

*Алисин Валерий Васильевич*

## НОВЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

**Ключевые слова:** наноструктура, кристаллы, диоксид циркония, трение, износ, ресурс, надежность.

*Работа посвящена обобщению экспериментальных данных прочностных и трибологических свойств наноструктурированных частично стабилизированных кристаллов диоксида циркония, в том числе легированными редкоземельными элементами. Приведены примеры практического применения этих материалов в узлах трения машин и приборов.*

**Keywords:** nanostructure, crystals, zirconium dioxide, friction, wear, resource, reliability.

*The work is devoted to generalization of experimental data of strength and tribological properties of nanostructured partially stabilized zirconium dioxide crystals, including doped rare-earth elements. Examples of practical application of these materials in friction units of machines and devices are given.*

Ресурс и надежность машин и приборов практически во всех отраслях промышленности в основном ограничен долговечностью узлов трения. Основной путь решения проблемы повышения ресурса и надежности узлов трения состоит в применении в парах трения новых материалов с качественно более высоким уровнем триботехнических и прочностных свойств. Перспективность применения в узлах трения приборов и машин технических керамик и кристаллов на основе диоксида циркония в сравнении с другими композиционными керамическими материалами основывается на лучших антифрикционных свойствах и самой высокой трещиностойкости. Особое место принадлежит наноструктурированным кристаллам частично стабилизированного диоксида циркония (кристаллам ЧСЦ), получаемым направленной кристаллизацией расплава в холодном

контейнере при использовании прямого высокочастотного нагрева [1, с. 215]. Кристаллы ЧСЦ имеют сложную упорядоченную нанодоменную кристаллическую структуру с характерными размерами доменов 5 – 100 нм, что обеспечивает существенно лучшие трибологические свойства и трещиностойкость в сравнении с мелкозернистой керамикой одинакового химического состава. Отсутствие границ зерен в кристаллах ЧСЦ приводит к более высоким механическим характеристикам по сравнению с керамикой [2, с. 5547]. Наноструктурированные кристаллы диоксида циркония перспективны для использования в узлах трения приборов и машин, работающих в условиях высоких температур и агрессивных средах. Эти материалы превосходят все известные керамические материалы по антифрикционности, трещиностойкости и перспективны для применения в промышленности. Метод синтеза из расплава практически безотходен (возможность повторного переплава кристаллических отходов) и не предъявляет требований к гранулометрическому составу исходных материалов, что снижает себестоимость материала по сравнению с аналогичной керамикой. Кристаллы ЧСЦ сохраняют свою работоспособность до температуры +1400°C (температура плавления ~ 2800°C), обладают наиболее высокой вязкостью разрушения в сравнении с другими керамиками, а значит и более высокой износостойкостью. Эти свойства обуславливают конкурентные преимущества ЧСЦ кристаллам перед лучшими в мире образцами технических керамик и кристаллов [3, с. 120]. Уникальное сочетание физико-механических свойств кристаллов ЧСЦ открывает перед этим материалом большие перспективы при создании объектов новой техники, предназначенных для эксплуатации в экстремальных по температурам, давлениям и внешним средам условиях. ЧСЦ кристаллы значительно превосходят по критерию износостойкости все кристаллы, применяемые в опорах часовых и аналогичных механизмов приборов. Разработана опытно-промышленная технология синтеза кристаллов ЧСЦ и создан производственный участок производительностью 500 кг/мес. Производство аналогичной продукции в России и за рубежом отсутствует. Были синтезированы (фирма «Ceres», США) только единичные образцы кристаллов ЧСЦ для научных исследований.

Наноструктура кристаллов состава  $ZrO_2$ -3мол% $Y_2O_3$  была изучена методом ПЭМ [4, с. 122] высокого разрешения, а также методом рентгеноструктурного анализа (РСА), которым оценивались размеры областей когерентного рассеяния по уширению дифракционных рефлексов. Исследования методом ПЭМ кристалла  $ZrO_2$ -3мол.%  $Y_2O_3$  показали наличие колоний размерами шириной от 30 до 100 нм и длиной от ~400нм до ~800нм, имеющих «паркетную» структуру (рис. 1).

