

УДК 623.438.3 : 669.715

БЕСКОНТАКТНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ПРЕПРЕГОВ УГЛЕПЛАСТИКА ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОМПОНОВКИ

© 2021 Т.А. Джабраилов, И.А. Шукарев, А.С.А. Аль-Месри, Е.В. Черненькая

Институт авиационных технологий и управления,
Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 10.12.2020

Исследована возможность проверки ламинатов препрегов, ламинатов, армированных углеродными волокнами (CFRP), в процессе изготовления слоев. Сначала определяются ультразвуковые свойства неотвержденного материала, эта информация используется для разработки системы контроля, которая проверяется при изготовлении ламинатов с количеством слоев до 30, с использованием различных схем уплотнения и включением некоторых тефлоновых вставок для имитации наличия расслоений. В статье показано, что для данного выбора параметров (чувствительность преобразователей, центральная частота и конфигурация пресс-формы) возможен контроль, открывающий новую область применения ультразвуковых методов с воздушной связью.

Ключевые слова: ламинаты препрегов, композитные материалы, тефлоновые вставки, схемы уплотнения, ультразвуковые методы, авиационная промышленность, термоактивные полимеры, стадия автоклава, неотвержденная стадия.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-48-54

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование композитных материалов в авиационной промышленности находится в постоянном прогрессе в связи с растущим спросом на материалы, способные удовлетворить экономические цели, задачи в области безопасности и проектирования, которые также становятся все более требовательными. Аналогичным образом, проблемы, с которыми сталкиваются методы инспекции, растут такими же темпами. Например, для терморезистивных полимеров проверка перед отверждением рассматривается в качестве альтернативы, поскольку она дает возможность отремонтировать или утилизировать нездоровый материал до стадии автоклава с потенциально значительным снижением затрат.

Одним из таких применений является проверка во время изготовления заготовки препрега. Препрег – это ткань или лента, предварительно пропитанные смолой. Система смолы уже смешана и находится в неотвержденной стадии. Материал обычно помещается в рулон. Материал препрега является липким и легко прили-

пает к другим слоям в процессе укладки. Проверка во время этого процесса изготовления является чрезвычайно сложной по ряду причин. Во-первых, во избежание загрязнения материала процедуры изготовления определяют, что контакт с материалом запрещен; это исключает возможность использования обычных ультразвуковых методов. Во-вторых, хотя существует значительный недостаток знаний о свойствах неотвержденного препрега из углепластика, ожидается, что затухание ультразвуковых волн в неотвержденном материале будет чрезвычайно высоким. В-третьих, ожидается, что на ультразвуковые свойства материала сильно повлияет отсутствие уплотнения, которое может возникнуть во время изготовления. Однако большинство из них не являются реальными дефектами, так как они полностью удаляются во время отверждения в автоклаве, но они серьезно влияют на проверку перед отверждением. В-четвертых, материал должен быть проверен вместе с формой или поверхностью укладки, где он изготовлен.

Целью проведенного исследования является предложение бесконтактного ультразвукового метода для проверки ламинатов препрега из углепластика во время изготовления укладки. Предложена технология сквозной передачи с использованием датчиков с воздушной связью для передачи ультразвуковых сигналов через ламинат препрега и форму, где он изготовлен с использованием нормального падения.

Помимо некоторых исследований по распространению поперечных волн в неотвержденном FRP с использованием преобразователей EMAT и

Джабраилов Тайяр Акберович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Общественные дисциплины». E-mail: tqayag@yandex.ru

Шукарев Игорь Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Общественные дисциплины». E-mail: schykar@mail.ru

Аль-Месри Али Сауд Ахмед, аспирант кафедры «Радиотехника». E-mail: ali_almassry@mail.com

Черненькая Елена Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Общественные дисциплины». E-mail: lekalav@mail.ru

некоторых исследований с использованием ультразвуковых методов для контроля отверждения эпоксидной смолы в FRP, нет информации об ультразвуковых свойствах неотвержденного CFRP. Поэтому сначала было проведено подробное экспериментальное исследование свойств неотвержденных ламинированных препрегов для определения скорости и ослабления ультразвука. Затем эти свойства были использованы для моделирования распространения ультразвука в системе, как показано на рис. 1, для определения оптимальной конфигурации контроля. Наконец, система контроля, построенная в соответствии с этими критериями проектирования, была испытана в реальных условиях. Несколько образцов были изготовлены по различным схемам уплотнения. Некоторые из них включали тефлоновые вставки для имитации наличия дефектов. Во время изготовления проводились проверки, чтобы проверить влияние как количества слоев, так и процессов уплотнения.

