

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ФАЗИРОВАННЫМИ РЕШЕТКАМИ НИЗКОСКОРОСТНЫХ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПОЛИМЕРАХ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ

© 2023 г. Сюньхуэй Цзоу¹, Вэйчэн Гао^{1,*}, Гозэн Лю¹

¹Технологический институт Харбина, Харбин, Китай

E-mail: *gaoweicheng@sina.com

Поступила в редакцию 11.05.2023; после доработки 28.06.2023

Принята к публикации 07.07.2023

Для исследования характеристик расслоения слоистых углепластиков в состоянии едва видимого ударного повреждения (ЕВУП) использовались испытания на низкоскоростное ударное воздействие (НСУВ) и неразрушающий контроль (НК). С помощью методов визуального контроля и контактных измерений были определены энергетические пороги для шести различных последовательностей укладки слоев в состоянии ЕВУП. Ультразвуковые методы неразрушающего контроля с применением фазированных решеток использовались для количественной оценки величины повреждений расслоения с помощью различных параметров, включая площадь, форму и тенденцию к изменению величины расслоения. Кроме того, была проведена качественная оценка ударной вязкости слоистых пластиков путем анализа характерных форм повреждений расслоения на различных образцах с целью выявления влияния последовательности укладки слоев. Результаты данного исследования показывают, что уменьшение углового разброса между соседними слоями и минимизация повторения одинаковых слоев позволяет уменьшить повреждение отслаивания. Кроме того, увеличение соотношения углов $\pm 45^\circ$ и 0° позволяет повысить жесткость конструкции на изгиб. В частности, было показано, что метод ультразвукового неразрушающего контроля с применением фазированных решеток позволяет эффективно обнаруживать повреждения отслоения в ламинате в состоянии ЕВУП.

Ключевые слова: слоистые углепластики, низкоскоростные ударные повреждения, ЕВУП, ультразвуковой контроль фазированными решетками, последовательность укладки слоев.

DOI: 10.31857/S0130308223080055, EDN: DYZBRT

1. ВВЕДЕНИЕ

Полимеры, армированные углеродными волокнами (ПАУВ), широко используются в аэрокосмической отрасли, поскольку отвечают строгим техническим требованиям, предъявляемым к легким, долговечным, легкоформуемым, коррозионностойким и высокоэффективным конструкциям [1, 2]. Тем не менее в процессе эксплуатации или технического обслуживания углепластиковые конструкции подвержены падению инструмента, ударам града, птиц, столкновениям с обломками или другими летающими объектами [3]. Эти низкоскоростные ударные нагрузки могут нанести непоправимый ущерб композитным слоистым конструкциям, имеющим низкую внутри- и межслойную прочность, что представляет значительную угрозу безопасности полета самолета [4].

Едва видимое ударное повреждение (ЕВУП) привлекло внимание многих ученых благодаря своей скрытой форме [5—9]. Качественная идентификация повреждений расслоения в слоистых конструкциях, испытывающих ЕВУП, в настоящее время является основной задачей и проблемой неразрушающего контроля (НК) в области композитов. Известные методы НК для углеволоконных композитов включают инфракрасную термографию [10], рентгенографию [11], вихретоковый контроль [12] и ультразвуковой контроль [13]. Ультразвуковой контроль является наиболее распространенным методом неразрушающего контроля благодаря своей дешевизне, безопасности и способности проникать в различные материалы [14, 15].

Сложность многослойных конструкций из углепластика и окружающая среда создают значительные трудности для традиционных технологий ультразвукового контроля. Метод фазированных решеток предпочтительнее традиционных методов ультразвукового неразрушающего контроля благодаря более высокой эффективности обнаружения, более широкому диапазону охвата, лучшей чувствительности и более высокой надежности. Эта технология приобрела большую популярность среди инженеров и специалистов [16—18]. С помощью ультразвукового метода неразрушающего контроля с применением фазированных решеток во многих исследованиях изучалось влияние различных параметров, включая материалы волокон и матрицы [19], энергию удара [20], толщину ламината [21], внутрислойные включения [18] и форму ударного элемента [22], на повреждение внутреннего расслоения композитных ламинатов при низкоскоростном ударном нагружении. Сложность и хаотичность путей распространения повреждений в слоистом материале не позволяют полностью понять взаимосвязь между последовательностью укладки слоев и повреждением отслоения. Хотя

некоторые типичные слоистые материалы с однонаправленной укладкой, перекрестной укладкой и квазистатической укладкой [23—25] были предметом ограниченного числа исследований, посвященных последовательности укладки слоев, влияние изменения соотношения слоев на внутренние повреждения в композитных слоистых материалах получило меньшее внимание.

Исследование было начато с проведения испытаний на низкоскоростной удар шести углепластиковых слоев с различной последовательностью укладки слоев. Пороговые значения энергии для различных образцов в состоянии BVID определялись путем визуального осмотра и контактных измерений. Затем для исследования были выбраны три уровня энергии удара, которые удовлетворяли состояниям BVID для всех образцов. Уровни повреждения внутреннего расслоения углепластиковых слоев исследовались качественно и количественно с помощью ультразвукового метода неразрушающего контроля с применением фазированных решеток. Сравнивая форму, площадь и тенденцию изменения проекции расслоения, в данном исследовании было проанализировано влияние слоев $\pm 45^\circ$ и 0° на повреждение внутреннего расслоения. Также были объяснены причины увеличения площади расслоения. Кроме того, был проведен сравнительный анализ дефектов внутреннего расслоения слоистых композитов с нетрадиционным направлением укладки волокон.