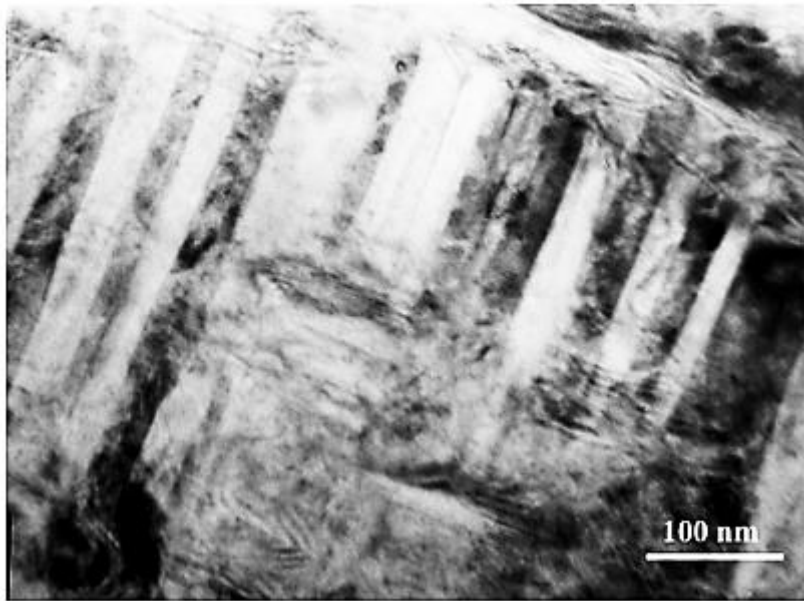


Рис. 1. Структура образца  $ZrO_2$ - 2,5мол% $Y_2O_3$  (скорость роста 10мм/ч)

В колониях в свою очередь наблюдается полосчатый контраст с периодом около 10 нм, что свидетельствует о наличии тонкой доменной структуры в каждой колонии. Оценка размеров их составляет (0,1–0,5) x (10–20) нм. По оценке методом РСА для кристалла  $ZrO_2$ -3мол% $Y_2O_3$  размеры областей когерентного рассеяния  $D$ , нм составляли от 87–310 нм, что соответствует оценке размеров колоний. Исследование микроструктуры ростовой поверхности кристалла с помощью растровой электронной микроскопии при увеличении  $25000^x$  позволило оценить размеры самых мелких структурных элементов: ширина 70–300 нм, длина 300–900 нм, что близко по оценке к размерам колоний, наблюдаемых с помощью ПЭМ. Таким образом, микроструктура ростовой поверхности кристаллов отражает характер внутренней структуры кристаллов (структуры колоний) и

представляет собой результат укрупненных элементов этой наноструктуры. Исследование наноструктуры кристаллов состава  $ZrO_2$ -2,5 мол%  $Y_2O_3$  показало, что при этих концентрациях оксида иттрия только начинается процесс формирования доменной (образуется система параллельных доменов с отдельными элементами твидовой. В кристаллах  $ZrO_2$ -4 мол%  $Y_2O_3$ , остаются только отдельные участки со слабо выраженной доменной структурой. Это соответствует результатам исследования микроструктуры ростовой поверхности кристаллов ЧСЦ в зависимости от их состава [5, с. 1890].

Для улучшения механических характеристик материала эффективна термообработка кристаллов. Термообработку кристаллов на основе диоксида циркония можно разделить на два типа:

- (1) отжиг кристаллов при температурах выше температур фазового перехода кубическая (с) ↔ тетрагональная фаза;
- (2) отжиг кристаллов ЧСЦ при температурах, соответствующих двухфазной области на диаграмме состояния ( $t+t'$ ).

В первом случае это температуры в области  $2000^\circ\text{C}$  и выше, при которых кристаллы ЧСЦ должны иметь кубическую структуру. В зависимости от величины скорости охлаждения от этих температур формируется фазовый состав и микроструктура. Можно предположить, что при достаточно длительном времени выдержки и высокой скорости охлаждения в зависимости от состава кристаллов ЧСЦ, в них будет преобладать полидоменная фаза  $t'$ . Кроме того, высокие температуры способствуют снятию остаточных термических напряжений в монокристаллах, возникающих при быстром охлаждении. Проведение высокотемпературных ( $> 2000^\circ\text{C}$ ) отжигов для этих кристаллов по аппаратурным причинам возможно только в инертной среде или вакууме.