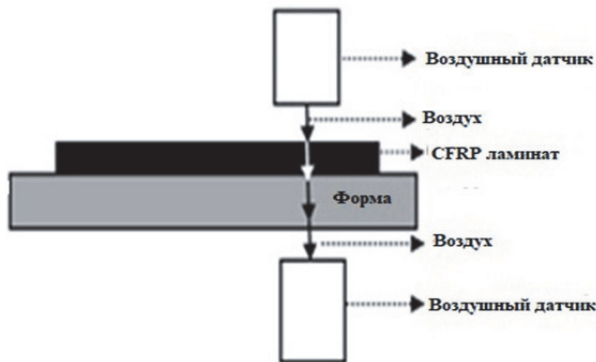


Рис. 1. Предлагаемая конфигурация для бесконтактного контроля укладки ламината из композиционного материала углепластика на литейную форму с использованием технологии сквозной передачи и пьезоэлектрических преобразователей с воздушной связью.

2. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ СВОЙСТВА НЕОБРАБОТАННЫХ ЛАМИНАТОВ

Неотвержденный ламинат из углепластика толщиной 1 мм был использован для характеристики материала. Для сравнения были также охарактеризованы отвержденный ламинат CFRP толщиной 2 мм. Для этого была исполь-

зована описанная методика, состоящая в измерении амплитудных и фазовых спектров коэффициента пропускания вокруг резонанса толщины первого порядка с использованием метода сквозной передачи и широкополосных преобразователей с воздушной связью, а затем в решении обратной задачи.

Пластины были измерены в десяти разных точках для определения пространственной изменчивости. Два репрезентативных измерения показаны на рисунке 2. Усредненные полученные параметры и стандартное отклонение собраны в таблице I. Более заметное различие между обоими материалами заключается в том, что в неотвержденном ламинате коэффициент затухания намного больше, что серьезно ограничивает возможности проверки. Другие различия заключаются в несколько меньшей плотности в неотвержденном углепластике, значительно меньшей скорости из-за сравнительно более низкой скорости в неотвержденной смоле и большей изменчивости измеренных свойств. Акустический импеданс неотвержденного ламината из углепластика ниже (2,16 мРайл) по сравнению с отвержденным материалом (5,27 мРайл).

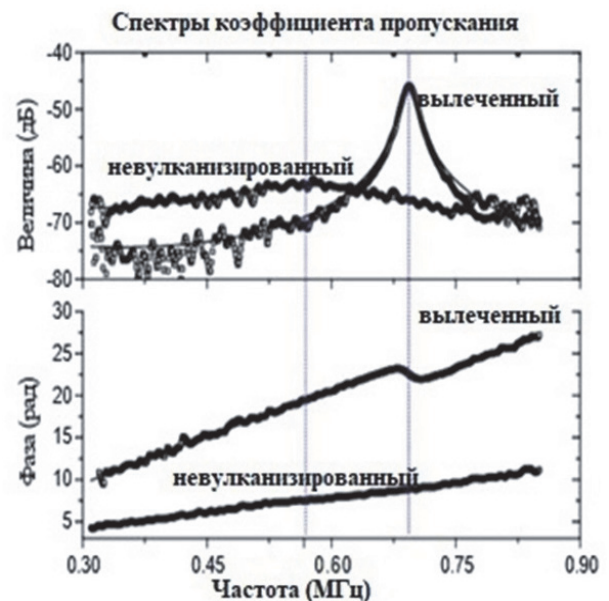


Рис. 2. Измеренные и рассчитанные амплитудные и фазовые спектры коэффициента пропускания для двух пластин FRPC, отвержденной (толщиной 2 мм) и неотвержденной (толщиной 1 мм)

Таблица. 1. Свойства ламинатов очищенных и необработанных

Материал	Плотность (кг / м ³)	Скорость ультразвука (м/с)	Затухание ультразвука @ fres (нп / м)
Невулканизированный	1580 ± 120	1370 ± 175	540 ± 80
Вылеченный	1850 ± 120	2840 ± 40	20 ± 2

