

УДК 678.539

DOI 10.21661/r-557281

*Дин Кай Цзянь*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ  
УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ  
ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ**

*Аннотация:* в статье раскрываются технологические принципы повышения физико-механических характеристик пластин из оксидной и нитридной керамики путем поверхностной обработки, сочетающей различные варианты абразивного воздействия и нанесения покрытий. Автором выполнен анализ составов износостойких покрытий для различных условий эксплуатации керамики, приведены сведения об их влиянии на прочностные характеристики и распределение остаточных напряжений в поверхностном слое.

*Ключевые слова:* комбинирование, режущая керамика, поверхностная обработка, нитрид, оксид, изнашивание.

*Ding Kai Jian*

**STUDY OF THE EFFECT OF COMBINED HARDENING TREATMENT  
ON THE WEAR RATE OF MINERALOCERAMIC**

*Abstract:* abstract: the technological principles of increasing the physical and mechanical characteristics of oxide and nitride ceramics plates by surface treatment, combining various options of abrasive action and coating are revealed in this article. The author carried out the analysis of wear-resistant coating compositions for vari-

*ous operating conditions of ceramics and provided information about their effect on strength characteristics and the distribution of residual stresses in the surface layer.*

**Keywords:** *combining, cutting ceramics, surface treatment, nitride, oxide, wear.*

*Введение.*

Повышение работоспособности режущего инструмента является важнейшим резервом интенсификации процесса резания и роста эффективности механообрабатывающего производства. Работоспособность режущего инструмента во многом определяется свойствами его контактных площадок. Следовательно, повышение износостойкости контактных площадок режущего инструмента, изготовленных из традиционных инструментальных материалов, является высокоэффективным направлением роста его работоспособности.

Повышение износостойкости контактных площадок режущего инструмента может быть обеспечено применением различных методов поверхностной модификации рабочих поверхностей режущего инструмента (деформационного и термического воздействия, поверхностного легирования, нанесения покрытий). Их применение позволяет существенно увеличить ресурс работы металлообрабатывающего инструмента и комплексно реализовать современные направления совершенствования металлообрабатывающего производства – повышение производительности обработки, повышение точности и качества обрабатываемых деталей и агрегатов и др.

Керамические режущие материалы характеризуются прекрасно тепло – и износостойкостью, поэтому могут найти широкое применение при обработке труднообрабатываемых материалов в условиях непрерывного высокоскорост-

ного резания. Однако известным недостатком керамических материалов является их низкая трещиностойкость, приводящая к внезапному отказу керамического режущего инструмента [1; 2]. С целью повышения надежности режущих инструментов из оксидной и нитридной керамик было исследовано влияние на характеристики поверхностей керамических режущих пластин предварительной механической обработки – торцового шлифования с планетарной кинематической и плоскопараллельной притирки абразивной суспензией. После механической обработки на пластины методом ионно-плазменного осаждения наносилось износостойкие нитридные покрытия  $ZrN$ ,  $(TiCr)N$ ,  $(ZrHfCr)N$ . на готовых керамических образцах исследовалась шероховатость поверхности ее рельеф, твердость, прочность адгезии и остаточные напряжения. Основной задачей исследований являлось установление подходящих методов предварительной обработки инструмента и последующего нанесения покрытий. Определялись возможности инструмента для обработки жаропрочного сплава, шарикоподшипниковой стали и серого чугуна при непрерывном и прерывистом резании.

*Методика проведения исследований.*

*Керамические образцы и режущие пластины.*

Для исследований было выбрано два вида керамических материалов, значительно различающихся по своим характеристикам: оксидная керамика ( $Al_2O_3/ZrO_2$ ) и керамика на основе нитрида кремния ( $Si_3N_4$ ). Керамика на основе  $Al_2O_3$ , имеющая в своем составе  $ZrO_2$ , обладает более высокой вязкостью, что

повышает эффективность режущих инструментов, изготовленных из нее. Керамика на основе нитрид кремния содержит > 94% объемных долей  $\beta$  –  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Для исследования были изготовлены керамические образцы размерами 4 мм х 3 мм х 50 мм в соответствии с требованиями к образцам, применяемым при испытаниях на четырехточечный изгиб. Рабочие поверхности образцов были обработаны различными методами, а боковые поверхности и устранения дефектов. Испытаниям также подвергались режущие керамические пластины, имеющие геометрию SNGN120708.

