

Уманский А.П.,*
Довгаль А.Г.,**
Костенко А.Д.*

*Институт проблем материаловедения
НАНУ

**Национальный авиационный университет

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И МЕХАНИЗМЫ ИХ ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ ТРЕНИИ В ПАРЕ С КЕРАМИЧЕСКИМ КОНТРЕТОМ

Введение

В газовых и гидравлических машинах, насосах для химической, нефтехимической, топливной и

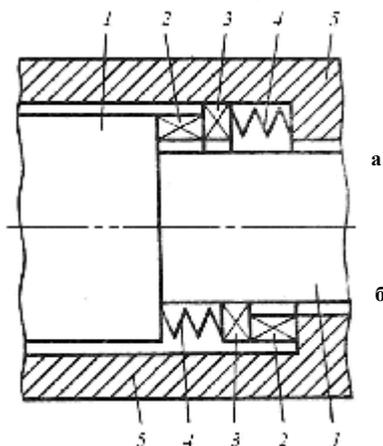


Рис. 1 – Принципиальная схема торцевого уплотнения:

- а – с неподвижным упругим элементом;
б – с вращающимся упругим элементом;
1 – вал; 2 – опорное уплотнительное кольцо;
3 – упорное уплотнительное кольцо;
4 – упругий элемент; 5 – корпус

других отраслей промышленности применяются торцевые уплотнения валов. Основная функция торцевых уплотнений заключается в обеспечении герметичности между рабочими полостями с разным давлением, средами и температурами (рис. 1.) Ресурс центробежных насосов ограничивается именно работоспособностью торцевых уплотнительных элементов. Поэтому рабочие элементы торцевых уплотнений должны обладать высокой износо- и коррозионной стойкостью.

Для производства уплотняющих колец 2, 3 (рис. 1) торцевых уплотнений применяются графиты, стали, твердые сплавы и керамика. Сравнительная характеристика свойств этих материалов для применения их в качестве торцевых уплотнений приведена в табл. 1.

Графиты – несмотря на эффект самосмазывания, высокую коррозионную стойкость и низкую стоимость, обладают низкой износостойкостью, особенно при высоких скоростях скольжения [1]. Стали и чугуны обладают такими преимуществами, как высокая технологичность, высокая жесткость и вязкость, низкая стоимость. Недостатками этого класса материалов являются низкий pV -критерий (9 - 35) (соотношение давления уплотняемой среды и скорости вращения [2]) торцевого уплот-

нения, а также низкая коррозионная стойкость.

Таблица 1

Классы материалов для торцевых уплотнений и их свойства

Материалы	Свойства			
	стоимость	износостойкость	коррозионная стойкость	pV -критерий
Графиты	низкая	низкая	высокая	9 - 18
Стали, чугуны	средняя	средняя	низкая	9 - 35
Сплавы ВК (WC-Co)	высокая	высокая	низкая	90
Керамические материалы	низкая	высокая	высокая	150

Твердые сплавы на основе карбида вольфрама (сплавы ВК) обладают высокими значениями износостойкости, вязкости и жесткости, а pV -критерий 90. Однако этот класс материалов имеет низкую коррозионную стойкость, высокую стоимость, а также большой удельный вес. Керамические конструкционные материалы обеспечивают pV -критерий 150, они обладают высокой износо- и коррозионной стойкостью а также имеют высокие триботехнические характеристики. уступают только стальным кольцам с покрытиями из керамических материалов (pV -критерий 200 Керамические материалы на основе карбида кремния обладают достаточно высокими износостойкостью, жесткостью, коррозионной стойкостью и относительно низкой стоимостью. Они являются перспективными для изготовления и использования в качестве торцевых уплотнений насосных агрегатов. Торцевые уплотнения из антифрикционных твердых керамических материалов обеспечивают минимально возможные утечки уплотняемой среды [3].

Сырьевая база Украины располагает большими запасами кремнезема и глинозема и поэтому целесообразно разрабатывать и внедрять керамику, основными ингредиентами которой являются карбид кремния и оксид алюминия. Выбор карбида кремния был обоснован тем, что он обладает высокими твердостью, прочностью, эрозивной и коррозионной стойкостью в газовых и жидких агрессивных средах, а также является недорогим и недефицитным материалом. В данной работе исследованы триботехнические характеристики карбидокремниевых композиционных материалов в условиях трения в паре с керамическим контртелом, изучено влияние добавок Al_2O_3 и ZrO_2 на износостойкость и механизмы изнашивания композиционных материалов.

