

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛ ПЛАСТИК

ULTRASONIC INSPECTION OF METAL PLASTIC CONNECTION

Мильцев Глеб Дмитриевич

Студент, Санкт-Петербургского горного университета

Россия, г. Санкт-Петербург

Gleb Dmitrievich Miltsev

Student, St. Petersburg Mining University

Russia, St. Petersburg

АННОТАЦИЯ

Клеевые разнородные материалы вызывают большой интерес в аэрокосмической и автомобильной промышленности из-за их способности обеспечивать превосходные конструкционные характеристики и уменьшать вес для экономии энергии. Несмотря на обширную работу, сделанную для исследования, по-прежнему сложно обнаружить такие дефекты в соединениях разнородных материалов из-за больших различий в свойствах металлов и композитов, а также многослойной структуры компонента. Целью данной работы является улучшение обнаруживаемости дефектов в адгезионно скрепленном алюминии и пластике, армированном углеродным волокном (углепластик), путем разработки усовершенствованного алгоритма последующей обработки. Было определено, что анализ множественных отражений имеет высокий потенциал для улучшения обнаруживаемости в соответствии с результатами, полученными в результате инспекционного моделирования и оценки граничных характеристик. Влияние такого очень важного параметра, как кривизна образца, может быть устранено путем выравнивания времени прихода сигналов, отраженных от образца.

В случае клеевого соединения устраняется высокая концентрация напряжений и обеспечивается равномерное распределение напряжений. Другими преимуществами клеевого соединения являются его устойчивость к усталости, а также способность сохранять структурную целостность

соединяемых материалов, соединять разнородные материалы и уменьшать вес конструкции.

ANNOTATION

Adhesive heterogeneous materials are of great interest in the aerospace and automotive industries because of their ability to provide excellent structural characteristics and reduce weight to save energy. Despite the extensive work done for the study, it is still difficult to detect such defects in compounds of dissimilar materials due to the large differences in the properties of metals and composites, as well as the multilayer structure of the component. The aim of this work is to improve the detectability of defects in adhesive bonded aluminum and plastic reinforced with carbon fiber (carbon fiber) by developing an improved algorithm for subsequent processing. It was determined that the analysis of multiple reflections has a high potential for improving detectability in accordance with the results obtained as a result of inspection modeling and evaluation of boundary characteristics. The influence of such a very important parameter as the curvature of the sample can be eliminated by equalizing the arrival time of the signals reflected from the sample.

In the case of an adhesive joint, a high stress concentration is eliminated and a uniform stress distribution is ensured. Other advantages of the adhesive joint are its resistance to fatigue, as well as the ability to maintain the structural integrity of the materials being joined, connect dissimilar materials and reduce the weight of the structure.

ВВЕДЕНИЕ

Композитные и металлические компоненты с требуемыми характеристиками материала могут быть соединены для получения уникальных характеристик, таких как повышенная прочность и жесткость, а также устойчивость к повреждениям от соединений разнородных материалов после объединения. Соединения стеклопластик / алюминий и стеклопластик / титан используются в обтекателях двигателей самолетов, панелях крыла, фиксированных задних кромках, обтекателях и других элементах конструкции [10]. Из-за использования разнородных соединений в таких дорогостоящих конструкциях требуется регулярный осмотр для выявления дефектов и повреждений, которые могут иметь решающее значение для конструкции, а также для оценки пригодности конструкции для дальнейшего безопасного использования. Затраты, безопасность людей, жизни и здоровья зависят от конструктивного состояния этих конструкций [8].

Ухудшение адгезии может значительно снизить прочность сцепления структуры разнородных соединений, скрепленных клеем. Условия окружающей среды и нагрузки влияют на целостность клеевой линии соединений и приводят к появлению различных типов дефектов [6,11,12,13]. Основной проблемой таких конструкций является разрыв между компонентами клееной конструкции. Обнаружение нарушения адгезии в склеенных аналогичных материалах является сложным процессом из-за сложного расположения поверхности раздела и тонкой толщины слоя клея [8,14].

Есть несколько работ, в которых предлагаются традиционные ультразвуковые, усовершенствованные нелинейные ультразвуковые, лазерные ультразвуковые, акустические, управляемые волны, вихретоковые, термография, шиарография, рентгеновская томография и другие неразрушающие методы для оценки целостности связующих структур [6,15,16,17,18,19,20,21,22,23]. Йилмаз и др. [14] использовали усовершенствованный ультразвуковой неразрушающий контроль для

обнаружения слабых связей в композитно–адгезивных структурах. Для контроля качества клеевого слоя использовался высокочастотный акустический микроскоп с высоким разрешением. Кроме того, для более качественной визуализации был разработан алгоритм постобработки извлечения объектов на основе формы. В другой работе Йилмаз и соавт. [24] предложили метод слияния данных ультразвукового контроля и термографии для оценки качества склеивания.

Композитные конструкции с усиленной обшивкой интенсивно используются в аэрокосмических конструкциях в качестве заслуживающего внимания конструктивного решения для поверхностей управления самолетами, таких как закрылки, элероны и даже обшивки руля направления и руля высоты. Эти конструкции в основном состоят либо из совместно отвержденных, либо из адгезивно скрепленных стрингеров через равные промежутки времени.

Соединения с композитными соединениями также используются при ремонте для восстановления целостности конструкции. Экспериментальные исследования показывают, что адгезионное соединение может восстановить прочность отремонтированной конструкции до 80% от первоначальной прочности неповрежденного ламината [1]. Область соединения известна как зона потенциальной слабости из-за происходящих явлений передачи нагрузки и возможного расслоения. Кроме того, соединения подвержены разрушению клея с течением времени, неблагоприятным условиям окружающей среды или неправильному монтажу, что приводит к локальному расслоению или пористости. Эти типы повреждений могут значительно снизить производительность и безопасность конструкции без предварительного предупреждения, и, поскольку их нелегко обнаружить при визуальном осмотре, для детального осмотра конструкций используются методы неразрушающего контроля (NDT).

1. НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ПО ТЕМЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

За последние 50 лет методы неразрушающего контроля достигли зрелости в инженерных приложениях, играя решающую роль в оценке целостности и долговечности композитных конструкций. Обычные методы неразрушающего контроля обычно проводятся с регулярными запланированными интервалами в течение срока службы и не могут предоставить описательную информацию о целостности конструкции. Более того, почти все существующие методы неразрушающего контроля требуют чрезвычайно трудоемкого точечного контроля. Мониторинг состояния конструкции (SHM) в качестве улучшенной и модернизированной версии традиционного неразрушающего контроля был предложен для непрерывного контроля конструктивных особенностей, включая композитные соединения, для оценки состояния и целостности соединений в режиме реального времени. Системы SHM нацелены на замену планового технического обслуживания техническим обслуживанием по мере необходимости (в зависимости от состояния), что позволяет снизить затраты на ненужное техническое обслуживание, а также повысить уровень безопасности за счет учета обновлений условий работы [2]. Было показано, что эффективный SHM может снизить общие затраты на техническое обслуживание по сравнению с традиционными подходами NDI более чем на 30% для парка воздушных судов [3]. Среди различных подходов SHM для эффективного мониторинга композитных конструкций было предложено ультразвуковое направленное распространение волн (Lamb) с пьезоэлектрическими преобразователями [4], поскольку оно быстрое, воспроизводимое, чувствительное к повреждениям небольшого размера и экономичное [2]. Управляемые волны могут распространяться в симметричных или антисимметричных режимах относительно нейтральной оси пластины. Симметричные моды имеют большее радиальное смещение частиц в плоскости, тогда как антисимметричные моды в основном имеют смещение вне плоскости.

Поэтому симметричный режим часто указывает на выпуклость и сжатие толщины, в то время как антисимметричный режим представляет изгиб постоянной толщины. В прошлом распространение управляемой волны успешно применялось для обнаружения повреждений в отремонтированных композитах и соединениях [5], [6], [7], [8], [9].

Предыдущие исследования показали, что для контроля соединений с использованием управляемых волн можно использовать две стратегии [8], а именно “внутри соединения” и “поперек соединения”. Первым подходом, рассмотренным в литературе, является метод “внутри соединения”, с помощью которого в качестве волновода используются линии связи, поэтому влияние сложных геометрических особенностей на поведение волн сводится к минимуму [10]. Было показано, что при использовании этого подхода первичный антисимметричный режим (A0) ниже частотного диапазона 200 кГц является хорошим кандидатом для эффективного контроля гибридных связанных структур [11]. Метод “поперечного соединения” является второй стратегией, которая в основном использовалась в предыдущих исследованиях для контроля металлических сборок [12], [13]. С помощью этого метода степень расслоения в клеевых соединениях может быть оценена путем измерения уровня затухания моды A0 [14]. Хотя существует несколько исследований, в которых изучалось рассеяние волны Лэмба от отверстия и заклепки в металлических конструкциях [15], [16] рассеяние управляемой волны через композитное клеевое соединение еще не рассматривалось подробно.

Методы ультразвуковых измерений широко используются для неразрушающей оценки обычных клеевых соединений. Многими авторами были предложены различные подходы к обнаружению дефектов разъединения, расслоения или разрушения клея, включая применение измерений сопротивления [42], сдвига [43], продольного [44], [45], [46], [47], [48], управляемые волны [49],[50], [51], [52], [53], [54], [55], [56] и нелинейный ультразвуковой контроль (УТ) [57], [58]. Вышеупомянутые

авторы продемонстрировали несколько различных подходов к контролю качества клеевых соединений. Например, Ramadas и др. [43] проанализировали распространение основной моды A0 на образце лопатки ветряной турбины. Авторы обнаружили, что режим A0 преобразуется в симметричный режим S0 при наличии перемены лонжерона, и генерируются “режимы поворота”, которые распространяются назад и вперед в T-образном соединении. Кумар и др. [54] предположили, что амплитуда отражения поперечных волн от адгезивного слоя может использоваться в качестве индикатора для обнаружения деградации интерфейса. Титов и др. [44] предложили устранять дефекты путем измерения коэффициента отражения и инверсии фазы продольных волн. реверберации Основные проблемы при UT соединений, о которых сообщили эти авторы, были связаны с непараллельными поверхностями, значительными в металлической части, которые могут маскировать другие эхо-сигналы, перекрывающимися отражениями из-за тонких слоев, рассеянием и ослаблением в составной части. Внедрение гибридных соединений с массивами штифтов делает UT еще более сложной задачей из-за небольших штифтов с коническими головками и технологии производства, которая позволяет создавать шероховатые поверхности для улучшения адгезии. Основной проблемой при оценке качества клеевых соединений является обнаружение межфазных разрывов нулевого объема, также известных как целующиеся соединения [14]. Дефекты такого типа сложно обнаружить обычными ультразвуковыми методами, поскольку две поверхности либо частично соединены, либо соприкасаются без усилий, что делает их прозрачными для ультразвуковых волн [60].

Несмотря на многочисленные литературные исследования, по структурной оценке, обычных клеевых соединений, мало внимания уделяется NDE гибридных соединений, изготовленных из разнородных (металлических и композитных) материалов. Недавно Parkes и др. [29] сообщили о некоторых подходах к ультразвуковому контролю соединений

стеклопластик-алюминий методом С-сканирования для определения прочности сцепления при различных уровнях нагрузки. Авторы предложили проводить проверку с металлической стороны образца, поскольку слоистая структура и штыри рассеивают падающий сигнал. Такой подход может быть эффективно использован для обнаружения сломанных штырей путем мониторинга времени прохождения сигнала, отражающегося от стыка и кончика штыря. В качестве альтернативы, его можно использовать для обнаружения расслоения между поверхностью раздела металла и композита, поскольку ожидается, что амплитуда отражения в случае дефекта будет выше, чем при хорошем соединении. Однако этот подход не может быть применен для обнаружения расслоений между слоями композита и вокруг штифтов, которые также могут быть существенной причиной разрушения соединения.

Существует множество исследований, в которых обсуждается оценка качества соединения с помощью различных методов неразрушающего контроля, но только некоторые из них посвящены неразрушающему обнаружению и оценке слабых связей. Хотя распространение продольных ультразвуковых волн является обычным ультразвуковым методом, изображения C-scan использовались для демонстрации производственных дефектов, вызванных влагой и влажностью в клеевых соединениях Markatos et al. [9]. Утверждается, что изменение снижения качества на границе склеивания может быть обнаружено тогда и только тогда, когда уровень влажности достаточно высок. Кроме того, Титов и др. [14] использует импульсно-эхо-метод ультразвукового неразрушающего контроля, который использовался для оценки качества склеивания с помощью характеристик ультразвуковых волн и расчетов коэффициента пропускания-отражения. Кроме того, Wang et al. [15] рассчитали межфазную жесткость и поперечную жесткость для оценки слабых связей в структурах, скрепленных ПММА-эпоксидной смолой, с помощью аналитических моделей ультразвука с воздушной связью. Однако результаты не всегда коррелируют с экспериментальными исследованиями, и применение к композитам очень