Во втором случае, термообработку проводят в области температур  $1400$ – $1600^\circ\text{C}$  для исследования фазовой устойчивости твердых растворов, которая зависит от природы и концентрации стабилизирующего оксида, способа получения материала. Результат будет зависеть от температуры и продолжительности дестабилизирующего отжига. Высокие механические свойства кристаллов ЧСЦ

сохраняются вплоть до температуры 1400<sup>0</sup>С. Поэтому исследования влияния термического отжига на фазовую устойчивость твердых растворов при этих температурах чрезвычайно важны для практических применений материала.

Влияние отжига проявляется также в улучшении трибологических характеристик в части стабильности сил трения, которые характеризуется уменьшением разброса величин коэффициента трения, т.е. величина стандартного отклонения уменьшается от 0,041 до 0,030. В большей степени улучшение стабильности коэффициента трения наблюдается после отжига в вакууме, что объясняется более равномерным распределением твердости поверхности. Полученное экспериментально значение коэффициента вариации микротвердости после отжига в вакууме в 1,5 раза меньше, чем после отжига на воздухе. Это свидетельствуют о том, что отжиг ЧСЦ кристаллов в вакууме значительно снижает неравномерности величин микротвердости поверхности. В таблице 1 приведены результаты испытаний кристаллов  $ZrO_2 + 2,8\text{ мол.}\% Y_2O_3$  после отжига в вакууме.

Таблица 1

Трибологические характеристики кристаллов  $ZrO_2 + 2,8 \text{ мол.}\% Y_2O_3$   
после отжига в вакууме

№ образца	Коэф. трения F	Стандартное отклонение $\sigma$	Путь трения L (м)	Линейный износ h (мкм)	Интенсивность изнашивания $I_{\text{ЧСЦ}}$
3-1	0,246	0,019	7425	14	$1,88 * 10^{-9}$
3-2	0,320	0,036	5557	7	$1,26 * 10^{-9}$
3-3	0,212	0,025	10171	42	$4,13 * 10^{-9}$
3-4	0,233	0,017	7915	10	$1,26 * 10^{-9}$

Для практического использования кристаллов ЧСЦ чрезвычайно актуальной является разработка технологии обработки для массового изготовления изделий. Поскольку кристаллы ЧСЦ обладают высокими значениями прочности, твердости, вязкости разрушения, износостойкостью этот материал относится к трудно обрабатываемым материалам наряду с алмазом и сапфиром. Трудоемкость процесса обработки кристаллов, трудности при изготовлении изделий сложной формы вызвали необходимость разработки специальной технологии,

включающую разработку альтернативных методов обработки материала – лазерной, ультразвуковой и т. д. Для внедрения в практику перспективного конструкционного материала – кристаллов ЧСЦ в работе были частично решены проблемы подбора материалов по свойствам, отвечающих конкретному применению; оптимизации технологии синтеза кристаллов ЧСЦ и технологии обработки кристаллов. Изготовлена опытная партия кристаллов ЧСЦ и разработана опытно-промышленная технология механической обработки наноструктурированных кристаллов ЧСЦ для изготовления деталей – тел вращения типа колец, дисков, втулок и др. по классификатору ЕСКД класс 71.

Показателями качества механизмов приборов и машин являются: ресурс работы, К.П.Д. и надёжность, которые в основном определяются основными трибологическими характеристиками:  $f$  – коэффициент трения,  $J$  – интенсивность изнашивания испытываемых материалов:

$$f = F / P; J = \Delta h / L$$

где:  $F$  – сила трения,  $P$  – нагрузка;  $\Delta h$  – величина изношенного материала на пути трения  $L$ .

Методика исследования трибологических свойств кристаллов ЧСЦ базируется на современных представлениях о взаимодействии поверхностей при трении, в основе которых положены модель дискретного контакта твердых тел и гипотеза о двойственной адгезионно – деформационной природе внешнего трения. В качестве модельного узла трения принимается сопряжение плоскость-палец [6, с. 286]. Указанная схема трения упрощает изготовление образцов для испытаний, что особенно важно для трудно обрабатываемых кристаллических материалов на основе диоксида циркония; обеспечивает постоянство средних контактных давлений в процессе испытаний

Проведено ранжирование материалов по характеристикам трибологических и прочностных свойств, полученным в одинаковых условиях и по одинаковым методикам [7, с. 23]. В таблице 1 приведены результаты сравнительных испытаний перспективных керамических материалов и кристаллов триботехнического

назначения, которые получены в одинаковых условиях трения и позволяют только качественно ранжировать материалы.

