

правда, данный материал нельзя уже в полной мере отнести к разряду волокнистых, поскольку, как уже отмечалось, связующее частично играет в нем роль наполнителя.

Отмеченный рост приведенной прочности при испытании на сжатие как при повышении температуры спекания материала (хотя при этом, вероятно, происходит одновременное снижение прочности самих волокон из-за роста зерна), так и с увеличением плотности материала (что сопровождается увеличением числа контактов между волокнами и, соответственно, уменьшением протяженности волокна между контактами), свидетельствует об особенностях деформации волокнистого каркаса. Рассмотрим эти особенности на приближенной модели разрушения – сжатие каркаса из жестких стержней\*.

При сжатии каркаса из жестких стержней разрушение будет происходить вследствие изгиба стержня и потери его устойчивости.

Для стержней, испытывающих нагрузку изгиба, при повышении жесткости заделки концов увеличивается их несущая способность (в пределе – до 2 раз). Соответственно этому, в экспериментах авторов отмечено существенное увеличение значения приведенной прочности при улучшении спекания в узлах каркаса благодаря отжигу при более высокой температуре. Для образцов практически одинаковой плотности при повышении температуры термообработки с 1400 до 1600°C приведенная прочность увеличилась более чем на 30%. Таким образом, можно сделать вывод, что основную роль в повышении прочности при сжатии жесткого волокнистого каркаса (при данной плотности) играет прочность связи волокон в местах контакта.

Устойчивость сжатого стержня прямо пропорциональна его модулю упругости  $E$  и обратно пропорциональна квадрату длины  $L$ :  $P = \pi^2 EJ/L^2$ , где  $J$  – минимальный момент инерции сечения стержня (определяется геометрией его сечения). Подобная зависимость также согласуется с результатами данной работы – рост приведенной прочности при увеличении плотности волокнистого каркаса (т. е. при уменьшении протяженности длины волокон ( $L$ ) между контактами). При увеличении плотности ЖВПК от 0,3 до 0,8 г/см<sup>3</sup> приведенная прочность возрастает в 2,5 раза.

Из приведенных рассуждений следует, что нагрузка разрушения при сжатии жесткого волокнистого каркаса определяется сопротивлением дискретных волокон изгибу и потере устойчивости.

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

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БОРАЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ С ТИТАНОМ**

Современный путь создания конкурентоспособных экономичных двигателей предусматривает разработку, создание и эксплуатацию двигателей с большой степенью двухконтурности, с диаметром вентилятора, превышающим два метра. При таких размерах вентилятора, лопасти, изготовленные из высокопрочных титановых сплавов, под действием центробежных сил «раскручиваются» и теряют свои аэродинамические характеристики. Это обстоятельство существенно ограничивает возможности их широкого использования.

Для обеспечения жесткости и «отстройки» от опасных частот, лопасти из полимерных композиционных материалов более перспективны. Уже в настоящее время при

---

\* Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во физ.-математ. лит., 1962, с. 619–626.

их применении эффект снижения массы значительно выше при сохранении характеристик жесткости. Однако анализ показывает, что лопатки из углепластиков используются при относительно малых скоростях вращения, что облегчает решение проблемы эрозионной стойкости и стойкости к воздействию посторонних предметов (например, ударов птиц). Кроме того, стоимость изготовления таких лопаток высока\*.

Наиболее эффективным решением представляется конструкция лопатки, состоящей из тонкостенной титановой оболочки и несущих основную нагрузку боралюминиевых стержней. Основными преимуществами такой составной лопатки является возможность «отстройки» от опасных высокочастотных колебаний путем изменения геометрических размеров, количества и места расположения несущих нагрузку стержней, а также отказ от бандажирования лопаток ввиду высоких жесткости и демпфирующих характеристик композита, минимизация перемещений периферийной части лопатки и, следовательно, рабочих зазоров и снижение массы диска и всей ступени в целом.

