

Композиционные материалы

УДК 621.792.4

Поверхностное армирование углепластиков микроструктурированными металлическими материалами

Н.Н. Зубков¹, д-р техн. наук, И.В. Безин¹, М.Ю. Ощепков², канд. техн. наук

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

²ООО «Политермо», Московская область, Истринский район

E-mail: zoubkovn@bmstu.ru

В статье рассматривается вариант поверхностного армирования углепластиков металлическими листами. Для повышения прочности соединения на металле использовался микрорельеф, полученный методом деформирующего резания. Все образцы с микрорельефом при испытаниях на отслоение и удар показали высокие показатели прочности при изменении механизма разрушения с адгезионного на когезионный.

Ключевые слова: углепластик, полимерный композиционный материал, армирование, клеевое соединение, деформирующее резание.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают рядом преимуществ по сравнению с металлами и их сплавами, что обуславливает расширяющиеся объемы их применения в аэрокосмической технике, автомобилестроении и иных областях. Однако такие недостатки ПКМ, как невысокая твердость и износостойкость, малая величина ударной вязкости, низкая теплоустойчивость и др., не позволяют полностью отказаться от использования металлических функциональных деталей, требующих специальных свойств материала.

Во многих случаях за функционирование детали из ПКМ отвечает только ее поверхностный слой. Это касается деталей трения; деталей, подверженных кавитационному или

эрозионному износу, контактными нагрузками на смятие и др. В настоящее время одним из самых сложных и малоизученных остается вопрос соединения деталей, изготовленных из полимерных композитных материалов с металлическими частями конструкций [1]. Поверхностное армирование ПКМ листовым материалом является эффективным методом повышения функциональных характеристик композитных деталей. В качестве примера можно привести противоэрозийную обшивку листовым металлом лопастей несущего винта вертолета, изготовленных из ПКМ [2].

Для поверхностного армирования ПКМ могут применяться тонколистовые металлические (коррозионно-стойкие и углеродистые стали, титановые и алюминиевые спла-

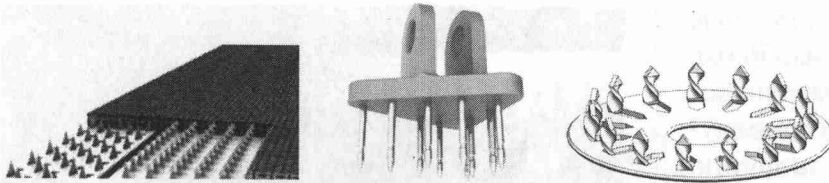


Рис. 1. Крепежные микроэлементы для соединения металла с ПКМ [5]

вы), а также полимерные (сверхвысокомолекулярный полиэтилен, фторопласт и др.) материалы. В большинстве случаев единственным методом крепления тонколистовых материалов к поверхности ПКМ является клеевое соединение или присоединение армирующего слоя непосредственно в процессе полимеризации связующего ПКМ [3, 4].

Современные клеи имеют высокую адгезию к ПКМ с термореактивной матрицей (стекло-, угле-, органопластики), однако прочность их адгезионного сцепления с металлами или термопластичными полимерами недостаточна. Особую сложность представляет соединение ПКМ и коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, обладающих весьма низкими адгезионными свойствами. В настоящее время для обеспечения прочности стыка металл—ПКМ поверхность металла подвергается травлению, пескоструйной обработке, активации и др. Более надежные соединения обеспечиваются выполнением на металле крепежных микроэлементов методами штамповки гребенок, фрезеровани-

ем штырьков или их запрессовки, приварки и т.п. (рис. 1) [5]. Актуальной проблемой является миниатюризация крепежных элементов и обеспечение воспроизводимости требуемого качества их установки, что является достаточно сложной технологической задачей.

