

## РАЗДЕЛ 3. МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.025  
УДК 666.193.2

### ПРИМЕНЕНИЕ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ «МЕТАЛЛ – КОМПОЗИТ»

С. А. Милованов, В. Б. Маркин

*Применение полимерных композиционных материалов в конструкциях современной техники обусловлено снижением металлоемкости и повышением весового совершенства изделий. В этом плане полимерные композиционные материалы зарекомендовали себя как конструкционные, обладающие не только высокими удельными характеристиками прочности и жесткости, но и коррозионной стойкостью, что позволяет использовать их в нефтегазовой и химической промышленности, сокращать сроки их ремонта, что способствует уменьшению энергоемкости производства и снижению его экологической опасности, особенно если оно связано с загрязнением атмосферы. Однако полная замена металлов на композиционные материалы связана с большими техническими и технологическими проблемами, поэтому актуальной является задача разработки стыковочных элементов, позволяющих осуществить связь между ними. Для высоконагруженных конструкций целесообразно использование сплошных соединений «металл – композит», в которых важная роль отводится адгезионным свойствам контактирующих компонентов. В настоящее время, одной из задач при создании и применении армированных пластиков можно считать развитие различных методов обработки волокнистых наполнителей и, как правило, изучение возможности корреляционной зависимости прочности композиционного материала от сил адгезионного взаимодействия на границе раздела. Рассмотрены способы образования соединений металлов и композитов, их особенности и возможности передачи нагрузки.*

*Ключевые слова: базальтовое волокно, низкотемпературная плазма, ВЧ разряд, полимерные композиционные материалы, стыковочные элементы «металл – композит», модификация поверхности волокна*

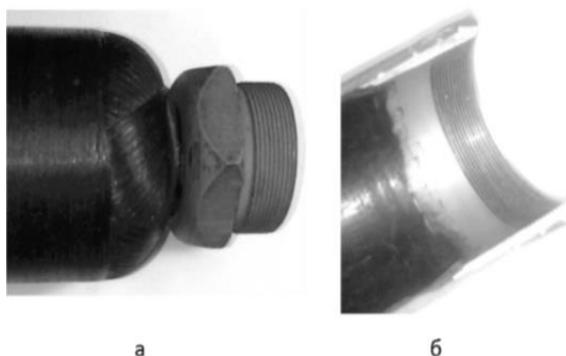
В настоящее время трудно найти такую отрасль машиностроения, которая не нуждалась бы в снижении металлоемкости и особенно металлоемкости изделий. Достаточно хорошо известно, что полимерные композиционные материалы и их применение приводят к существенному снижению металлоемкости и, как следствие, массы изделия. Кроме того, это сопровождается повышением коррозионной стойкости конструкций и сокращением сроков их ремонта, что способствует уменьшению энергоемкости производства и снижению его экологической опасности, особенно если оно связано с загрязнением атмосферы.

Однако полная замена металлических, чаще всего стальных, элементов конструкций на композитные представляется довольно сложной задачей, связанной со сложностью технологии изготовления стыковочных элементов для разных агрегатов. Поэтому разработка таких элементов для совершенствования изделий современной техники представляется актуальной задачей.

Требования, которые предъявляются к конструкциям металло-композитного соединительного узла, а также характер нагрузок,

действующих на данное соединение, зависят прежде всего от условий, в которых эксплуатируется изделие и от его назначения. В зависимости от характера передачи нагрузок соединения подразделяются на стыковочные и поддерживающие [1]. К стыковочным относятся механические и комбинированные соединения «металл – композит». В данных конструкциях нагрузки, которые приходится на стык, воспринимаются металлическими компонентами и через композиционный материал передаются на корпус изделия. Группу поддерживающих соединений представляют конструкции, основная особенность которых связана с передачей напряжений на стыке непосредственно адгезионными прослойками. На рисунке 1 представлены характерные конструкции, относящиеся к этим типам соединений.

В некоторых случаях увеличение прочности соединения «металл – композит» достигается за счет увеличения поверхности контакта компонентов конструкции (рисунок 1 б) с участием факторов механической адгезии. В баллонах давления металлические элементы (фланцы) оказываются вмотанными в силовую оболочку.