Технология изготовления составной лопатки включает диффузионную сварку боралюминиевых стержней с титановой оболочкой. Уровень термомеханического воздействия на этапе диффузионной сварки сопоставим с уровнем деформации при аналогичном процессе формирования МКМ. Для предотвращения возможного «пережога» материала необходимо согласовать технологические параметры этих двух процессов с целью получения оптимальных свойств боралюминия и прочной связи по границам раздела боралюминий–титан.

**Методика испытаний.** Прессование боралюминиевого материала проводили на гидравлическом прессе П-476 усилием 160 тс, с обогреваемыми плитами, обеспечивающими температуру до 560°C.

Оценку прочности боралюминиевых стержней проводили при испытании плоских образцов толщиной 5 мм, вырезанных алмазным диском из прессованных пластин материала размером 5×80×120 мм (скорость резки 12–15 мм/мин, глубина резки 1,5 мм, число оборотов режущего алмазного диска 2000 об/мин, охлаждение режущего инструмента эмульсией).

Испытания образцов проводили на разрывной машине INSTRON 1195 при скорости перемещения активного захвата машины 1 мм/мин.

Образцы изучали на световом микроскопе Neophot-21 и методом локального рентгеноспектрального анализа (ЛРСА) на САМЕВАХ.

**Результаты исследования.** Исходным полуфабрикатом боралюминиевого КМ является монослой, представляющий собой волокна бора с плазменно-напыленным на них матричным сплавом АД33. Исходная прочность борного волокна диаметром 140 мкм составляет 2900–3000 МПа. Шаг укладки волокон бора: 180 мкм.

Для оценки ситуации, связанной с долговременным хранением полуфабрикатов, была изготовлена партия боралюминиевых стержней по технологии получения паспортного материала. Прочность боралюминиевого КМ при растяжении составила 1180,90 МПа, что ниже паспортных данных ( $\sigma_b=1250$  МПа).

Полученное снижение свойств МКМ потребовало корректировки режима изготовления боралюминия. Основными технологическими параметрами изготовления боралюминиевого КМ являются: температура прессования ( $T^\circ\text{C}$ ); давление прессования ( $P$ , МПа); время выдержки ( $\tau$ , мин).

---

\* Каблов Е.Н., Салибеков С.Е., Абузин Ю.А., Турченков В.А., Рьльников В.С., Каримбаев Т.Д., Луппов А.А. Конструкционные и технологические решения для создания составных лопаток перспективных вентиляторов с применением прочных и жестких металлокомпозитов // В сб.: Новые технологические процессы и надежность ГТД. Вып. 3. Композиционные и керамические материалы в ГТД.– М.: ЦИАМ, 2003, с. 124–139.

Проведенными ранее исследованиями была определена оптимальная температура прессования боралюминиевого КМ исходя из условий взаимодействия на границе раздела матрица–волокно – установленный температурный режим позволяет получить наивысшие механические свойства конечного материала. Изменение этого параметра может привести либо к деградации волокна, либо к недостаточной химической связи на границе матрица–волокно. Таким образом, для получения максимальных механических свойств конечного продукта необходимо строго соблюдать установленный температурный режим.

Давление прессования было установлено из условий деформации матричного сплава на борном волокне и термодиффузионного взаимодействия МКМ с титаном на этапе диффузионной сварки. Изменение давления ведет к снижению прочности сдвига комбинированного материала либо к передавливанию боралюминиевого КМ.

Наиболее «мягким» параметром технологического процесса является продолжительность выдержки материала при горячем прессовании. Изменение этого параметра ведет к устойчивым закономерным изменениям характеристик КМ. Для определения возможности корректировки негативного воздействия длительного хранения полуфабриката, решено оптимизировать процесс по времени выдержки.