Деформирующее резание как средство подготовки поверхностей под склеивание

Существенного повышения прочности и надежности как клеевых соединений, так и соединений, получаемых непосредственно при полимеризации связующего, можно достичь за счет создания регулярного мелкошагового микро- или макрорельефа с большим отношением его высоты к шагу. Наиболее эффективно получение глубоких микро- и макрорельефов деформирующим резанием (ДР).

Метод ДР основан на одновременном подрезании поверхностных слоев и их пластическом деформировании [6, 7]. Подрезанный слой не отделяется полностью от заготовки, сохраняя с ней связь по своей узкой стороне. Совокупность подрезанных поверхностных слоев, которые сохранили сплошность своего соединения с заготовкой, образует на обработанной поверхности детали развитый макрорельеф в виде оребрения (рис. 2). Технология ДР позволяет получать макрорельеф на пластичных материалах, таких как медь, алюминий и их сплавы, титан, стали, а также на термопластичных полимерах [8].

Описание образцов для механических испытаний поверхностно-армированного углепластика и особенностей их получения

Образцы для испытаний представляли пластины углепластика толщиной 4,2 мм с односторонним поверхностным армированием тонколистовым материалом из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса 316L (ближайший российский аналог — сталь

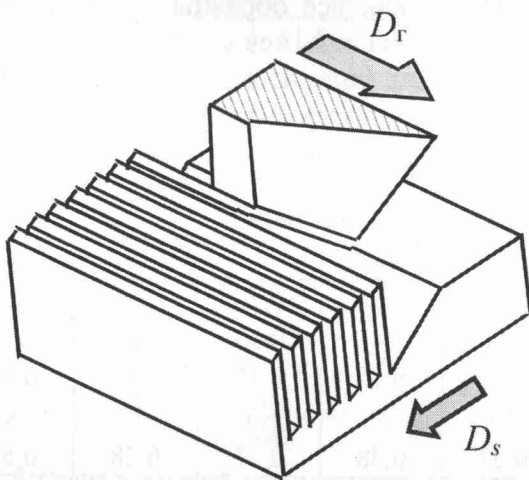


Рис. 2. Принцип деформирующего резания

03X17H14M3). Использовались стальные пластины с исходной толщиной 0,6 и 0,76 мм. Соединение углепластика со сталью проводилось непосредственно в процессе получения ПКМ методом вакуумной инфузии. Для получения углепластика использовалось углеродное полотно плотностью 400 г/м² с пропиткой эпоксидной смолой Toolfusion® 1A/1B фирмы Airtech. Постотверждение при повышенной температуре не выполнялось.

Для поверхностного армирования использовались как гладкие стальные пластины, так и пластины с микрорельефом двух типов, полученных ДР: простое наклонное оребрение (рис. 3, а) и оребрение с разрывами по вершинам ребер, внешне похожее на микроштырьковую структуру (рис. 3, б) [9]. Разрывы по вершинам ребер получались оребрением поверхности пластины, имеющей неглубокие (около 0,1 мм) насечки. Насечки выполняли функцию концентраторов напряжений, по которым происходил разрыв образующегося при ДР ребра. Насечки получали накатным роликом с шагом зубьев 0,6 мм. Для всех образцов шаг ребер S составлял 0,4 мм. Высота микрорельефа варьировалась в диапазоне 0,45–0,7 мм, наклон ребер составлял 7–13 град, межреберный зазор микрорельефа был в диапазоне 120–220 мкм. Деформирующее резание реализовывалось на токарно-винторезном станке 16К20 с использованием приспособления в виде барабана, на который натягивалась обрабатываемая стальная полоса.

Геометрические параметры микрорельефов испытываемых образцов приведены в табл. 1.

1. Параметры микрорельефа лакирующей пластины для испытываемых образцов

Номер образца	1	2	3*	4	5	6*
Толщина исходного стального листа, мм	0,76	0,76	0,6	0,76	0,6	0,76
Высота ребер, мм	0,65	0,67	0,45	0,53	0,6	0,7
Межреберный зазор, мм	0,19	0,16	0,22	0,13	0,12	0,13
Угол наклона ребер, град	8	13	8	13	7	8
Остаточная толщина пластины, мм	0,26	0,37	0,38	0,37	0,28	0,53

*С разрывом по вершинам ребер.