маловероятно из-за их неоднородности и разнообразия. Применение ультразвука с воздушной связью для оценки качества склеивания ограничено из-за высокого затухания в воздухе, высокой длины волны и низкой пропускной способности, особенно для конструкций, скрепленных композитным клеем. Ву и др. [16,17] недавно использовали ультразвуковые системы неразрушающего контроля с воздушной связью для расчета межфазной жесткости слабых связей в композитных структурах во время отверждения, однако чувствительность исследования ограничена только дефектами, связанными с отверждением, и результаты необходимо улучшить. Кроме того, направленные волны, особенно волны Лэмба, используются для оценки воздействия обработки поверхности не только на структуры, скрепленные металлическим клеем, Gauthier et al. [17] но также и в структурах, скрепленных композитным клеем, Рен и Лиссенден [18].[19] Применение волновых исследований Лэмба к композитным материалам ограничено из-за различий в дисперсионных кривых каждой структуры. Кроме того, снижение качества связи коррелировало с уровнем нелинейности и было исследовано с помощью нелинейного ультразвука Яном и др. [87]. Однако применение нелинейного ультразвука является сложной задачей в промышленных приложениях. Кроме того, Bossi и др. [20] установили, что лазерный контроль связи (LBI) может использоваться для устранения слабых и целующихся связей путем передачи концентрированных ударных волн в клеевой слой.²¹ Кроме того, Escoult и соавт. провели подробное исследование устойчивости к повреждениям метода испытания на адгезию при лазерном ударе (LASAT) для оценки слабых связей и Эрхарт и др. [22]. Однако методы лазерного ударного контроля адгезии (LASAT) и лазерного контроля адгезии (LBI) пока не доступны повсеместно, поскольку системы тестирования являются дорогостоящими и дорогостоящими в обслуживании. С другой стороны, акустическая микроскопия с высоким разрешением благодаря высокочастотным преобразователям и [23], считается многообещающим

методом ультразвукового неразрушающего контроля для исследования качества интерфейса в скрепленных структурах. Акустическая микроскопия использовалась в качестве методологии неразрушающего контроля для исследования качества сварных швов трением с перемешиванием с использованием комбинации различных методов неразрушающего контроля, таких как рентгеновская томография Jasiuniene et al. [коротковолновая] и голографическая визуализация от Twerdowski et al. [24].

Клеевые соединения углепластик-эпоксидная смола-углепластик в один нахлест, содержащие четыре различных качества соединения, были исследованы с помощью сканирующей акустической микроскопии (KSI GmbH), расположенной в Институте ультразвуковых исследований Каунасского технологического университета, Литва. Экспериментальная установка, показанная на фиг. 3 был использован для сохранения ультразвукового отклика выбранных областей склеивания образцов. В интересующей области (квадратная область размером $16,7 \times 16,7$ мм на линии соединения) было измерено 250 точек на каждой декартовой оси (x и y) и записан отклик А-сканирования в полном масштабе времени. Образцы были исследованы с помощью сфокусированного ультразвукового преобразователя РТ с частотой 50 МГц-50-3-10 под погружением с помощью техники импульсного эха. Апертура ультразвукового преобразователя составляет 3 мм, а фокусное расстояние в воде составляет 10 мм (рис. 1). Во время измерений образцы располагались перпендикулярно датчику. Расстояние между датчиком и образцами выбрано равным 5.5 мм для фокусировки ультразвукового поля на поверхности образца.

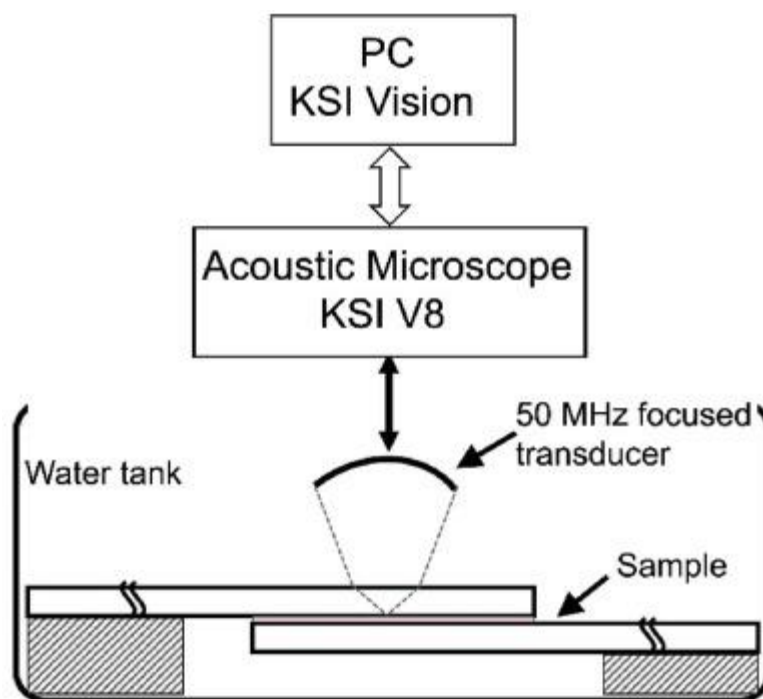


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для акустического микроскопического контроля скрепленных образцов.

Физические параметры, такие как толщина и скорость ультразвуковой волны адгезива, играют важную роль при выборе правильной частоты преобразователя, которая будет использоваться для контроля. Чем выше скорость звука в прилипающем материале, тем короче время прохождения акустической волны; а также тонкая адгезия приводит к более короткому времени прохождения акустической волны. Такие условия, как высокая скорость звука и малая толщина прилипающего материала, создают необходимость в ультразвуковых проверках с использованием высокочастотных преобразователей.

Следует отметить, что высокочастотные исследования сильно ослабленных материалов, таких как композиты, зависят от способности ультразвукового импульса достигать интересующей поверхности раздела. Соотношение между толщиной адгезива, уровнями внимания и фокусным расстоянием преобразователя играет важную роль.

В настоящее время ультразвуковые методы наиболее широко используются для количественной неразрушающей оценки пористости в композитах из-за его относительной простоты, безопасности и высокой

чувствительности к наличию пустот и пор (пузырьков газа) [13]. Это связано с сильным влиянием пористости на коэффициент затухания и скорость ультразвуковых волн, поскольку пустоты и поры очень эффективно рассеивают эти волны. В дисперсных ММК армирующие частицы также являются рассеивателями ультразвуковых волн, поэтому коэффициент ослабления увеличивается как за счет увеличения содержания армирования, так и пористости (см., Например, [14] и ссылки, размещенные в нем). Для количественной оценки значения пористости в MMCs с использованием измеренного частотно-зависимого коэффициента ослабления ультразвука необходимо рассчитать частичный вклад армирующих частиц в общее затухание. Этот вклад сильно зависит от формы и размеров частиц и соотношения между этими размерами и длиной волны зондирующего ультразвука [15], [16]. Было разработано большое количество моделей для расчета коэффициента ослабления (рассеяния) ультразвука в двухфазных упругих твердых и дисперсных композитах (см., Например, репрезентативные работы [17], [18], [19], [20], [21]). Однако фундаментальным недостатком всех этих моделей является то, что они применимы только для сферических частиц или цилиндрических удлиненных включений, тогда как реальных частиц MMC с таким “идеальным” содержанием армирования не существует. Поэтому расчеты коэффициента ослабления ультразвука в таких материалах с использованием упомянутых моделей практически невозможны. Другими словами, невозможно рассчитать “эталонное ослабление ультразвука” в материале MMC без пор с содержанием армирования сложной формы, чтобы извлечь из фактического измеренного ослабления в данном пористом образце MMC вклад ослабления, вызванный исключительно пористостью.

