

## ТЕПЛОЗАЩИТНЫЙ МАТЕРИАЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКСИДНЫХ АРМИРУЮЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

*Изложены особенности технологии получения волокнистых композиционных материалов на основе керамических и стеклокерамических матриц.*

*Экспериментально установлено влияние технологического процесса получения стеклокерамических и керамических композиционных материалов на их теплофизические свойства.*

**Ключевые слова:** теплозащитный материал, волокнистые композиционные материалы

Применение теплозащиты в современных изделиях авиационно-космической техники IV–V поколений ужесточает требования, предъявляемые к разрабатываемым материалам по обеспечению рабочих температур и конструкционной прочности. Для обеспечения функциональных характеристик современных летательных аппаратов широко применяют теплозащитные стеклокерамические композиционные материалы (СККМ).

Волокнистые композиционные материалы на основе керамических и стеклокерамических матриц привлекают особое внимание, благодаря их чрезвычайной стойкости к термическим и химическим воздействиям. Они продемонстрировали ряд преимуществ по сравнению с металлическими материалами, а именно уникальное сочетание малой плотности с высокой конструкционной прочностью, стабильностью и рядом других свойств [1].

Требования противостоять окислению при высоких температурах значительно ограничивают выбор упрочняющих керамических и стеклокерамических волокон. Оксидная керамика является наиболее перспективной для синтеза высокотемпературной теплозащиты. Кроме того, армирующие компоненты оксидной керамики не являются дефицитными и дорогостоящими. Перспективными считаются волокна на основе оксида алюминия, муллита, диоксида циркония, а также нитрида и карбида кремния. Как правило, для синтеза матрицы используют те же соединения, которые благотворно влияют на их совместимость с армирующим наполнителем. Повышение эксплуатационных характеристик оксидных композиционных материалов осуществляется путем улучшения качества исходного сырья, оптимизации составов и технологических режимов [2].

Регулирование свойств таких материалов возможно осуществлять путем подбора составляющих компонентов, их количественного соотношения, распределения и ориентации в объеме материала, технологических параметров их получения. Это позволяет получать композиционные материалы многофункционального назначения [3, 4].

В данной работе в качестве матрицы исследовалась система  $Al_2O_3-SiO_2$ . Оксид алюминия вводился в состав матрицы в виде водорастворимых солей или высокодисперсного порошка. Отличительной особенностью стекловидных и стеклокерамических матриц является низкая реакционная способность и высокое сопротивление деформированию в твердофазном состоянии, однако проблемы химической и механической совместимости для композитов весьма серьезны, их решение требует комплексных подходов, тщательной научной и практической проработки процессов синтеза и технологии.

Одним из важнейших этапов производства СККМ и обеспечения его высоких свойств является получение качественного полуфабриката – мата из объемно-структурированных армирующих наполнителей. Мат должен быть равноплотным на макро- и микроуровнях, иметь максимальную изотропность, обладать необходимой технологической прочностью и заданными геометрическими размерами. При этом уже

на этапе получения матов должна учитываться схема последующего технологического процесса изготовления СККМ.

Была разработана технология изготовления матов из армирующих волокон на основе муллита и каолина.

Механическая очистка исходных армирующих волокон заключалась в удалении крупных неволокнистых включений.

Гидросуспензию готовили в емкости с мелющими шарами на валковой мельнице. В процессе изготовления гидросуспензии установлено, что при перемешивании волокно претерпевает хаотичное соударение с мелющими шарами, в результате чего оно утрачивает до 50% исходных механических характеристик. Поэтому был опробован второй вариант приготовления гидросуспензий из волокна, обработанного на ножевой мельнице. Маты, полученные из волокна, подвергнутого обработке на ножевой мельнице, обладали большей технологической и механической прочностью.

Удаление воды может осуществляться как самопроизвольно, так и принудительно под давлением. Регулирование давления позволило получить маты с пористостью от 20 до 40% (объемн.) и обеспечило возможность получения КМ с регулируемой объемной долей армирующего наполнителя – от 20 до 40% (объемн.). При этом маты получаются равномерно, отсутствует слоистость. На рис. 1 представлены данные по изменению плотности полученных волокнистых заготовок в зависимости от давления.