Таблица 1

### Результаты сравнительных триботехнических испытаний

технических кристаллов и керамик при трении без смазки по закаленной стали

У10А ( $p=10$  МПа,  $v=2$  м/с)

Материал основы	Модуль упругости E, ГПа	Коэф. Пуассона	H, ГПа	K1с, МПа*м <sup>0,5</sup>	Прочность на изгиб $\sigma_{из}$ , МПа	Коэфф трения f	Коэфф. износа I/p (МПа) <sup>-1</sup>
<sup>1</sup> ZrO <sub>2</sub> +2,5 мол% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	372	0,25	14,9	11/11,4	1071	0,32	8,6*10 <sup>-10</sup>
ZrO <sub>2</sub> +3 мол% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	284	0,28	12,3	10,11,1	880	0,32	8,6*10 <sup>-10</sup>
ZrO <sub>2</sub> +3,5 мол% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	345	0,28	15,1	9/8,2	630	0,34	5,0*10 <sup>-10</sup>
ZrO <sub>2</sub> +4 мол% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	277	0,31	11,8	7,2/7,9	561	0,27	5,0*10 <sup>-10</sup>
(ZrO <sub>2</sub> +3мол.% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
исходные	398	0,19	12	–	740	0,30	4,5*10 <sup>-10</sup>
отожженные	406	0,21	11,8	–	700	0,27	4,5*10 <sup>-10</sup>
CeO <sub>2</sub> +Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	356	0,29	12,5	9	679	0,0,69	4,5*10 <sup>-9</sup>
CeO <sub>2</sub> +Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	300	0,36	12,8	15	697	0,12	2,4*10 <sup>-10</sup>
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	288	0,37	13,1	11,1	762	0,25	3,8*10 <sup>-10</sup>
CeO <sub>2</sub>	358	0,23	12,7	9,6		0,21	2,8*10 <sup>-10</sup>
Pr	364	0,27	15,9	10,6		0,20	2,6*10 <sup>-10</sup>

На износостойкость материалов влияют следующие основные факторы.

1. Величины, определяющие уровень внешнего воздействия на трибосистему:  $p$  – контактное давление, МПа;  $v$  – скорость скольжения, м/с;  $\theta$  – температура, °С и др.

2. Физико-механические свойства материалов, из числа которых наибольшее значение имеют те величины, которые определяют свойства поверхностных

слоев контактирующих материалов: модуль упругости  $E$ , твердость  $H$ , относительная деформация образцов при разрыве  $\delta$ , а для хрупких материалов типа керамик – коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ ;

### 3. Микрогеометрия поверхностей трения.

Анализ экспериментальных данных показал, что элементный закон изнашивания можно представить в виде  $J = C \frac{fP_a}{H}$ . Применяя разработанную ранее [8, с. 225] методику построения элементного закона изнашивания получим значения константы  $C$  для различных легирующих элементов (таблица 2)

Таблица 2

Значение констант  $C$  в элементных законах изнашивания  
легированных кристаллов

Легирующие элементы	$Er_2O_3$	$CeO_2+Er_2O_3$	$CeO_2$	Pr
Константа $C \cdot 10^7$	51,2	39,8	33,9	12,2

Методика расчета подшипников скольжения на ресурс. При наложении одной детали на другую и прижатии их силой  $P$  формируется площадь контакта  $S$ , на которой в результате действия контактного давления  $p = P/S$  и относительного смещения сопряженных тел со скоростью  $v$  происходит разрушение поверхностных слоев контактирующих материалов и отделение частиц износа. Размеры площади контакта, форма эпюры и величины контактных давлений зависят от геометрии сопряженных тел, механических свойств материалов, режимов нагружения трибосопряжения (нагрузка, скорость скольжения, температура) и величины износа деталей в процессе ее работы. Для описания этих взаимосвязанных процессов применяется математический аппарат одного из разделов теории упругости, описывающего механику контактного деформирования упругих тел с учетом изменения геометрии сопрягаемых поверхностей (контактные задачи с износом).

