

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*А.А. Шавнев, Ю.А. Абузин, В.Н. Кочетов, В.А. Ковылин*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОЛИЧЕСТВА ЦИКЛОВ НАГРЕВ–ОХЛАЖДЕНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БОРАЛЮМИНИЕВОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Оптимальный технологический цикл формирования боралюминиевого МКМ включает нагрев, изотермическую выдержку и охлаждение. При этом длительность изотермической выдержки и ее термодформационный вклад в формирование материала значительно больше вклада единственного цикла нагрев–охлаждение.

При создании сложных конструкций, таких как широкохордная пустотелая лопатка вентилятора с применением боралюминия, неизбежно разделение оптимального процесса формирования композиционного материала на несколько технологических этапов, соответствующих формированию отдельных элементов конструкции. При этом суммарный термодформационный вклад циклов нагрев–охлаждение увеличивается в несколько раз и становится соизмерим с воздействием изотермической выдержки по оптимальному процессу формирования боралюминия. В этих условиях становится актуальной оптимизация многоэтапного технологического процесса формирования МКМ.

Настоящее исследование посвящено выявлению вклада циклов нагрев–охлаждение в формирование структуры и свойств боралюминия в зависимости от температуры нагрева и количества циклов в отсутствие изотермической выдержки.

Исходным полуфабрикатом выбран монослой из волокон бора с плазменно-напыленным матричным сплавом АД33. Выбранные монослои нарезали на карточки необходимого размера. Полученные карточки собирали в пресс-пакет и укладывали в пресс-форму, которую помещали между обогреваемыми плитами и нагревали до заданной температуры. Процесс проводили на гидравлическом прессе П-476 усилием 160 тс, оборудованном обогреваемыми плитами, обеспечивающими температуру нагрева до 560°C. Из полученного материала алмазной резкой изготавливали образцы размером 80×20 мм. При этом толщина материала была переменной, ее значение замеряли после изготовления образцов перед механическими испытаниями. Исследования влияния температуры и циклов нагрев–охлаждение на формирование боралюминиевого МКМ проводили в области температур от 100 до 525°C. При этом если после первого цикла связь между боралюминиевыми монослоями отсутствовала и получение образцов для механических испытаний было невозможно, эксперимент останавливали. При формировании связи в материале, приводящей к возможности получения образцов, эксперимент продолжали до 5 циклов включительно с целью выявления динамики изменения прочностных характеристик. Образцы, прошедшие от 1 до 5 циклов нагрев–охлаждение, испытывали на разрушение в трансверсальном направлении на разрывной машине «Instron-1195» со скоростью перемещения активного захвата 1 мм/мин с последующим анализом поверхности излома образцов на микроскопе «NEORHOT-21».

Эксперименты показали, что при температурах от 100 до 400°C связь между монослоями не возникает. Повышение температуры до 450°C приводит к возможности изготовления и испытания образцов. При этом по мере увеличения количества циклов, трансверсальная прочность материала повышалась.

Повышение температуры до 500°C привело к резкому увеличению трансверсальной прочности уже после первого цикла. При этом рост трансверсальной прочности от цикла к циклу был незначителен.

При температуре 525°C трансверсальная прочность осталась на уровне прочности при температуре 500°C и не менялась в зависимости от количества циклов.

Прочность боралюминиевого МКМ в зависимости от температуры и количества циклов представлена на рис. 1 и 2.

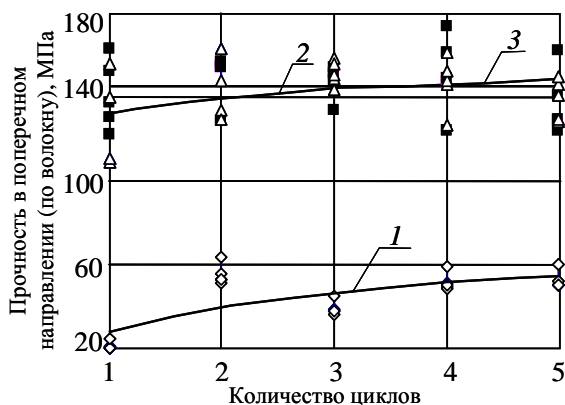


Рис. 1. Изменение прочности боралюминиевого МКМ в зависимости от количества циклов при температурах : 450 (1), 500 (2) и 525°C (3)

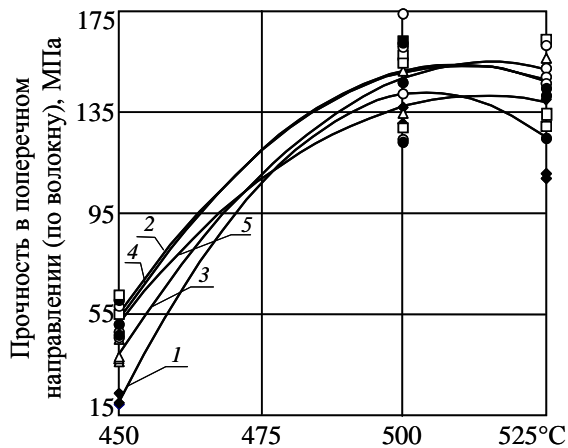


Рис. 2. Динамика роста прочности В-А1 МКМ в зависимости от температуры цикла. Количество циклов 1, 2, 3, 4, и 5 (кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно)

Анализ макроструктуры поверхности боралюминиевого МКМ после проведенных испытаний показал, что образцы, полученные при температуре 450°C, имели структуру с очаговым характером межслойной связи. Общая площадь очагового схватывания увеличивалась с ростом количества циклов. При этом даже на 5 цикле площадь связи не превышает 60% от площади поперечного сечения образца.

