

**Применение композиционных материалов с защитными покрытиями в агрегатах систем кондиционирования воздуха**

д.т.н. проф. Меркулов В.И., Нагайцев Р.Ю.

*Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)*

*Аннотация.* В статье содержится анализ использования современных композиционных материалов в системах воздухообмена на транспорте и даны рекомендации по использованию данных материалов в конструкциях.

*Ключевые слова:* композиционные материалы, снижение веса, пластинчатые теплообменники, защитные покрытия

Композиционные материалы на основе пластиков, армированные борными и угольными волокнами, нашли применение в авиации. Они используются для изготовления лопастей винтов вертолетов, лонжеронов, хвостового оперения, лопастей компрессоров и т.д. Следует отметить, что намечается тенденция к использованию углепластиков не только в тех областях, где стоимость имеет второстепенное значение, но и при производстве товаров широкого потребления (рыболовные удилища, теннисные ракетки).

Нужно отметить, что угольные волокна дешевле и легче борных; по модулю упругости борные и угольные волокна почти не отличаются, хотя последние имеют несколько меньшую прочность. Но самое большое преимущество угольных волокон состоит в их технологичности. Основным фактором, несколько сдерживающим применение волокон бора, кроме высокой стоимости, является большой диаметр волокна (0,1 мм), что ограничивает его применение только на поверхностях с небольшой кривизной. Угольные волокна лишены этого недостатка. Их получают из вискозных или полиакрилонитриловых волокон пиролизом при 1600-3000°C, в процессе которого даётся небольшая вытяжка. В зависимости от температуры и степени вытяжки получают высокопрочные или высокомодульные волокна графита. Угольное волокно изготавливают рубленным, в виде штапеля, предварительно пропитанного полотна.

Наиболее перспективным материалом в настоящее время является карбид кремния (SiC) и композиционные материалы на его основе, позволяющие получать заданное сочетание свойств: высокие удельные прочность и жесткость, жаропрочность, износостойкость, высокие теплопроводность и теплозащитные свойства, радиационная прочность и др. Спектр свойств карбида кремния: теплопроводность 180-200 Вт/(м·К) (как у алюминия), у монокристаллов – до 470 Вт/(м·К); рабочая температура – более 1350°C (как у жаропрочных сталей); температура плавления/разложения составляет 2830°C; стойкость в окислительной и восстановительной среде выше, чем у титана; по химической инертности приближается к золоту и платине; высокая стойкость к абразивному износу (чуть ниже, чем у алмаза).

В последнее десятилетие проводятся интенсивные исследования по разработке композиционных материалов (КМ) на основе неоксидных соединений – углерода, карбида и нитрида кремния и др., в которых указанные соединения могут являться как матрицей, так и армирующим наполнителем в виде непрерывных или дискретных волокон, усов, вискерсов, пластин (композиты состава C/C, C/SiC, SiC/SiC). Такие материалы отличаются высокими прочностными характеристиками, жаропрочностью, малой плотностью, что позволяет использовать их в авиации и космической технике в качестве высокотемпературных конструкционных материалов, для изготовления элементов газовых турбин, дизельных двигателей, теплообменников, в робототехнике.

Композиционные материалы вида C/SiC и SiC/SiC отличает низкая удельная масса, износостойкость, возможность формирования из них изделий сложной формы, в восстановительных условиях эксплуатации эти композиты сохраняют высокие механические свойства вплоть до температуры 2000°C, однако в окислительных условиях их использование ограничивается склонностью C и SiC к окислению уже при 400 и 1200°C соответственно. Их деградация усиливается при воздействии паров воды и солей щелочных металлов.

Одним из возможных способов решения проблем окисления материалов на основе карбида кремния является разработка функциональных защитных покрытий. В зависимости от состава композиционных материалов, условий их эксплуатации и, соответственно, предъявляемых требований, покрытия могут выполнять различные функции:

- улучшать механические свойства подложки при воздействии градиента температур;
- ограничивать химические процессы окисления и коррозии композитов;
- регулировать процесс переноса тепла при высоких температурах эксплуатации изделий путем изменения теплопроводности материала.

Составы функциональных покрытий должны соответствовать определенным требованиям, основными из которых являются: высокая температура плавления, стойкость к окислительной атмосфере и водяным парам, низкая теплопроводность и, самое главное, – значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), близкие к ТКЛР карбида кремния. В работах российских ученых (С.С. Солнцев, В.Г. Севастьянов, Е.С. Лукин и др.) и зарубежных исследователей (Kang N. Lee, J.D. Webster, M. Ferraris и др.) показано, что для поверхностной и объемной защиты композитов C/SiC, SiC/SiC в наибольшей степени эффективно применение покрытий на основе силикатов и алюмосиликатов: муллита, кордиерита, цельзиана, стронциевого анортита, силикатов редкоземельных элементов, а также на основе более высокотемпературных соединений: титанатов, цирконатов и гафнатов алюминия, скандия и редкоземельных элементов.

Муллит  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  представляет наибольший интерес как защитное покрытие для карбида (нитрида) кремния из-за низких значений ТКЛР и высокой химической стойкости. Начиная с 80-х годов именно покрытия на основе муллита и/или бинарных систем  $Al_2O_3$  и тугоплавких оксидов  $ZrO_2$ ,  $Y_2O_3$  и др. использовали для термозащиты композиционных материалов, такие покрытия позволяли существенно повысить трещиностойкость изделий.