*а –металлический резьбовой элемент соединения в органопластиковом корпусе баллона давления; б – металлический фланец резьбового соединения стеклопластикового композитного элемента конструкции*

Рисунок 1 – Типы соединений «металл – композит» в конструкциях

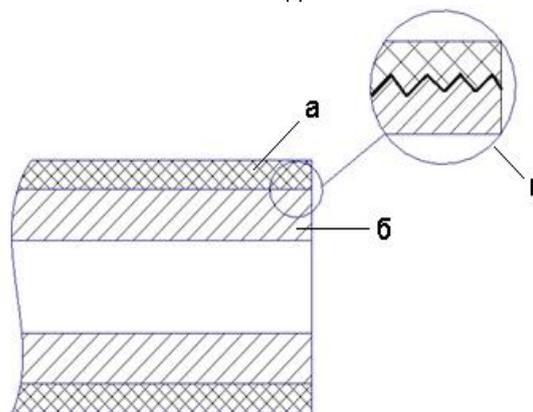
Для всех видов пластиков наиболее слабым звеном является граница раздела «матрица – наполнитель», так как в большинстве случаев именно здесь начинается образование трещин. Понятие адгезионной прочности взаимосвязано с адгезионным контактом, несмотря на то, что наличие функциональных групп в связующем и армирующих волокнах не дает точной гарантии образования высокой адгезионной прочности. Число, характеризующее количество вступивших во взаимодействие функциональных групп, порой никак не связано с их общим количеством, или же, связь является лишь косвенной. Что касается взаимодействия соответствующих групп поверхности наполнителя с функциональными группами адгезива, то в данном аспекте при анализе каждой конкретной системы требуется индивидуальный подход. Также не стоит забывать о пространственном строении полимера, прочности и характере надмолекулярных образований, о гибкости и длине макромолекул.

При рассмотрении молекулярного взаимодействия на границе раздела фаз нужно отметить неравноценность функциональных групп контактируемых фаз говоря о их вкладе в адгезионную прочность. Более предпочтительными можно считать полярные группы с подвижным азотом водорода или же те группы, которые имеют гетероатомы с необобщенными электронами. На поверхности волокна и в матрице такие группы, как азоциановые, гидроксильные, эпоксидные, винилпиридиновые, карбоксильные и пирольные,

обеспечивают высокую адгезионную прочность. Совместимость наполнителя с матрицей – один из факторов, которые определяют прочность адгезионной связи. Термодинамический анализ взаимодействия позволяет связать поверхностную энергию наполнителя с происходящими изменениями.

При введении наполнителя, происходит изменение условий протекания релаксационных процессов и плотности упаковки макромолекул при формировании надмолекулярных структур. У многих полимеров нет возможности образовывать общую кристаллическую решетку, отсутствует термодинамическая совместимость. Но, несмотря на это, присутствует совместимость морфологического плана, подразумевающая отсутствие четких границ раздела между элементами надмолекулярного порядка, а также образование совместных надмолекулярных структур.

В соединении «металл – композит» на границе раздела необходима большая величина адгезии, позволяющая добиться более высокой сдвиговой прочности. На рисунке 2 представлена схема границы раздела металло-композитного соединения.



*а) композит; б) металл и в) граница раздела*

Рисунок 2 – Соединение «металл – композит» в разрезе

В настоящее время одной из задач при создании и применении армированных пластиков можно считать развитие различных методов, касающихся обработки волокнистых наполнителей и, как правило, изучение возможности корреляционной зависимости прочности композиционного материала от силы адгезионного взаимодействия.

Для исследования адгезии были выбраны базальтовые волокна, так как они обладают лучшими показателями термостойкости и бо-

## ПРИМЕНЕНИЕ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ «МЕТАЛЛ – КОМПОЗИТ»

лее экономически выгодны в связи с довольно невысокой стоимостью относительно тех же углеродных волокон или стекловолокон.

В современном мире, материалы, производимые из базальтовой породы, пользуются довольно большим спросом. Это подтверждается использованием их практически во всех отраслях промышленности. Переработка базальта в различные волокна проходит без выделения промышленных отходов и выбросов вредных веществ в атмосферу. Для изготовления базальтового волокна куски базальта подвергаются расплавлению в ваннах печах, после чего расплавленный состав базальта вырабатывают на многофильном платиновородиевом питателе и полученные волокна наматывают на бобины.