Таким образом, в одну из задач работы входило определение максимальных свойств конечного продукта на имеющихся полуфабрикатах и согласование процесса получения материала с диффузионной сваркой с титаном по уровню термодиффузионного воздействия. Были изготовлены и испытаны образцы с различным временем выдержки при прессовании. По результатам проведенных исследований определен оптимальный режим изготовления боралюминиевого КМ, при котором достигаются необходимые физические свойства МКМ с максимальной плотностью. Прочность такого материала в продольном направлении составила  $\sigma_b=1235$  МПа, в трансверсальном –  $\sigma_b=148$  МПа. Изменение продолжительности выдержки позволило получить материал со свойствами, незначительно отличающимися от паспортных. На основании полученных результатов разработана и оптимизирована двухступенчатая технология изготовления боралюминиевого КМ, включающая диффузионную сварку с титаном. На первом технологическом этапе изготавливают боралюминиевый КМ, имеющий необходимую геометрическую форму с технологической прочностью. На этом этапе материал должен обладать оптимальной степенью уплотнения, геометрической формой, шероховатостью поверхности, при которой в процессе диффузионной сварки с титаном будет исключено образование оксидов на границе боралюминий–титан. На втором технологическом этапе проводят диффузионную сварку предварительно скомпактированного боралюминиевого КМ с титановой оболочкой с достижением максимальных прочностных характеристик боралюминия и максимальной связью с титаном.

Для определения механических свойств боралюминия с титаном после диффузионной сварки, была изготовлена партия плоских образцов. Степень уплотнения предварительно скомпактированного материала составляла 95%.

Последовательность операций при изготовлении образцов: сначала по предварительному режиму были изготовлены боралюминиевые пластины, которые затем разрезаны алмазным диском на плоские панели. Эти панели укладывали на нижнюю титановую пластину толщиной 0,5 мм, с шагом укладки 5 мм и накрывали верхней титановой пластиной толщиной 0,5 мм, после чего проводили процесс диффузионной сварки. Для обеспечения надежной связи на границе титан–боралюминий, титан подвергали различным типам химического травления, а боралюминий – механической обработке для обеспечения необходимого качества контактной поверхности.

Полученные первые образцы обладали недостаточной диффузионной связью титана с боралюминием: на некоторых образцах наблюдалось отслоение титановой оболочки от боралюминиевых стержней, наличие оксидов на поверхности титана по границе боралюминий–титан. Причиной этому послужило недостаточное первоначальное давление в момент закладки сборки в предварительно разогретый пресс и недостаточное качество контактной поверхности боралюминиевого КМ. Была проведена корректировка давления в момент диффузионной сварки титана с боралюминием. Контролем этого процесса служил процент механических повреждений борных волокон, вытравленных из алюминиевой матрицы после диффузионной сварки, и визуальный осмотр готового изделия. Процент поврежденных волокон, по скорректированному процессу диффузионной сварки, составил 0,2%. Данный процент повреждений волокон получен на этапе предварительного компактирования боралюминиевого КМ. Для улучшения качества поверхности боралюминиевого КМ провели корректировку механической обработки.

Для определения прочности связи по границе раздела боралюминий–титан, проводили испытания на прочность при сдвиге – были изготовлены образцы боралюминий–титан (сварка внахлест) с различным видом химического травления титановой оболочки.

Проведенные испытания образцов боралюминий–титан как при растяжении, так и при сдвиге позволили определить оптимальный тип химического травления титановой оболочки, скорректировать время выдержки на различных технологических этапах, метод механической обработки плоских боралюминиевых панелей. Данная технология обеспечивала прочность при сдвиге комбинированного материала боралюминий–титан  $\sigma_{сдв}=77$  МПа, прочность при растяжении  $\sigma_{в}=1191$  МПа, приведенную прочность боралюминиевого КМ  $\sigma_{в}=1228$  МПа. Микроструктура комбинированного материала боралюминий–титан показана на рис.1. Очевидно, что данная технология диффузионной сварки обеспечивает полное компактирование боралюминия и получение беспористого материала, с равномерным распределением волокон в матрице, без разрушения волокон.