Понимая под величиной  $J$  элементный закон изнашивания материалов в трибосопряжении  $J(p)$ , а также учитывая, что при достижении суммарного износа



сопряженных тел  $h$  предельно допустимой величины  $[h]$  время  $t$  принимает смысл ресурса работы  $T$ :

$$T = \frac{1}{v} \cdot \int_0^{[h]} \frac{dh}{J(p, H, \varepsilon \dots)},$$

где  $h$  – величина изношенного слоя материала на пути трения  $p$  – контактное давление;  $H$  и  $\varepsilon$ , – микротвердость и предельная деформация разрушения кристалла ЧСЦ.

Точность расчетов определяется, прежде всего, достоверностью установления элементного закона изнашивания  $J(p, H, \varepsilon)$ . Для керамических материалов типа модифицированных кристаллов ЧСЦ, характеризующихся хрупким разрушением при трении, такие закономерности установлены впервые. Метод универсален, может быть применен к различным типовым узлам трения. В данной работе он используется для оценки ресурса работы подшипников скольжения, втулки которого изготовлены из кристаллов ЧСЦ. Нагрузочные характеристики определялись в соответствии с общепринятыми методами расчета деталей машин.

Ресурс работы подшипника скольжения  $T$  определяется соотношением

$$T = \frac{[h] - \varepsilon_0}{2\pi r_1 n_1 [J_2 + (\varphi_0 / \pi) J_1]},$$

где  $[h]$  – суммарный предельно допустимый износ вала и втулки подшипника;  $\varepsilon_0$  – радиальный зазор в подшипнике с учетом температуры окружающей среды;  $\varepsilon_0 = r_2 - r_1$  ( $r_2$  – радиус втулки,  $r_1$  – радиус вала);  $n_1$  – частота вращения вала;  $J_1$  и  $J_2$  – интенсивности изнашивания материалов вала и втулки подшипника;  $\varphi_0$  – половина угла зоны контакта вала и втулки под нагрузкой  $P$ .

Для определения ресурса работы подшипника скольжения необходимо знать геометрические размеры подшипника, режим его работы, триботехнические характеристики материалов подшипника, размер контактной зоны  $2\varphi_0$  и величину контактного давления  $p$  вдоль нее, а также задаться предельно допустимым износом  $[h]$ .

Контактные параметры сопряжения вал-втулка (подшипника скольжения) определяли из решения контактной задачи теории упругости при внутреннем сжатии двух цилиндрических тел, радиусы которых почти равны между собой.

Ресурс работы подшипника скольжения  $T$  рассчитывается в следующей последовательности. Исходя из геометрических размеров подшипника, его теплофизических свойств и заданной температуры окружающей среды, определяется радиальный зазор в подшипнике  $\varepsilon_\theta$  при температуре  $\theta$ . Затем вычисляются угол контакта  $2\varphi_0$  и максимальное контактное давление  $p_{\max}$ ; находятся интенсивности изнашивания для материалов вала и втулки  $J_1$  и  $J_2$ , и, далее устанавливается ресурс работы подшипника скольжения  $T$ .

Для выполнения работ по проектированию узлов трения необходимо получение триботехнических параметров в условиях приближенных к эксплуатационным. Для примера рассмотрим одно из перспективных направлений применения новых материалов на основе кристаллов ЧСЦ – втулки опорных и упорных подшипников скольжения.

На характер протекания трибологических процессов в зоне контакта влияют радиальный зазор в подшипнике скольжения, его макрогеометрии материал контртела. Наиболее существенным недостатком керамических материалов в сравнении с металлами является их низкая трещиностойкость, который особенно проявляется на кромках втулок, где как правило имеют место повышенные контактные давления, обусловленные как механикой контактного взаимодействия цилиндрических твердых деформируемых тел с близкими радиусами кривизны, так и перекосами втулок вследствие не симметричного приложения нагрузки на подшипник скольжения при наличии радиального зазора, что приводит к разрушению втулок особенно сколам на торцевых поверхностях. Поэтому простая замена металлической втулки на керамическую не всегда даёт положительный эффект и необходимы специальные приемы конструирования втулок подшипников скольжения из технических керамик и кристаллов.