Задачей применения композиционных материалов в конструкциях и узлах систем кондиционирования воздуха, в данное время, занимается ОАО «НПО НАУКА».

Основными направлениями для исследования являются :

- замещение материалов конструкций корпусных деталей.
- возможность использования композиционных материалов в матрице пластинчатого теплообменника.
- использование современных систем проектирования деталей из композита.

В целях научно-исследовательской работы по исследованию возможности применения композиционных материалов, на предприятии ОАО «НПО» Наука впервые в качестве опытного образца был изготовлен клапан выпускной электроприводной.

Клапан с проходным сечением  $D_n=200$  мм, предназначен для дросселирования потока воздуха на сбросе из гермокабины с регулированием по электрическим управляющим сигналам в двух режимах автоматического управления и в режиме дистанционного управления в составе цифровой системы автоматического регулирования давления (САРД). Клапан выпускной применяется на самолетах Ту-204СМ и Ан-70.

Корпус и заслонка экспериментального образца выпускного клапана изготовлены из композиционных материалов (полиамид 6.6) методом лазерного спекания. Применение полимерных композиционных материалов позволило снизить массу корпуса и заслонки в два раза, массу клапана в 1,3 раза (см. табл. 1).

Таблица 1

Масса, кг	Заслонка	Корпус	Клапан (в сборе)
АК7	0,55	1,35	4,8
Полиамид 6.6.	0,225	0,53	3,655

Далее были исследованы свойства клапана к механическим воздействиям и проведены испытания клапана в составе системы автоматического регулирования давления. Клапан с положительными результатами выдержал испытания на работоспособность, ударную проч-

ность, на прочность и устойчивость к воздействию широкополосной случайной вибрации, акустические и стендовые испытания в составе системы автоматического регулирования давления.

Ещё одной научно-исследовательской работой является проработка возможности использования композитных материалов в пластинчатых теплообменниках. Матрица теплообменника, состоящая из плоских и гофрированных листов, изготавливается из композитных материалов на основе углеродной ткани с пропиткой связующим на основе поликарбосилов или силиконов. Затем листы соединяются высоко температурным клеем и осуществляется отверждение клея под давлением. После этого проводится термообработка пакета. После этого проводится уплотнение пакета керамическим компонентом.

Для расчёта и моделирования деталей из композита предполагается использование современного программного обеспечения от компании ESI.

С учётом анализа физико-химических свойств композиционных материалов рассмотрена номенклатура деталей и узлов системы кондиционирования воздуха на авиационном транспорте, которые могут быть изготовлены из композитов.

Перевод ряда деталей и узлов системы кондиционирования воздуха на транспорте позволяет существенно улучшить эксплуатационные свойства конструкций таких как снижение массы, улучшение вибрационных и шумовых параметров, увеличение ресурса.

### Литература

1. Меркулов В.И. , Кустарёв Ю.С. , Валеев А.Г. , Пелевин А.Н. Применение композиционных материалов на транспорте // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта, вып. 20, изд. ФГОУ ВПО ВГАВТ, Нижний Новгород 2006.
2. Меркулов В.И. , Нагайцев Р.Ю. Использование композиционных материалов в системе кондиционирования воздуха на транспорте // Известия МГТУ «МАМИ» №2(20) 2014. Москва.
3. Меркулов В.И, Никулин А.В. Акустическое проектирование агрегатов систем воздухообмена на транспорте // Известия МГТУ «МАМИ» №2(16) 2013. Москва.
4. Рогов В.А., Соловьёв В.В., Копылов В.В. Новые материалы в машиностроении // РУДН , Москва 2008.
5. Тялина Л.Н., Минаев А.М., Пручкин В.А. Новые композиционные материалы // ГОУ ВПО ТГТУ, Тамбов 2011.
6. Котов В.В. Моделирование производства композиционных материалов – вызов времени // Аэрокосмический курьер №1 2011, Москва.
7. Лебедева Ю.Е., Попович Н.В., Орлов Л.А. Защитные высокотемпературные покрытия для композиционных материалов на основе SiC // Труды ВИАМ №2 2013, Москва.
8. Warriar K.G., Kumar G.M., Ananthakumar S. Densification and Mechanical Properties of Mullite-SiC Nanocomposites Synthesized Through Sol-gel Coated Precursors // Bull. Mater. Sci. 2001. V. 24. №2. P. 191-195.
9. Webster J.D., Westwood M.E., Hayes F.H. Oxidation Protection Coatings for C/SiC Based on Yttrium Silicate // J. Eur. Ceram. Soc. 1998. V. 18. P. 2345-2350.
10. Lee K.N., Fox D.S., Eldrige J.I., Zhu D., Robinson R.C., Bansal N.P., Miller R.A. Upper temperature limit of Environmental Barrier Coatings based on mullite and BSAS // J. Am. Ceram. Soc. 2003. V. 86. №8. P. 1299-1306.
11. Способ поверхностной и объемной защиты керамоматричных композитов типа C/SiC и SiC/SiC: пат. 2322425 Рос. Федерация. 2006.