2. НСУВ

2.1. Исследуемые образцы

Представленные образцы углепластиков, используемые в данном исследовании, включают в себя два основных типа: образцы со стандартными (обозначаются как T) углами укладки волокон 0° , $\pm 45^\circ$, 90° и образцы с нестандартными (обозначаются как NT) углами укладки волокон $\pm 22,5^\circ$, $67,5^\circ$, $112,5^\circ$. Размер каждого образца составляет 150×100 мм, толщина одного слоя — 0,187 мм. Всего для изготовления образца используется 20 слоев. В табл. 1 приведены сведения об используемых слоях и номера образцов. Приведены соотношения слоев, указывающие процентное соотношение слоев 0° , $\pm 45^\circ$ и 90° к общему количеству слоев, использованных в каждом образце (нетрадиционные образцы в обсуждение не включены). Размеры образцов и типичная последовательность укладки слоев композитных ламинатов показаны на рис. 1.

Таблица 1

Данные о компоновке образцов

Номер	Компоновка	Количество слоев	Толщина, мм	Соотношение слоев, %
T1	$[45/-45/90/45/-45/45/-45/0/45/-45]_s$	20	3,74	[10/80/10]
T2	$[45/-45/90/0/45/-45/45/-45/90/0]_s$	20	3,74	[20/60/20]
T3	$[45/0/-45/90/45/0/90/-45/90/0]_s$	20	3,74	[30/40/30]
T4	$[45/0/-45/90/45/0/-45/0/90/0]_s$	20	3,74	[40/40/20]
T5	$[45/90/-45/0/0/45/0/0/-45/0]_s$	20	3,74	[50/40/10]
NT	$[67,5/-22,5/112,5/67,5/-22,5/67,5/-22,5/22,5/67,5/-22,5]_s$	20	3,74	\

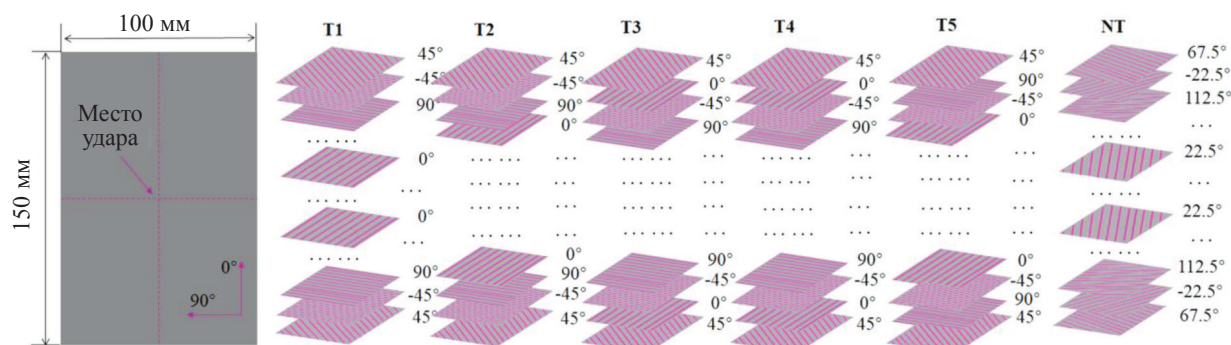


Рис. 1. Размеры образцов и типичная последовательность укладки слоев композитных ламинатов.

2.2. Методика эксперимента

Испытания состоят из двух основных частей. Первая часть включает в себя проведение испытания на НСУВ для определения порога повреждения ЕВУП-энергии. Вторая часть включает в себя использование метода ультразвукового неразрушающего контроля с применением фазированных решеток для определения повреждений внутреннего расслоения углепластиковых слоев в ЕВУП-состоянии.

Ударные испытания проводились на копере с падающим грузом Zwick HIT230F (рис. 2а), который состоит в основном из системы измерения нагрузки и перемещений, полусферического ударного элемента и вторичного противоударного устройства. Кроме того, система измерения нагрузки и перемещений включает датчики нагрузки, датчики перемещений и датчики скорости, которые способны регистрировать соответствующие кривые во время удара. Образцы, в соответствии с ASTM D 7136 [26], устанавливались на неподвижное основание с прямоугольным отверстием 125×75 мм, а четыре резиновых захвата ограничивали их движение во время удара (рис. 2б). Различные энергии удара достигались путем регулирования высоты падения молотка в процессе испытания. После ударного испытания обе стороны образца подвергались визуальному осмотру для выявления видимых повреждений. После этого на поверхности определялась зона повреждения с помощью цифрового глубинного микрометра с точностью $\pm 0,001$ мм (рис. 2в) и цифрового верньерного штангенциркуля с точностью $\pm 0,03$ мм (рис. 2г). С учетом упругой деформации измерения проводились каждые 6 ч, а окончательные значения фиксировались после достижения стабильности. Для проведения испытаний были выбраны семь различных уровней энергии удара: 20, 25, 30, 35, 40, 45 и 50 Дж. В дальнейшем для определения энергетического диапазона состояния ЕВУП использовались визуальный контроль, верньерный штангенциркуль и микрометрический контроль.