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНСПЕКЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УЛЬТРАЗВУКОВ: КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ИНСПЕКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Поскольку материал должен проверяться вместе с литейной формой, в которой он изготовлен, необходимо учитывать следующие конструктивные параметры системы контроля: 1) материал и толщина литейной формы и 2) центральная частота и ширина полосы преобразователя. Теоретическое моделирование передачи ультразвука выполняется с использованием параметров материала, полученных ранее, и варьированием этих проектных переменных для определения наилучшей конфигурации. Была рассмотрена одномерная задача: плоские волны и нормальное падение, а также линейное изменение затухания с частотой. Предполагается, что толщина ламината углепластика во всех случаях составляет 7 мм. Исходя из нашего предыдущего опыта, максимально допустимые сквозные потери при передаче

установлены на 100 дБ, т. Е. Сверх этого значения считается, что проверка невозможна с доступной технологией.

Поскольку пресс-форма должна быть изготовлена из металла, выбранным вариантом был алюминий из-за его относительно более низкого акустического сопротивления и стоимости. На рис. 3 показаны рассчитанные вносимые потери (IL) в зависимости от частоты для трех различных толщин пресс-формы: 2, 6 и 13 мм. Первый вывод заключается в том, что рабочая частота должна быть ограничена ниже 0,55 МГц, а второй заключается в том, что может быть достигнуто значительное увеличение амплитуды передаваемого сигнала, если рабочая частота настроена на резонанс толщины кристаллизатора. Таким образом, для формы толщиной 6 мм резонанс толщины появляется при 0,52 МГц, минимальный IL = -92 дБ, для формы толщиной 13 мм резонанс толщины появляется при 0,25 МГц с минимальным IL -78 дБ. Поэтому предлагаемая конфигурация состоит из пресс-формы толщиной 13 мм и пары преобразователей с воздушной связью 0,25 МГц.