В то же время фазовая скорость ультразвуковых волн в таких дисперсных ММК может быть рассчитана с использованием ряда разработанных теоретических моделей для модулей упругости квазиизотропных и квазиоднородных дисперсных ММК с произвольной

геометрией упрочняющих частиц: классическая аналитическая микромеханическая модель для многофазных материалов [22], трехмерная фазовая самосогласованная модель для определения эффективного модуля сдвига композитной системы [23], модель модуля упругости двухкомпонентного изотропного композита, которая учитывает трехмерную природу взаимодействия напряжений и деформаций в материале [24]. Эти модели можно использовать при условии, что известны упругие свойства и содержание матрицы и армирующих частиц, а длина волны зондирующего ультразвука намного больше, чем размеры частиц. При довольно низком содержании частиц (<10-15%) результаты расчетов, полученные с использованием разных моделей, практически совпадают друг с другом. Вариационная связанная модель Хашина-Штрикмана [22] успешно используется во многих работах для расчета упругих свойств дисперсных ММК с различными типами армирования и содержанием. Результаты показывают хорошее согласие с экспериментальными данными, полученными с использованием измеренных фазовых скоростей продольных и поперечных ультразвуковых волн (см., Например, [25], [26], [27]). Это означает, что упомянутые модели могут быть использованы для теоретических расчетов скоростей ультразвука в твердой (беспористой) фазе исследуемых реальных пористых ММК. Результаты расчетов могут служить “справочными” данными для выявления исключительно влияния пористости на фактические скорости в этих материалах.

Другой причиной предпочтительного использования скорости ультразвука в ММС вместо затухания для количественной оценки пористости является то, что метод погружения, широко используемый для точных измерений затухания ультразвука, требует знания коэффициентов отражения и пропускания ультразвуковых волн для исследуемого образца ММС. Эти значения зависят от акустического импеданса образца, который, в свою очередь, определяется скоростью ультразвука. Поэтому для получения абсолютного значения коэффициента ослабления ультразвука в любом

случае следует измерить скорость ультразвука. Кроме того, некоторая нестабильность амплитуды опорного ультразвукового импульса влияет на результаты измерения абсолютного затухания, тогда как эта нестабильность не влияет на результаты измерения фазовой скорости.

Существует множество теоретических и эмпирических моделей зависимости скоростей ультразвука от пористости. Они основаны на теориях зависимости модулей упругости от пористости [28], [29], [30], о структурных моделях, использующих электроакустическую аналогию [31], или о теории рассеяния ультразвуковых волн в пористых средах (см., например, [32]). Модифицированная теория зависимости скоростей ультразвука от пористости, основанная на зависимости модуля Юнга от пористости, предполагающая сплюснутые поры сфероидальной формы, была предложена в [33]. Все упомянутые теории точно описывают экспериментальные результаты для спеченных однофазных металлов и керамики при условии, что известно соотношение размеров пор. Однако они очень чувствительны к соотношению сторон пор и их ориентации по отношению к эталонному ультразвуковому лучу и, следовательно, не применимы для твердых частиц ММС с произвольной геометрией пор.

Авторы [34], вероятно, были первыми, кто экспериментально наблюдал ультразвуковую дисперсию фазовых скоростей продольных ультразвуковых волн в слоистых материалах из углепластика (углепластика) с различной пористостью. Было обнаружено, что в диапазоне частот 3-8 МГц увеличение пористости приводит к увеличению относительной дисперсии скорости по сравнению с беспористыми CFRPS. То же явление в слоистых материалах из углепластика наблюдалось и количественно анализировалось в недавних работах [35], [36]. В [36] было обнаружено, что увеличение пористости приводит к увеличению относительной дисперсии фазовых скоростей в диапазоне частот 1-10 МГц независимо от объемного содержания компонентов композита.

2. НЕРЕШЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальной задачей для научного сообщества является совершенствование ультразвукового контроля в конструкциях металл-стеклопластик.

Рассмотрены основные определения, используемые при обзоре научных статей связанных с обнаружением дефектов в металлопластах [15,16].

Рассмотрены основные современные методы контроля, используемые при контроле подобных материалов [17-19].

Отдельно исследован вопрос о возможных путях совершенствования ультразвукового контроля с технической стороны и со стороны оптимизации обработки выходного сигнала [25-27].

Исследование чувствительности изменяющихся параметров состоит из двух основных частей, таких как калибровочный случай и вычисление метамоделей.

Целью неразрушающего контроля является обнаружение искусственно созданных расслоений. Сложная геометрия (штифты) и неоднородная структура (анизотропная микроструктура композита из алюминия и стеклопластика) сборных соединений затрудняют неразрушающий контроль. Таким образом, в первую очередь необходимо выбрать надлежащий метод контроля. Метод иммерсионного импульсного эха является наиболее распространенным методом проверки клеевых соединений [13]. Однако в случае разнородных соединений успех метода импульсного эха зависит от ориентации образца в соответствии с датчиком, т.е. выполняется ли тестирование со стороны металла или со стороны композита.

Первым шагом в выборе подходящей системы контроля и ориентации образца была оценка ожидаемых амплитуд сигналов, отраженных поверхностью и интерфейсами гибридного соединения, в случае контроля со стороны титана и углепластика. Были выполнены две отдельные оценки, одна для здорового гибридного соединения, а другая для соединения с

воздушным зазором в качестве дефекта типа расслоения. Для этой оценки учитывались только различия в акустическом импедансе слоистой структуры.

Теоретическая оценка коэффициентов отражения была выполнена в четырех отдельных случаях (рис. 3):

- а) проверка со стороны стеклопластика – хорошее соединение (рис. 2 а);
- б) контроль со стороны стеклопластикового соединения с расслоением (рис. 2 б);
- с) проверка со стороны алюминия – хорошее соединение (рис. 2 в);
- д) контроль со стороны алюминиевого соединения с расслоением (рис. 2 д).