Материалы и методика проведения исследования

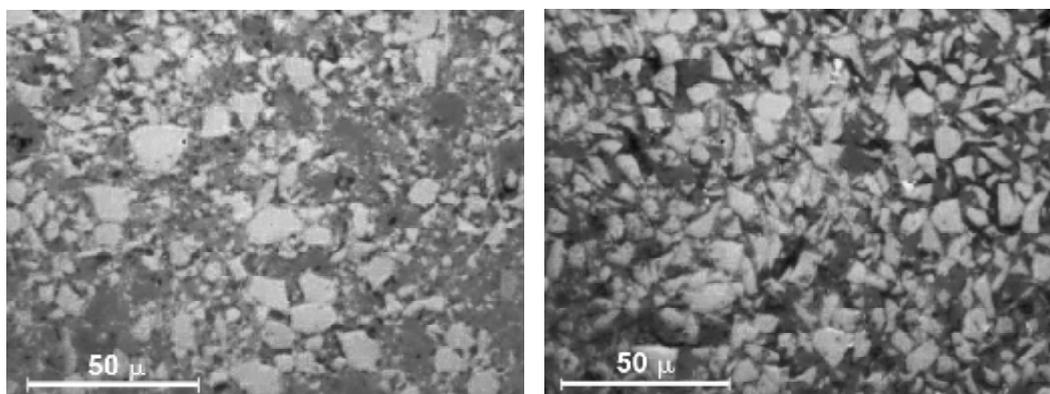
Для проведения исследований использовались композиты на основе карбида кремния, которые получались следующим образом. Порошки оксида алюминия (ТУ 6-09-2432-77) и карбида кремния (ТУ 6-09-03-350-73) в соответствующих соотношениях перемешивали в стальных барабанах со стальными размольными телами в планетарной мельнице «Санд-1» в среде ацетона в течение 4 - 6 часов. Средний размер зерен после размолла составлял 4 - 6 мкм. Полученную шихту сушили, просеивали и засыпали в графитовую прессформу. Горячее прессование производили на установке СПД-120 с индукционным нагревом без защитной атмосферы. Температуру контролировали с помощью пирометра «Промінь». Составы полученных керамических материалов СИАЛ-80, СИАЛ-50 и СИАЛ-20 приведены в табл. 2. Кроме приведенных композитов в работе использовалась карбидокремниевая керамика СИАЛ-Ц, в состав которой дополнительно вводили оксид циркония (ТУ 6-09-2486-77) в количестве 16 мас. % (табл. 2).

Таблица 2

Свойства керамических материалов на основе карбида кремния

Обозначение керамического материала	Состав керамики	Оптимальная температура прессования, °С	Остаточная пористость, %	Фазовый состав	Предел прочности на изгиб, МПа
СИАЛ-80	80 мас. % SiC - 20 мас. % Al ₂ O ₃	2250	5	Каркас SiC с участками Al ₂ O ₃ переходная зона SiO ₂	122
СИАЛ-50	50 мас. % SiC - 50 мас. % Al ₂ O ₃	1870	1 - 2	Равномерная матрица Al ₂ O ₃ с зернами SiC окруженными SiO ₂	550
СИАЛ-20	20 мас. % SiC- 80 мас. % Al ₂ O ₃	1600	< 1	Равномерная матрица Al ₂ O ₃ дисперсно-упрочненная зернами SiC окруженными SiO ₂	289
СИАЛ-Ц	50 мас. % SiC - 34 мас. % Al ₂ O ₃ - 16 мас. % ZrO ₂	1710	< 1	Равномерная матрица из эвтектики Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ с зернами SiC окруженными SiO ₂	1210

Соотношение оксидов алюминия и циркония в композите СИАЛ-Ц соответствует эвтектическому, что привело к существенному снижению температуры его горячего прессования на 160° (сравнение проводилось по отношению к материалу СИАЛ-50, т.к. оба композита содержат 50 мас. % карбидной фазы SiC). Это способствовало образованию мелкодисперсной структуры в материале SiC- Al₂O₃- ZrO₂. Размер зерен карбидной фазы в керамике СИАЛ-Ц не превышает 7 - 9 мкм, в то время как в материале СИАЛ-50 размер зерен карбидной фазы варьировался в пределах 12 - 17 мкм (рис. 2). Керамический материал на основе карбида кремния с добавками оксидов алюминия и циркония обладает более высокими, по сравнению с композитом СИАЛ-50, свойствами: пределом прочности на изгиб $\sigma_{изг} = 1210$ МПа и твердость 91 HRA [4].



а

б

Рис. 2 – Микроструктура материалов:
а – СИАЛ-50; б – СИАЛ-Ц

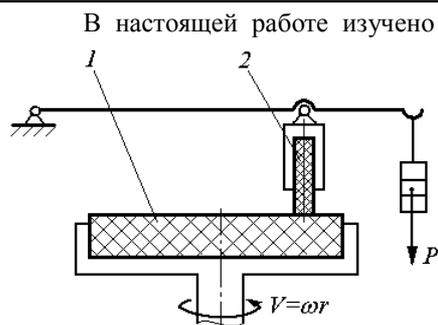


Рис. 3 – Схема испытания триботехнических характеристик керамических материалов:

1 – контртело из керамики СИАЛ-50;
2 – образец одного из составов

В настоящей работе изучено влияние добавок оксидов циркония и алюминия на триботехнические характеристики карбидокремниевой керамики. При проведении испытаний разработанных композиционных материалов выбраны диапазоны скоростей ($V = 3 - 7$ м/с) и нагрузок ($P = 3 - 7$ МПа), которые соответствуют моделированию реальных условий работы низко- и среднескоростных торцевых уплотнений центробежных насосов типа СВН и СЦЛ, широко применяющиеся для перекачки авиационного топлива в технологическом оборудовании аэропортов.