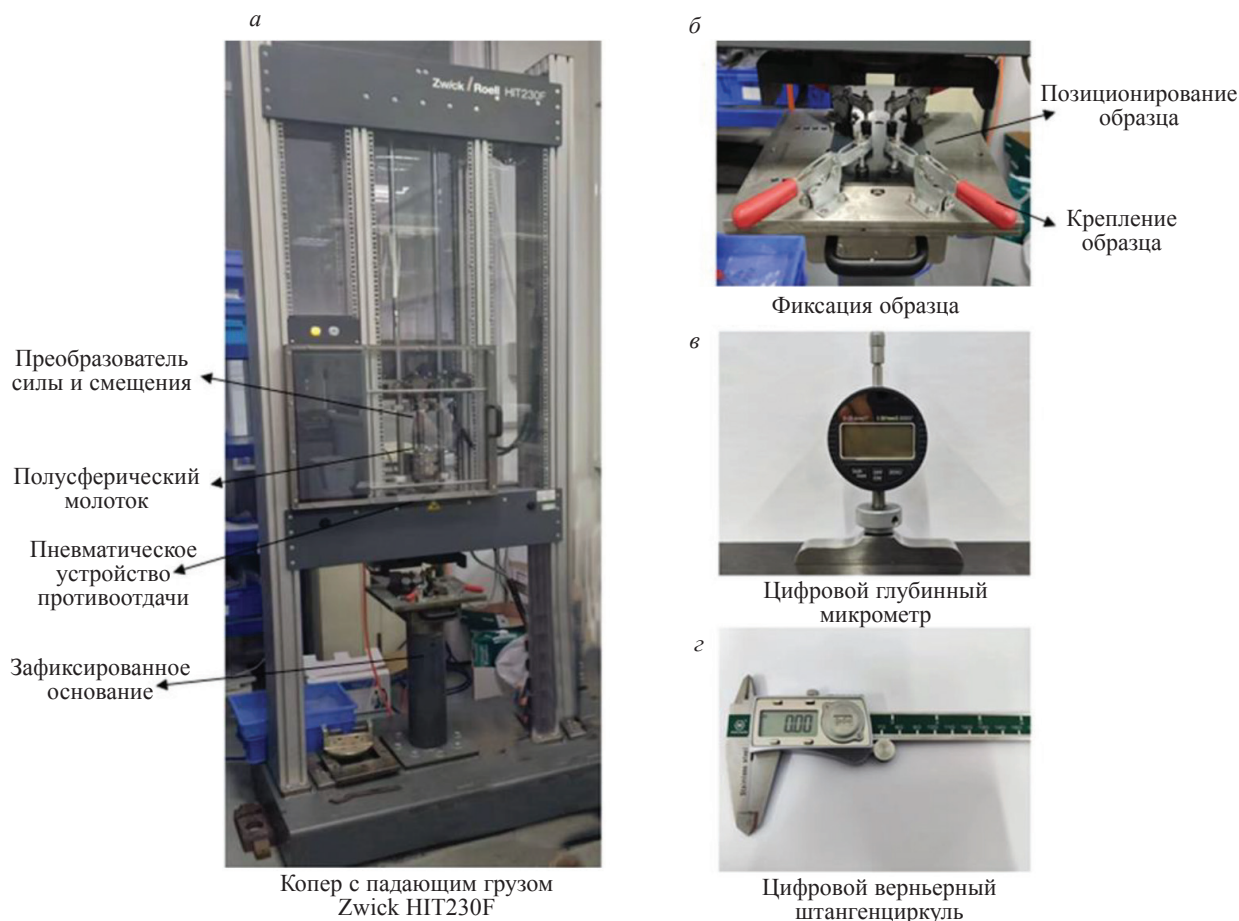


Рис. 2. Испытание на низкоскоростное ударное воздействие.

3. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК

В ультразвуковом неразрушающем контроле с применением фазированных решеток ультразвуковые волны одновременно передаются на проверяемый образец через несколько элементов решетки с применением закона задержки и регистрацией результирующих эхосигналов. Эти сигналы анализируются с целью получения информации о разности времен, амплитуд и фаз. На основе этого анализа строится трехмерное изображение внутренних структур контролируемого объекта. Кроме того, данная технология позволяет определить местоположение расслоения внутри объекта. Это позволяет проводить качественный и количественный анализ дефектов.

Установка, реализующая ультразвуковой неразрушающий контроль (НК) с применением фазированных решеток, использованные в данном исследовании, представлен на рис. 3. В частности, использовался портативный ультразвуковой дефектоскоп Phasor XS с линейной фазированной решеткой, состоящей из 64 элементов (шириной 0,49 мм и расстоянием между центрами элементов двух соседних элементов 1 мм), с центральной частотой 5 МГц. Для минимизации эффекта ближнего поля и улучшения визуализации дефектов датчик был установлен под нулевым углом на прямоугольной призме толщиной 20 мм. Кроме того, для получения информации о положении зонда в направлении развертки использовался энкодер. Для предотвращения образования воздушных карманов между образцами и контактной поверхностью призмы, которые могут снизить затухание звукового луча и препятствовать беспрепятственному распространению ультразвуковых сигналов в образцах, применяется специальный контактный гель. Контактный гель также минимизировал трение и защищал как образцы, так и поверхность зонда.



Рис. 3. Установка для ультразвукового контроля фазированными решетками.