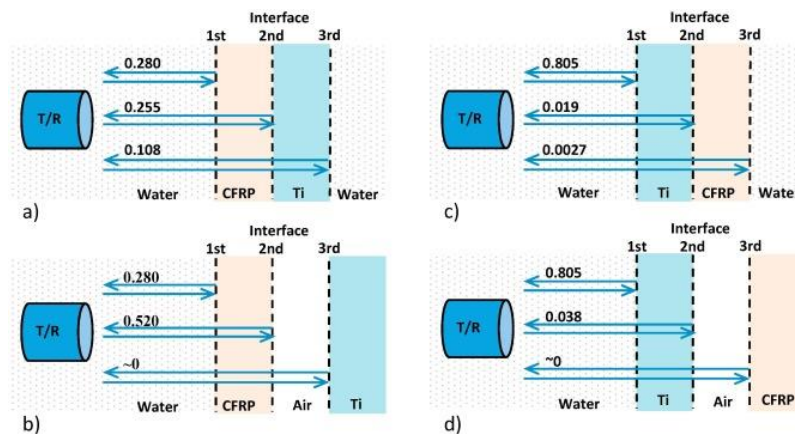


Рисунок 2. Схемы вариантов проводимого опыта.

Таблица 1. Рассчитанные нормированные значения амплитуды на поверхности ультразвукового преобразователя.

| Слоистая структура* | Отраженная нормированная амплитуда от | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|
| | 1-й интерфейс | 2-й интерфейс | 3-й интерфейс |
| a. W → углепластик → Ti → W | 0.280 | 0.255 | 0.108 |
| b. W → углепластик → Воздух → Ti | 0.280 | 0.520 | ~0 |
| c. W → Ti → углепластик → W | 0.805 | 0.019 | 0.0027 |
| d. W → Ti → Воздух → Углепластик | 0.805 | 0.038 | ~0 |

Результаты показывают, что в случае контроля со стороны стеклопластика нормализованная амплитуда сигнала, отраженного от поверхности, составляет 0,28, в то время как в случае контроля со стороны алюминия нормализованная амплитуда того же отражения составляет 0,805 (см. Таблицу 1). Это означает, что сигнал, который достигает

контролируемой поверхности раздела (стеклопластик-алюминий), намного сильнее в случае контроля со стороны стеклопластика. Кроме того, если посмотреть на значения амплитуды на границе раздела между стеклопластиком и алюминия, амплитуда сигнала, отраженного от границы раздела, составляет 0,255 в случае контроля со стороны стеклопластика по сравнению с 0,019 в случае контроля со стороны алюминия.

Задача неразрушающего контроля состоит в том, чтобы оценить качество сопряжения, то есть его необходимо дифференцировать, если качество соединения хорошее или есть расслоение между слоями. Это означает, что по сигналу, отраженному от поверхности раздела, должна быть произведена оценка качества соединения. В случае контроля со стороны стеклопластика разница в амплитуде сигнала хорошего соединения / плохого соединения составляет $0,255/0,520$, в то время как в случае контроля со стороны алюминия $0,019/0,038$. В обоих случаях разница примерно в два раза, но в случае контроля со стороны алюминия амплитуда информативного сигнала (отраженного от интерфейса) будет примерно в 13 раз меньше, чем в случае контроля со стороны стеклопластика. Расчеты показывают, что сканирование со стороны стеклопластика может обеспечить гораздо большую амплитуду сигнала, отраженного от непохожей поверхности раздела, а также большую разницу в амплитудах отраженного сигнала хорошего соединения и плохого соединения.

Однако существуют и недостатки сканирования со стороны стеклопластика: поверхность слоя стеклопластика шероховатая и не параллельна границе раздела с алюминием, толщина слоя стеклопластика может меняться, и поэтому невозможно предсказать точное время прихода сигнала, отраженного от границы раздела. Кроме того, слой стеклопластика имеет неоднородную структуру. Следовательно, в изображении В-scan сигнал, отраженный интерфейсом, будет отображаться не в постоянном временном окне. Его положение во временной области будет меняться в зависимости от толщины композитного слоя. Тем не менее, как было

показано выше, сканирование со стороны стеклопластика может обеспечить гораздо большую амплитуду сигнала, отраженного от несходного интерфейса. Кроме того, информативный сигнал не будет перекрываться многократными отражениями, как при контроле со стороны алюминия. Кроме того, измерение со стороны стеклопластика позволяет обнаружить не только расслоение в разнородном соединении, но и дефекты внутри слоя стеклопластика. Исследования Милна и др. [66] показывают, что чувствительность метода импульсного эха в алюминии ограничена также из-за шума, рассеянного обратно анизотропной микроструктурой алюминия.

Основная причина, по которой проверки таких конструкций выполняются со стороны алюминия, связана со сложным прогнозированием времени прихода сигнала, отраженного от границы раздела, из-за изменения толщины слоя стеклопластика [13]. Эта проблема может быть решена путем разработки специального алгоритма обработки сигналов для обнаружения различных интерфейсов.

3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВЫЯВЛЕННЫХ НАУЧНЫХ ПРОБЛЕМ

Для проверки эффективности предложенного метода обработки сигналов были проведены эксперименты на сборном гибридном соединении с искусственными расслоениями. Образец с гибридным соединением погружали в резервуар для воды, обращая композитную деталь вверх, как показано на рисунке 3. Данные импульсного эха образца были получены путем сканирования сфокусированного преобразователя с частотой 10 МГц по всей поверхности с пространственным разрешением 0,5 мм. Расстояние между образцом и датчиком было выбрано таким образом, чтобы получить фокусную точку примерно на границе раздела композит-металл. Преобразователь приводился в действие импульсом напряжения 50 В. На стороне приема сигналы регистрировались с использованием частоты дискретизации 200 МГц. В каждой позиции отраженные сигналы были измерены 64 раза и усреднены для обеспечения лучшего отношения сигнал / шум. На рисунке 3 Представлена экспериментальная установка для сбора данных.

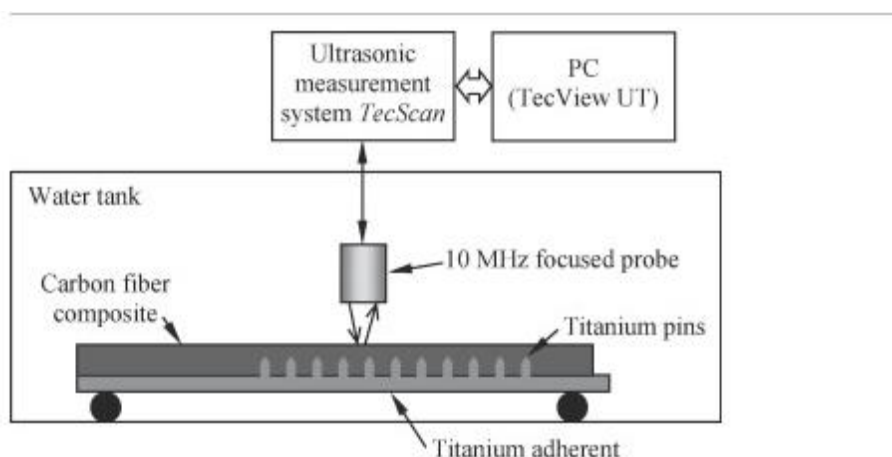


Рисунок 3. Экспериментальная установка для оценки качества гибридного соединения.

