

---

---

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

---

---

УДК 620.179  
DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-95-99

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ, УПРОЧНЕННЫХ ЧАСТИЦАМИ

Ю. А. ФАДИН<sup>1</sup>, С. Н. ПЕРЕВИСЛОВ<sup>2</sup>, Д. П. ДАНИЛОВИЧ<sup>2</sup>, М. А. МАРКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем машиноведения РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия*  
*E-mail: fadinspb@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет),  
190013, Санкт-Петербург, Россия*

Рассмотрен процесс изнашивания композитов с поликристаллической матрицей из карбида кремния при сухом трении по инструментальной стали. В качестве наполнителей матрицы композитов использованы хрупкие частицы различного размера. Изнашивание как процесс множественного разрушения поверхности происходит в поле механических напряжений, которое создается при взаимодействии шероховатостей контактирующих тел, каждая шероховатость играет роль индентора, как при „контакте Герца“. С помощью нагрузки можно регулировать как глубину слоя максимальных касательных напряжений, так и числовое значение напряжений. Установлено, что износостойкость композитов, упрочненных частицами размером 1—1000 мкм, зависит от соотношения глубины слоя максимальных касательных напряжений и размера упрочняющих частиц.

**Ключевые слова:** *поверхность, износ, размеры частиц, керамика на основе SiC*

Вопрос о влиянии размеров упрочняющих частиц на износостойкость композитов с разной природой матрицы, применяющихся в узлах трения, не теряет актуальности уже длительное время. Например, в работах [1—5] выбор размера упрочняющих частиц увязывается с влиянием нагрузки, природой матрицы и особенностями ее упрочнения. В качестве упрочняющих частиц в композитах часто используются как волокна, так и тугоплавкие неорганические химические соединения, которые в микроскопических объемах обладают высокими физико-механическими свойствами. Несмотря на довольно длительную историю исследования этой проблемы, результаты применения композитов в узлах трения, упрочненных таким образом, остаются все еще противоречивыми. В последнее время возрос интерес к материалам „керамика—керамический наполнитель“, которые перспективны для работы в экстремальных условиях. Трибологические свойства этих материалов либо изучены недостаточно, либо неизвестны. В настоящее время использование композитов для этих целей базируется в основном на экспериментальных данных, поскольку какие-либо правила, обеспечивающие выбор материала, работающего в условиях трения, не разработаны.

Поскольку трение происходит в условия сжатия и сдвига поверхностных слоев, большое влияние на разрушение поверхности оказывают величина напряжений сдвига и их распределение по глубине. Цель настоящей работы состоит в исследовании влияния размеров

упрочняющих частиц на изнашивание керамических композитов и установлении качественных закономерностей этого процесса.

Керамические композиты, исследуемые в настоящей работе, были получены методом спекания порошка карбида кремния в двух различных модификациях — с крупными и мелкими упрочняющими частицами [6, 7]. В качестве крупных частиц использовались отрезки волокон карбида кремния, полученного газовой фазой синтезом на вольфрамовой нити-подложке. Диаметр упрочняющих волокон составлял  $d=140$  мкм, а длина достигала  $4\text{--}7d$ . В другой модификации в качестве упрочнителя применялась смесь мелких частиц  $V_4C$  и  $TiB_2$  максимальным размером  $< 3$  мкм.