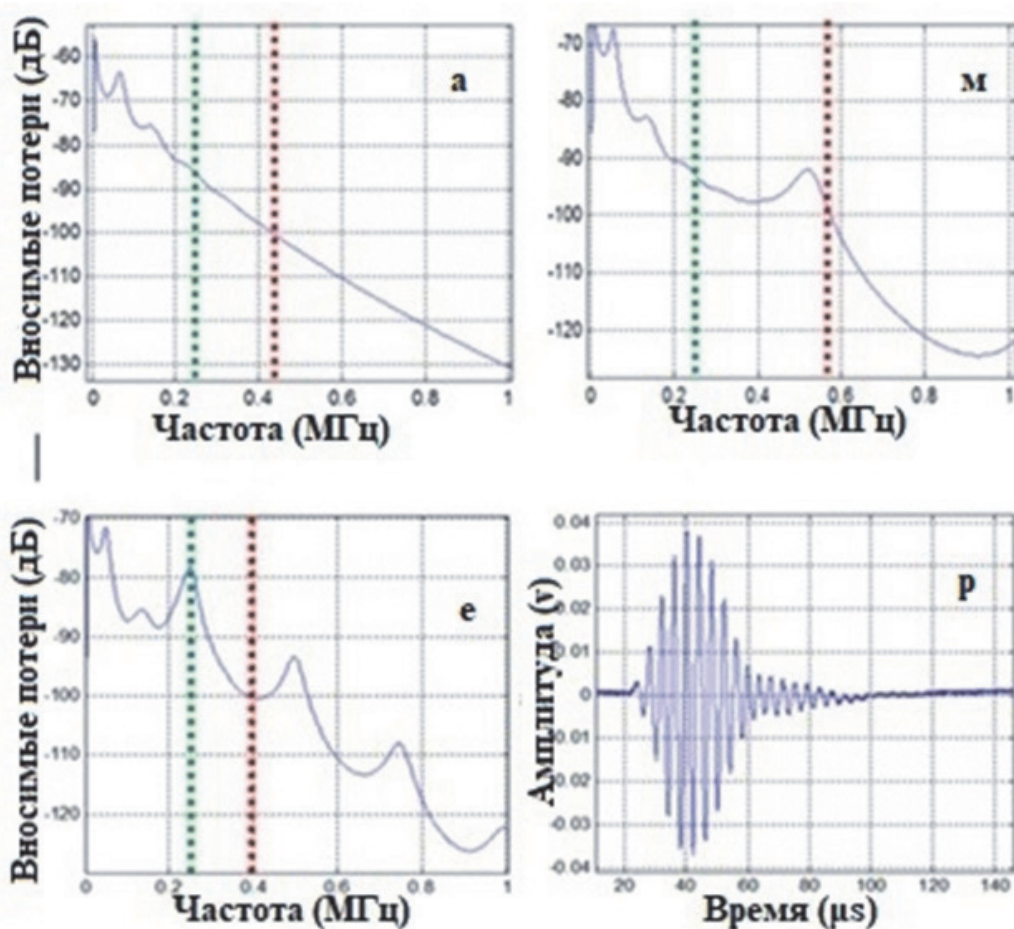


Рис. 3. Рассчитанные спектры вносимых потерь ламината FRCP и алюминиевой формы для трех различных толщин формы (а: 2 мм; м: 6 мм; е: 13 мм). Зеленая линия указывает местоположение частоты 0,25 МГц, а красная линия указывает максимальную частоту проверки для предела -100 дБ.

3. р: имитированный передаваемый импульс для пресс-формы 13 мм с использованием пары преобразователей с воздушной связью 0,25 МГц

4. ВНУТРИВЕННО УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНСПЕКЦИОННАЯ СИСТЕМА

4.3. Механика

4.1. Датчики

Импульсный отклик и чувствительность, полученные с помощью пары преобразователей, использованных для этой работы, проходили через передачу, разделенные на 2 см в воздухе, используя Panametrics Pulser / Receiver (PR 5058), с амплитудой пика, установленной на 200 В, и усилением приемника, установленным на 0 дБ, а осциллограф Tektronix DPO7054 показан на рис. 4. Чувствительность рассчитывается как отношение БПФ электрического напряжения, измеренного на клеммах приемника, к значению, измеренному на клеммах передатчика. Пиковая чувствительность составляет -24,6 дБ, этот показатель является ключевым для установки предела максимально допустимых вносимых потерь при сквозном испытании на передачу в -100 дБ.

4.2. Электроника

Две разные системы импульс / приемник были успешно использованы. Panametrics P / R 5058 и USB-ультразвук DASEL, которые обеспечивают импульсный сигнал (прямоугольная волна, мы использовали от 1 до 5 циклов) до 400 В и 60 дБ усиления при приеме.

Преобразователи были установлены на U-образном держателе, как показано на рис. 5. Держатель был встроен в автоматическую и портативную сканирующую систему, разработанную ИАТУ, для выполнения точечных измерений при передаче и С-сканов. Эта система может быть установлена для проведения испытаний, а затем убрана, чтобы освободить место для машины, которая укладывает слои препрега CFRP.

4.4. Материалы и схема проверки.

Несколько образцов (300 x 300 мм и до 30 слоев) углепластика, равного другим, используемым в авиационной промышленности, были изготовлены на FIDAMC (Ульяновск, РФ) по другой схеме уплотнения. Некоторые образцы были изготовлены без их уплотнения, а некоторые были спрессованы на разных стадиях. Уплотнения проводились с использованием обычных вакуумных пакетов. Использовали два разных времени уплотнения: короткое (15-30 мин) и большое (от 4 до 8 часов). Кроме того, некоторые из них включали тефлоновые вставки размером 10 x 10 мм на трех разных глубинах (2, 15 и 28 слоев) для имитации наличия локальных дефектов (расслоения).