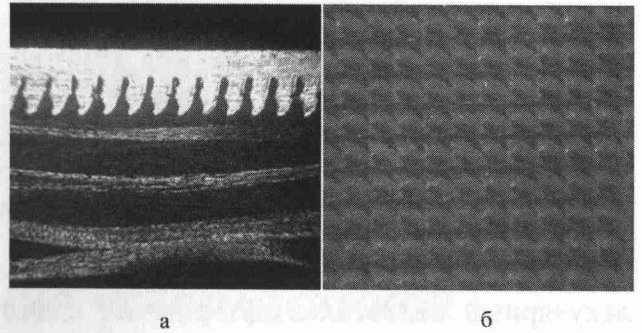


Рис. 3. Поперечный срез армированного углепластика до испытаний (а) и вид на микроструктурированную ошпикованную поверхность (б)

Было проведено три вида испытаний: одно на ударную вязкость и два на отслаивание (индентором и разрывной машиной). Каждое испытание проводилось на двух одинаковых образцах с осреднением результатов.

Оценка характеристик прочности соединения металл—углепластик поверхностно-армированного ПКМ

Испытание на ударную вязкость проводилось на маятниковом копре Walter+Bai AG PH150 при энергии удара 50 Дж. Образцы представляли собой пластину без надреза с размерами 55×12×4,2 мм. Удар маятника производился со стороны металла. Схема испытаний показана на рис. 4, а.

У образцов с лакирующим металлическим слоем без микрорельефа происходило его полное отслоение от углепластика, в то время как все образцы с микрорельефом расслаивались исключительно по слоям углеткани (рис. 4, б). Значения энергии разрушения испытываемых образцов представлены в табл. 2. Максимальная энергия раз-

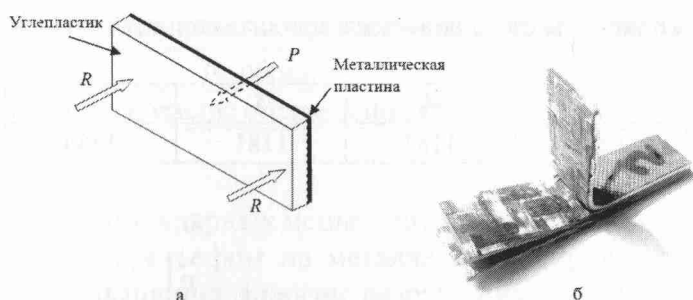


Рис. 4. Схема испытаний на копре (а) и вид образца с лакирующим слоем с микро рельефом, полученным ДР, после испытания (б)

рушения для образцов с микроструктурированной поверхностью лакирующей пластины составила $A_n = 11,5$ Дж, что дает величину удельной ударной вязкости $a_n = 228$ кДж/м². Повышение величины удельной ударной вязкости образцов 5,2 и 11 по сравнению с углепластиковыми образцами, лакированными листами без микро рельефа, составило 53—60%.

При проведении испытания на отслаивание индентором образцы представляли собой лакированные углепластиковые пластины размером 25×30×4,2 мм. По центру пластины со стороны углепластика шпоночной фрезой вырезалось отверстие диаметром 8 мм до касания с лакирующим металлом. Внедрение индентора в виде цилиндрического пуан-

сона в полученное отверстие осуществлялось подачей вертикально-фрезерного станка со скоростью 50 мм/мин без его вращения. Образец закреплялся на платформе динамометра модели 9257В фирмы Kistler (Швейцария) с опорой на неплакированную часть углепластика, как показано на рис. 5, а. Порог чувствительности динамометра составлял 0,01 Н. Для данных испытаний показателем прочности клеевого соединения являлось максимальное отрывное усилие, необходимое для отслоения металла от углепластика.