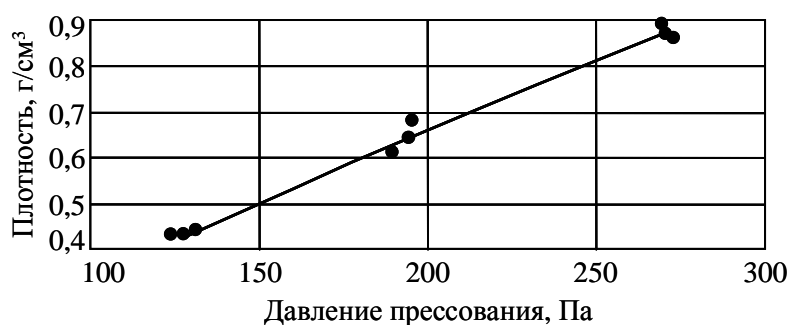


Рис. 1. Влияние давления прессования на плотность волокнистых полуфабрикатов

Процесс сушки заключался в полном удалении влаги из мата за счет ее испарения. Температурно-временной режим сушки матов является определяющим фактором получения бездефектных заготовок – должны отсутствовать коробление, расслоение и трещины.

Основной способ получения СККМ на основе волокнистых полуфабрикатов из оксидных волокон и стеклокерамической матрицы – золь-гель метод. Достоинством данного метода является низкая энергоемкость процесса и обеспечение высоких качественных показателей материала. При этом возможны различные технологические приемы получения СККМ – от простой пропитки волокнистой заготовки матричным составом до горячего прессования полуфабриката СККМ под давлением.

На этапе перехода от изготовления образцов до изготовления изделий из СККМ учитывали, что качество и стабильность свойств изделий зависят от многих факторов: состава и качества исходных компонентов, технологических параметров, размеров изготавливаемого изделия и его конфигурации. Часто на переходном этапе в готовом изделии возникали разного рода дефекты – как поверхностные, так и внутренние, что не наблюдалось при изготовлении образцов. Количество дефектов, как правило, увеличива-

лось с увеличением размеров изделия и с изменением вида термической обработки, которой оно подвергается.

Для устранения дефектов, связанных с нарушением фазовой стабильности СККМ, вводили в состав гель-матриц агенты – замедлители кристаллизации (борсодержащие компоненты), а для снижения усадок при высокотемпературном нагреве – оксид магния, замедляющий спекание стеклокерамических волокон.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили правильность выбранных направлений. Были изготовлены три партии панелей из теплозащитного материала типа Геларм размером 400×400×150 мм на основе муллитового волокна и матрицы системы  $Al_2O_3-SiO_2$  с добавками  $B_2O_3$  и  $MgO$ . Экспериментальные панели прошли предварительную термообработку до 1000°C в течение 1 ч, после чего испытывались на температуроустойчивость по режиму: 1650°C, 20 мин и 1 ч. Оценка температуроустойчивости панелей проводилась по изменению их размеров и по качеству поверхности. Были получены следующие данные: усадки панелей СККМ на основе оксидных волокон и матрицы системы  $Al_2O_3-SiO_2$  с добавками  $B_2O_3$  и  $MgO$  после испытаний составили 3–5%, в то время как усадки панелей, не содержащих компонентов модификаторов, составили 10–11%.

Температуроустойчивость экспериментальных панелей СККМ на оксидных армирующих волокнах подтверждена данными рентгенофазового анализа. Фазовый состав образцов СККМ исследовался как в исходном состоянии, так и после термообработки по следующим режимам: 1000°C (10 мин и 1 ч); 1650°C (10 мин и 1 ч). Съемка образцов проводилась на дифрактометре D/MAX-2500 фирмы «Rigaku» с медным монохроматическим излучением (рис. 2).

В результате проведенных исследований установлено, что основными фазами исходного СККМ являются корунд  $Al_2O_3$ , аморфный кварц  $SiO_2$  и оксид  $Al_2O_3$ . При нагреве до 1000°C, 1 ч, появляется дополнительная фаза – муллит – и незначительное количество силлиманита (<0,55%). При нагреве материала до температуры до 1650°C и выдержке до 1 ч основной состав СККМ остается неизменным, содержание муллита не меняется, и лишь незначительно снижается содержание аморфного кварца (<0,1%) и появляется кристаллический кварц.