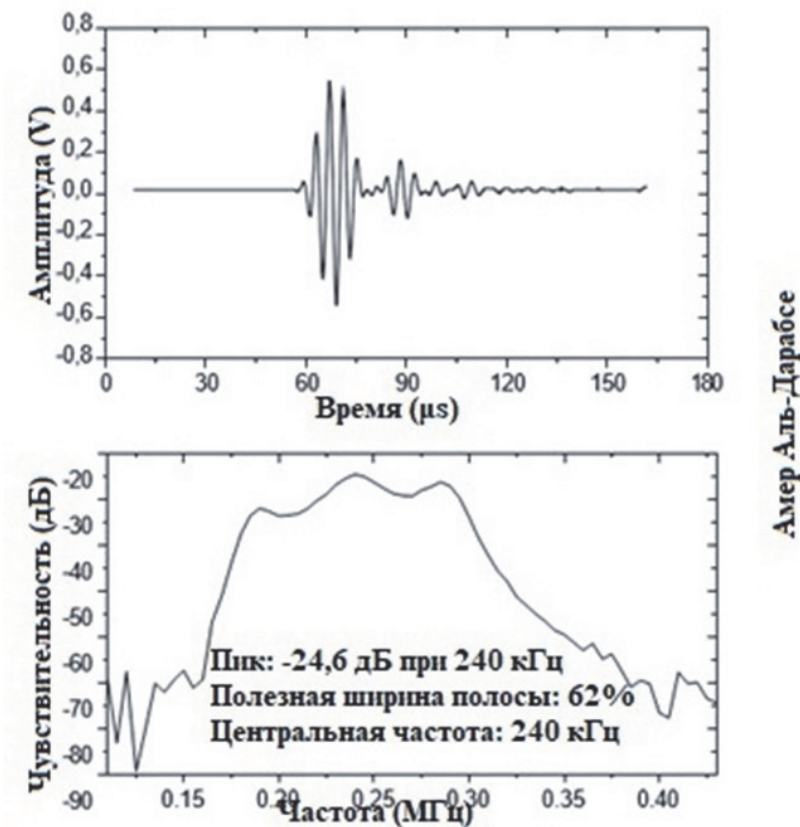


Рис. 4. Измеренная импульсная характеристика и чувствительность датчиков с воздушной связью 0,25 МГц, используемых для испытаний



Рис. 5. Изображение алюминиевой формы с углепластиком, преобразователями и системой сканирования

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Передача бортовых ультразвуковых сигналов через систему ламината CFRP и алюминиевую форму.

На рис. 6 показан передаваемый сигнал от Tx до Rx для нескольких случаев. Передаваемый сигнал через систему CFRP-пресс-формы четко идентифицирован, и показатель SNR довольно хороший (> 30 дБ). Реверберация в воздушных зазорах между датчиками и образцом четко оценена, что свидетельствует

о важности использования широкополосных датчиков.

Для проверки 8 слоев ламината амплитуда импульса Panametrics 5058 была установлена на 400 В, а коэффициент усиления на приеме - на 40 дБ. Для 30-слойного ламината конфигурация составляла 400 В и 50 дБ соответственно.

Измерение изменения во времени полета по мере увеличения количества слоев в слоях позволило нам определить скорость ультразвука, которая оказалась немного меньше, чем значения, полученные в предлиминальном исследовании, около 950 м / с.

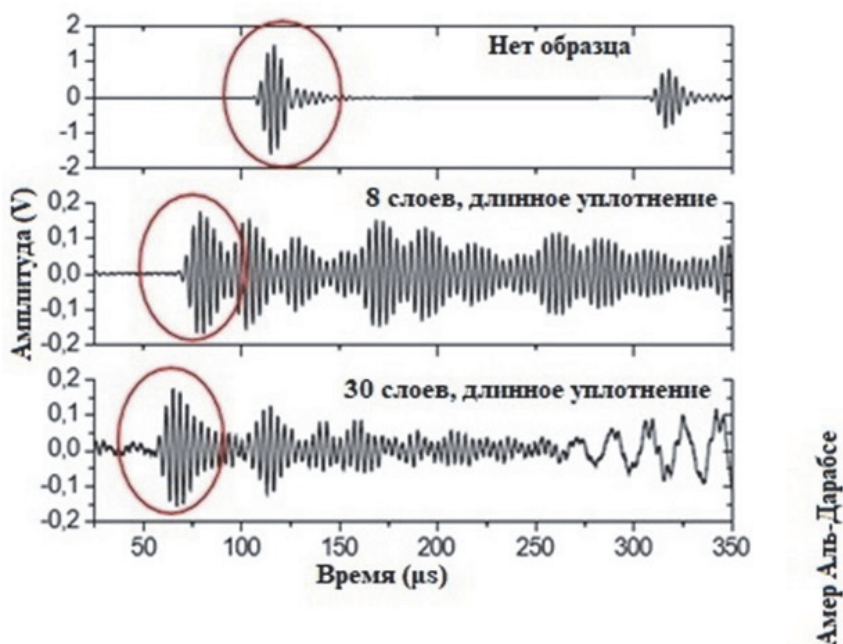


Рис. 6. Переданный сигнал от Tx-преобразователя к Rx-преобразователю для трех случаев:

Ur: нет выборки между Tx и Rx;

средняя: ламинат из углепластика (8 слоев) и алюминиевая форма 13 мм;

