

## **СЛОИСТЫЕ САМОЗАЛЕЧИВАЮЩИЕСЯ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ БОРОСИЛОКСАНОВОЙ МАТРИЦЫ**

**Ситников Н.Н.<sup>1</sup>, Хабибуллина И.А.<sup>1</sup>, Машенко В.И.<sup>2</sup>, Шеляков А.В.<sup>3</sup>,  
Высотина Е.А.<sup>1</sup>, Мостовая К.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный областной университет, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

В настоящее время направление искусственно созданных материалов или композиционных систем, способных частично или полностью восстанавливать исходные характеристики после причиненных им повреждений, переживает бурное развитие. Искусственные самозалечивающиеся материалы открыли бы огромные возможности, в особенности в тех случаях, когда необходимо обеспечить работоспособность материалов в труднодоступных зонах на как можно более длительный срок. Способность искусственных материалов к самовосстановлению каких-либо свойств может позволить увеличить срок их службы, снизить затраты на поддержание их в рабочем состоянии и ремонт, а также повысить уровень безопасности конструкции или изделия в целом.

На основании проанализированной литературы и собственных экспериментальных данных авторами предлагается следующее определение: эффект самозалечивания (самовосстановления) в искусственных материалах – полное или частичное уменьшение площади поверхности повреждения материала за счёт направленного массопереноса и консолидации границ (связей) с полным или частичным восстановлением функциональных характеристик материала [1-3]. Данные эффекты наблюдаются в материалах после их повреждения, которые обычно сопровождаются нарушением сплошности с увеличением площади поверхности. В таких материалах консолидация границ повреждения (отвечает за понятие «залечивание») происходит после их сведения, реализуемого посредством массопереноса (отвечает за понятие «само»). Процессы массопереноса и консолидации границ могут происходить автономно (например, за счёт течения материала) или неавтономно, т.е. залечивание стимулируется внешним воздействием, например, повышением температуры или воздействием ультрафиолетового излучения. Механизмы самовосстановления искусственных материалов подразделяются на «внешние» и «внутренние» по способу организации процессов самозалечивания. «Внешние» механизмы самовосстановления основаны на специально внедренных в матрицу основного материала восстанавливающих компонентах, например, микрокапсул с залечивающими веществами, а «внутренние» механизмы самовосстановления не требуют наличия каких-либо дополнительных восстанавливающих составов.

Самозалечивающиеся материалы зачастую представлены в виде композиционных систем, состоящих из разнородных компонентов керамических материалов, цементов, твёрдых растворов и сплавов. На сегодняшний день самозалечивание в «чистых» материалах наиболее успешно реализуется в полимерах (олигомерах или форполимерах) благодаря относительно большим скоростям диффузии из-за наличия поперечных молекулярных связей и их способности при определённых условиях к восстановлению связей за счёт сшивания полимерных цепей.

Одним из наиболее перспективных направлений создания самовосстанавливающихся систем считаются слоистые композиционные материалы (сэндвичные панели), имеющие в своём составе слой или несколько слоёв, обладающих каким-либо механизмом самозалечивания. В такой схеме каждый слой выполняет свою определённую функцию, а в общей системе слоистый композиционный материал способен минимизировать повреждения и восстанавливать свои исходные макрохарактеристики. Подобные сэндвичные панели могут включать различные твёрдые, вязкие или жидкие наполнители, которые при возникновении

дефекта материала вступают между собой в реакции, образуя твёрдую фазу. В подавляющих случаях в композиционных капсулированных материалах залечивание представляется как заполнение возникающих в материале несплошностей какой-то другой субстанцией, отличной от основного материала, иногда с совершенно отличными от матричного материала свойствами. На самом деле при этом происходит не восстановление исходных характеристик материала, а формирование нового материала с другой структурой и свойствами. Тем не менее, самовосстановление в большинстве случаев подразумевает восстановление объёмной или поверхностной целостности изделия с одновременным частичным или полным восстановлением важных эксплуатационных свойств, таких как герметичность, прочностные характеристики, электропроводность, экстерьер и т.д.

В работе предложена принципиальная архитектура слоистого самозалечивающегося композитного материала (ССКМ) с внутренней боросилоксановой матрицей. Разработанная многослойная схема имеет преимущество в простоте исполнения и наиболее удобна для проверки эффективности подбираемых материалов для каждого слоя ССКМ. На основе анализа доступных в научно-технической литературе свойств и характеристик самовосстанавливающихся полимеров в качестве самозалечивающегося слоя, удовлетворяющего требования прототипа ССКС, был выбран материал на основе соединений боросилоксана (БС). Боросилоксан представляет собой соединения на основе полиорганосилоксанов (силиконов, силоксанов) с группировками связей Si-O-B. Такие соединения обладают свойствами силиконовых масел и полимерных материалов, сочетая в себе такие характеристики, как текучесть при статической нагрузке и упругость при кратковременной или ударной нагрузке. В различных вариантах ССКМ были использованы один или несколько слоёв БС с различными наполнителями. В качестве материалов внешних слоёв были выбраны монолитный вакуумноплотный листовой силикон и плетёная стекловолоконистая ткань, пропитанная силиконом. Выбор внешних слоёв из материалов на основе силикона обосновывается тем, что эти материалы при контакте с боросилоксаном проявляют хорошую адгезию, которая обусловлена однотипными связями. Дополнительно в БС добавлялись углеродные и полиамидные волокна с целью его армирования. Полученные образцы БС показали хорошую растекаемость и консолидацию границ при их сведении, как в армированном состоянии, так и в исходном состоянии. Образец макета ССКМ, состоящий из трёх слоёв, с внутренней боросилоксановой матрицей толщиной около 2 мм представлен на рисунке 1.