В качестве контртела использовался керамический материал СИАЛ-50. Оценка триботехнических характеристик проводилась по схеме «плоскость-плоскость» (рис. 3) [5] в воздушной среде без смазочных материалов.

Результаты исследования и их обсуждение

Влияние скорости на триботехнические характеристики полученных материалов определялось при постоянной нагрузке $P = 7$ МПа (рис. 4), а влияние нагрузки на износостойкость и величины коэффициентов трения – при постоянной скорости $V = 7$ м/с (рис. 5).

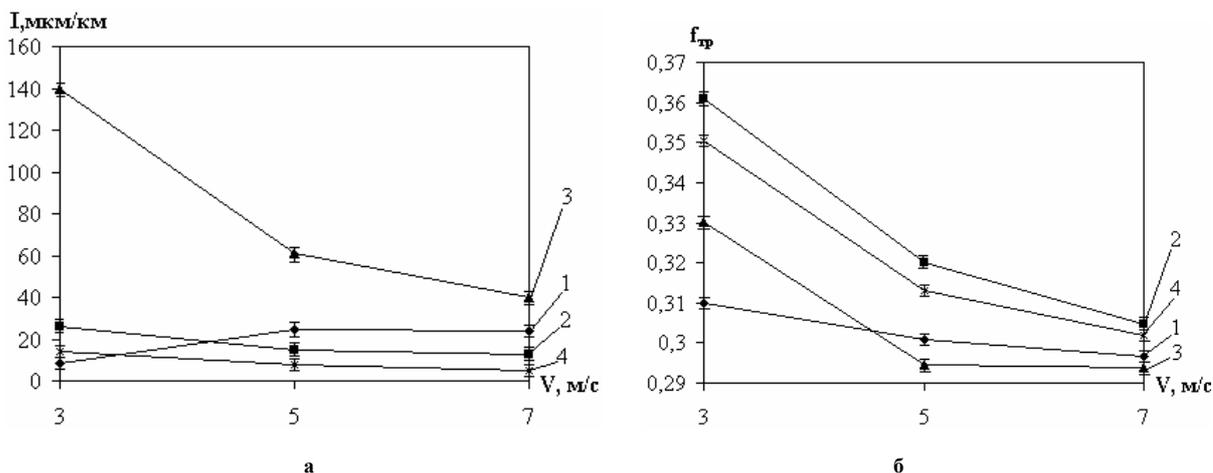


Рис. 4 – Зависимость интенсивности изнашивания (а) и коэффициентов трения (б) материалов от скорости при $P = 7$ МПа: 1 – СИАЛ-20; 2 – СИАЛ-50; 3 – СИАЛ-80; 4 – СИАЛ-Ц

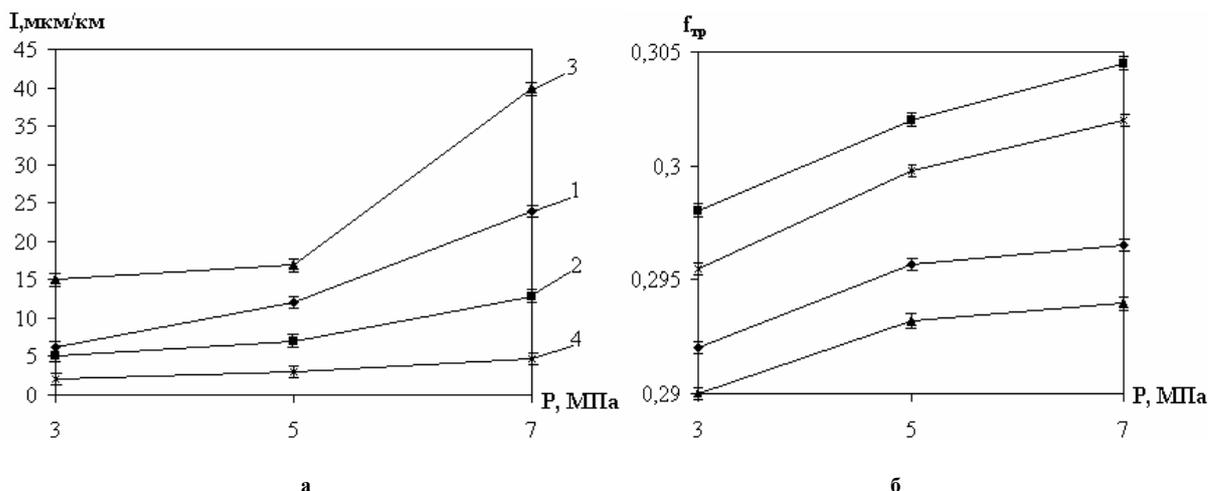


Рис. 4 – Зависимость интенсивности изнашивания (а) и коэффициентов трения (б) материалов от нагрузки при $V = 7$ м/с: 1 – СИАЛ-20; 2 – СИАЛ-50; 3 – СИАЛ-80; 4 – СИАЛ-Ц