Испытания на трение проводились на торцевом трибометре, описанном в статье [8]. Нагрузка составляла 20 Н, скорость скольжения 0,6 м/с. Пара трения включала неподвижный образец из испытываемого керамического композита и подвижный — из инструментальной стали 6P5M, изготовленный в виде трубки диаметром 5 мм с толщиной стенок 0,5 мм. Оценка изнашивания проводилась по методике, разработанной для определения износа керамики [9]. Эта методика специально разработана для материалов с очень маленькой величиной износа. Суть методики заключается в том, что числовую оценку износа можно получить по изменению шероховатости поверхности в процессе трения. Поверхности твердых тел обладают шероховатостью, которую можно описать, например, параметром шероховатости  $R_t$ . Этот параметр представляет собой расстояние от самой глубокой впадины на поверхности до самого высокого выступа (перепад высот). Можно экспериментально подобрать такое время испытания при заданных условиях (нагрузка и скорость), чтобы величина общего изнашивания не превышала первоначальный перепад высот. Тогда дно самой глубокой впадины первоначального профиля шероховатости может быть принято за точку отсчета. Для практической оценки износа необходимо обработать  $\approx 30$  профилей поверхности до проведения испытаний на трение и столько же после. В итоге формула для оценки изношенного объема  $\Delta V$  материала за время контакта имеет вид [9]:

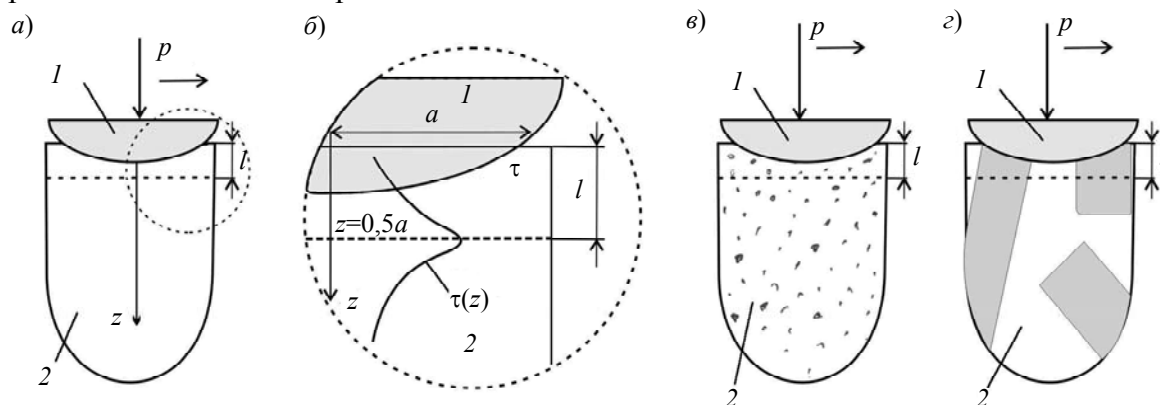
$$\Delta V = \Delta R_t S \alpha^2,$$

где  $\Delta R_t$  — изменение шероховатости профиля поверхности за время испытания,  $S$  — площадь номинальной поверхности контакта,  $\alpha$  — относительное число наиболее выступающих шероховатостей на длине профиля. Результаты испытаний на износостойкость  $I$  всех изученных в работе керамических материалов приведены в таблице ( $\varphi$  — объемное содержание упрочняющих частиц,  $L$  — их размер).

Упрочнитель	$\varphi$ , мас. %	$L$ , мкм	$\Delta V$ , мм <sup>3</sup>	$I$ , км/мм
Нет (базовый состав)	0	0	0,02	1,1
Смесь $V_4C$ и $TiB_2$	5	$< 3$	0,025	0,84
	10	$< 3$	0,052	0,42
Отрезки волокон SiC	5	140—700	0,0038	5,8
	10	140—700	0,0028	7,8

На рисунке представлены схемы взаимодействия единичной шероховатости металлического контртела 1 с поверхностью керамического материала 2 при трении (пунктир — уровень максимального сдвигового напряжения;  $a$  — базовая керамика SiC без упрочнителя,  $b$  — увеличенный фрагмент базовой керамики,  $в$  — керамика SiC с мелкими частицами,  $г$  — керамика SiC с крупными отрезками волокон). При трении со скоростью  $x$  в первую очередь происходит контакт наиболее выступающих шероховатостей обеих поверхностей. На рисунке  $a$  схематично показан контакт единичной шероховатости металлической поверхности с поверхностью керамики. Такой контакт приводит к появлению подповерхностных сдвиговых напряжений (см. рисунок,  $б$ ). Оценка этих напряжений можно получить из теории Герца о взаимодействии твердого шара с упругим полупространством [10]. Средний размер области