В работе были проведены исследования теплофизических свойств СККМ на оксидных волокнах и из нитевидных кристаллов карбида кремния (НК-SiC). Размер исследуемых образцов: диаметр 0,015 м, толщина 0,003 м. Плотность исследуемых образцов находилась в пределах  $d=0,6-0,7$  г/см<sup>3</sup>.

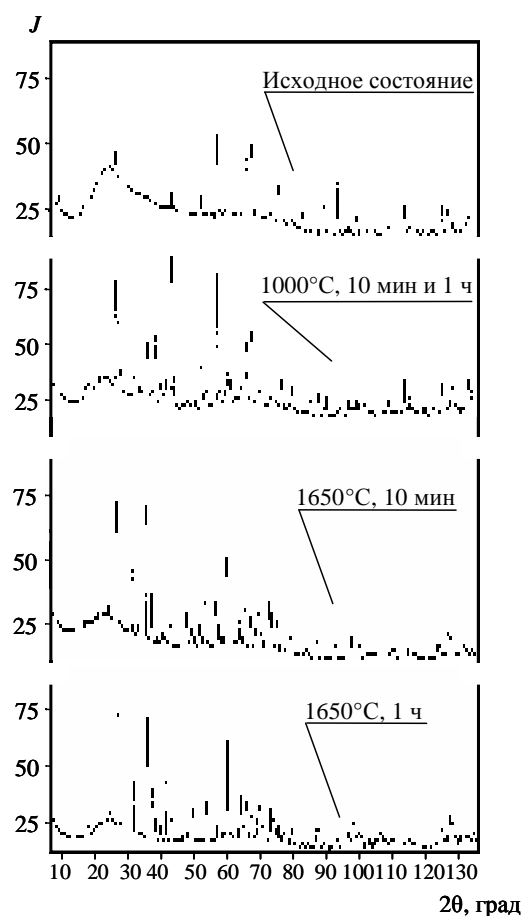


Рис. 2. Дифрактограммы образцов СККМ типа «Геларм» на оксидных волокнах

Получены следующие данные по теплопроводности ( $\lambda$ ):

Материал образцов	$\lambda$ , Вт/(м·°С)
На волокне системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ .....	0,13–0,14
НК–SiC .....	0,24–0,25.

Данные результаты свидетельствуют о том, что разработанный СККМ на оксидных волокнах по теплопроводности превосходит СККМ на дефицитном армирующем волокне SiC.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели разработанного СККМ на основе оксидных армирующих наполнителей и стеклокерамической матрицы: высокая температуроустойчивость, механическая прочность, низкие теплопроводность и плотность, экологическая безопасность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений: Международная научно-техническая конференция.– М.: ЦАГИ, 2004, с. 64–96.
2. Композиционные материалы: Справочник.– М.: Машиностроение, 1990, Гл. 1, с. 7–10.
3. Августинник А.И. Керамика.– Л.: Стройиздат, 1975, с. 370–380.
4. Солнцев С.С., Минаков В.Т., Розененкова В.А., Швец Н.И., Миронова Н.А., Антонова С.В. Комплексные температуроустойчивые защитные покрытия для керамокерамических композиционных материалов: Труды XVIII совещания по температуроустойчивым функциональным покрытиям, ч. 2.– Тула: изд. ТПУ им. Л.Н. Толстого, 2001, с. 8–10.

*С.С. Солнцев, Н.В. Исаева, В.В. Швагирева, Г.А. Соловьева*

### **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЖАРОСТОЙКИЕ ЭМАЛЕВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ И ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

*Приведены данные по влиянию и воздействию продуктов сгорания топлива на сопротивляемость коррозионностойких сталей и жаропрочных сплавов и их работоспособность. Для защиты от коррозионного воздействия продуктов сгорания топлива разработаны и применяются жаростойкие газоплотные стеклоэмалевые покрытия.*

**Ключевые слова:** жаростойкие эмалевые покрытия, коррозионностойкие стали, жаропрочные сплавы.

Сопротивляемость коррозионностойких сталей и жаропрочных сплавов воздействию продуктов сгорания топлива зависит от химического состава материала, влияния примесей топлива, температуры и продолжительности воздействия, а также циклического нагружения на работающие конструкции.

При неполном сгорании некоторых топлив в продуктах сгорания всегда содержатся соединения углерода (оксид углерода, углеводороды и др.), что приводит к отложению на поверхности металлических конструкций продуктов термического разложения углеводородных горючих (нагар, сажа).