В случае разнородных соединений свойства соединяемых материалов (акустические импедансы) различны, что означает, что сигнал от соединения будет отражен даже без дефектов в нем., следовательно, обнаружение дефектов в разнородных соединениях является сложной задачей для

обычных ультразвуковых методов. Кроме того, шероховатая поверхность и неплоская поверхность раздела представляют собой дополнительную проблему, которую необходимо решить. Однако основной проблемой анализа данных измерений в случае разнородных соединений является наличие непараллельных структур различной толщины. Это приводит к тому, что время задержки сигналов, отраженных от поверхности и от границы раздела образца, изменяется во время сканирования. Обычные методы, основанные на перемещении временного окна с использованием одного и того же порогового уровня, не работают из-за большого изменения амплитуды сигнала, вызванного эффектами рассеяния в структуре. Чтобы преодолеть эту проблему, был разработан новый алгоритм обработки. Это позволяет обнаружить границу раздела между двумя слоями материала, а затем “выровнять” ее.

Для проверки работоспособности предложенного метода обработки сигналов были проведены эксперименты на сборном образце гибридного соединения с искусственными дефектами – отсутствующими штифтами и дефектами типа расслоения. Образец с гибридным соединением был погружен в резервуар для воды; были выполнены измерения как со стороны алюминия, так и со стороны композита для проверки теоретических соображений в части 3.1 (альтернативные варианты установки контроля). Экспериментальные измерения показали, что неразрушающий контроль со стороны алюминия невозможен.

Рисунок 4. Частотно-временной анализ отраженных сигналов показал, что часть сигнала, соответствующая отражению на границе раздела, обладает более низкой полосой пропускания по сравнению с отражением от поверхности, поскольку на более высокие частоты в большей степени влияют рассеяние и затухание (а). Из представленного рисунка видно, что, несмотря на передачу сигнала 10 МГц, центральная частота отраженного сигнала составляет 6 МГц

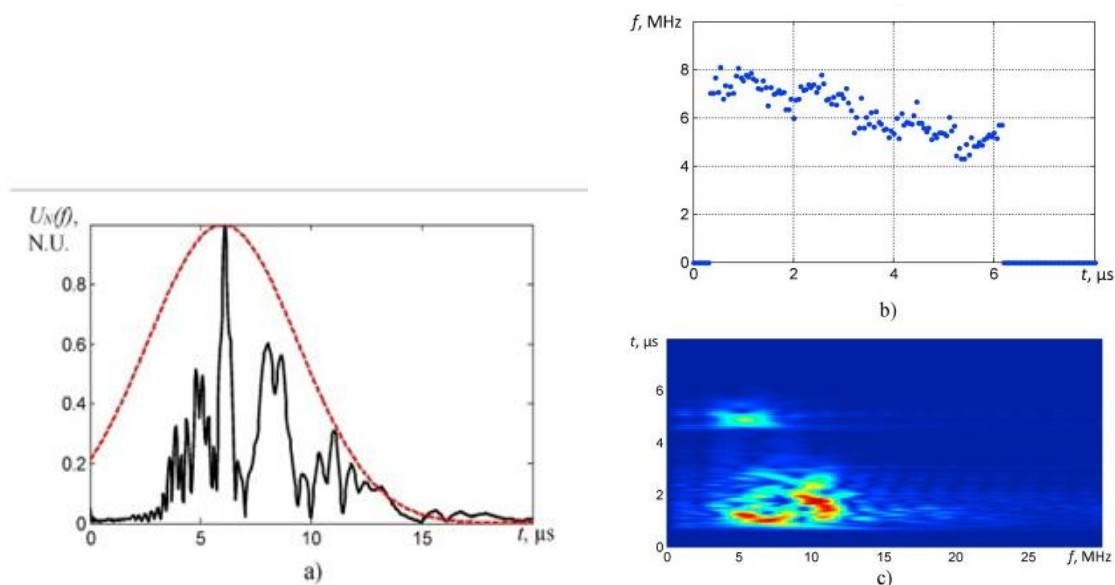


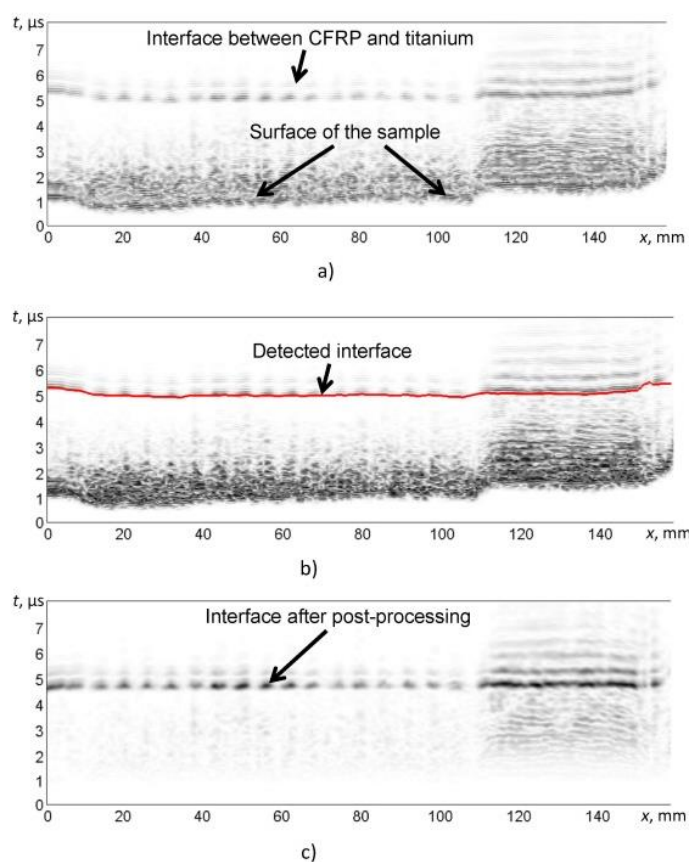
Рис. 4. Анализ отраженных сигналов, а – спектр сигнала, отраженного от границы раздела, б – средняя частота спектра, с – 2D частотный спектр В-сканирования.