С увеличением скорости испытаний (при $P = \text{const}$) интенсивность изнашивания всех керамических материалов, кроме СИАЛ-20, снижалась. Максимальная интенсивность изнашивания зафиксирована у материала СИАЛ-80. При скорости 3 м/с величина износа составляет 140 мкм/км, а при 7 м/с – $I = 40$ мкм/км. Минимальный износ при высоких скоростях испытаний характерен для керамического материала СИАЛ-Ц и составляет 4,7 мкм/км при $V = 7$ м/с. Интенсивность изнашивания керамики СИАЛ-20 при малой скорости испытаний ($V = 3$ м/с) составила 8,4 мкм/км, а с увеличением скорости испытания до 7 м/с величина износа увеличилась до 24 мкм/км, что очевидно связано с изменением механизма изнашивания при увеличении скорости испытаний.

Значения величин коэффициентов трения с ростом скорости испытания уменьшаются для всех исследуемых материалов и варьируются в пределах от 0,29 до 0,36.

С увеличением нагрузки (при $V = \text{const}$) значения интенсивности изнашивания всех четырех материалов монотонно возрастала. Установлено, что с увеличением нагрузки наблюдается повышение значений износа для всех исследуемых материалов. Наиболее высокой износостойкостью обладает материал СИАЛ-Ц: при нагрузке 3 МПа интенсивность изнашивания составляет 2 мкм/км, а при нагрузке 7 МПа – 4,7 мкм/км.

Неудовлетворительные результаты показал материал состава СИАЛ-80, будучи обедненным по оксидоалюминиевой связке, он изнашивался с интенсивностью 40 мкм/км при нагрузке 7 МПа. Значения коэффициентов трения с увеличением нагрузки изменяются в пределах 0,29 - 0,33. На рис. 6 приведена гистограмма которая показывает влияние состава композиционного материала на его триботехнические характеристики в самых экстремальных условиях при скорости 7 м/с и давлении 7 МПа.

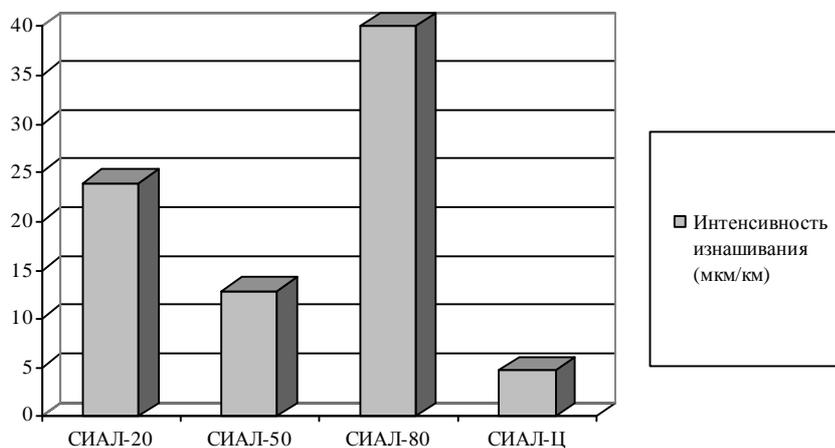
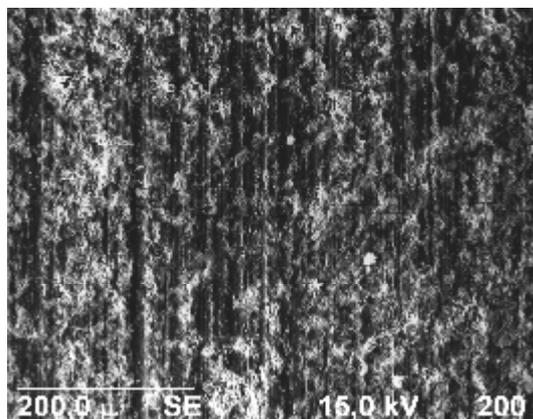
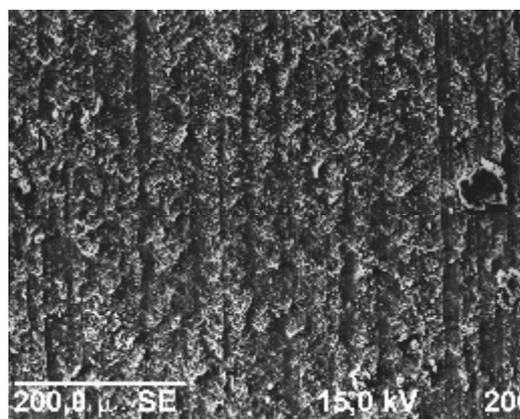


Рис. 6 – Интенсивность изнашивания (мкм/км) различных составов керамических материалов на основании карбида кремния по керамическому контртелу из СИАЛ-50 в самых экстремальных условиях трения

Для объяснения полученных результатов был произведен анализ поверхностей трения исследуемых материалов на электронном микроскопе “САМЕВАХ SX50”. Электронографический анализ позволяет сделать следующие выводы. Поверхности трения материалов СИАЛ-20 и СИАЛ-50 (рис. 7 а, б) подобны, за исключением того, что у первого материала полосы скольжения шире и глубже, что подтверждает более высокую износостойкость керамики СИАЛ-50.