Рассмотрим перспективные области применения кристаллов ЧСЦ в промышленности. Втулки подшипников, работающих в условиях повышенных

температур, например узлы поворота лопаток направляющего аппарата компрессоров высокого давления (авиадвигатели). По законам аэромеханики, чтобы К.П. Д. компрессора был оптимальным, воздушный поток должен падать на лопатку строго под определенным углом, который зависит от скорости потока. Для этого служат направляющие лопатки, которые нужно вращать в зависимости от скорости потока. Аналогичная проблема стоит в газовых турбинах двигателей для перспективных транспортных машин специального назначения. В частности для типового узла поворота лопаток направляющего аппарата осевых компрессоров высокого давления (авиадвигатели) проведены стендовые испытания, моделирующие осредненные нагрузочно-скоростные характеристики шарнира узла поворота лопаток. На первом этапе проведены сравнительные испытания ряда перспективных материалов при трении без смазки по титановому сплаву ВТ 9. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты сравнительных испытаний жаропрочного сплава ВЖЛ-1 и наноструктурированных кристаллов ЧСЦ. ( $p=3,3\text{МПа}$ ,  $V=4\text{мм/с}$ )

№	Пара трения	T, (час)	Плотн. (г/см <sup>3</sup> )	f <sub>0</sub>	f <sub>k</sub>	Интенсивн. износа (I)
1	1. ВТ9(альфир.) 2. Кристалл ЧСЦ	19,5	4,5 5,9	0,045	0,064	$1,4 \times 10^{-10}$ $6,0 \times 10^{-9}$
2	1. ВТ9(альфир.) 2. Керамика ЧСЦ	6	4,5 5,9	0,045	0,119	$4,0 \times 10^{-9}$ $2,0 \times 10^{-9}$
3	1. ВТ9 (альфированный) 2. Карбонитрит	1	4,5 6,5	0,069	0,2	$4,0 \times 10^{-9}$ $2,8 \times 10^{-8}$
4	1. ВТ9 (альфированный) 2. ВЖЛ	1	4,5 8,4	0,064	0,190	$4,0 \times 10^{-8}$ $6,7 \times 10^{-7}$
5	1. ВТ9 (альфированный) 2. Карбонитрит	1	4,5 6,5	0,075	0,190	$4,0 \times 10^{-8}$ $1,1 \times 10^{-8}$
Примечание: 1) – неподвижная втулка; 2) подвижная втулка; T – длительность испытаний; f <sub>0</sub> – коэффициент трения в начале испытания; f <sub>k</sub> – коэффициент трения в конце испытания						

Эксперименты показали, что из испытанных материалов при трении без смазки по альфированному сплаву ВТ-9 лучшими трибологическими свойствами обладают наноструктурированные кристаллы ЧСЦ.

На втором этапе исследовано влияние контртела на трибологические свойства кристаллов ЧСЦ (таблица 4). Эксперименты показали, что из испытанных материалов при трении без смазки наноструктурированных кристаллов ЧСЦ лучшими трибологическими свойствами обладают пары трения с покрытием  $\text{MoSe}_2$ . Однако износостойкость штатных втулок из альфированного титана вполне удовлетворяет требованиям технического задания. Следовательно, применение втулок подшипника скольжения из наноструктурированного кристалла ЧСЦ позволит увеличить ресурс работы узла поворота лопаток более, чем в 2–3 раза.

Перспективно применение наноструктурированных кристаллов ЧСЦ в опорах установки синтеза кристаллов (например теллурида висмута). Качество высокоэффективных термоэлектрических модулей на базе наноструктурных высокостабильных кристаллов теллурида висмута в значительной мере определяется надежностью работы установок синтеза. Наименее надёжным и долговечным узлом установок синтеза является устройство перемешивания является оригинальным узлом, ресурс работы которого лимитируется износом опорных элементов, выполненных из графита и работающих в условиях трения без смазки, высоких температур ( $500\text{ C}^0$ ) и в среде гелия. Корпус, а также вал с рабочими лопатками, выполнены из графита и конструктивно образуют две опоры скольжения.