Образцы, полученные при температурах 500 и 525°C, имели сплошной контакт волокна с матрицей уже при первом цикле нагрев-охлаждение.

На рис. 3 представлена макроструктура поверхности излома боралюминиевого МКМ после механических испытаний.

Боралюминий, полученный при температурах до 400°C, разрушался послойно в ходе извлечения из пресс-формы вследствие отсутствия связи между монослоями, что можно объяснить недостаточной пластической деформацией напыленных частиц сплава, необходимой для формирования межслойных связей. При этом изготовление образцов для испытаний не представлялось возможным.

Повышение температуры до 450°C и выше приводит к формированию боралюминия путем образования первичных межслойных связей в материале (см. рис. 1-3).

При температуре 450°C наблюдается очаговое схватывание при любых количествах циклов нагрев-охлаждение, что говорит о слабом развитии процессов деформации матричного материала. При этом степень деформации растет от цикла к циклу, вызывая прирост прочности и увеличение площади очагов межслойной связи. Однако при любом количестве циклов нагрев-охлаждение объединения очагов схватывания так и не происходит, что объясняет невысокие свойства материала.

При повышении температуры до 500°C и выше формируется сплошной контакт волокна с матрицей уже на 1 цикле (см. рис. 3), что свидетельствует о практически

полной реализации процессов пластической деформации матрицы. В силу этого при температурах 500 и 525°C наблюдается резкое повышение свойств боралюминия уже на 1 цикле. По фотографиям макроструктуры образцов можно судить о практически полном прохождении пластической деформации матричного сплава, об образовании сплошного контакта матричного сплава с волокном.