Средняя частота спектра сигналов вдоль образца была проанализирована и представлена на рис. 4б. Также можно наблюдать, что частота сигнала уменьшается при более глубоком проникновении в образец. 2D частотный спектр В-сканирования, представленный на рис. 5 с, также подтверждает это наблюдение – отражение от поверхности раздела (при 4,5 мкс) обладает более низкими частотами, чем отражение от поверхности.

Таким образом, чтобы увеличить амплитуду отражения на границе раздела по сравнению с отражением от поверхности, центральная частота фильтра была выбрана немного ниже по сравнению с частотой преобразователя. После изучения нескольких случаев было определено, что ширина фильтра должна быть близка к ширине полосы пропускания преобразователя.

На рисунке 5 В-изображения сканирования, полученные на образце углепластика-титана с помощью штифтов, представлены до и после постобработки: необработанное изображение В-сканирования (а), обнаруженная граница раздела между стеклопластиком и алюминием с использованием предложенного алгоритма постобработки (б) и интерфейс после коррекции времени поступления (с). Можно заметить, что специальный метод постобработки позволил обнаружить границу раздела

между двумя материалами (рис. 6 б), а затем “выровнять” ее (рис. 6 в), т.е. устранить влияние неровной поверхности образца.



Рисунке 5. Необработанное В-сканированное изображение, полученное на образце стеклопластика-алюминия с помощью выводов (а), обнаруженный интерфейс между стеклопластиком и алюминием с использованием предложенного алгоритма постобработки (б), интерфейс после постобработки (с).

После применения разработанного алгоритма постобработки дефекты были обнаружены в разных слоях и в разных положениях – даже между штифтами. Метод обработки сигналов, предложенный в этом исследовании, был протестирован и экспериментально проверен с использованием иммерсионной импульсно-эхо-установки. Такая установка была выбрана для демонстрации принципа предлагаемой методики. Однако предлагаемая методика не ограничивается этим конкретным устройством и может быть легко заменена в практических приложениях измерениями с использованием струи воды.

Аддитивное производство титановой адгезии сочеталось с вакуумной инфузией стеклопластикового ламината для создания соединения из нескольких материалов с химической и механической адгезией. Этот метод производства одновременно создает соединение и композитный ламинат, обеспечивая высокое качество соединения и ламината с небольшим количеством пустот. Однако во время изготовления из-за плохого процесса подготовки поверхности в разнородном соединении или в самом композите могут возникнуть дефекты, поэтому необходимы методы неразрушающего контроля, подходящие для контроля разнородных соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аддитивное производство алюминиевой адгезии сочеталось с вакуумной инфузией стеклопластикового ламината для создания соединения из нескольких материалов с химической и механической адгезией. Этот метод производства одновременно создает соединение и композитный ламинат, обеспечивая высокое качество соединения и ламината с небольшим количеством пустот. Однако во время изготовления из-за плохого процесса подготовки поверхности в разнородном соединении или в самом композите могут возникнуть дефекты, поэтому необходимы методы неразрушающего контроля, подходящие для контроля разнородных соединений.

Было показано, что ультразвуковой контроль со стороны композита с использованием высокочастотного сфокусированного ультразвукового преобразователя может быть использован для исследования качества разнородных соединений. Для решения проблем, связанных с шероховатой поверхностью и непараллельными слоями, был разработан новый алгоритм последующей обработки сигнала. Представленные результаты демонстрируют, что предлагаемое решение позволяет обнаруживать дефекты в сложных сборных соединениях из композита алюминия / стекловолокно и оценивать их положение и глубину. Следовательно, отслоения могут быть обнаружены в разных слоях и в разных положениях – даже вблизи штифтов, а также отсутствующих штифтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Cooper, G.J. Turvey (1995). Effects of joint geometry and bolt torque on the structural performance of single bolt tension joints in pultruded GRP sheet material. *Compos. Struct.*, 32 (1995), pp. 217-226. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0263-8223(95)00071-2)
2. K. Goto, K. Imai, M. Arai, T. Ishikawa (2002). Shear and tensile joint strengths of carbon fiber-reinforced thermoplastics using ultrasonic welding. *Compos A: Appl Sci Manuf*, 116 (2019), pp. 126-137. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.10.032>
3. F. Ascione, L. Feo, F. Maceri (2010). On the pin-bearing failure load of GFRP bolted laminates: an experimental analysis on the influence of bolt diameter. *Compos. B Eng.*, 41 (2010), pp. 482-490. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(02\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00033-1)
4. B. Egan, C.T. McCarthy, M.A. McCarthy, R.M. Frizzell (2012). Stress analysis of single-bolt, single-lap, countersunk composite joints with variable bolt-hole clearance. *Compos. Struct.*, 94 (2012), pp. 1038-1051. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.04.001>
5. Y. Zhai, D. Li, X. Li, L. Wang, Y. Yin (2015). An experimental study on the effect of bolt-hole clearance and bolt torque on single-lap, countersunk composite joints. *Compos. Struct.*, 127 (2015), pp. 411-419. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.028>
6. I.K. Giannopoulos, D. Doroni-Dawes, K.I. Kourousis, M. Yasaee (2017). Effects of bolt torque tightening on the strength and fatigue life of airframe FRP laminate bolted joints. *Compos. B Eng.*, 125 (2017), pp. 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.059>
7. U.A. Khashaba, H.E.M. Sallam, A.E. Al-Shorbagy, M.A. Seif (2006). Effect of washer size and tightening torque on the performance of bolted joints in composite structures. *Compos. Struct.*, 73 (2006), pp. 310-317. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.02.004>
8. G. Marannano, B. Zuccarello (2015). Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints. *Compos. B Eng.*, 71 (2015), pp. 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.025>
9. J. Ahamed, M. Joosten, P. Callus, S. John, C.H. Wang (2016). Ply-interleaving technique for joining hybrid carbon/glass fibre composite materials. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 84 (2016), pp. 134-146. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.01.010>
10. D.P. Graham, A. Rezai, D. Baker, P.A. Smith, J.F. Watts (2014). The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining

scheme for composite–metal structures. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 64 (2014), pp. 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.018>

11. F.M.F. Ribeiro, R.D.S.G. Campilho, R.J.C. Carbas, L.F.M. da Silva (2016). Strength and damage growth in composite bonded joints with defects. *Compos. B Eng.*, 100 (2016), pp. 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.060>

12. D.N. Markatos, K.I. Tserpes, E. Rau, S. Markus, B. Ehrhart, S. Pantelakis (2013). The effects of manufacturing-induced and in-service related bonding quality reduction on the mode-I fracture toughness of composite bonded joints for aeronautical use. *Compos. B Eng.*, 45 (2013), pp. 556-564. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.052>

13. O. Ozdemir, N. Oztoprak (2017). An investigation into the effects of fabric reinforcements in the bonding surface on failure response and transverse impact behavior of adhesively bonded dissimilar joints. *Compos. B Eng.*, 126 (2017), pp. 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.005>

