

Значение жесткости при актюировании  $k_a$  в точке определения деформации волоконно-оптическим сенсорным элементом рассчитывается по формуле (3). После сравнения разности значений прогиба профилей  $Z_{1a}-Z_1$  и  $Z_{2a}-Z_2$  и отклонения значения жесткости  $k_a$  от  $k$  можно судить об изменении жесткости образца.

Таким образом, описанный способ позволяет оценить изменение жесткости образцов. В свою очередь, изменение жесткости конструкций из ПКМ может служить индикатором наличия структурных изменений и, как следствие, образования микродефектов, их развития при воздействии нагрузок и зарождения опасных дефектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бунаков В.А., Головкина Г.С. Армированные пластики. М.: МАИ. 1997. 404 с.
2. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера. 2006. 628 с.
3. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. М.: Техносфера. 2006. 223 с.
4. Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 31–34.
5. Физика. Большой энциклопедический словарь /Гл. ред. А.М. Прохоров. 4-е изд. М.: Большая российская энциклопедия. 1998. 944 с.

УДК 620.179:678.84

*Е.Н. Каблов, Д.В. Гращенков, Н.Е. Уварова*

## **ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ**

*Приведены преимущества золь-гель технологии для получения высокотемпературных стеклокерамических материалов. Рассмотрены результаты исследования методом инфракрасной спектроскопии процессов структурообразования – переходов «раствор (золь)→гель→кристаллическая фаза» на примере системы  $SrO-Al_2O_3-SiO_2$ .*

**Ключевые слова:** *золь-гель технология, гелеобразование, стеклокерамика, структурообразование, стронциевый анортит.*

Получение высокотемпературных керамических и стеклокерамических материалов – важная задача современного материаловедения. Областью применения этих материалов являются перспективные изделия авиационной и космической техники, а также машиностроение, энергетика, нефтяная и газовая промышленность [1–3].

Получение высокотемпературных стеклокристаллических материалов традиционным способом варки стекла с последующей его направленной кристаллизацией сопряжено с рядом трудностей: необходимостью применения высокой температуры варки исходных стекол и сложностью при получении материала заданного фазового состава. При осуществле-

нии этой технологии происходит загрязнение воздуха пылью из мелкодисперсных шихтовых материалов и испарениями продуктов реакции при варке стекла.

В настоящее время возрастает интерес к новым энергосберегающим способам получения высокотемпературных материалов, таким как золь-гель технология, главным преимуществом которой является более низкая температура синтеза материалов по сравнению с традиционными способами. Достижения последних лет в области золь-гель технологии доказали перспективность ее применения как для получения тонкодисперсных порошков матричных компонентов, включая нанопорошки, так и для нанесения покрытий на волокна из золей прекурсоров [4–7].

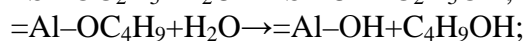
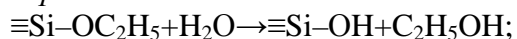
Золь-гель технология является перспективным способом получения высокотемпературных материалов, позволяющим регулировать структуру и свойства материалов путем изменения условий синтеза, и имеет следующие преимущества: высокую химическую однородность многокомпонентных систем (на молекулярном уровне); высокую поверхностную энергию гелей или порошков, что способствует понижению температуры спекания; высокую химическую чистоту реагентов; возможность получения продуктов в виде волокон, порошков, пленок и микросфер высокой чистоты и однородности; возможность синтеза принципиально новых материалов [8, 9].

В работе рассматриваются результаты исследования методом инфракрасной спектроскопии (ИК) процессов структурообразования, протекающих в процессе переходов «раствор (золь)→гель→кристаллическая фаза» на примере системы SrO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>.

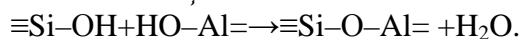
Процесс гелеобразования имеет особенно важное значение при получении материалов по золь-гель технологии, поскольку именно на этом этапе формируется структура геля, включающего в себя фрагменты структуры будущего материала, и во многом обусловлен последующими процессами.

