеящего полимера. Коэффициенты концентрации напряжений, обусловленные макроскопической неоднородностью склеиваемых субстратов, равны, и не зависят от типа адгезива ($\delta_{\text{с}} \approx \delta_{\text{э}}$, $\gamma_{\text{с}} \approx \gamma_{\text{э}}$). $B = \frac{2\beta}{c(ab)^2} R^6$, $A = \left(\frac{\alpha'\Delta T}{c}\right)$ 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, $E_{\theta}^2(\sigma)$ – величина характеризует квадрат амплитуды ЭМИ, зависящий от σ – остаточные напряжения в клеящем полимере.

В силу действительности значений $\sigma_{\text{ад}}$ и E_{θ} выражения (3') и (3) отображаются в первом квадранте декартовой системы координат, а их когезионные прочностные характеристики отличаются на порядок, то можно сделать следующие допущения.

$$\frac{\sigma_{\text{кс}}}{\gamma_{\text{с}}\delta_{\text{с}}} : \frac{\sigma_{\text{кэ}}}{\gamma_{\text{э}}\delta_{\text{э}}} = 10 \div 15, \text{ а } \frac{A}{\delta_{\text{с}}} \approx \frac{A}{\delta_{\text{э}}} \text{ и } \frac{B}{\delta_{\text{с}}} \approx \frac{B}{\delta_{\text{э}}}, \tau_{\text{э}} = \frac{\sigma_{\text{кэ}}}{\gamma_{\text{э}}\delta} + \frac{A}{\delta}, \tau_{\text{с}} = \frac{\sigma_{\text{кс}}}{\gamma_{\text{с}}\delta} - \frac{A}{\delta}, \rho = \frac{B}{\delta}.$$

Это позволяет выражения (3') и (3) привести к параболическому виду:

$$\begin{aligned}\sigma_{адс} &= \tau_c - \rho \cdot E_{анс}^2, \\ \sigma_{адэ} &= \tau_э + \rho \cdot E_{анэ}^2.\end{aligned}\quad (4)$$

Анализ выражения (4) показывает, что, чем прочнее клеевое соединение образованное стеклообразным полимером, тем меньше амплитуда электромагнитного излучения, а для клеевого соединения образованное эластичным полимером наоборот. Это отражено на графиках работ [17, 18].

При дальнейшей проработке этого метода было показано, что амплитуда электромагнитного излучения появляется при ориентации дипольных моментов кристаллитов, если частицы из сегнетокерамических материалов ориентировать по постоянному полю и «заморозить» [3]. Для этого склеиваемые изделия выдерживают в электрическом поле в процессе полимеризации адгезива. В этом случае дипольные моменты частиц сегнетокерамики ориентируются по полю. При достаточно больших напряжениях постоянного электрического поля активированный клеевой шов становится как бы однодоменным [18], что позволяет диполям частиц излучать ЭМИ когерентно и кооперативно, тем самым усиливая результирующий сигнал. В дальнейшем были найдены другие способы создания кооперативного когерентного эффекта, связанного с созданием установившейся макроскопической упорядоченности в макроскопических масштабах описываемой системы.

Изменение свойств сегнетоэлектриков под действием механических напряжений

Среди разнообразных материалов сегнетоэлектрики обладают не только способностью преобразовывать энергию акустических волн в электромагнитную, излучаемую в окружающее пространство, но и изменять величину дипольного момента домена, под действием приложенного к нему постоянного механического напряжения. При этом оказывается, что кооперативный дипольный момент контролируемых доменов также изменяется под действием остаточных напряжений. Так, например, изделия из сегнетокерамики находят широкое применение для датчиков давления [25]. Оказывается, величины механического напряжения $\sigma = 4,1 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ достаточно для полной поляризации пьезокерамического материала PZT-5 [22], что значительно превышает прочность клеевых соединений.