В результате испытаний на лакирующих пластинах без микро рельефа наблюдалось полное адгезионное отслоение металла при минимальных усилиях воздействия на индентор. Для всех образцов с микро рельефом зафиксировано когезионное разрушение углеткани с ее остатками на лакирующей металлической пластине (рис. 5, б). Значения сил отслаивания образцов приведены в табл. 3. Максимальная нагрузка отслоения лакирующего слоя (1254 Н) зафиксирована для образца 6, имеющего микро рельеф высотой 0,7 мм с разрывами по вершинам ребер.

Для всех образцов также были проведены испытания на прочность при отслаива-

2. Энергия разрушения образцов при испытаниях на копре

№ образца	1	2	3	4	5	6	Плакировка без рельефа	Без плакировки
Энергия разрушения образца (A_n), Дж	11,5	11	7,3	10,4	11,1	9,1	7,2	4,1

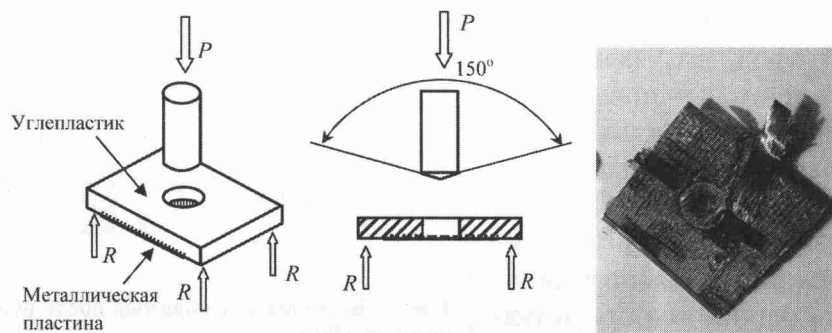


Рис. 5. Схема испытаний на отслаивание индентором (а) и вид лакирующей стальной пластины с микро рельефом после отслаивания (б)

3. Сила отслаивания металлической лакирующей пластины от углепластика при испытаниях индентором

№ образца	1	2	3	4	5	6
Сила отслаивания, Н	1016	1103	1206	1181	1181	1254

нии под углом 90° . Схема испытаний приведена на рис. 6. Испытания проводились на универсальной испытательной машине INSTRON 600-DX. Размер контактной зоны сочленения металл—углепластик составлял 25×100 мм. Образцы растягивались со скоростью 25 мм/мин, при этом определялось среднее разрушающее усилие. Далее усилие пересчитывалось в погонное, измеряемое в ньютонах на 1 мм ширины образца (или в кН/м).

Зафиксировано многократное повышение усилия на отслаивание металлического листа, имеющего микрорельеф, по сравнению с лакированием гладкими металлическими пластинами. Пластины без микрорельефа отслаивались одновременно сразу по всей площади склейки (при усилии на порядок меньшем, чем для образцов с микрорельефом). Для оребренных образцов происходило когезионное разрушение, вырывание эпоксидного связующего из микрорельефа не наблюдалось (рис. 7, б). Среднее погонное разрушающее усилие находилось в интервале 4,4—9,1 кН/м (табл. 4). Наибольшее значение зафиксировано для образцов 3 и 6, имеющих микрорельеф в виде оребрения с разрывами по вершинам ребер.

Выводы

1. Доказана перспективность использования микрорельефов, получаемых деформирующим резанием, для поверхностного армирования углепластиков металлическими листовыми материалами. При двустороннем оребрении металлических листов ДР также может найти применение в создании многослойных композиционных материалов на основе тонких металлических листов и клеевых препрегов — металлопластиков [10].