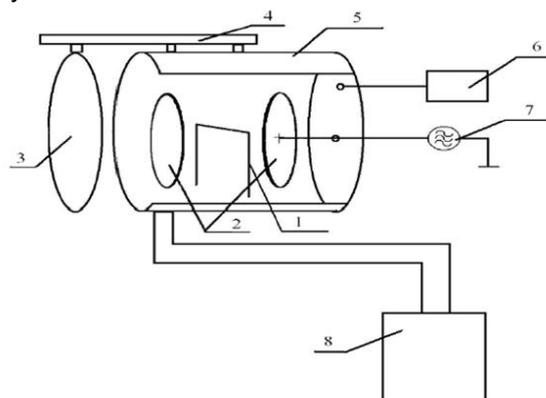
Технология создания полимерных композиционных материалов (ВПКМ) включает в себя активацию поверхности волокон с целью увеличения адгезионного взаимодействия между волокном и матрицей. На сегодняшний день, непосредственно до изготовления армированных композитов, волокна чаще всего обрабатываются благодаря химическим растворам, являющимися агрессивными и токсичными средами. Отсюда следует, что при обработке волокон данными методами требуются довольно сложные системы защиты и, соответственно, утилизация опасных отходов. Высокочастотную емкостную плазму считают активно развивающимся направлением обработки различной природы материалов. Метод дает возможность обрабатывать неорганические и органические материалы различного состава и структуры. Особенно важно отметить тот факт, что технология обработки ВЧ плазмой является экологически безопасной.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения более высокой адгезии в металло-композитной конструкции необходимо обрабатывать в плазме как волокно, так и подложку. Данная работа посвящена только модификации поверхности волокна в низкотемпературной высокочастотной плазме различных соединений.

В качестве объекта исследования использовалось базальтовое волокно, наносимое на металлическую подложку и граница раздела между композитом, в роли которого выступал базальтопластик, и металлом. Модификация волокна проводилась на ВЧ плазменной установке пониженного давления. Схема установки представлена на рисунке 3. Волокна для обработки помещаются в каме-

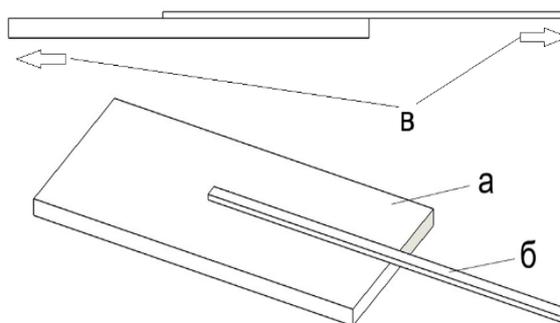
ру, что обеспечивает их обработку в продуктах плазмы. Временем обработки считается время горения разряда. В качестве насыщающей среды, были выбраны следующие соединения: 1) 2%-й раствор метилакрилата в ацетоне; 2) 2%-й раствор метилметакрилата в  $CCl_4$ ; 3) 2%-й раствор винилацетата в ацетоне и 4) 2%-й раствор малеинового ангидрида в ацетоне. Обработка в плазме этих соединений проводилась в течение 5-6 минут.



1 – рамка; 2 – ВЧ электроды; 3 – крышка камеры; 4 – консоль для открытия крышки; 5 – вакуумная камера установки; 6 – система подачи и регулировки плазмообразующего газа; 7 – ВЧ-генератор; 8 – откачивающая система

Рисунок 3 - Схема ВЧ плазменной установки пониженного давления

Непосредственно после обработки волокон изготавливались образцы в виде соединения металлической подложки и базальтопластика. Полученные образцы подвергались испытанию на сдвиговую прочность на установке Instron 3369.



а – подложка; б – базальтовое волокно; в – направления сдвига

Рисунок 4 – Модель образца для испытаний

На рисунке 5 представлены результаты по сдвиговым испытаниям, полученные после

математической аппроксимации по трехпараметрической экспоненциальной модели.

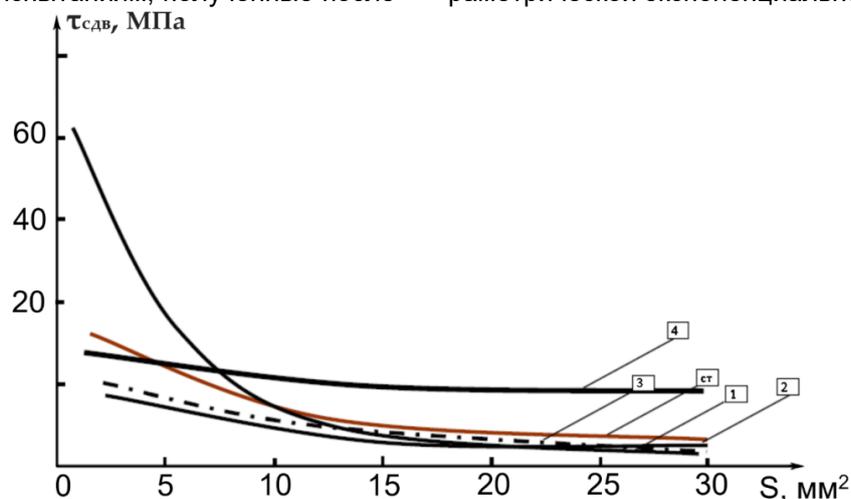


Рисунок 5 – Зависимость сдвиговой прочности контакта базальтового волокна с металлической подложкой от площади соединения:  
1, 2, 3, 4 - методы обработки волокон,  
ст – стандартное соединение без обработки