#### *Состав и свойства покрытий.*

На основании предварительных исследований для наносимых покрытий (ZrHfCr)N, (TiCr)N и ZrN была установлена их оптимальная толщина в диапазоне от 2.5 до 4 мкм.

Покрытие (ZrHfCr)N имеет очень высокую термостойкость и теплостойкость. Цирконий, гафний и хром имеют возможность создавать жесткие связи с атомами азота. Кроме того, коэффициент теплового расширения этого покрытия схож с коэффициентом расширения рассматриваемых керамик [3].

Относительно высокий коэффициент эластичности покрытия (TiCr)N способствует сопротивлению адгезионному изнашиванию. Поскольку микротвердость этого покрытия сопоставима с микротвердостью керамики, не возникает слишком высоких напряжений в переходной зоне между покрытием и субстратом. Другим преимуществом этого покрытия является сравнительно не высокая стоимость его компонентов – титана и хрома [1].

Покрытие ZrN также имеет высокую термостойкость и хорошо сопротивляется развитию трещине, благодаря своей жесткой кристаллической решетке. Другим его преимуществом является пониженная склонность к образованию капель при осаждении. При этом покрытие обладает коррозионной стойкостью и химической пассивностью [3; 4].

Параметры предварительной механической обработки керамических режущих пластин.

В качестве способов абразивной обработки, потенциально способных обеспечить достижение целей исследования, были выбраны торцовое шлифование с планетарной кинематикой и плоскопараллельная притирка. Торцовое шлифование проводилось на высокоскоростном шлифовальном станке DLM 05 HS фирмы Stahli (Швейцария), притирка производилась на двух притирном доводочном станке фирмы (Германия). При притирке с плоскопараллельной кинематикой заготовка обрабатывается на станке между стальными доводочными дисками с доводочной суспензией из карбида бора, зернистостью F280 (размер частиц 39.9 мкм) и воды. Кинематические условия при шлифовании с планетарной кинематикой, в сущности, соответствуют притирке с плоскопараллельной кинематикой, только доводочные колеса и суспензия заменены шлифовальными дисками и смазочно-охлаждающей жидкостью.

Режимы предварительной абразивной обработки образцов из керамик и режущих пластин приведены в таблице 1.

1. Режимы предварительной абразивной обработки образцов из керамик и
--

режущих пластин		
Плоскопараллельная притирка		
Материал	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Доводочная паста	B <sub>4</sub> C, зернистость F280, вода	
Средняя скорость V <sub>c</sub> [м/мин]	75.... 150	
Доводочное давление p[Н/см <sup>2</sup> ]	10... 30	60....100
Относительная частота вращения N <sub>L</sub>	0.6	
Плоское шлифование с планетарной кинематикой		
Шлифовальный круг	D 126 C 47 с пазами	
Смазочно-охлаждающее вещество	Масло Diamond 80	
Средняя скорость V <sub>c</sub> [м/мин]	75... 150	
Давление при шлифовании [Н/см <sup>2</sup> ]	10... 30	60.... 100
Относительная частота вращения N <sub>L</sub> *	0.6	

\*Относительная частота вращения  $N_L = n_1/n_2$ , где  $n_1$  [мин – 1] – частота вращения внутреннего венца и  $n_2$  [мин – 1] – частота вращения нижнего шлифовального круга/притира.

Нанесение покрытий на образцы из керамики.

Нанесении износостойких покрытий на керамику на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> осуществлялось методом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности при помощи вакуумно-плазменной установки.

*Порядок проведения исследований.*

Исследования проводились в следующей последовательности [2; 5].

1. Предварительная абразивная обработка керамических образцов и режущих пластин с помощью выбранных методов.

2. Метрологические исследования керамических режущих пластин перед нанесением покрытий.

На этом этапе контролировались все характеристики образцов, оказывающие сильное влияние на качество сцепления материалов покрытия и субстрата. Производилась оценка топографии и шероховатости поверхности, анализ поверхности на присутствие механических и химических дефектов, очистка субстратов, а также фиксация образцов во вспомогательных устройствах.

3. Очистка образцов и режущих пластин в вакууме и нанесение многослойных композиционных покрытий на керамические режущие пластины методом вакуумного осаждения из паровой фазы. В процессе очистки субстратов в вакууме с их поверхности снимается слой толщиной около мкм [7; 8].

На заключительном этапе образцы подвергаются очистке с помощью источника ускоренных нейтральных частиц (молекулы аргона). В результате травления поверхность очищается от дефектов [9].