контакта металлической шероховатости с поверхностью керамики (или керамического композита, см. рисунок, *в, з*) в настоящей работе составляет  $2a \sim 20$  мкм. Тогда под воздействием нагрузки  $p$ , направленной вдоль оси  $z$ , согласно теории Герца, на глубине  $l=0,49a$  возникает максимальное касательное напряжение  $\tau_{\max} = 0,465p$  [10]. Если нагрузка  $p$  достаточно велика, то это напряжение и играет основную роль в образовании частиц износа. Таким образом, в указанных выше условиях опытов подповерхностные трещины могут возникнуть при  $l \sim 5$  мкм. Рассмотрим, как влияет упрочнение частицами на износ базовой керамики. На рисунке, *в* приведена схема упрочнения керамики смесью малых частиц  $V_4C$  и  $TiB_2$ . Видно, что размер  $L$  упрочняющих частиц меньше толщины слоя  $l$ . Границы раздела между частицами и матрицей некогерентные, поскольку, по данным оптико-микроскопических исследований, на поверхности трения керамических композитов не наблюдается разрушенных упрочняющих частиц. Подповерхностные трещины проходят исключительно по матрице, не задевая упрочняющих частиц, поэтому частицы не могут оказать существенного сопротивления при развитии подповерхностных сдвиговых процессов.



Теперь рассмотрим случай  $L \gg l$ , когда в слое возникают максимальные сдвиговые напряжения (см. рисунок, *з*). Из таблицы видно, что износостойкость при увеличении концентрации частиц существенно растет. При трении разрушение материала происходит вследствие сдвиговых напряжений. Рассматриваемый приповерхностный слой материала толщиной  $l$  и нижележащие слои материала действуют как своеобразное „заклепочное соединение“ [11]. В настоящей работе роль заклепок выполняют крупные отрезки волокон  $SiC$ , выходящие на поверхность контакта. Характерной особенностью заклепочного соединения является повышение прочности соединения на срез при увеличении числа заклепок. В рассматриваемом случае увеличение концентрации частиц приводит к повышению прочности на сдвиг и, следовательно, к увеличению износостойкости (см. таблицу).

Таким образом, можно сделать общий вывод, что при выборе размеров упрочняющих частиц для материалов узлов трения необходимо учитывать нагрузку и шероховатость поверхности. Кроме этого, если размер упрочняющих частиц меньше глубины слоя предполагаемых максимальных подповерхностных напряжений, увеличение износостойкости маловероятно; если размер частиц в несколько раз больше глубины слоя максимальных напряжений, то можно ожидать увеличения износостойкости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hosking F. M., Folgar Portillo F., Wunderlin R., Mehrabian R. Composites of aluminium alloys: fabrication and wear behavior // J. Mat. Sci. 1982. Vol. 17, N 2. P. 477—498.
2. Durand J. M., Vardavoulis M., Jeandin M. Role of reinforcing ceramic particles in the wear behaviour of polymer-based model composites // Wear. 1995. Vol. 181—183(Pt 2), N 3. P. 833—839.