а



б

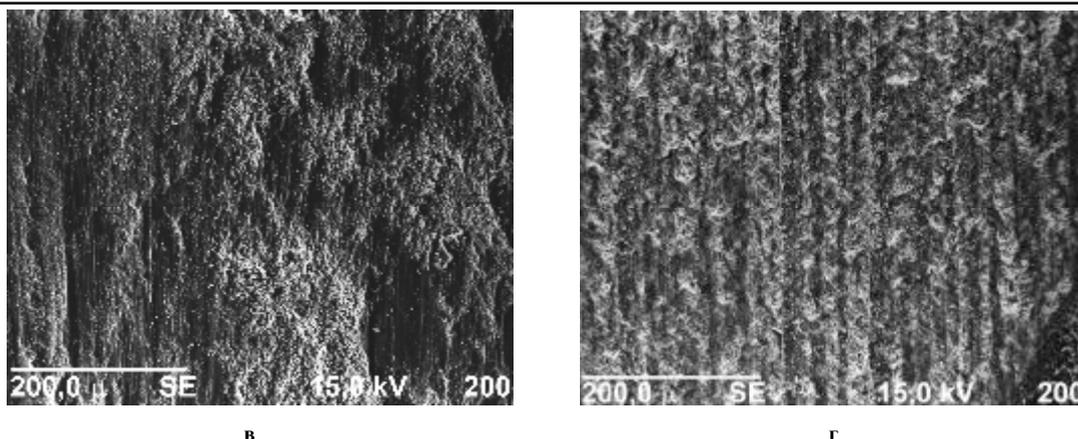


Рис. 7 – Микроструктура поверхностей трения керамических материалов различных составов $\times 200$:
а – СИАЛ-20; б – СИАЛ-50; в – СИАЛ-80; г – СИАЛ-Ц

Поверхность материала СИАЛ-80 характеризуется обширными сколами и интенсивным развитием повреждаемости (рис. 7, в), его износостойкость минимальна среди исследуемых материалов. Материал СИАЛ-Ц имеет равномерную и мелкодисперсную структуру, поверхность его трения (рис. 7, г) подобна материалу СИАЛ-50, но имеет еще более мелкие полосы скольжения. Этим объясняется то, что керамика СИАЛ-Ц имеет лучшее значение износостойкости среди испытываемых материалов.

Для изучения механизмов изнашивания был произведен более детальный микрорентгеноспектральный анализ поверхностей трения разработанных материалов. Внешний вид поверхностей трения полученных этим анализом приведен на рис. 8 - 11.

Поверхность трения материала СИАЛ-20 имеет текстурированную структуру оксида алюминия с включениями агрегатов карбида кремния (рис. 8, а). Очевидно, происходил процесс абразивной повреждаемости более мягкого оксида алюминия ($HV = 22-24$ ГПа) зернами карбида кремния ($HV = 34$ ГПа). Из литературных источников известно [6], что оксид алюминия широко используется как антифрикционный материал. Но при больших нагрузках и скоростях трения он подвергается разрушению вследствие зарождения и беспрепятственного распространения трещин. Роль карбида кремния в керамике СИАЛ-20 сводится к формированию дисперсно-упрочненной структуры, в которой зерна SiC препятствуют развитию трещин и распространению зон повреждаемости. Но очевидно, что введение добавок SiC в количестве 20 мас. % не является оптимальным для повышения износостойкости материала в условиях работы при повышенных скоростях (7 м/с) и нагрузках (7 МПа). Этим и объясняется более высокие значения износостойкости материала СИАЛ-50 (12,8 мкм/км) по сравнению с материалом СИАЛ-20 (24 мкм/км, рис. 6). В области низких скоростей СИАЛ-20 обладает более высокими триботехническими характеристиками (рис. 4, а), чем другие исследуемые материалы, однако при высоких скоростях и нагрузках в нем активно развивается повреждаемость, и существенно снижается его износостойкость (рис. 6).

Среди исследованных керамических материалов системы SiC-Al₂O₃ максимальные значения интенсивности изнашивания (40 мкм/км) зафиксированы у материала СИАЛ-80. Структура поверхности трения СИАЛ-80 имеет два характерных участка (рис. 7, в): зона разрушения и островковые полосы скольжения. Причем зона разрушения превалирует по площади над полосами скольжения. Микрорентгеноспектральный анализ двух типов участков (рис. 10) обнаружил, что в зоне повреждаемости в основном содержится карбид кремния, а в полосах скольжения преобладает оксид алюминия. Таким образом, при трении композита СИАЛ-80 в условиях высоких скоростей и нагрузок из-за недостаточного количества оксида алюминия происходит хрупкое разрушение карбидокремниевой фазы и вынос ее из зоны трения, что в конечном итоге приводит к значительному росту интенсивности изнашивания материала.