Нанесению покрытия предшествует нагрев и активация поверхностей субстратов. Керамические образцы и режущие пластины облучаются нейтральными ускоренными частицами аргона. Параллельно производится бомбардировка субстратов металлическими ионами с испарителя.

4. Метрологические исследования и испытания резанием керамических режущих пластин после нанесения покрытий.

*Метрологические исследования.*

Измерения шероховатости поверхности проводились с помощью измерительной системы Form Talysurf 120 L фирмы Rank Taylor Hobson (Великобритания). Допуск измерительной системы составляет 0.01 мкм с точностью 2%. Угол при вершине тестера составляет 600, радиус  $r_{\text{MT}}$  вершины тестера 5 мкм.

Толщина покрытий измерялась с помощью методики Calotest на специальной установке для шарового шлифования, при котором в покрытом субстрате с помощью стального шара полируется сферическое углубление. Из размеров возникающей полусферы рассчитывается толщина покрытия. Прочность адгезии измерялась вдавливанием индентора Роквелла. Испытания на четырехточечный изгиб проводились на напольной испытательной машине фирмы Zwick Roell (Германия).

Для изучения характера адгезии использовался метод царапания. Суть метода заключается в измерении критической нагрузки ( $L_c$ ) в момент отслоения покрытия при движении по поверхности образца алмазной иглы и нарастающей при этом нагрузке. Данные исследования согласно ISO 1518 проводились при комнатной температуре  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  при нормальной влажности.

Для измерения остаточных напряжений использовался четырехцикловый дифрактометр фирмы Huber (Германия).

#### *Испытания резанием.*

Для испытаний резанием в качестве обрабатываемых были выбраны материалы: закаленная шарикоподшипниковая сталь 100Cr6, серый чугун EN GJS 600. Испытания проводились на токарном станке с ЧПУ VDF 180 C – U CNC фирмы Boehringer. Резание проводилось на режимах  $V_c = 200$  и  $400$  м/мин, глу-

бина резания  $t = 0.5$  мм. В качестве критерия отказа режущего инструмента был принят размер фаски  $h_3 = 0.2$  мм [6].

*Результаты исследований и их обсуждение.*

В результате исследований шероховатости и топографии поверхности и топографии поверхности были выявлены специфические следы предварительной механической обработки. На поверхности после притирки обнаружены характерные для этого типа обработки кратеры, тогда как образцы после шлифования с планетарной кинематикой имеют на поверхности перекрестные риски (рис. 1).

Результаты исследования характера адгезии представлены на рис. 2.

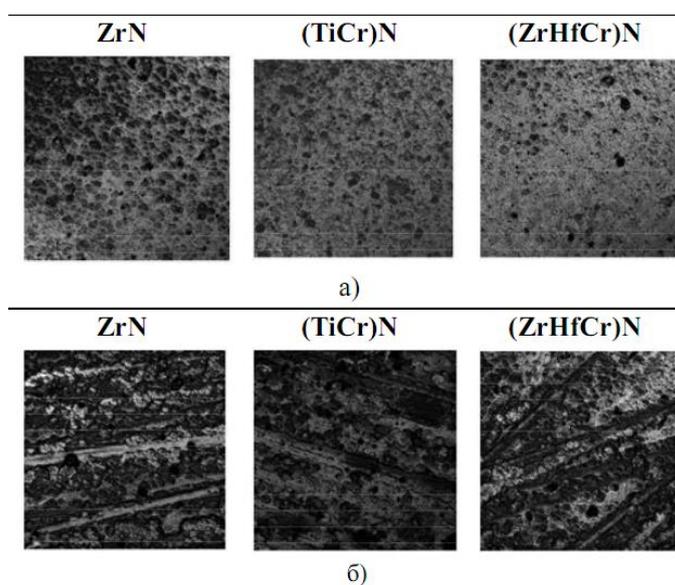


Рис. 1. Топографии поверхности образцов из оксидной керамики  $Al_2O_3$ , после а) притирки и б) плоского шлифования с планетарной кинематической с последующим нанесением покрытий