Для получения точной информации о дефектах необходимо провести калибровку скорости звука в образце до начала контроля. С этой целью для калибровки скорости звука была выбрана поверхность образца в неповрежденной области, удаленной от точки удара. Окончательно откалиброванная скорость звука составила 2700 м/с. В процессе контроля достаточно точно рассчитывался закон задержки, а в режимах линейной развертки и линейной фокусировки ультразвуковой фазированной системы проводилось продольное сканирование вдоль образца. При каждом сканировании задействовалось 16 элементов решетки с шагом 1, а глубина фокусировки была установлена на 3,5 мм, что позволило получить 49 сигналов А-скана без перемещения датчика. В каждой точке развертки отображаются амплитудно-временные кривые (или кривые толщины) для падающей волны, волны от дефекта и волны от нижней поверхности материала. Затем сигнал А-скана обрабатывается алгоритмом получения изображения С-скана, который позволяет получить информацию о форме и размерах дефектных участков в слоистых углепластиках.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Верификация достоверности контроля

Для обеспечения надежности и достоверности результатов испытаний из каждого типа образцов были сделаны три тестовых экземпляра под номерами 001, 002 и 003, которые подвергались воздействию одной и той же энергии удара. На рис. 4 и 5 показаны кривые истории отклика на удар и С-сканы повреждений при отслаивании образца Т1 при энергии удара 20 Дж для трех образцов. В случае низкоскоростного удара композит рассеивает кинетическую энергию ударного тела двумя основными способами (рис. 4в): один — это энергия, поглощенная различными механизмами повреждения (поглощенная энергия) и другой — энергия, возвращенная обратно к ударному телу в результате упругой деформации (упругая энергия). Эти два вида энергии получаются путем интегрирования кривой «нагрузка—перемещение» (рис. 4б) во время удара. Кроме того, методом ультразвукового неразрушающего контроля с фазированными решетками получен С-скан повреждения отслоения. Результаты показывают, что кривые «контактная сила—время», «контактная сила—смещение», «энергия—время» и размер участка расслоения имеют меньшую погрешность и меньший разброс при одинаковой энергии удара. Эти результаты подтверждают хорошую повторяемость и согласованность результатов испытаний. Следовательно, в последующем исследовании результаты испытаний не будут дублироваться.

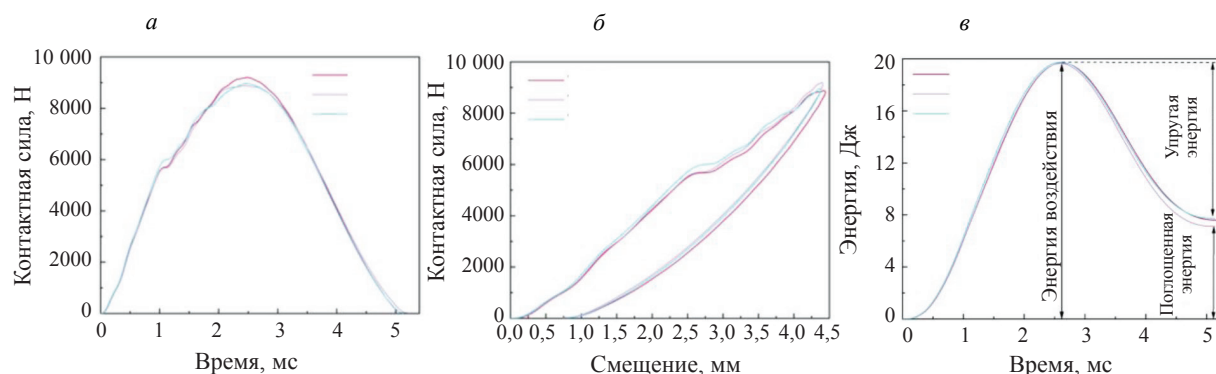


Рис. 4. История ударного отклика трех контролируемых экземпляров из образца Т2 при 20 Дж: кривые «контактная сила—время» (а); кривые «контактная сила—смещение» (б); кривые «энергия—время» (в).

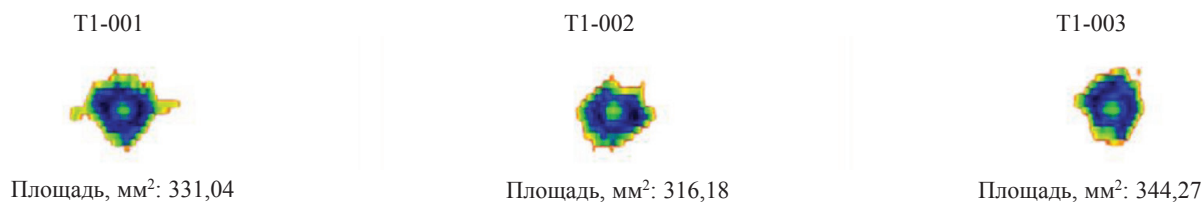


Рис. 5. С-сканы повреждения расслоения.

4.2. Определение энергетического порога для состояния ЕВУП

На начальном этапе планирования эксперимента было выбрано семь значений энергии удара. Однако в ходе испытаний было обнаружено, что по мере увеличения энергии на передней и задней сторонах углепластиковых ламинатов появляются видимые трещины. Это визуально заметное повреждение, хотя и заслуживает внимания, меркнет по сравнению с угрозой безопасности, которую представляют собой едва заметные повреждения, что также негативно сказывается на проектировании и применении композитных конструкций. В связи с этим возникла необходимость в более

точном определении диапазона энергии удара для получения полного и наглядного представления о повреждении внутреннего расслоения визуально малозаметных углепластиковых слоев. В данной работе состояние ЕВУП композитов описывается количественно двумя способами: во-первых, проводится визуальное поиск значительных вмятин или трещин на поверхности образцов (наблюдатель стоит на расстоянии примерно 30—50 см от поверхности образцов); во-вторых, используются цифровые микрометры и верньерные штангенциркули, чтобы убедиться, что глубина вмятин в зоне удара не превышает 0,5 мм.