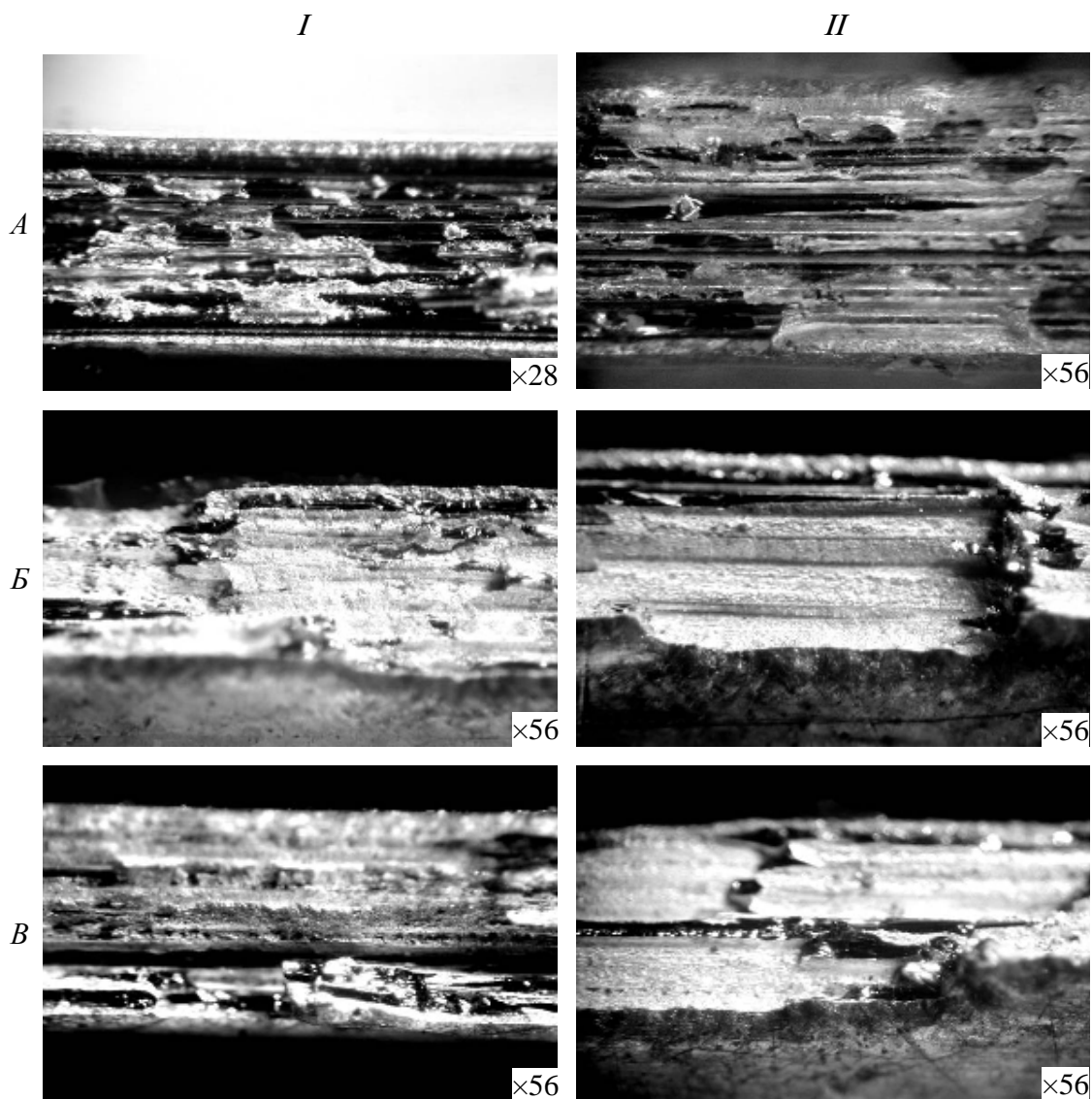


Рис. 3. Макроструктура поверхности боралюминиевого МКМ после испытаний на трансверсальную прочность. Образцы получены после циклов нагрев–охлаждение (*I* – 1 цикл; *II* – 5 циклов) при температуре 450 (*A*), 500 (*B*) и 525°C (*B*)

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно представить следующий механизм формирования боралюминиевого МКМ на этапах нагрева–охлаждения.

При температурах до 400°C фактически не происходит даже первичного схватывания между слоями, и боралюминий не формируется. При повышении температуры возникает очаговое схватывание, приводящее к формированию межслойных связей. От

цикла к циклу площадь схватывания увеличивается, незначительно повышая трансверсальную прочность боралюминия.

При температурах 500–525°C матричный сплав формирует контакт по всей поверхности волокна, и образуется монолитный композиционный материал, трансверсальная прочность которого в 3–3,5 раза превышает прочность материала, сформированного при температуре 450°C.

Выявлена критическая температура, при которой уже на 1 цикле нагрев–охлаждение формируется материал с практически полным охватом поверхности волокна деформирующейся матрицей. Для сплава АД33 и волокон бора диаметром 140 мкм эта температура составляет 500°C. Полученный при этом боралюминий не чувствителен к количеству дальнейших циклов нагрев–охлаждение.

Таким образом, при изготовлении деталей сложной конструкции из боралюминия по многоэтапному технологическому процессу, при любом количестве циклов нагрев–охлаждение, первый цикл необходимо проводить при температуре не ниже 500°C.

*Г.Ф. Железина, И.В. Зеленина, Н.П. Кувшинов,  
Л.Г. Орлова, В.В. Сидорова, Н.А. Соловьева*

## **АВИАЦИОННЫЕ ОРГАНОТЕКСТОЛИТЫ С ПОВЫШЕННОЙ ВЛАГОСТОЙКОСТЬЮ НА ОСНОВЕ АРАМИДНОГО ВОЛОКНА РУСАР**

Весовое совершенство авиационных конструкций в значительной степени зависит от применения легких, прочных и ударостойких полимерных композитов – органопластиков, армированных высокопрочными арамидными волокнами.

Конструкционные органопластики на основе арамидного волокна СВМ отличаются высокой удельной прочностью, стойкостью к динамическим нагрузкам, низкой скоростью роста усталостных трещин, высокими демпфирующими характеристиками. Органопластики мало чувствительны к различного рода повреждениям и сохраняют высокую конструкционную прочность в случае локальных разрушений при ударных, эрозионных и других воздействиях.

Опыт эксплуатации органопластиков первого поколения в составе авиационных конструкций показывает, что эти материалы имеют достаточно высокую эксплуатационную надежность в различных климатических зонах – календарный срок эксплуатации составляет не менее 5 лет. Однако в сравнении с композитами на основе стеклянных и углеродных волокон органопластики на основе волокна СВМ в большей степени сорбируют атмосферную влагу. Повышенное водопоглощение органопластиков традиционно считается основным недостатком этих материалов, несмотря на то что по уровню сохранения конструкционных свойств при увлажнении органопластики не уступают угле- и стеклопластикам.

Один из путей дальнейшего совершенствования авиационных органопластиков – это использование в их составе нового арамидного волокна Русар, обладающего пониженным водопоглощением и более высокими, по сравнению с волокном СВМ, механическими свойствами.

На основе арамидного волокна Русар разработана новая группа органопластиков: Органит 12Т(М)-Рус, Органит 18Т-Рус (на рабочую температуру 80°C) и Органит 16Т-Рус (на рабочую температуру 150°C).

В составе органопластиков использовали типовые эпоксидные связующие ЭДТ-69Н(М), ЭНФБ-2М и ВС-2526к. В качестве армирующего наполнителя новых ор-