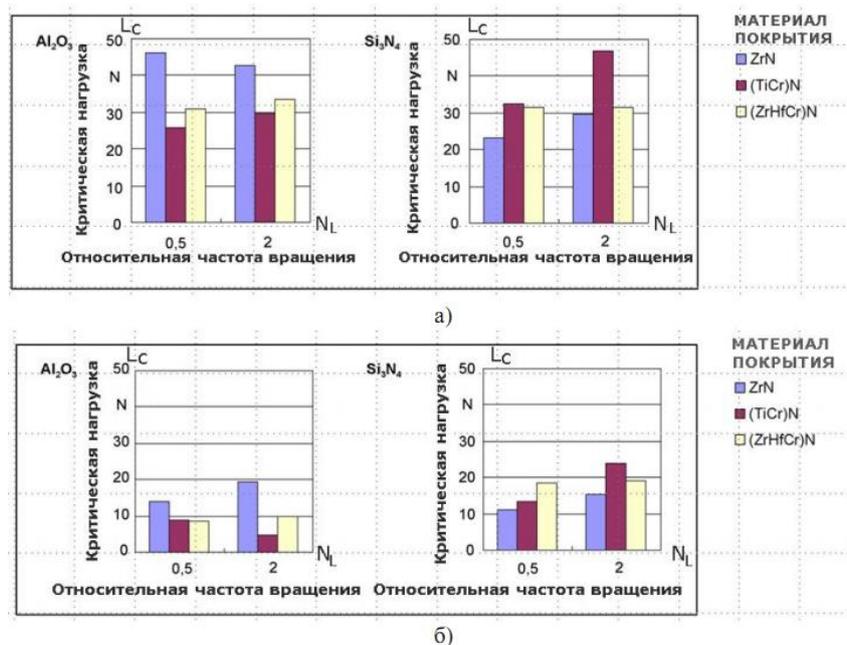


Рис. 2. Результаты исследования характера адгезионной связи покрытий с подложкой методом царапания: а) доводка с плоскопараллельной кинематикой, б) плоское шлифование с планетарной кинематикой

Результаты анализа остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из керамических материалов представлены на рис. 3.

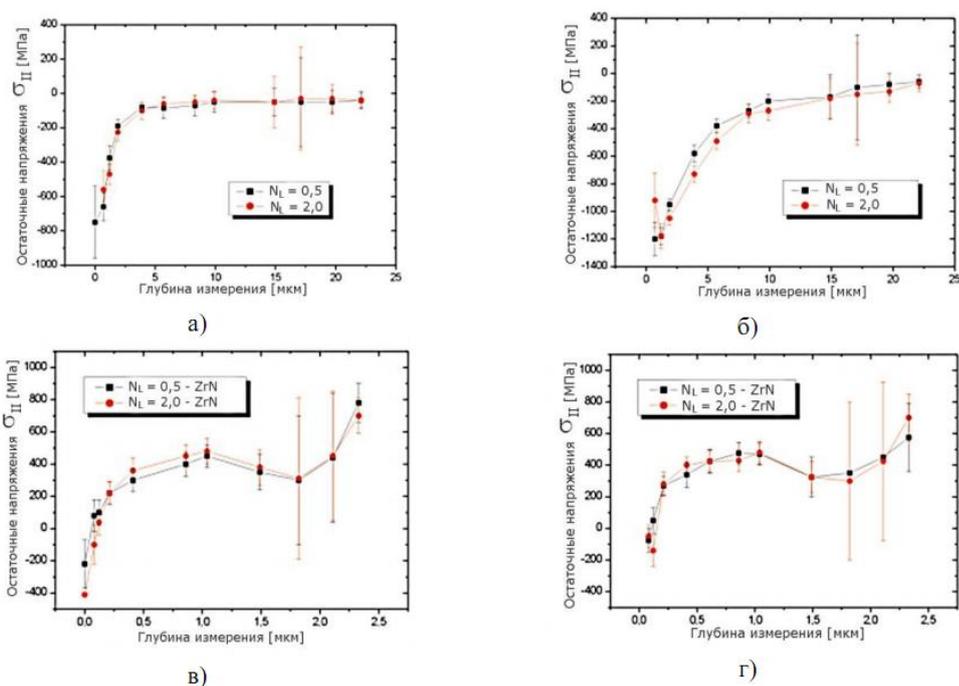


Рис.3. Результаты измерений остаточных напряжений в керамических образцах из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ : а)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – плоское шлифование без покрытия; б)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – притирка без покрытия; в)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – плоское шлифование с покрытием  $\text{ZrN}$ ; г)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – притирка с покрытием  $\text{ZrN}$

Выводы.