внизу: ламинат из углепластика (30 слоев) и алюминиевая форма 13 мм

5.2. Влияние уплотнения

Чтобы определить влияние степени уплотнения на возможности контроля, было изготовлено несколько ламинатов (до 30 слоев) по различным схемам уплотнения. Во всех этих случаях слои наносились вручную, что является наихудшим возможным сценарием, поскольку в этом случае степень уплотнения сравнительно меньше по сравнению со случаем, когда слои наносятся машиной. Сравнивая амплитуду сигнала, принятого с разным количеством слоев после одной и той же процедуры уплотнения, можно было оценить коэффициент ослабления в многослойном материале, который в результате чрезвычайно сильно зависит от степени уплотнения. Результаты суммированы в таблице II. Они, наряду с оценкой уровня шума, позволяют определить максимальное количество слоев, которые можно проверить с помощью этой конфигурации. Например, после короткого уплотнения результаты показывают, что контрольный предел составляет около 12 слоев, для неуплотненного материала этот предел снижается примерно до 3 слоев, в то время как после длительного уплотнения можно было бы проверить до 90 слоев.

5.3. Обнаружение тефлоновых вставок.

На рис. 7 показан результат сканирования гильзы двумя тефлоновыми вставками разме-

ром 10 x 10 мм, расположенными на расстоянии 75 и 150 мм соответственно от начала сканирования. Падение амплитуды сигнала из-за наличия вставок составляет от 7 до 12 дБ, а фактический размер вставки соответствует размеру падения амплитуды.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье рассматривается возможность использования ультразвукового метода с воздушной связью и сквозного пропускания для проверки ламинатов препрега из углепластика во время изготовления укладки (то есть до отверждения смолы). Основными проблемами этого применения являются невозможность прикоснуться к материалу во время проверки, большой коэффициент затухания в неотвержденном ламинате из углепластика и необходимость проведения проверки вместе с формой изготовления. Предлагается воздушная и сквозная техника передачи. Чтобы минимизировать влияние очень больших вносимых потерь, пара широкополосных и низкочастотных (0,15–0,35 МГц), высокочувствительных (-24 дБ) преобразователей с диаметром активной области 25 мм использовалась вместе с обычным импульсом / приемником. Кроме того, была предложена форма из алюминия толщиной 13 мм, поэтому форма имела резонанс толщины в пределах полосы пропускания преобразователей, что увеличивает передачу энергии. При такой конфигурации

Таблица 2. Среднее значение измеренного потребления на слой для различных видов компакт-дисков для всех испытанных случаев

Уплотнение	Затухание (дБ / слой) при 0,25 МГц
Длинная	0.3-0.75
Короткий	2.5-3.0
Ничего	7-10

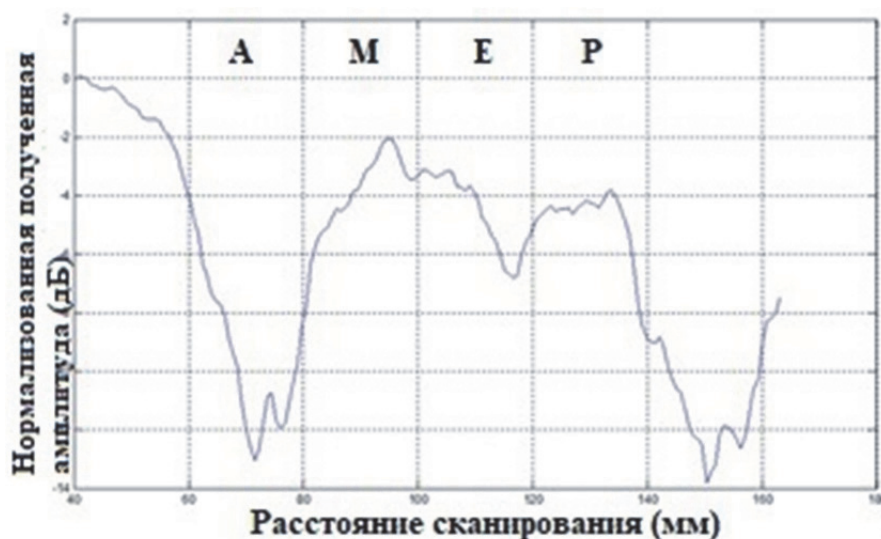


Рис. 7. Линейное сканирование вдоль двух тефлоновых вставок, ламинат с 24 слоями, измеренный после длительного уплотнения