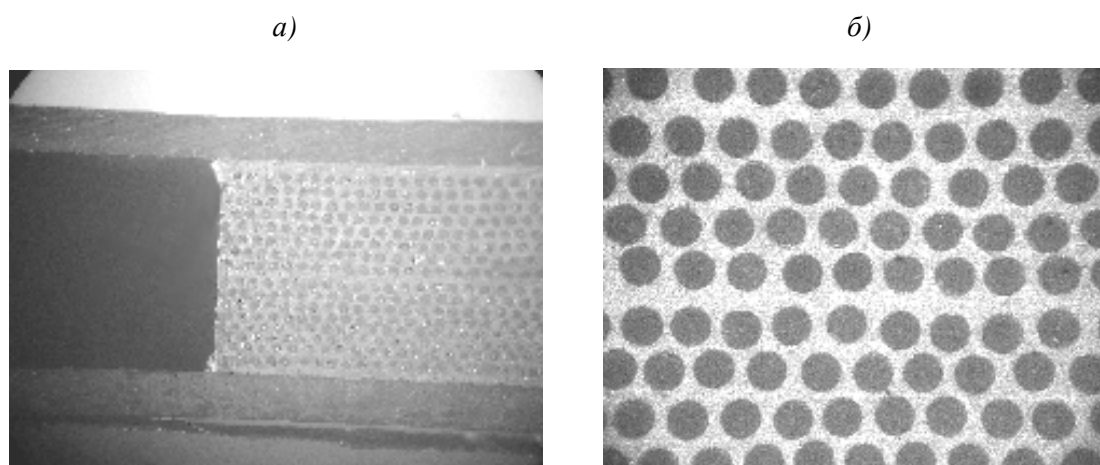


Рис. 1. Боралюминий после диффузионной сварки с титаном: *a* –  $\times 4$ ; *б* –  $\times 20$

Для определения качества диффузионной сварки боралюминий–титан проведен локальный рентгеноспектральный анализ (рис. 2).

На рентгенограмме видно (см. рис. 2, *б*), что в зоне взаимодействия алюминиевой матрицы с титаном отсутствуют промежуточные интерметаллидные включения.

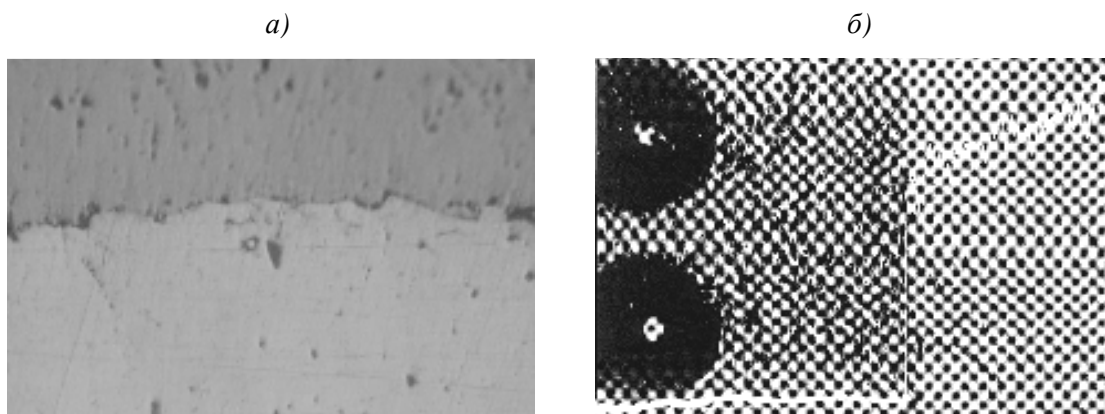


Рис. 2. Микроструктура зоны соединения Ti–Al: *a* –  $\times 900$ ; *б* –  $\times 150$  (МРС)

Для отработки технологии и опытного подтверждения возможности изготовления составной конструкции боралюминий–титан применительно к широкохордным лопаткам вентиляторов, во ФГУП «ЦИАМ» разработана модель, выполненная в виде двухзамковой плоской панели.

Технологии изготовления двухзамковых модельных лопаток и плоских панелей были идентичны. На первом технологическом этапе по предварительному режиму были изготовлены боралюминиевые пластины с замковой частью типа «ласточкин хвост» по обе стороны. В качестве расклинивающих вкладышей в замковой части применялся алюминий марки А99 (рис. 3). Данные пластины были порезаны алмазным диском на стержни необходимого размера. Боралюминиевые стержни зачищали механическим путем для придания контактной поверхности необходимой чистоты.