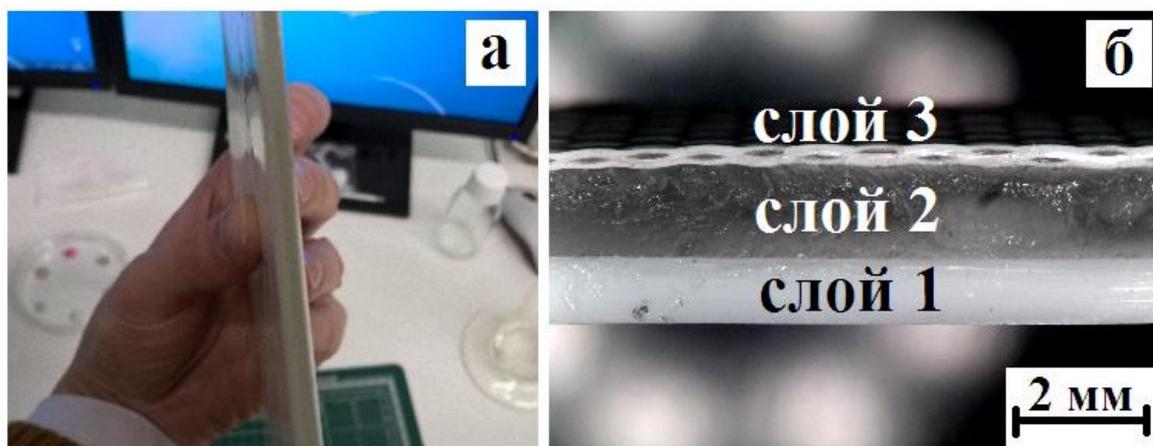


Рисунок 1 - Типичный вид трехслойного ССКМ с внутренним слоем из боросилоксана: вид в профиль (а), поперечное сечение (б)

Для изучения свойств самозалечивания макета ССКМ, была изготовлена установка для изучения характеристик ССКМ после пробоя каким-либо объектом. Установка представляет собой камеру, выполненную из металлической трубы, одна

сторона которой (лицевая часть установки) представляет собой фланец («окошко»), в котором зажимается макет ССКМ. Другая сторона трубы заварена (задняя часть установки), таким образом, чтобы образовывался закрытый объем. В задней части установки находятся клапаны для напуска и выпуска газа, создающего давление в объеме установки, давление отслеживается по манометру. Во фланцевое окошко помещается образец ССКМ и газоплотно фиксируется в нём, в камере создаётся избыточное давление порядка 0,1-0,3 ат. При возникновении пробоя разработанный ССКМ в установке под давлением будет стремиться уменьшить напряжения в боросилоксановой матрице за счёт заполнения образовавшегося дефекта, тем самым свести и прижать друг к другу повреждённые области. В этом случае область разрушения будет минимизирована, а в местах контакта ранее разъединённых поверхностей БС реализовано залечивание дефекта. Во внутреннем объеме установки располагается видеокамера с подсветкой для визуального контроля прокола, его формы и динамики залечивания ССКМ. Данная установка позволяет изучать процессы самозалечивания в изготовленных композитах после их сквозного пробоя каким-либо объектом. Оценка реализации эффекта самозалечивания в испытываемых образцах ССКМ и динамика залечивания проводилась по перепаду давления в камере, после образования в композите какого-либо дефекта с нарушением его сплошности. Когда давление в камере после пробоя снижается, а затем стабилизируется, принимаем, что отверстие от повреждения затянулось и произошла консолидация границ в БС. Испытания самозалечивающихся свойств композита осуществлялись посредством его пробоя различными по диаметру заострёнными пробойниками диаметром от 0,8 мм до 2 мм, а также посредством сквозного разреза скальпелем.

При сквозном пробое все образцы ССКМ с внутренней боросилоксановой матрицей продемонстрировали эффект самозалечивания, давление в камере после пробоя стабилизировалось за времена менее 1 секунды. При сквозном порезе ССКМ скальпелем с погружением лезвия на его полную длину образовывался разрез длиной около 6 мм. При извлечении лезвия скальпеля из композита в камере наблюдался перепад давления 0,03 ат. от исходного 0,25 ат. Время самозалечивания ССКМ составило около 2 секунд, после которого давление в камере стабилизировалось.

Полученные ССКМ на основе боросилоксановой матрицы, а также разработанные подходы к их созданию и испытанию могут быть использованы при конструировании современных устройств и механизмов с повышенными требованиями к живучести, работающими в труднодоступных для оперативного ремонта местах, в том числе, в экстремальных условиях окружающей среды, например, таких как космическое пространство.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 18-29-18095(мк).*

### Список литературы

1. Bekas D.G., Tsirka K., Baltzis D., Paipetis A.S. Selfhealing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques // Composites Part B, 2016, № 87, pp. 92–119.
2. Ситников Н.Н., Хабибуллина И.А., Мащенко В.И., Ризаханов Р.Н. Оценка перспектив применения самовосстанавливающихся материалов и технологий на их основе // Перспективные материалы, № 2, 2018, с. 5-16.
3. Ситников Н.Н., Хабибуллина И.А., Мащенко В.И. Самовосстанавливающиеся материалы: обзор механизмов самовосстановления и их применений // Видеонаука, № 1 (9), 2018, с. 1-29.