Таблица 4

Результаты сравнительных испытаний наноструктурированных кристаллов ЧСЦ при трении по различным контртелам ( $p=3,3\text{МПа}$ ,  $V=4\text{мм/с}$ )

№	Пара трения	T (час)	Плотн. (г/см <sup>3</sup> )	f <sub>0</sub>	f <sub>k</sub>	Интенсивность износа
1	1. ВТ9 2. Кристалл ЧСЦ	3	4,5 5,9	0,207	0,228	$7,9 \times 10^{-6}$ $6,7 \times 10^{-8}$
2	1. ВТ9(альфир.) 2. Кристалл ЧСЦ	19	4,5 5,9	0,045	0,064	$1,4 \times 10^{-10}$ $6,0 \times 10^{-9}$
3	1. Покрытие MoSe <sub>2</sub> 2. Кристалл ЧСЦ	1	10,0 5,9	0,05	0,181	$7,9 \times 10^{-7}$ $6,0 \times 10^{-9}$
4	1. Покрытие MoSe <sub>2</sub> 2. Кристалл ЧСЦ	21	10,0 5,9	0,063	0,05	$9,0 \times 10^{-9}$ $2,6 \times 10^{-10}$
5	1. Покрытие TiN 2. Кристалл ЧСЦ	1	4,5 5,9	0,05	0,191	$5,1 \times 10^{-8}$ $6,0 \times 10^{-9}$
6	1. Хромиров. сталь 2. Кристалл ЧСЦ	0,5	7,2 5,9	0,165	0,218	$2,3 \times 10^{-6}$ $2,4 \times 10^{-8}$
7	1. Керамика ЧСЦ 2. Кристалл ЧСЦ	2	5,9 5,9	0,043	0,119	$1,3 \times 10^{-7}$ $1,2 \times 10^{-7}$
8	1. Сталь 30ХАГСН2А 2. Кристалл ЧСЦ	0,5	7,87 5,9	0,095	0,113	$8,9 \times 10^{-7}$ $2,4 \times 10^{-8}$

На основе полученных данных по износостойкости образцов выполнен расчет ожидаемого ресурса работы опор скольжения устройства перемешивания при вероятности безотказной работы (функции надежности) равной  $P(t)=0,95$ . Данные расчета (таблица 6.1) показывают, что единственная возможность обеспечить заданный уровень надежности – установка в опорах скольжения втулок из кристаллов ЧСЦ. Изготовление втулок из любого другого материала из числа испытанных приведет к снижению уровня надежности.

Таблица 5

Трибологические свойства перспективных конструкционных керамик и кристаллов

№ п/п	Материал основы	Примеси %	Коэфф. трения f	Коэфф. износа $I/p$ (МПа) <sup>-1</sup>	Расчетный ресурс работы опоры (час.) при $P(t)=0,95$
1	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (NC-132)	–	0,48	$1,0 \times 10^{-9}$	86
2	Нанокompоз. (на основе Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	–	0,56	$6,4 \times 10^{-10}$	50

3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub> + (керам.)	–	0,52	5,8*10 <sup>-10</sup>	92
4	ZrO <sub>2</sub> ++3% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (кристалл ЧСЦ)	+ La, + Y 17% CeO <sub>2</sub>	0,27	2,6*10 <sup>-10</sup>	190

Другим перспективным применением наноструктурированных кристаллов ЧСЦ являются

узлы трения точных механизмов приборов вместо применяемых прозрачных корундов (сапфиры, рубины), которые уступают кристаллам ЧСЦ по антифрикционным свойствам, трещиностойкости и много дешевле.

Наиболее интересны области массового применения:

- часовая промышленность (так называемые «опоры на камнях»);
- подпятники в игольчатых опорах газовых центрифуг для обогащения урана, опоры роторов гироскопов навигационных приборов, приборов контроля и регулирования, счетчиков, микроэлектромашин и др. прецизионных миниатюрных узлов трения (опор скольжения), работающих как в режиме трогания так и при поступательном и вращательном движении в диапазоне угловых скоростей до 100 тыс. об/мин.;

- керамические энергосберегающие подшипники качения для всех массовых отраслей промышленности и специальных предназначенных для работы в условиях высоких температурах (например авиадвигатели). Цель – снижение энергопотребления подшипниками качения, достигаемое, путем применения кристаллов ЧСЦ и создание нового поколения подшипников, работоспособных в широком диапазоне температур (–50...+1000°С), вакууме, различных газовых инертных и агрессивных средах, применительно к объектам общего машиностроения, авиационно-космической, атомной техники. Энергия тратится на преодоления трения в подшипниках. Наиболее массовым типом подшипников являются подшипники качения, объем производства которых исчисляется миллионами штук. В настоящее время можно отметить падение спроса на подшипники качения российского производства, в связи с отставанием от ведущих зарубежных фирм в области качества подшипников и ценообразования.