14. D. Yan, S.A. Neild, B.W. Drinkwater (2012). Modelling and measurement of the nonlinear behaviour of kissing bonds in adhesive joints. *NDT and E Int.*, 47 (2012), pp. 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.12.003>

15. C.V. Katsiropoulos, A.N. Chamos, K.I. Tserpes, S.G. Pantelakis (2012). Fracture toughness and shear behavior of composite bonded joints based on a novel aerospace adhesive. *Compos. B Eng.*, 43 (2012), pp. 240-248. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.07.010>

16. S. Ucsnik, M. Scheerer, S. Zaremba, D.H. Pahr (2010). Experimental investigation of a novel hybrid metal–composite joining technology. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 41 (2010), pp. 369-374. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.11.003>

17. R. Matsuzaki, M. Shibata, A. Todoroki (2008). Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 39 (2008), pp. 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.11.009>

18. B. Beylergil, Y. Cunedioğlu, A. Aktas (2011). Experimental and numerical analysis of single lap composite joints with inter-adherend fibers. *Compos. B Eng.*, 42 (2011), pp. 1885-1896. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.010>

19. G. Marannano, B. Zuccarello (2017). Static strength and fatigue life of optimized hybrid single lap aluminum–CFRP structural joints. *J. Adhesion*, 1–28 (2017). <https://doi.org/10.1080/00218464.2017.1291349>

20. G. Di Franco, B. Zuccarello (2014). Analysis and optimization of hybrid double lap aluminum-GFRP joints. *Compos. Struct.*, 116 (2014), pp. 682-693. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.05.044>
21. T.M. Koh, S. Feih, A.P. Mouritz (2011). Experimental determination of the structural properties and strengthening mechanisms of z-pinned composite T-joints. *Compos. Struct.*, 93 (2011), pp. 2222-2230. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.03.009>
22. M. Li, P. Chen, B. Kong, T. Peng, Z. Yao, X. Qiu (2016). Influences of thickness ratios of flange and skin of composite T-joints on the reinforcement effect of Z-pin. *Compos. B Eng.*, 97 (2016), pp. 216-225. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.007>
23. T. Ishikawa, K. Amaoka, Y. Masubuchi, T. Yamamoto, A. Yamanaka, M. Arai, *et al.* (2018). Overview of automotive structural composites technology developments in Japan. *Compos Sci Technol*, 155 (2018), pp. 221-246. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.09.015>
24. L.W. Byrd, V. Birman (2006). Effectiveness of z-pins in preventing delamination of co-cured composite joints on the example of a double cantilever test. *Compos. B Eng.*, 37 (2006), pp. 365-378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.05.019>
25. F. Pegorin, K. Pingkarawat, S. Daynes, A.P. Mouritz (2015). Influence of z-pin length on the delamination fracture toughness and fatigue resistance of pinned composites. *Compos. B Eng.*, 78 (2015), pp. 298-307. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.093>
26. D.P. Graham, A. Rezai, D. Baker, P.A. Smith, J.F. Watts (2011). A hybrid joining scheme for high strength multi-material joints. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.01.137>
27. S. Stelzer, S. Ucsnik, G. Pinter (2015). Composite-composite joining with through the thickness reinforcements for enhanced damage tolerance. *Mater. Sci. Forum*, 825–826 (2015), pp. 883-890. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.883>
28. S. Stelzer, S. Ucsnik, G. Pinter (2016). Strength and damage tolerance of composite-composite joints with steel and titanium through the thickness reinforcements. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 88 (2016), pp. 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.020>
29. P.N. Parkes, R. Butler, J. Meyer, A. de Oliveira (2014). Static strength of metal-composite joints with penetrative reinforcement. *Compos. Struct.*, 118 (2014), pp. 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.07.019>
30. P. Chang, A.P. Mouritz, B.N. Cox (2006). Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension. *Compos. A*

- Appl. Sci. Manuf.*, 37 (2006), pp. 1501-1513.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.11.013>
31. H. Ji, J. Kweon, J. Choi (2014). Fatigue characteristics of stainless steel pin-reinforced composite hat joints. *Compos. Struct.*, 108 (2014), pp. 49-56.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.040>
32. H. Son, Y. Park, J. Kweon, J. Choi (2014). Fatigue behaviour of metal pin-reinforced composite single-lap joints in a hygrothermal environment. *Compos. Struct.*, 108 (2014), pp. 151-160. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.012>
33. A.P. Mouritz (2007). Review of z-pinned composite laminates. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 38 (2007), pp. 2383-2397.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.08.016>
34. A.P. Mouritz (2013). Delamination properties of z-pinned composites in hot-wet environment. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 52 (2013), pp. 134-142.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.03.010>
35. I.K. Partridge, D.D.R. Cartié (2005). Delamination resistant laminates by Z-Fiber® pinning: part I manufacture and fracture performance. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 36 (2005), pp. 55-64.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.06.029>
36. F. Warzok, G. Allegri, M. Gude, S.R. Hallett (2016). Experimental characterisation of fatigue damage in single Z-pins. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 91 (2016), pp. 461-471.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.023>
37. A. Russo, B. Zuccarello (2013). Toward a design method for metal-composite co-cured joints based on the G-SIFs. *Compos. B Eng.*, 45 (2013), pp. 631-643. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.08.024>
38. S. Yang, L. Gu, R.F. Gibson (2001). Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composite structures. *Compos. Struct.*, 51 (2001), pp. 63-71. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00125-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00125-2)
39. T.E.A. Ribeiro, R.D.S.G. Campilho, L.F.M. da Silva, L. Goglio (2016). Damage analysis of composite-aluminium adhesively-bonded single-lap joints. *Compos. Struct.*, 136 (2016), pp. 25-33.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.054>
40. S. Teixeira, de Freitas, J. Sinke (2015). Failure analysis of adhesively-bonded skin-to-stiffener joints: metal-metal vs. composite-metal. *Eng. Failure Anal.*, 56 (2015), pp. 2-13. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.023>
41. M.S. Islam, L. Tong (2016). Influence of pinning on static strength of co-cured metal-GFRP hybrid single lap joints. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 84 (2016), pp. 196-208.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.01.011>

42. S.M. Friedrich, A.S. Wu, E.T. Thostenson, T. Chou (2011). Damage mode characterization of mechanically fastened composite joints using carbon nanotube networks. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 42 (2011), pp. 2003-2009. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.09.006>

43. R.L. Vijaya Kumar, M.R. Bhat, C.R.L. Murthy (2013). Some studies on evaluation of degradation in composite adhesive joints using ultrasonic techniques. *Ultrasonics*, 53 (2013), pp. 1150-1162. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.01.014>