В общем виде процесс гелеобразования можно представить в виде схемы последовательных реакций:

– гидролиз



– поликонденсация

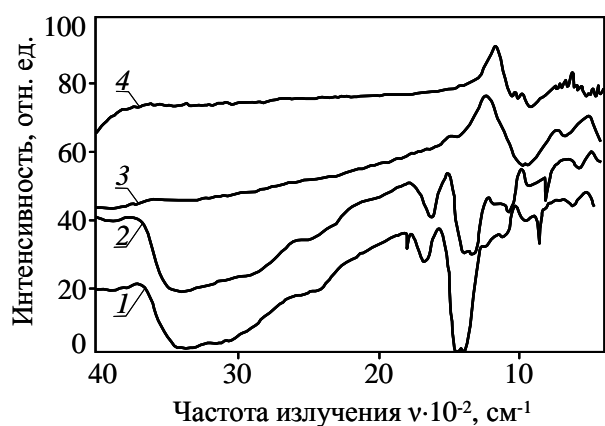


Такая схема является лишь формальным отображением процессов гидролиза и поликонденсации, позволяющая дать общее представление о сути золь-гель технологии. Многие исследователи считают, что установить последовательность химических превращений в данном случае затруднительно, поскольку одновременно с гидролизом начинают протекать реакции поликонденсации, и эти процессы не удается разделить во времени и описать количественно.

Существенное преимущество метода ИК спектроскопии состоит в том, что, в отличие от традиционных разновидностей рентгеноструктурного анализа, он дает возможность получить важную информацию о структуре силикатов и подобных им материалов не только в кристаллическом, но и в аморфном, и расплавленном состояниях [10].

На рисунке показаны инфракрасные спектры золь-геля после различных режимов термообработки. Для исходного геля характерна широкая площадка в области частоты излучения волны  $\nu=3200\text{--}3400\text{ см}^{-1}$ , что обусловлено антисимметричными и симметричными валентными колебаниями группы OH. На деформационные колебания молекулы воды указывает хорошо выраженный пик в области  $\nu=1680\text{ см}^{-1}$ . Присутствие нитратных и этокси-групп подтверждается наличием полос поглощения в области  $870$  и  $1420\text{ см}^{-1}$  соответственно, причем для этокси-группы характерна очень интенсивная полоса поглощения. Полоса поглощения при  $\nu=1120\text{ см}^{-1}$  относится к валентным колеба-

ниям связи  $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ , а пик при  $\nu=620\text{ см}^{-1}$  указывает на колебания группы  $\text{OH}$  (вращательные движения молекул воды в кристаллической решетке).



Инфракрасные спектры золь-геля до (1) и после сушки (2), а также после кальцинации при  $700^\circ\text{C}$  (3) и термообработки при  $1350^\circ\text{C}$  (4)

начают протекать реакции поликонденсации с образованием связи  $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ , в этом случае на ИК спектре наблюдается совмещение полос поглощения, соответствующих колебаниям связей групп  $\equiv\text{Si}-\text{OH}$  и  $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ .

Кальцинация существенно изменяет вид спектра – в нем всего две полосы поглощения: при  $\nu=980\text{ см}^{-1}$ , характерной для валентных колебаний связи  $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Sr}$ , и  $\nu=700\text{ см}^{-1}$  – колебания группы  $[\text{AlO}_4]^-$ .

После термообработки наблюдается суперпозиция большого количества полос поглощения с хорошим разрешением, относящихся к моноклинной форме стронциевого анортита.

Результаты исследований позволили установить эволюционный характер изменения структуры в процессе переходов «раствор→гель→кристаллическая фаза». Методом ИК спектроскопии показано, что химические связи, характерные для керамических и стеклокерамических материалов, в значительной мере сформированы уже в исходных гелях. Образование связей  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ ,  $\text{Si}-\text{O}-\text{Me}$  и  $\text{Al}-\text{O}-\text{Al}$  в гелях подтверждается снижением температуры образования кристаллических фаз по сравнению с традиционным синтезом стеклокристаллических материалов в процессе термической обработки. Установлено, что основной кристаллической фазой в структуре является стронциевый анортит с температурой плавления  $1760^\circ\text{C}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Саркисов П.Д., Орлова Л.А., Уварова Н.Е., Гращенков Д.В., Исаева Н.В. Высокотемпературные радиопрозрачные материалы: сегодня и завтра //Авиационные материалы и технологии. 2010. № 1. С. 16–21.
2. Саркисов П.Д., Гращенков Д.В., Орлова Л.А., Уварова Н.Е., Попович Н.В. Современные достижения в области создания высокотемпературных радиопрозрачных материалов //Техника и технология силикатов. 2009. Т. 16. № 1. С. 2–10.
3. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Журнал РХО им. Д.И. Менделеева. 2010. Т. LIV. № 1. С. 20–24.
4. Христов Ц.И. Золь-гель технология силикатных материалов. М.: РХТУ. 1995. 232 с.