Параметры сегнетокерамических мягких материалов зависят от механических напряжений в гораздо большей степени, чем сегнетокерамических жестких материалов [25]. Если механическое давление приложено к материалу таким образом, что вызываемые им на поверхности электродов заряды создают поле, совпадающее с направлением поля предварительной поляризации, то нелинейные эффекты выражены довольно слабо, что не приводит в акустоэлектромагнитном методе к зависимости электромагнитного излучения от

остаточных напряжений в клеевом слое. Если наоборот, то нелинейность носит явно выраженный характер [25], что является одним из механизмов снижения суммарного вектора поляризации и соответственно приводит к зависимости электромагнитного излучения от остаточных напряжений.

В результате воздействия давления $\sigma = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ имеет существенное место необратимое изменение пьезоэлектрического модуля [25]. Это изменение тем меньше, чем больше «жесткость» сегнетокерамического материала [28].

Как было показано в [25], эффект механической ползучести, т.е. возрастание деформации при неизменной механической нагрузке, обязан своим происхождением доменной переориентации, поскольку при температурах выше температуры Кюри этот эффект отсутствует. При больших давлениях для ряда составов на основе твердых растворов цирконата свинца большая часть переориентации доменов осуществляется не менее, чем за $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ [25].

Если сжимающее давление приложено перпендикулярно поляризационной оси, то эффекты переориентации доменов для разомкнутой цепи выражены сильнее, чем для замкнутой накоротко, так как возникающее благодаря пьезоэффекту электрическое поле способствует переориентации доменов [30]. Механическое напряжение может вызвать частичную или даже полную деполяризацию сегнетоматериала.

Выводы

1. Создание композиционного материала основано на адгезии его компонентов.
2. Адгезия – физико-химическое состояние границы компонентов композиционного материала. Адгезия имеет ряд характеристик, важнейшее значение из них занимает прочность адгезионного соединения и напряженные состояния, центром которых является граница.
3. Рассматриваемый метод относится к классу акустоэлектромагнитных методов с активацией адгезива частицами и создания в нем когерентной кооперативной системы из этих частиц.
4. Контроль прочности адгезионного соединения возможен через контроль механических напряжений, возникающих в процессе формирования адгезионного соединения. Кроме того, на основании приведенного краткого обзора следует, что наиболее информационным параметром об адгезионной прочности является остаточное напряжение, возникающее в адгезиве из-за несовершенства технологии и других причин.
5. Контроль остаточных напряжений позволяет выйти на фундаментальное понятие прочности адгезионного соединения, связанное с формулами Бикермана и Журкова.

Список литературы

1. А.с. 979987 СССР, МКИ³G01N 29/04. Способ контроля соединений в многослойных конструкциях / Б. И. Ворожцов, М. П. Тонконогов, К. М. Омаров (СССР). – 3 с.
2. А.с. 1087877 СССР, МКИ³ G01N 29/04. Способ измерения коэффициента затухания ультразвуковых колебаний / А. Ф. Мельконович, Г. В. Пягус, Л. Б. Ливенцова, Л. М. Кушкулей (СССР). – 4 с.
3. А.с. 1352348 СССР, МКИ³G01N 29/04. Способ контроля клеевых соединений композиционных конструкций / В. П. Кузнецов (СССР). – 3 с.
4. Берлин А. А. Основы адгезии полимеров / А. А. Берлин, В. Е. Басин. – М.: Химия, 1974. – 392с.
5. Волькенштейн М. В. Молекулы и их строение. – М.; Л.: Изд. АН СССР, 1955. – 231 с.
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. Гриднев С. А. Диэлектрики с метастабильной электрической поляризацией // Соросовский общепрообразовательный журнал. – 1997. – № 5. – С. 105-111.
8. Джагунов Р. Г. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике / Р. Г. Джагунов, А. А. Ерофеев. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
9. Зинченко В. Ф. Чувствительность некоторых физико-механических характеристик к изменению адгезии между компонентами стеклопластика // Механика композиционных материалов. – 1983. – № 3. – С. 395-399.
10. Зорин А. Ю. Ультразвуковой контроль качества клеевых соединений // Тр. Московского энергетического института. – 1983. – № 607. – С.104-109.
11. Китайгородский А. И. Молекулярные кристаллы. – М.: Наука, 1971. – 424 с.
12. Кондратьев В. Н. Структура атомов и молекул. 2-е изд. – М.: Физматгиз, 1959. – 524 с.
13. Кордашов Д. А. Синтетические клеи. – М.: Химия, 1968. – 592 с.
14. Кузнецов В. П. Адгезия в клеевых соединениях: термины и физическая сущность / В. П. Кузнецов [и др.] // Вестник КемГУ, 2014. – № 2. – Т. 1. – С.170-174.
15. Кузнецов В. П. Адгезия в клеевом соединении: адгезия с позиции теории прочности / В. П. Кузнецов, М. И. Баумгартэн // Вестник КузГТУ, 2014. – № 4. – С. 97-102.
16. Кузнецов В. П. Акустоэлектромагнитный метод контроля прочности клеевых соединений: дис. ... канд. техн. наук. /25.12.89/ Томский политехнический институт. – Томск, 1989. – 155 с.