Накоплен положительный опыт применения кристаллов ЧСЦ в кабельной промышленности. Изготовлена опытная партия волокон-заготовок из кристаллов ЧСЦ (для производящих проволоку волочильных станов). Проведены квалификационные испытания опытных образцов волокон-заготовок из кристаллов ЧСЦ, которые показали высокие эксплуатационные характеристики разработанных изделий в условиях реального производства.

Перспективно применение наноструктурированных кристаллов ЧСЦ для изготовления лезвий режущих инструментов, в частности медицинских скальпелей. Разработана технология механической обработки (заточки) остроконечных лезвий трёх типоразмеров, с учётом специфических свойств обрабатываемого материала ЧСЦ. Данная технология обеспечивает шероховатость режущей кромки лезвий скальпелей  $Ra \sim 0.1$  мкм, с радиусом закругления, составляющим 0,5 микрон. Изготовлена опытная партия скальпелей разных типоразмеров из кристаллов ЧСЦ. Изготовленная установочная партия скальпелей с лезвием из ЧСЦ передана для испытаний в ведущие клиники РФ и Республики Беларусь.

### *Выводы*

Кристаллы ЧСЦ могут широко и успешно использоваться в приборостроении и в машиностроении для практически всех отраслей промышленности. Необходимость в таких изделиях для многих отраслей науки и техники связана с требованиями повышения надежности и увеличения срока службы при работе в широком диапазоне температур, вакууме, радиации, химически агрессивных средах в присутствии жидких, твердых, газообразных смазочных материалов или при их отсутствии; в медицине, в частности как качественно новое поколение режущего инструмента и имплантаты широкого назначения.

### *Список литературы*

1. Кузьминов Ю.С. Тугоплавкие материалы из холодного тигля / Ю.С. Кузьминов, Е.Е. Ломонова, В.В. Осико. – М.: Наука, 2004. – 369 с.
2. Borik M.A. Structure and conductivity of yttria and scandia-doped zirconia crystals grown by skull melting / M.A. Borik, A.V. Kulebyakin, E.E. Lomonova

---

[etc] // Journal of the American Ceramic Society. – 2017. – Т. 100. – №12. – С. 5536–5547.

3. Osiko V.V. Extra-strong wear-resistant materials based on nanostructured crystals of partially stabilized zirconium dioxide // Mendeleev Commun., 2009. – №19. – С. 117–122.

4. Borik M.A. Phase composition, structure and properties of  $(\text{ZrO}_2)_{1-x} - \text{Y}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_x(\text{Y}_2\text{O}_3)_y$  solid solution crystals ( $x=0.08-0.11$ ;  $y=0.01-0.02$ ) grown by directional crystallization of the melt / M.A. Borik, A.V. Kulebyakin, E.E. Lomonova [etc] // Journal of Crystal Growth. – 2017. – Т. 457. – P. 122–127.

5. Borik M.A. Change in the phase composition, structure and mechanical properties of directed melt crystallised partially stabilised zirconia crystals depending on the concentration of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  / M.A. Borik, A.V. Kulebyakin, E.E. Lomonova [etc] // Journal of the European Ceramic Society. – 2015. – Т. 35. – №6. – С. 1889–1894.

6. Осико В.В. Трибологические свойства нанокристаллического материала нового поколения на основе диоксида циркония / В.В. Осико, В.В. Алисин, М.А. Вишнякова [и др.] // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – №3. – С. 285–289.

7. Алисин В.В. Наноструктурные технические кристаллы и керамики для узлов трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – №9. – С. 21–27.

8. Осико В.В. Трибологические свойства нанокристаллического материала нового поколения на основе диоксида циркония / В.В. Осико, В.В. Алисин, М.А. Вишнякова [и др.] // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – №3. – С. 285–289.

---

*Алисин Валерий Васильевич* – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения им А.А. Благонравова РАН», Россия, Москва.

---