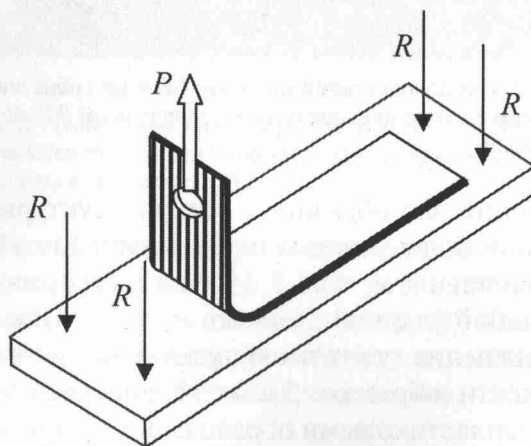


Рис. 6. Схема испытания образцов на отслоение под углом 90°

2. Все образцы с микрорельефом на испытаниях как на отслаивание, так и на удар показали изменение механизма разрушения с адгезионного на когезионное. Для образцов с микрорельефом происходит либо межслойное разрушение по слоям углеткани (испытания на копре), либо разрушение эпоксидного связующего по вершинам ребер (испытания на отслаивание).

3. Микрорельеф, полученный методом деформирующего резания, повышает прочность соединения металл—ПКМ на отслаивание до прочности матрицы углепластика.

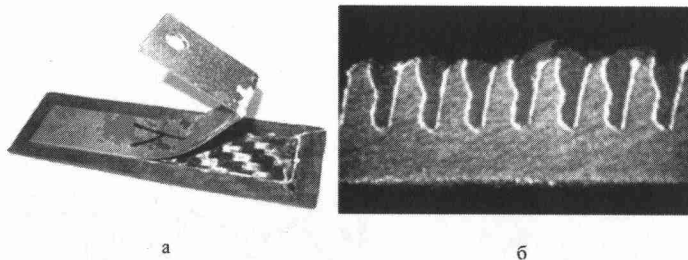


Рис. 7. Внешний вид образцов после испытаний на отслоение под углом 90° :

а — лакирующая пластина с микрорельефом; б — поперечный срез лакирующего слоя с микрорельефом

4. Погонное усилие отслаивания под углом 90° металлического плакированного слоя от углепластика

№ образца	1	2	3	4	5	6
Погонное усилие отслаивания, кН/м	6,8	5,4	9,1	6,5	4,4	7,3

4. При ударных испытаниях для образцов с микрорельефом на металле зафиксировано повышение энергии разрушения до 60% по сравнению с образцами без микрорельефа на металле.

Публикация подготовлена в рамках выполнения государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сорокина И.И., Астахов М.В.** Исследование влияния формы крепежного элемента на прочность соединения «металл—композит» // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2012. № 2. С. 9.
2. **Технология вертолетостроения:** Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов / Б.Н. Слюсарь, М.Б. Флек, Е.С. Гольдберг и др. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. 228 с.
3. **Карпов Я.С.** Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов // Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. 359 с.
4. **Склеивание в машиностроении: справочник:** в 2 т. / общ. ред. Малышева Г.В. М.: Наука и технологии, 2005. Т. 1 / Аронович Д.А., Варламов В.П., Войтович В.А. [и др.]. 2005. 544 с.
5. **Черевашенко А.С.** Конструктивно-технологические решения соединений металл-композит, работающих на отрыв // Сборник научных трудов ХАИ «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов». Выпуск 1 (73). Харьков «ХАИ». 2013. С. 14—20.
6. **Зубков Н.Н.** Разработка и исследование метода деформирующего резания как способа формообразования развитых макрорельефов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Москва, 2001. 478 с.
7. **Зубков Н.Н.** Особенности реализации метода деформирующего резания // Технология машиностроения. 2001. № 1. С. 19.
8. **Zubkov N.N., Slepcev A.D.** Production of Slotted Polymer Filter Tubes by Deformational Cutting // Russian Engineering Research. 2010. Т. 30, № 12. С. 1231—1233.
9. **Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Трофимович А.С., Черкасов А.С.** Использование штырьковых структур нового типа для охлаждения электронной аппаратуры // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2014. № 2 (95). С. 70—79.
10. **Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Серезенков А.А.** и др. Клеевые препреги и композиционные материалы на их основе // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 53—56.