Типичные едва видимые ударные повреждения (ЕВУП) и видимые ударные повреждения (ВУП) углепластиковых слоев представлены на рис. 6 и 7. Очевидно, что в отличие от ВУП образец в состоянии ЕВУП не имеет следов повреждений на поверхности, но при этом происходит его внутреннее расслаивание, что существенно влияет на несущие характеристики конструкции.

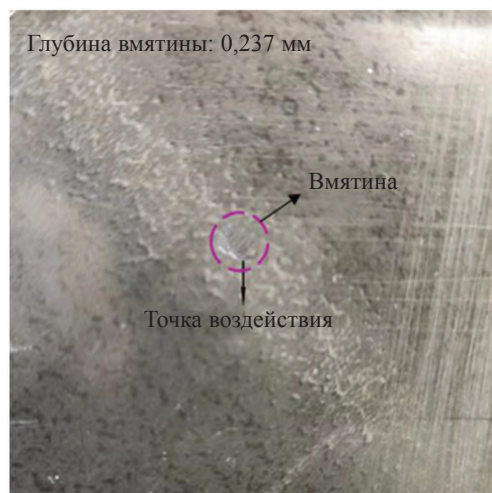


Рис. 6. Едва видимое ударное повреждение (ЕВУП).

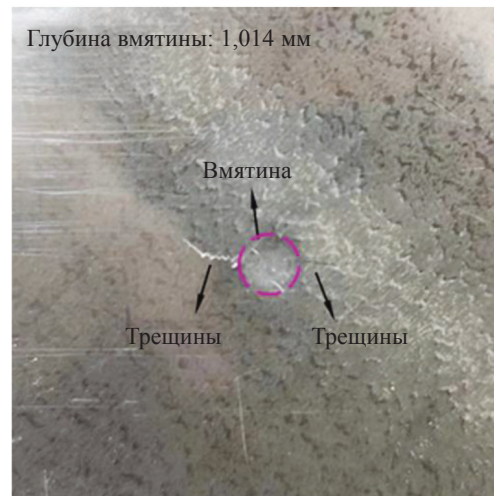


Рис. 7. Видимое ударное повреждение (ВУП).

На рис. 8 показана динамика изменения глубины вмятины в зоне удара при различных последовательностях укладки слоев и значениях энергии удара. Образцы имеют схожие характеристики, причем увеличение глубины вмятины положительно коррелирует с энергией. До определенного значения энергии удара этот прирост невелик, а после него быстро увеличивается — явление, известное в литературе как «явление перегиба» [27]. Считается, что способность образца сопротивляться ударному разрушению меняется до и после этой точки. Примечательно, что до «точки

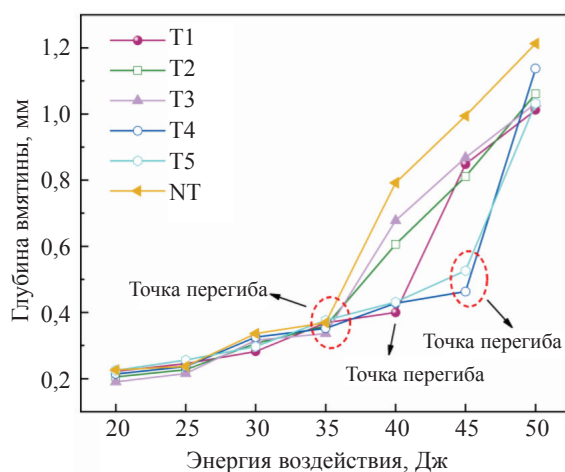


Рис. 8. Значение глубины вмятины для различных образцов при семи энергиях удара.

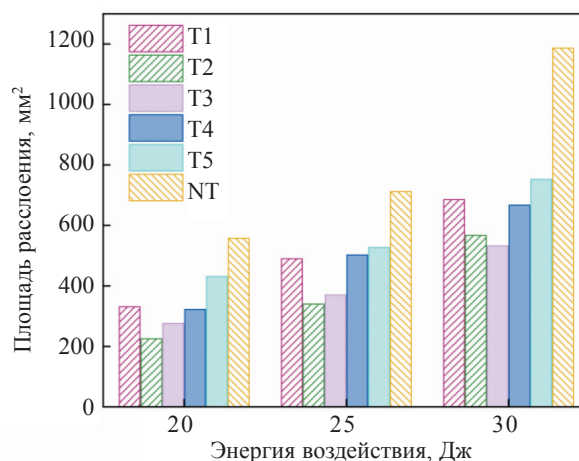


Рис. 9. Площадь расслоения у различных образцов в состоянии БВИД.

перегиба» глубина вмятины на поверхности образца составляет менее 0,5 мм, что соответствует состоянию ЕВУП, описанному в предыдущей работе. После «точки перегиба» глубина вмятины резко увеличивается, что свидетельствует о возникновении ВУП. В сочетании с результатами визуального контроля можно считать, что энергия при возникновении «точки перегиба» может быть использована в качестве порогового значения энергии для ЕВУП. Учитывая разницу в сопротивлении повреждению, вызванную изменением последовательности укладки слоев, для исследования влияния конфигурации укладки на повреждение внутреннего расслоения образцов были выбраны три энергии (20, 25 и 30 Дж).