## ВЫВОДЫ

Полученные данные свидетельствуют о целесообразности применения обработки волокон в продуктах плазмы. Данный вывод подтверждается увеличением сдвиговой прочности в некоторых из примененных сред по сравнению с необработанным волокном. При небольшой площади контакта (до 5 мм<sup>2</sup>) наибольшую сдвиговую прочность показало волокно, обработанное в среде 2%-го раствора метилакрилата в ацетоне. Что касается больших площадей контакта, то в данном случае наилучший эффект адгезионного взаимодействия показала обработка в среде 2%-го раствора малеинового ангидрида в ацетоне. Для еще более высоких показателей сдвиговой прочности необходимо комбинировать обработку соответствующего волокна и металлической подложки в данных средах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления / И. Ш. Абдуллин, В. С. Желтухин, И. Р. Сагбиев, М. Ф. Шаехов. – Казань : Изд-во Казан. технол. ун-та, 2007. – 356 с.
2. Влияние плазменной обработки на поверхностные свойства стекловолокна / И. П. Ершов, Е. А. Сергеева, Л. А. Зенитова, И. Ш. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №4. – С. 97–99.
3. Исследование воздействия ВЧЕ плазмы

на сдвиговую прочность в гибридном микрокомпозите / А. Р. Гарифуллин, И. Ш. Абдуллин, Н. В. Корнеева, В. В. Кудинов // Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы : материалы Международной научной конференции и XI Всероссийской студенческой олимпиады молодых ученых / С.–Петербургский гос. ун–т технологии и дизайна. – СПб: ФГБОУВПО «СПГУТД», 2015. – С. 11–12.

4. Маркин, В. Б. Строительная механика композитных конструкций : учеб. пособие / В. Б. Маркин. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2004. – 180 с.

5. Еременко, В. И. Физическая химия границ раздела контактирующих фаз / В. И. Еременко. – М. : Высшая школа, 1985. – 463 с.

6. Липатов, Ю. С. Межфазные явления в полимерах / Ю. С. Липатов. - Киев: Наукова думка, 1980. – 259 с.

7. Исследование адгезионных свойств гибридных волокон после плазменной обработки / А. Р. Гарифуллин, И. Ш. Абдуллин, Н. В. Корнеева, В. В. Кудинов, Е. А. Скидченко // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – №12. – С. 64.

8. Ананьева, Е. С. Технологические характеристики пропиточных составов на основе эпокси-дианового связующего и полиметилен-л-трифенилбората при изготовлении стеклопластиковых препрегов / Е. С. Ананьева, Л. Г. Полукеева, М. С. Чипизубова, А. В. Ишков // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. – №3. – С. 245-248

9. Плазмохимическая модификация поверхности углеродных волокон в ВЧЕ разряде при пониженном давлении для повышения адгезии на границе раздела «волокно-матрица» в углепласти-

ПРИМЕНЕНИЕ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ  
«МЕТАЛЛ – КОМПОЗИТ»

ках / Е. А. Скидченко, А. Р. Гарифуллин, И. И. Каримуллин, А. Е. Карноухов // VI Всероссийская конференция по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи. Москва. 22-25 ноября 2016 г. : сборник материалов. – М. : ИМЕТ РАН, 2016. – С. 22–23.

10. Влияние плазменной активации и гибридизации волокон на сдвиговую прочность углепластиков / А. Р. Гарифуллин, И. Ш. Абдуллин, К. Н. Галямова, Е. А. Скидченко, Н. В. Корнеева, В. В. Кудинов // Вторая Всероссийская молодежная научно-техническая конференция с международным участием "Инновации в материаловедении": сб. материалов; Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН – М. : ООО «Ваш полиграфический партнер», 2015. – С. 22–23

**Милованов Сергей Андреевич** – студент гр. 8 МТМ-61, ФГБОУ ВО АлтГТУ, кафедра «Современных специальных материалов», e-mail: [milowanow-sergej@mail.ru](mailto:milowanow-sergej@mail.ru)

**Маркин Виктор Борисович** – д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО АлтГТУ, кафедра «Современных специальных материалов», e-mail: [mvb1942@mail.ru](mailto:mvb1942@mail.ru)