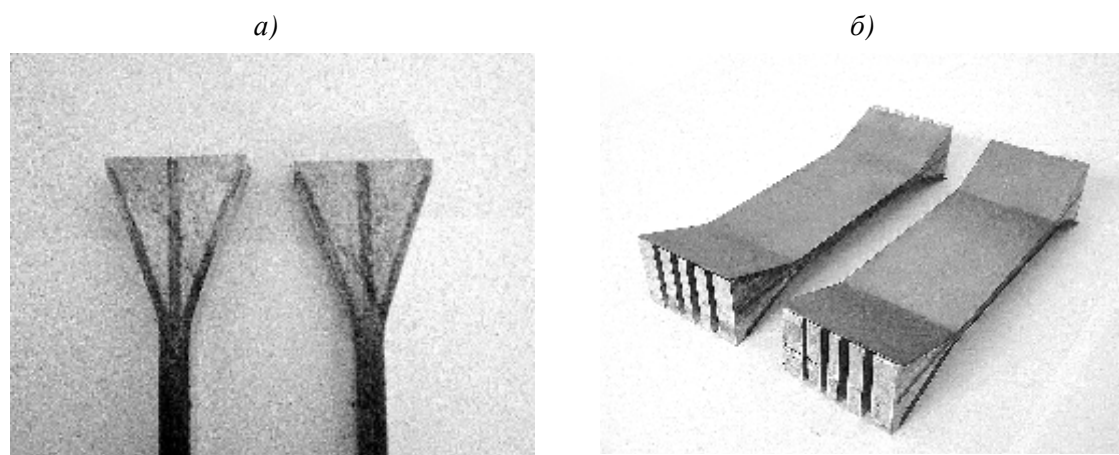


Рис. 3. Получение боралюминиевых стержней с замковой частью типа «ласточкин хвост» (*a*) из двухзамковой плоской панели (*б*)

Перед диффузионной сваркой титановые оболочки подвергали предварительной гибке для придания формы будущей двухзамковой панели, затем – химическому травлению.

Боралюминиевые стержни укладывали на нижнюю титановую оболочку толщиной 0,5 мм с различным шагом укладки и накрывали верхней титановой оболочкой толщиной 0,5 мм, после чего проводили процесс диффузионной сварки.

На первых полученных двухзамковых модельных лопатках визуально было обнаружено качественное соединение по границе боралюминий–титан, отсутствие осевого смещения боралюминиевых стержней. Однако была выявлена зигзагообразная форма замкового соединения, обусловленная недостаточной жесткостью конструкции замковой части.

Для предотвращения образования зигзагообразного вида замковой части боралюминиевых стержней, в процессе диффузионной сварки с титаном устанавливали металлические ограничители по высоте, равной высоте сборки минус расчетная деформация, необходимая для допрессовки боралюминиевых стержней и диффузионной сварки стержней с титановыми обкладками. Данный метод позволил избежать появления зигзагообразного вида в замковой части.

Проведенные испытания двухзамковых модельных лопаток во ФГУП «ЦИАМ» подтвердили работоспособность оболочковой конструкции в условиях одноосного и циклического нагружения, позволили уточнить характеристики элементов составной конструкции, показали, что в хвостовике полноразмерной лопатки вентилятора минимальные значения запасов статической прочности будут  $>1,44$ , кратковременной прочности: 2,58, прочности на базе 1000 ч: 2,1, малоциклового усталости: 1,8.

Во ФГУП «ЦИАМ» была разработана модель полноразмерной широкохордной лопатки составной конструкции с углом закрутки 18 град. На этой модели отработывалась технология соединения профилированных боралюминиевых стержней и титановой оболочки.

Для решения поставленной задачи во ФГУП «ЦИАМ» были спроектированы прессформы, позволяющие получать боралюминиевые стержни с профильной частью, формировать верхнюю и нижнюю титановые оболочки, а также сборочная прессформа для проведения диффузионной сварки боралюминия с титаном.