Оптимальным с точки зрения антифрикционных характеристик в исследуемой системе SiC-Al₂O₃ является керамический материал СИАЛ-50, интенсивность его изнашивания не превышает 13 мкм/км. Поверхность трения СИАЛ-50 (рис. 9) характеризуется меньшей повреждаемостью по сравнению с материалом СИАЛ-80, а полосы скольжения более тонкие и менее глубокие, чем у поверхности трения материала СИАЛ-20.

Таким образом, в результате триботехнических испытаний композиционных материалов системы SiC-Al₂O₃ установлено, что введение 20 мас.% Al₂O₃ в карбид кремния является недостаточным, СИАЛ-80 имеет неудовлетворительную износостойкость ($I = 40$ мкм/км). Износостойкость материала СИАЛ-20 выше, чем у материала СИАЛ-80 и интенсивность его изнашивания составляет 24 мкм/км. Самыми высокими триботехническими характеристиками в системе SiC-Al₂O₃ обладает композиционный материал СИАЛ-50, в котором содержится оптимальное соотношение карбидной и оксидной фаз и интенсивность его изнашивания составляет 12,8 мкм/км.

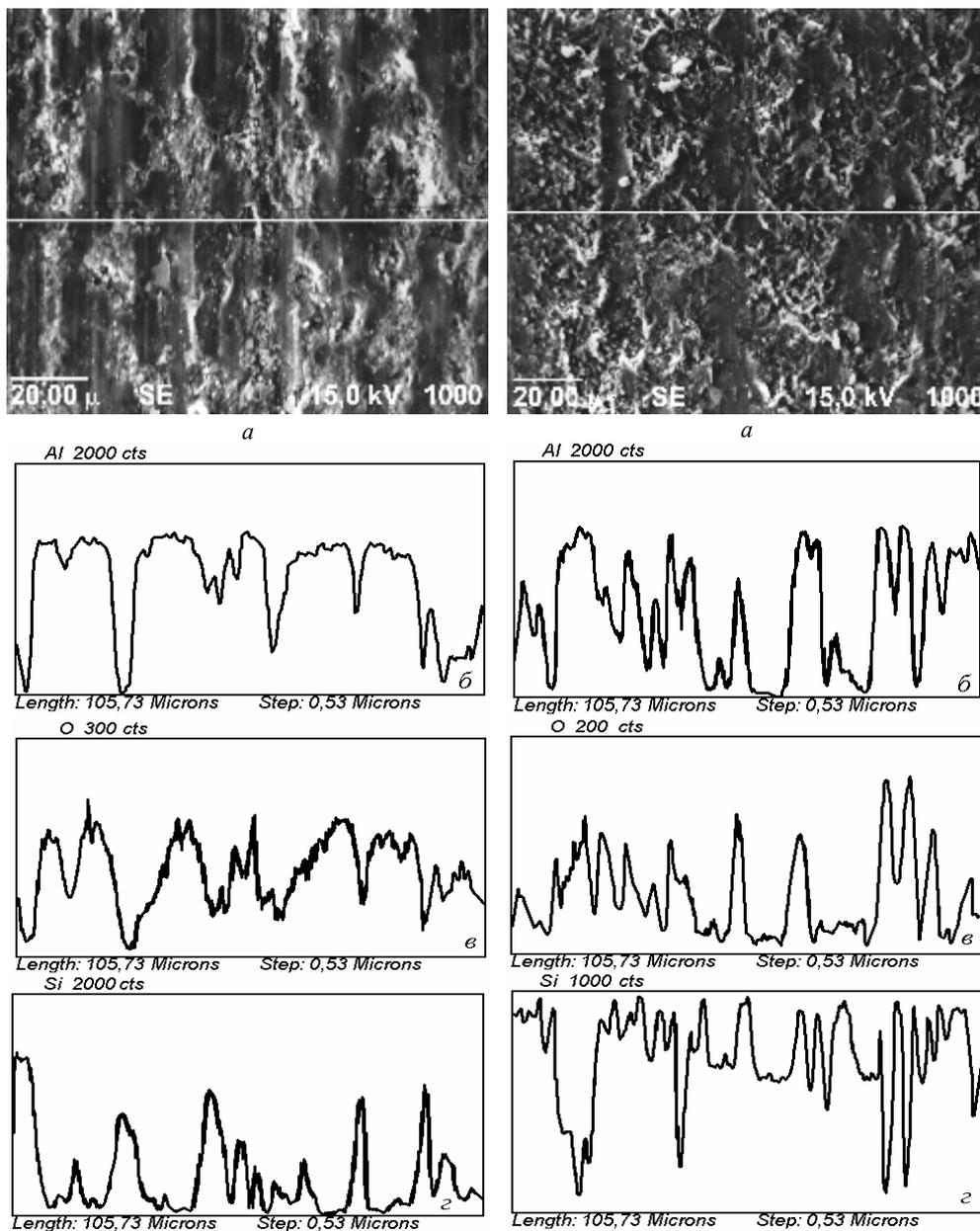


Рис. 8 – Микроструктура поверхности трения керамики состава СИАЛ-20 (при $V = 7 \text{ м/с}$ и $P = 7 \text{ МПа}$) $\times 1000$ (а) и распределение в ней: б – алюминия; в – кислорода; г – кремния