После сушки при температуре  $70^\circ\text{C}$  инфракрасный спектр практически не меняется, в нем присутствуют те же полосы поглощения, которые несколько смещены в сторону меньших частот. Так, полоса, характеризующая деформационные колебания молекулы воды, сдвинулась в область  $\nu=1620\text{ см}^{-1}$ ; оксигруппам соответствует пик при  $\nu=1350\text{ см}^{-1}$  – интенсивность его заметно снизилась.

Нитро-группам соответствует пик при  $\nu=820\text{ см}^{-1}$ . Полоса поглощения при  $\nu=1080\text{ см}^{-1}$  характерна для валентных колебаний связи  $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ . Однако уже на стадии сушки в геле начинают

5. Frety N., Taylor A., Lewis M.H. Microstructure and Crystallization Behavior of Sol-Gel Derived  $\text{SrO}_{0,5}\text{-BaO}_{0,5}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$  Glass-Ceramic //J. of non-crystalline solids. 1996. V. 195. №1–2. P. 28–37.
6. Schmidt H., Jonschker G., Goedicke S., Mennig M. The sol-gel process as a basic technology for nanoparticle-dispersed inorganic-organic composites. //J. of Sol-Gel Sci. and Techn. 2000. V. 19. P. 39–51.
7. Максимов А.И., Мошников В.А., Таиров Ю.М., Шилова О.А. Основы золь-гель технологии нанокompозитов. СПб.: ЛЭТИ. 2008. 254 с.
8. Turner C.W. Sol-gel process – principles and applications //Amer. Ceram. Soc. Bull. 1991. V. 70. №9. P. 1487–1490.
9. Haas P.A. Gel process for preparing ceramics and glasses //Chem. Eng. Progr. 1989. V. 25. №4. P. 44–52.
10. Павлушкин Н.М., Сентюрин Г.Г., Хадаковская Р.Я. Практикум по технологии стекла и ситаллов. М. 1970. 512 с.

УДК 669.245.018.44:629.7

*Б.С. Ломберг, М.М. Бакрадзе, Е.Б. Чабина, Е.В. Филонова*

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДИСКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Представлены основные направления развития жаропрочных сплавов для дисков газотурбинных двигателей, сформулированы требования к дисковым материалам, показаны тенденции развития жаропрочных сплавов для дисков современных и перспективных ГТД. Установлено влияние химической, фазовой и структурной неоднородности, а также технологических факторов на свойства сплавов. Обоснованы, разработаны и реализованы принципы получения регламентированной микроструктуры в штамповках сложнолегированных жаропрочных дисковых сплавов, обеспечивающей необходимый комплекс эксплуатационных свойств.*

**Ключевые слова:** *диски турбин, состав, структура, ликвация, фаза, свойства.*

### **Требования к дисковым материалам**

В большинстве современных ГТД диски турбины и последних ступеней компрессора подвергаются неравномерному, часто нестационарному нагреву (ободная часть: 550–800°C, ступичная: 300–550°C).

Пределы прочности, текучести, ползучести и малоцикловая усталость являются основными контролируемыми свойствами дисков; подчеркнем, что сопротивление малоциклового усталости особенно лимитирует долговечность диска. Таким образом, создание дисков, способных работать в условиях резкого возрастания значений параметров для двигателей V и VI поколений, является сложной и ответственной задачей. Механизмы упрочнения, ответственные за предел прочности и длительную прочность, имеют разную природу. Поэтому одновременное достижение их высоких значений представляет самостоятельную, весьма сложную проблему.

Для обеспечения работоспособности дисков из никелевых сплавов к материалу предъявляются следующие основные требования:

– высокий уровень длительной и кратковременной прочности во всем диапазоне рабочих температур;