3. Болдин М. С., Сахаров Н. В., Шотин С. В., Чувильдеев В. Н., Нохрин А. В., Котков Д. Н., Писклов А. В. Композиционные керамики на основе оксида алюминия, полученные методом электроимпульсного плазменного спекания для трибологических применений // Вестник Нижегородского университета. 2012. № 6. С. 32—37.
4. Altinkok N., Özsert İ., Findik F. Dry Sliding Wear Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Particle Reinforced Aluminium Based MMCs Fabricated by Stir Casting Method // Acta Physica Polonica A. 2013. Vol. 124, N 1. P. 11—19.
5. Antunes P. V., Ramalho A., Carrilho E. V. P. Mechanical and wear behaviours of nano and microfilled polymeric composite: Effect of filler fraction and size // Materials & Design. 2014. Vol. 61, N 9. P. 50—60.
6. Перевислов С. Н., Несмелов Д. Д. Жидкофазноспеченный карбид кремния: спекание, структура, механические свойства // Огнеупоры и техническая керамика. 2014. № 4—5. С. 3—13.
7. Данилович Д. П., Румянцев В. И., Орданьян С. С. Система SiC-TiC-TiB<sub>2</sub> как основа керамоматричных композиционных материалов // Вопросы материаловедения. 2009. № 4 (60). С. 42—47.
8. Фадин Ю. А., Марков М. А., Кукина А. А. Экспресс-оценка трибологических свойств износостойких материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8. С. 641—644.
9. Фадин Ю. А., Марков М. А., Орданьян С. С. Оценка износостойкости материалов на основе оксида алюминия // Огнеупоры и техническая керамика. 2015. № 4—5. С. 8—10.
10. Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. М.: ЛКИ, 2007. 224 с.
11. Кудрявцев В. Н. Детали машин. Л.: Машиностроение, 1980. 464 с.

#### *Сведения об авторах*

- Юрий Александрович Фадин** — д-р техн. наук; Институт проблем машиноведения РАН; зав. лабораторией; E-mail: fadinspb@yandex.ru
- Сергей Николаевич Перевислов** — канд. техн. наук, докторант; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов; E-mail: perevislov@mail.ru
- Дмитрий Петрович Данилович** — Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов; старший преподаватель; E-mail: dmitryDanilovich@gmail.com
- Михаил Александрович Марков** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), кафедра химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов; E-mail: barca0688@mail.ru

Поступила в редакцию  
21.11.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Фадин Ю. А., Перевислов С. Н., Данилович Д. П., Марков М. А. Особенности разрушения поверхности материалов, упрочненных частицами // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 95—99.

#### FEATURES OF DESTRUCTION OF MATERIAL SURFACE, STRENGTHENED BY PARTICLES

Yu. A. Fadin<sup>1</sup>, S. N. Perevislov<sup>2</sup>, D. P. Danilovich<sup>2</sup>, M. A. Markov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences,  
199178, St. Petersburg, Russia  
E-mail: fadinspb@yandex.ru

<sup>2</sup> St. Petersburg State Technological Institute (Technical University),  
190013, St. Petersburg, Russia

The process of wear of ceramic composites with polycrystalline matrix of silicon carbide with dry friction in tool steel is considered. Fragile particles of various sizes are used as fillers of the composite matrix. Wear as a process of multiple surface destruction occurs in the field of mechanical stresses created by the interaction of roughnesses of contacting bodies, each roughness plays the role of an indenter,

as in the case of "Hertz contact". Variation of the load makes it possible to regulate both the depth of the layer of the maximum tangential stresses and the numerical value of the stresses. The wear resistance of composites hardened by particles of 1—1000  $\mu\text{m}$  in size is shown to depend on the ratio of the depth of the layer of maximal tangential stresses and the size of the hardening particles.

**Keywords:** surface, wear, particle size, SiC ceramics

**Data on authors**

- Yury A. Fadin** — Dr. Sci.; Institute of Problems of Mechanical Engineering of the RAS; Head of Laboratory; E-mail: fadinspb@yandex.ru
- Sergey N. Perevislov** — PhD, Doctorant; St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Department of Chemical Technology of Refractory Non-metallic and Silicate Materials; E-mail: perevislov@mail.ru
- Dmitry P. Danilovich** — St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Department of Chemical Technology of Refractory Non-metallic and Silicate Materials; Senior Lecturer; E-mail: dmitryDanilovich@gmail.com
- Mikhail A. Markov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Department of Chemical Technology of Refractory Non-metallic and Silicate Materials; E-mail: barca0688@mail.ru

**For citation:** Fadin Yu. A., Perevislov S. N., Danilovich D. P., Markov M. A. Features of destruction of material surface, strengthened by particles. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 2. P. 95—99 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-95-99