Рис. 9 – Микроструктура поверхности трения керамики состава СИАЛ-50 (при $V = 7 \text{ м/с}$ и $P = 7 \text{ МПа}$) $\times 1000$ (а) и распределение в ней: б – алюминия; в – кислорода; г – кремния

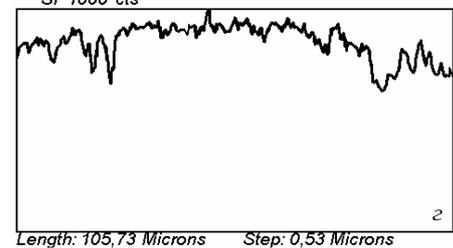
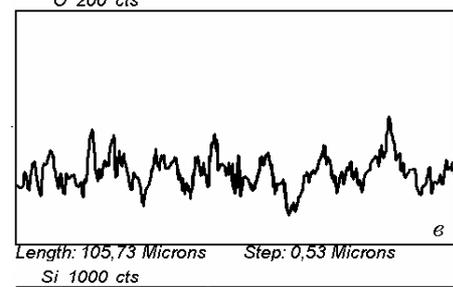
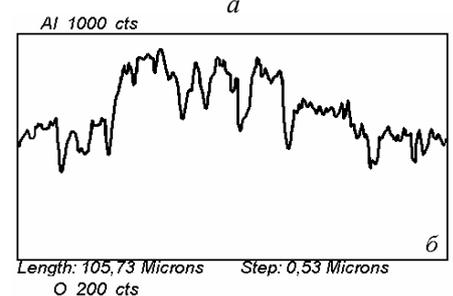
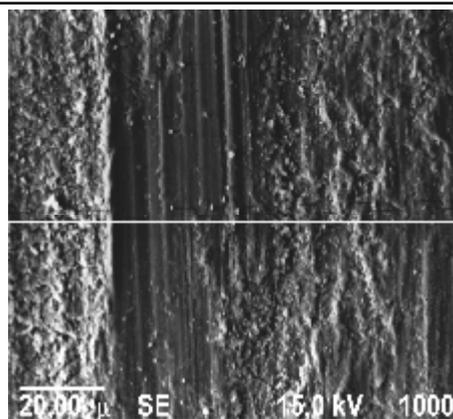


Рис. 10. Микроструктура поверхности трения керамики состава СИАЛ-80 (при $V = 7$ м/с и $P = 7$ МПа) $\times 1000$ (а) и распределение в ней:
 б – алюминия;
 в – кислорода;
 г – кремния;
 д – железа

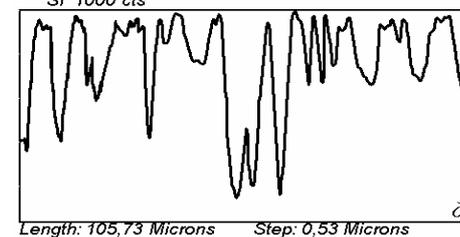
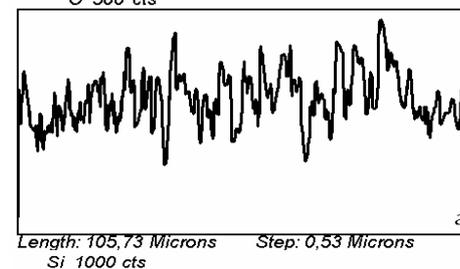
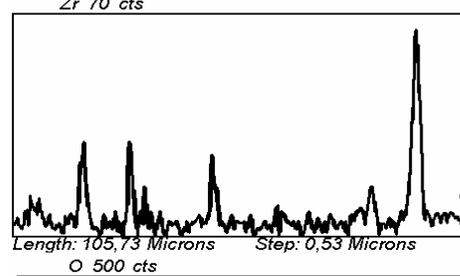
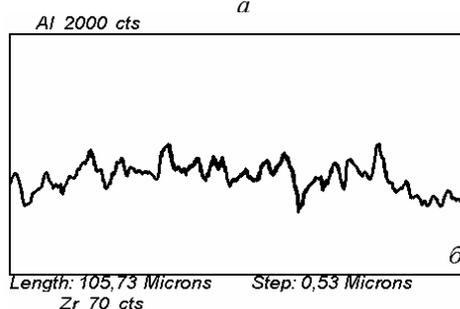
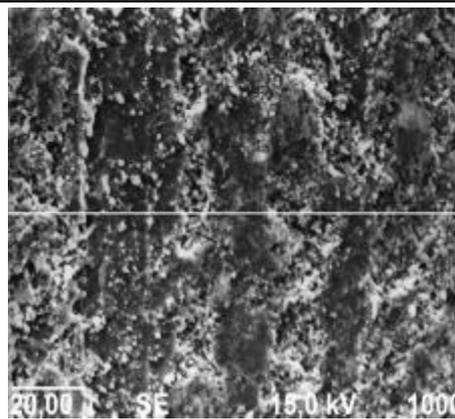