можно было проверять хорошо уплотненные ламинаты с количеством слоев до 30, и оценка заключается в том, что максимальная толщина, которая может быть проверена, составляет около 90 слоев. Также было возможно обнаружить присутствие тефлоновых (10 x 10 мм) вставок на разных глубинах с потерей амплитуды около 7-12 дБ по сравнению с областями без вставок. Наконец, в документе раскрывается, что одним из ключевых факторов, определяющих возможность проверки укладки препрега слоистых углепластика, является затухание ультразвука. Это ослабление в значительной степени определяется степенью уплотнения ламината; в случае слабо уплотненных ламинатов он может быть на порядок больше, чем в случае хорошо уплотненных ламинатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аль Дарабсе А.М.Ф., Маркова Е.В., Миллер В.В. Роль искусственного интеллекта в роботехнике // В сборнике: Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2019 Сборник трудов XXXII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов. Под общей редакцией В.И. Жулева. 2019. С. 638-641.
2. Аль Дарабсе А.М.Ф. Проблемы программного обеспечения в авиационных системах // В сборнике: Проблемы технического сервиса в АПК Сборник научных трудов II студенческой всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 7-15.
3. Аль Д.А.М.Ф., Маркова Е.В., Вольсков Д.Г. Подрыв конфиденциальности в системе адресации отчетности авиационной связи // В сборнике: Миллионщиков-2019 Материалы II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию ГГНТУ. 2019. С. 123-129.
4. Аль Д.А.М.Ф., Маркова Е.В. Система мониторинга работоспособности авиационных газотурбинных двигателей по реальным данным // В сборнике: Миллионщиков-2019 Материалы II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию ГГНТУ. 2019. С. 137-143.
5. Аль Д.А.М.Ф., Маркова Е.В. Особенности снабжения аэрокосмической промышленности // В сборнике: В мире научных открытий Материалы III Международной студенческой научной конференции. 2019. С. 137-140.
6. Маркова Е.В., Аль Дарабсе А.М.Ф., Черненко Е.В. Форсайт-аудит систем управления в аэрокосмической технологии // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2019. № 1 (85). С. 71-73.
7. Маркова Е.В., Аль Дарабсе А.М.Ф. Влияние инноваций на экономический рост // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2019. № 2 (86). С. 72-74.
8. Аль Дарабсе А.М.Ф., Маркова Е.В. Исследование требований летной годности составных воздушных судов для воздушных судов транспортной категории в FAA // Российский электронный научный журнал. 2019. № 1 (31). С. 8-21.
9. Аль Дарабсе А.М.Ф., Маркова Е.В., Денисова Т.В. Моделирование турбовинтовой гибридной электрической двигательной установки // Российский электронный научный журнал. 2019. № 2 (32). С. 16-33.
10. Аль Дарабсе А.М.Ф. Исследование экономических систем в авиационной инженерии на основе методологии функционально-стоимостной инженерии // В сборнике: Молодежь и наука XXI века Материалы Международной научной конференции. 2018. С. 470-472.

CONTROLS THE PLASTIC AMPLIFIER GAS DUE TO FLYING IN THE ASSEMBLY LINE

© 2021 T.A. Dzhabrailov, I.A. Shchukarev, A.S. A. Al-Mesri, E.V. Chernenkaya

The Ulyanovsk State Technical University,
The Institute of Aviation Technology and Management, Ulyanovsk, Russia

This article test chip reactivity of carbon fiber (CFRP) samples were analyzed in a standard format. First, the nature of ultrasound uncertainty is determined, and this information is used to establish the value of the control that characterized the production of crystals up to 30 layers, with different procedures. Different input and set some Teflon to simulate the presence of desalination. Article explains that the choice for special disability (flexible, medium frequency and configuration templates), collapse can be carried out, the face of the new field in the form the respiratory tract.

Key words: prepreg laminates, composite materials, teflon inserts, compaction schemes, ultrasonic methods, aviation industry, thermoactive polymers, autoclave stage, uncured stage.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-48-54

Tayyar Dzhabrailov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General Scientific Disciplines. E-mail: tqayar@yandex.ru

Igor Shchukarev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General Scientific Disciplines. E-mail: schykar@mail.ru

Al-Mesri Ali Said Ahmed, a Post-Graduate Student of the Department of Radio Engineering.

E-mail: ali_almassry@mail.com

Elena Chernenkaya, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of General Scientific Disciplines. E-mail: lekalav@mail.ru