4.3. Получение изображения межслойных повреждений в композитных углепластике с помощью С-сканирования

Механизм ударного разрушения композитных слоистых материалов при низкоскоростном ударе достаточно сложен: в нем участвуют комбинированные формы повреждений, на которые влияют как тонкий материал, так и макроструктура, изменяющаяся под действием нагрузки во времени и в пространстве. Изменение направления укладки волокон непосредственно влияет на общую жесткость слоистого материала, изменяя распространение волн ударных напряжений и вызывая различные режимы зарождения и распространения трещин в матрице. Это в дальнейшем влияет на процесс внутреннего расслаивания.

С-сканирование — это процесс отображения исходного сигнала, полученного портативным ультразвуковым дефектоскопом Phasor XS с фазированной решеткой, который представляется в виде цветowych изображений, отображающих информацию о различных уровнях проверяемого образца. А изображения С-скана представляют собой планарные картины, дающие информацию о форме и размерах плоскости дефекта. На рис. 10 показана проекция С-сканированного изображения повреждения внутреннего расслоения, полученного методом ультразвукового контроля фазированными решетками для шести типов слоистых пластиков при низкоскоростном ударном нагружении. Более темные цвета, расположенные ближе к центральной области изображения, свидетельствуют о более сильной отраженной энергии, что характеризует степень более серьезного повреждения. Кроме того, форма областей расслаивания существенно различается у образцов с разным порядком компоновки. Поэтому сравнение только по длине и ширине поврежденных участков не дает полного представления о реальных размерах повреждения. Для устранения этого недостатка область расслоения, представленная на С-скане рис. 10, была подвергнута дополнительной обработке для точного определения размеров области расслоения, как показано на рис. 9. Как видно из рисунка, область расслоения постепенно увеличивается по мере увеличения энергии.

Межслойные границы образцов Т1 и Т2 имели преимущественно угол $\pm 45^\circ$, в то время как остальные три типа образцов с обычной укладкой имели более равномерное расположение волокон. Для удобства сравнения образцы с обычной укладкой были разделены на две группы.

Результаты контроля повреждений поверхности показали, что образцы Т1 обладают более высоким пороговым значением энергии с точки зрения визуально видимого повреждения (точкой перегиба) по сравнению с образцами Т2, что свидетельствует о более высокой устойчивости образцов Т1 к деформации. С другой стороны, результаты ультразвукового контроля показали, что во всех трех случаях увеличения энергии удара площадь расслаивания образцов Т2 была меньше, чем образцов Т1, что свидетельствует о более высокой стойкости образцов Т2 к расслаиванию. Другими словами, увеличение доли слоев $\pm 45^\circ$ позволяет повысить жесткость слоистого пластика на изгиб, но это сопряжено с определенными издержками, поскольку увеличивает степень распространения межслойных повреждений. Увеличение степени повреждения при расслаивании в значительной степени связано с большей угловой разницей между границами 45° и -45° по сравнению с границами 0° и $\pm 45^\circ$ или 90° и $\pm 45^\circ$. Такая большая угловая разница обеспечивает больший потенциал для увеличения повреждений. Кроме того, в образцах Т1 и Т2 наблюдались значительные различия в форме проекций расслоения. При увеличении энергии форма проекции расслоения образцов Т1 менялась от неправильной круглой до неправильной эллиптической с направлением главной оси вдоль 0° . Образцы Т2, напротив, постоянно имели неправильную круглую форму. Это свидетельствует о том, что изменение последовательности укладки слоев влияет на реакцию ламината на ударные нагрузки.

Доля слоев с углом 0° увеличивалась на 10 % в каждом из оставшихся трех типов типовых образцов в порядке возрастания. Отсутствие достаточно качественных образцов не позволило авторам судить об энергетическом пороге состояния BVID образцов Т4 и Т5 только по результатам