17. Кузнецов В. П. Физическая модель зависимости между прочностью адгезионного соединения и электромагнитным излучением когерентной кооперативной системы модифицирующих адгезив частиц сегнетокерамики // ЭЖ «Фундаментальные исследования» № 5 (часть 3) 2014, стр. 497-502
18. Кузнецов В. П., Фадеев Ю. А., Кулешов В. К. Акустоэлектромагнитный метод неразрушающего контроля прочности клеевых соединений// ЭЖ «Современные проблемы науки и образования» СПНиО. – 2011. – № 6.: <http://www.science-education.ru/100-5011>.
19. Ланге Ю. В. Акустические методы неразрушающего контроля соединений в многослойных конструкциях // Дефектоскопия. – 1974. – № 3. – С. 70-79.
20. Ланге Ю. В. Методы неразрушающего контроля качества клеевых соединений: Синтетические клеи. – М.: Химия, 1968. – 214 с.
21. Ланге Ю. В. Фазовый вариант акустического импедансного метода дефектоскопии // Дефектоскопия. – 1968. – № 3. – С. 1-9.
22. Минчина М. Г. Распределение 90°-ных доменных переориентаций в пьезокерамике типа цирконаттитаната свинца под действием продольного сжатия / М. Г. Минчина, О. И. Янковский // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69. – В. 6. – С. 46-49.
23. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: В 2 кн. / под ред. В. В. Клюева. 2-е изд. перераб.и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – Кн. 2. – 352 с.
24. Притыкин Л. Н. Клеи и их применение в электротехнике / Л. Н. Притыкин, М. Г. Драновский, Х. Р. Поркмяян. – М.: Энергоиздат, 1983. – 136 с.
25. Ультразвук. Маленькая Энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
26. Фельдман Л. С. Неразрушающий контроль качества клеевых соединений. – Киев: Техника, 1973. – 188 с.
27. Хрулев В. М. Прочность клеевых соединений. – М.: Стройиздат, 1973. – 84 с.
28. Berlincourt D., Kruger H.J.//Appl. Phys. – 1959. – V. 30. – No. 11. – P.1804-1809.
29. Chapman G. B. Anon destructive method of evaluatiag adhesive bond strength in Liber glass rlihforced plastic assemblies//Joining composite Mater. Symp.,Minneapolis, Minn., 16 Apr., 1980. – Philadelphia, Pa. – 1981. – P. 32-60.
30. Wand S., Adler H. Ultrasonic studies of strength – related properties of graphite/ S. Wand, H. Adler // 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.
31. Wuich W. Problem der UltrasehallpZufung von Kunststoffen und Klebeverbindungen// Massen und Prüfen. – 1985. – No. 7. – P. 392; No. 8. – P.394-395.

Рецензенты:

Иванов В. В., д.т.н., профессор кафедры теоретической и геотехнической механики, ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», г. Кемерово;

Смирнов А.Н., д.т.н., профессор, директор ООО «Кузбасский центр сварки и контроля», г. Кемерово.