Рис. 11 – Микроструктура поверхности трения керамики состава СИАЛ-Ц (при $V = 7$ м/с и $P = 7$ МПа) $\times 1000$ (а) и распределение в ней:
 б – алюминия; в – циркония; г – кислорода;
 д – кремния

Поверхность трения керамики состава СИАЛ-Ц (рис. 11, а) характеризуется еще более мелкими полосами скольжения по сравнению с материалом СИАЛ-50. Керамика с мелкодисперсной структурой обладает повышенными триботехническими свойствами. Это связано с тем, что размер карбидных зерен в материале СИАЛ-Ц составляет 7 - 9 мкм, поэтому существенно снижается количество дефектов структуры с одной стороны и увеличивается фактическая площадь (а следовательно уменьшается величины удельных нагрузок) контакта с контртелом с другой. Интенсивность изнашивания этого материала составляет 4,7 мкм/км.

Выводы

1. При трении без смазки композиционных материалов системы SiC-Al₂O₃ в паре с керамическим контртелом реализуется абразивный механизм изнашивания. Введение в карбид кремния различных добавок оксида алюминия существенно влияет на структуру материалов и особенности механизмов их изнашивания, а следовательно, на триботехнические характеристики карбидокремниевой керамики.

Для керамики, содержащей 20 мас.% Al₂O₃ (СИАЛ-80) характерной является структура с большими конгломератами зерен карбида кремния. Более пластичной оксидной фазы недостаточно для удовлетворительной работы в паре трения с керамическим контртелом. В этом случае на поверхности трения в результате скалывания образуются большие по площади зоны разрушения материала, интенсивность изнашивания при этом составляет 40 мкм/км.

Керамический материал СИАЛ-20 имеет матричную структуру на основе оксида алюминия, упрочненную зернами карбида кремния. При небольших скоростях и малых нагрузках этот материал показал высокие результаты, однако при увеличении скорости испытаний до 7 м/с, а нагрузки до 7МПа его триботехнические характеристики ухудшились. Это объясняется недостатком упрочняющей карбидокремниевой фазы.

Оптимальное соотношение пластифицирующей (Al₂O₃) и упрочняющей (SiC) фаз в керамике СИАЛ-50 привело к формированию в процессе трения поверхности с незначительной повреждаемостью и минимальными по ширине и глубине полосами скольжения. В результате, керамический материал СИАЛ-50 обладает самым высоким уровнем триботехнических характеристик среди материалов системы SiC-Al₂O₃, интенсивность его изнашивания не превышает 13 мкм/км.

2. В композиционном керамическом материале СИАЛ-Ц в качестве оксидной составляющей использована эвтектика Al₂O₃-ZrO₂. Это позволило существенно снизить температуру горячего прессования керамики и предотвратить рост ее зерен. Введение эвтектической оксидной связки в материал позволяет существенно повысить его износостойкость за счет получения более равномерной и мелкодисперсной структуры. Керамика СИАЛ-Ц имеет максимальную износостойкость из всей группы исследованных материалов, интенсивность ее изнашивания не превышает 4,7 мкм/км.

Разработанные материалы просты в получении и относительно дешевы и рекомендуются для изготовления торцевых уплотнений центробежных насосов.

Литература

1. Антипин Г.В., Банников М.Т., Домашнев А.Д. и др. Торцевые уплотнения аппаратов химических производств. – М.: Машиностроение, 1984. – 112 с.
2. Комиссар А.Г. Уплотнительные устройства опор качения: Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 192 с.
3. Мельник В.А. Торцевые уплотнения валов: справочник. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
4. Патент № 53010 Композиційний зносостійкий матеріал на основі карбиду кремнію. Довгаль А.Г., Уманський А.П., Тамаргазін О.А., Панасюк А.Д., Костенко О.Д., Коновал В.П., 27.09.2010, - Бюл. № 18.
5. Мамикін Є.Т., Ковпак М.К., Юга А.І. та ін. Комплекс машин і методики визначення антифрикційних властивостей матеріалів при терті-ковзанні // Порошкова металургія. – 1973. – № 1. – С.67-72.
6. Голубев В.И. Уплотнение и уплотнительная техника: Справочник / Под общ. ред. В.И. Голубева – М: Машиностроение, 1994 г. – 356 с.

Надійшла 21.06.2011