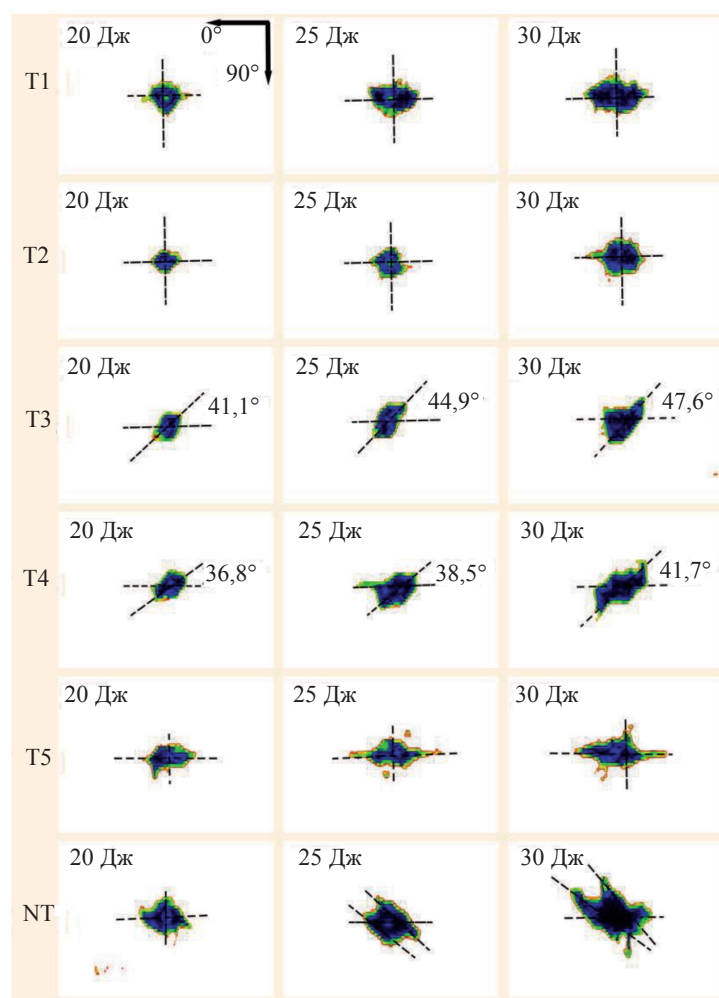


Рис. 10. Изображение С-скана повреждения расслоения.

поверхностного контроля повреждений. Однако, учитывая меньший энергетический порог образцов Т3, можно предположить, что увеличение доли слоев с углом 0° в определенной степени способствует улучшению жесткости многослойной структуры при изгибе. Результаты ультразвукового С-сканирования позволяют произвести более детальный анализ повреждений. В отличие от образцов Т1 и Т2, форма проекции расслоения образцов Т3, Т4 и Т5 была неправильной эллиптической для всех трех энергий удара. Примечательно, что направление проекции расслоения по главной оси также значительно изменяется при различных соотношениях слоев, уменьшаясь от почти 45° в начале до 0° в конце. Кроме того, площадь расслоения увеличивается по мере увеличения соотношения слоев в направлении 0° (см. рис. 10). Авторы определили, что увеличение площади расслоения отличается для образцов Т4 и Т5. Увеличение площади расслоения для образцов Т4 объясняется увеличением угла между границами 0 и 90° , что приводит к увеличению разницы между углами монослоев, аналогично ситуации с образцами Т2. Напротив, в образцах Т5 волокна укладывались с перекрытием в направлении 0° (см. табл. 1), что, согласно литературным данным [28], обычно не является причиной расслоения.

NT-образцы имеют большую площадь расслоения и более неправильную форму расслоения по сравнению со стандартными слоистыми образцами. Тем не менее использование нестандартных образцов при проектировании конструкций остается возможным. Хотя такие образцы открывают широкие возможности для проектирования, сложность и разнообразие их особенностей повреждения будут представлять большую сложность для специалистов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье исследованы возможности ультразвукового метода неразрушающего контроля с применением фазированных решеток для обнаружения и идентификации едва видимых ударных повреждений композитных слоистых материалов. Вначале были проведены испытания на низкоскоростное ударное воздействие на шести композитах с различной последовательностью укладки слоев. Формы повреждений на поверхности композита и глубина вмятин возле поверхности удара были проанализированы для определения пороговых значений энергии, при которых различные слои достигают состояния ЕВУП. Затем был проведен ультразвуковой неразрушающий контроль при трех более низких энергиях удара, которые удовлетворяли всем образцам, находящимся в состоянии ЕВУП. Результаты испытаний показали, что даже в состоянии ЕВУП низкоскоростной удар по-прежнему вызывает значительное внутреннее расслоение. При этом с увеличением энергии область расслоения становилась все более обширной и имела более сложную структуру.

Кроме того, было проведено исследование особенностей ударного воздействия на композит путем сравнения результатов повреждений при различной последовательности укладки слоев. Увеличение доли слоев ± 45 или 0° повысило жесткость композита на изгиб и в некоторой степени увеличило пороговое значение энергии состояния BVID. Однако увеличение доли слоев ± 45 и 0° привело к увеличению площади расслаивания. Увеличение межслоевой области зависит от двух причин. Во-первых, увеличение разности углов раздела между слоями (например, слои 45 и -45 , 0 и 90°) увеличивает вероятность распространения расслоения. Во-вторых, при перекрытии слоев в одном направлении (например, слои 0° и 0°) возникает значительная разница в жесткости между перекрывающимися и соседними слоями, что приводит к концентрации напряжений и вызывает сильное расслоение, которого необходимо избегать при проектировании конструкции. Изменение площади расслоения — не единственный фактор, влияющий на последовательность укладки слоев, он также существенно влияет на форму и направление распространения повреждений при расслоении. О сложности механизма ударного повреждения свидетельствует такое явление.