1. Исследование остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с покрытием  $\text{ZrN}$  выявило наличие растягивающих остаточных напряжений. Противоположная тенденция выявлена на образцах с покрытиями  $(\text{TiCr})\text{N}$  и  $(\text{ZrCrHf})\text{N}$ , которые демонстрируют в этой области высокие остаточные сжимающие напряжения. Эти данные подтверждаются результатами испытаний на изгиб, в которых образцы с покрытиями  $(\text{TiCr})\text{N}$  и  $(\text{ZrCrHf})\text{N}$  показали более высокие результаты.

2. Для формирования высоких остаточных напряжений сжатия в керамических образцах подходит метод доводки с плоскопараллельной кинематикой и отношением скоростей вращения  $N_L=2.0$ . По сравнению с  $N_L=0.5$  более высокое отношение скоростей вращения и следующие из этого низкие и средние скорости вращения шлифовальных кругов/притиров способствуют повышению остаточных напряжений сжатия в поверхности субстрата.

3. Целенаправленное формирование в поверхности субстрата остаточных напряжений сжатия до их определенной величины положительно сказывается на прочности адгезии покрытия с субстратом, твёрдости и пределе прочности при изгибе. Среди негативных последствий можно отметить некоторое увели-

чение шероховатости поверхности образцов, что свидетельствует о микроструктурных повреждениях поверхностного слоя субстрата.

4. При непрерывном резании (точении) экспериментально полученные результаты стойкости керамических режущих пластин без покрытия были близки к результатам, полученных при обработке инструментом с многослойными покрытиями. При прерывистом резании (фрезеровании) хорошие результаты были достигнуты только при использовании пластин  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с многослойным покрытием, обладающих повышенным сопротивлением переменной механической нагрузке, особенно при резании высокопрочного чугуна. Эти результаты подтверждаются данными по остаточным напряжениям результатами испытаний на изгиб, в которых образцов из  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , особенно с покрытиями  $(\text{TiCr})\text{N}$  и  $(\text{ZrCrHf})\text{N}$ , показали высокие результаты.

### *Список литературы*

1. Григорьев С.Н. Современное вакуумно-плазменное оборудование и технологии комбинированного упрочнения инструмента и деталей машин / С.Н. Григорьев // Технология машиностроения. – 2004. – №3. – С. 2–26.

2. Григорьев С.Н., Волосова М.А. Технология комбинированного поверхностного упрочнения режущего инструмента из оксидно-карбидной керамики / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова // Вестник машиностроения. – 2005. – №9. – С. 32–36.

3. Волосова М.А. Повышение эксплуатационных характеристик керамических режущих инструментов с помощью абразивной обработки и нанесения

покрытий / М.А. Волосова, С.Н. Григорьев, Н.Ю. Черкасова // Технология машиностроения. – 2012. – №1. – С. 36–40.

4. Grigoriev S. Broad fast neutral molecule beam sources for industrial – scale beam – assisted deposition / S. Grigoriev, Y. Melnik, A. Metel // Journal of Surface and Coating Technology. – 2002. – Т. 156. №1–3. – P. 44–49.

5. Андреев А.А. Технологические особенности получения композиционных наноструктурных покрытий вакуумно-плазменными методами / А.А. Андреев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев // Технология машиностроения. – 2010. – №7. – С. 47–52.

6. Григорьев С.Н. Разработка технологии нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент на основе минералокерамики и кубического нитрида бора / С.Н. Григорьев, В.Г. Боровский // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2013. – №3. – С. 5–6.

7. Uhlmann E. Development and application of coated ceramic cutting tools / E. Uhlmann, T. Huehns, S. Richarz [et al] // Industrial ceramics. Special Issue SI. – Sep., 2009. – P. 113–118.

8. Grigoriev S.N. Broad beam source of fast atoms produced as a result of charge exchange collisions of ions accelerated between two plasmas / S.N. Grigoriev, Yu.A. Melnik, A.S. Metal [et al] // Journal of Instruments and experimental techniques. – 2009. – №4. – P. 602–608.

9. Grigoriev S.N. Broad fast neutral molecule beam sources for industrial – scale beam – assisted deposition / S.N. Grigoriev, Yu.A. Melnik, A.S. Metal [et al] // Journal of Surface and Coating Technology. – 2002. – №1–3. – P. 44–49.

*Дин Кай Цзянь* – канд. техн. наук, профессор Технологический университет Китая, Китайская Народная Республика.

---