Весь комплект был изготовлен в ММПЗ «Салют». Прессформа для получения профилированных боралюминиевых стержней представляет собой ячеистую структуру и позволяет получать профилированные боралюминиевые стержни, без последующей механической обработки.

Для более устойчивого поведения замковой части в момент диффузионной сварки, увеличения жесткости и механических свойств, было предложено замковую часть изготавливать полностью из боралюминия вместо использования алюминиевых расклинивающих вкладышей.

Процесс укладки боралюминиевых монолитов в ячейки прессформы оказался чрезвычайно сложным и трудоемким. С целью облегчения данного процесса, первоначально получали боралюминиевые пластины с замковой частью. Далее эти пластины резали алмазным диском на стержни необходимого размера, после чего эти стержни укладывали в ячейки прессформы с последующим профилированием. Спрофилированные стержни зачищали механическим путем для придания контактной поверхности необходимой чистоты. Таким образом, первый технологический этап был разбит на два подэтапа, при котором суммарное время не выходило за установленные рамки продолжительности первого технологического этапа.

Формирование титановых оболочек проводили как в холодном, так и в горячем состоянии. В первом случае наблюдали недостаточную сформированность оболочек и, как следствие, снижение качества диффузионной сварки. Во втором случае сформированность титановых оболочек соответствовала всем требованиям. Для этого случая был подобран такой режим, при котором затраты времени на формирование титановых оболочек были минимальными. После формирования оболочек их подвергали химическому травлению.

Перед проведением диффузионной сварки боралюминиевых стержней с титановыми обкладками был проведен расчет изменения температуры и давления. По полу-

ченным данным, изменения температуры и давления не выходят за установленные рамки технологических параметров. Таким образом, отпала необходимость вводить корректировку в технологический режим.

Полученные первые образцы модельной лопатки показали недостаточно качественную диффузионную связь боралюминия с титаном. Причиной этого являлось отсутствие необходимого качества контактной поверхности боралюминиевых стержней. Для обеспечения надежной диффузионной связи по границе боралюминий–титан, качество контактной поверхности боралюминиевых стержней доводили до уровня «зеркального блеска».

Полученные боралюминиевые стержни укладывали на нижнюю титановую оболочку толщиной 0,5 мм и накрывали верхней титановой оболочкой толщиной 0,5 мм. Для предотвращения радиального смещения стержней между ними устанавливали технологические вставки.



Рис. 4. Модельная лопатка составной конструкции

Процесс диффузионной сварки боралюминия с титаном проводили по отработанному режиму. Полученные модельные лопатки визуально показали качественное соединение по границе боралюминий–титан, отсутствие радиального смещения боралюминиевых стержней и образования зигзагообразного вида замковой части (рис. 4).

В результате проведенной работы оптимизирован процесс получения боралюминиевого КМ, разработана методика определения критических параметров технологии изготовления. Собранный статистический материал позволил выявить критические точки в технологии и оптимизировать процесс изготовления боралюминиевого КМ, включающий диффузионную сварку с титаном. Оптимизация технологии позволила освоить процесс изготовления модельных лопаток составной конструкции с углом закрутки 18 град для проведения испытаний на разгонном стенде. После испытаний будут внесены соответствующие коррективы в процесс изготовления, которые позволят приступить к освоению технологии изготовления полноразмерной лопатки составной конструкции.

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

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОДЕЛЬНОЙ ПУСТОТЕЛОЙ ЛОПАТКИ СОСТАВНОЙ КОНСТРУКЦИИ КАК ОДНОГО ИЗ ЭТАПОВ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛНОРАЗМЕРНЫХ ШИРОКОХОРДНЫХ ПУСТОТЕЛЫХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА ГТД**

Лопатка вентилятора ГТД – одна из наиболее сложных деталей двигателя по геометрической форме и, следовательно, по технологии изготовления и условиям работы. Она испытывает статические и динамические нагрузки (растяжение, изгиб, кручение), меняющиеся температурные нагрузки, вибрации, приводящие к возникновению резонансных колебаний различной формы, а также коррозионное и эрозионное воздействие внешней среды, – при этом лопатка должна обладать минимальной массой.