Таким образом, использование метода ультразвукового контроля фазированными решетками для оценки формы внутренних повреждений композитных пластин в состоянии ЕВУП является эффективным и надежным средством исследования характеристик повреждения углепластиков при низкоскоростном ударном воздействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mair R.I.* Advanced composite structures research in Australia // *Composite Structures*. 2002. V. 57 (1—4). P. 3—10.
2. *Georgiadis S., Gunnion A.J., Thomson R.S.* et al. Bird-strike simulation for certification of the Boeing 787 composite moveable trailing edge // *Composite Structures*. 2008. V. 86 (1—3). P. 258—268.
3. *Pai Y., Pai K.D., Kini M.V.* A review on low velocity impact study of hybrid polymer composites // *Materials Today: Proceedings*. 2021. V. 46. P. 9073—9078.
4. *Ali M., Joshi S.C.* Impact Damage Resistance of CFRP Prepreg Laminates with Dispersed CSP Particles into Ply Interfaces // *International Journal of Damage Mechanics*. 2012. V. 21 (8). P. 1106—1127.
5. *Goossens S., Berghmans F., Sharif Khodaei Z.* et al. Practicalities of BVID detection on aerospace-grade CFRP materials with optical fibre sensors // *Composite Structures*. 2021. V. 259. P. 113243.
6. *Chen F., Yao W., Jiang W.* Experimental and simulation investigation on BVID and CAI behaviors of CFRP laminates manufactured by RTM technology // *Engineering Computations*. 2021. V. 38 (5). P. 2252—2273.
7. *Mustapha S., Ye L., Dong X.* et al. Evaluation of barely visible indentation damage (BVID) in CF/EP sandwich composites using guided wave signals // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. V. 76—77. P. 497—517.
8. *Wei L., Chen J.* An integrated modeling of barely visible impact damage imaging of CFRP laminates using pre-modulated waves and experimental validation // *Composite Structures*. 2023. V. 304. P. 116372.
9. *Thorsson S.I., Waas A.M., Rassaiian M.* Low-velocity impact predictions of composite laminates using a continuum shell based modeling approach Part b: BVID impact and compression after impact // *International Journal of Solids and Structures*. 2018. V. 155. P. 201—212.
10. *Ciampa F., Mahmoodi P., Pinto F.* et al. Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components // *Sensors*. 2018. V. 18 (2). P. 609.
11. *Yu B., Blanc R., Soutis C.* et al. Evolution of damage during the fatigue of 3D woven glass-fibre reinforced composites subjected to tension–tension loading observed by time-lapse X-ray tomography // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016. V. 82. P. 279—290.

12. Wang Z., Zhu J., Tian G. et al. Comparative analysis of eddy current pulsed thermography and long pulse thermography for damage detection in metals and composites // *NDT & E International*. 2019. V. 107. P. 102155.
13. Geng X., Zhang C., Zhou B. et al. Experiment and simulation for ultrasonic wave propagation in multiple-particle reinforced composites // *Ultrasonics*. 2023. V. 132. P. 106971.
14. Saito O., Sen E., Okabe Y. et al. Laser Wavelengths Suitable for Generating Ultrasonic Waves in Resin-Coated Carbon Fibre Composites // *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*. 2020. V. 3 (3). P. 031103.
15. Taheri H., Hassen A.A. Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic // *Applied Sciences*. 2019. V. 9 (8). P. 1628.
16. Cao H., Ma M., Jiang M. et al. Experimental Investigation of Impactor Diameter Effect on Low-Velocity Impact Response of CFRP Laminates in a Drop-Weight Impact Event // *Materials*. 2020. V. 13 (18). P. 4131.
17. Kamimura H.A.S., Wu S.-Y., Grondin J. et al. Real-Time Passive Acoustic Mapping Using Sparse Matrix Multiplication // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2021. V. 68 (1). P. 164—177.
18. Caminero M.A., García-Moreno I., Rodríguez G.P. et al. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites // *Composites Part B: Engineering*. 2019. V. 165. P. 131—142.
19. Cao H., Ma M., Jiang M. et al. Experimental Investigation of Impactor Diameter Effect on Low-Velocity Impact Response of CFRP Laminates in a Drop-Weight Impact Event // *Materials*. 2020. V. 13 (18). P. 4131.
20. Sadeghi M.Z., Nienheysen P., Arslan S. et al. Damage detection by double-sided ultrasonic assessment in low-velocity impacted CFRP plates // *Composite Structures*. 2019. V. 208. P. 646—655.
21. Wang X., He J., Guo W. et al. Three-dimensional damage quantification of low velocity impact damage in thin composite plates using phased-array ultrasound // *Ultrasonics*. 2021. V. 110. P. 106264.
22. Liu H., Liu J., Ding Y. et al. Effects of Impactor Geometry on the Low-Velocity Impact Behaviour of Fibre-Reinforced Composites: An Experimental and Theoretical Investigation // *Applied Composite Materials*. 2020. V. 27 (5). P. 533—553.
23. Lebaupin Y., Hoang T.-Q.T., Chauvin M. et al. Influence of the stacking sequence on the low-energy impact resistance of flax/PA11 composite // *Journal of Composite Materials*. 2019. V. 53 (22). P. 3187—3198.
24. García-Moreno I., Caminero M., Rodríguez G. et al. Effect of Thermal Ageing on the Impact Damage Resistance and Tolerance of Carbon-Fibre-Reinforced Epoxy Laminates // *Polymers*. 2019. V. 11 (1). P. 160.
25. Sebaey T.A., González E.V., Lopes C.S. et al. Damage resistance and damage tolerance of dispersed CFRP laminates: Design and optimization // *Composite Structures*. 2013. V. 95. P. 569—576.
26. ASTM D7136/D7136M-15 standard test method for measuring the damage resistance of a fibre-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event.
27. Chen P., Shen Z., Xiong J. et al. Failure mechanisms of laminated composites subjected to static indentation // *Composite Structures*. 2006. V. 75 (1—4). P. 489—495.
28. Fuoss E., Straznicky P.V., Poon C. Effects of stacking sequence on the impact resistance in composite laminates — Part 1: parametric study // *Composite Structures*. 1998. V. 41 (1). P. 67—77.