

УДК 621.9

*Дин Кай Цзянь*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ  
СО СЛОИСТЫМИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

***Аннотация:** статья посвящена проблеме развития материаловедения. Автор уделяет особое внимание вопросу разработки новых материалов, что связано со все возрастающими требованиями к повышению уровня их физико-химических, технологических и эксплуатационных свойств, созданием технологий получения и производства. Обосновывается мысль о том, что особый научный и практический интерес представляет разработка и получение инструментальных материалов (ИМ). В статье также излагаются взгляды на производительность труда в отраслях промышленности и качество обработки деталей машин, что в значительной степени зависит от применяемого режущей керамики (РК).*

***Ключевые слова:** инструментальный материал, режущей керамики, наноструктурированные покрытия, метод фильтруемого вакуумно-дугового осаждения, ФВДО, высокопрочная композиционная керамика, ВКК.*

***Abstract:** the article deals with the problem of the development of materials science. The author pays special attention to the issue of the development of new materials, which is associated with the increasing requirements to boost the level of their physical, chemical, technological and operational properties and the creation of*

*technologies for obtaining and production. The idea is substantiated that the development and production of instrumental materials is of particular scientific and practical interest. It is known that in mechanical engineering and other industries, labor productivity and the quality of machining of machine parts largely depends on the applied cutting ceramics (CC). The choice of material for the cutting part of the tool over the centuries has been a priority for science, technology and has been closely associated with the development of metallurgy, and more recently with powder metallurgy, the influence of concentrated energy flows, as well as physics and chemistry of solids.*

**Keywords:** *tool material, cutting ceramics, nanostructured coatings, method of filtered vacuum-arc deposition, FVDO, High – strength composition ceramics, HCC.*

*Введение.* По оценкам ведущих зарубежных и отечественных экспертов широкое применение керамического инструмента, не содержащего в своем составе дефицитных компонентов типа W, Ta, Nb, Co и др., в технологиях лезвийной формообразующей обработки будущего приведет к значительным экономическим и экологическим эффектам [1; 2].

Исследовали режущие свойства высокопрочной композиционной керамики (ВКК) с многокомпонентным функциональным покрытием (МФП) расширенной области технологического применения, в том числе и для экологически чистого высокоскоростного «сухого» резания. Разработка ВКК с МФП является актуальным научным направлением создания композиционных материалов с оптимальным сочетанием поверхностных и «объёмных» свойств в едином геометрическом теле изделия и агрегата.

### 1. Объект исследований.

Объектом исследований служили сменные многогранные пластины (СМП), в которых рационально сочетали свойства твердого сплава (достаточная прочность и вязкость), режущей керамики (высокая твердость теплостойкость и износостойкость) и многокомпонентное функциональное покрытие (благоприятная трансформация контактных процессов при резании, «залечивание» поверхностных дефектов керамики) (рис. 1) [2]. Подобный композиционный материал получил наименование «высокопрочная композиционная керамика» (ВКК) с функциональным покрытием.



Рис. 1. Концептуальная схема архитектуры

высокопрочной композиционной керамики (ВКК)

с наноструктурированным многослойно-композиционным покрытием

Использование вязкого и прочного субстрата (3) из вольфрамкобальтовых или безвольфрамовых твердых сплавов позволяет придать композиционной керамике прочностные свойства, близкие к соответствующим показателям прочных марок твердых сплавов ( $\sigma_{\text{и}} \approx 1350 - 1400$  МПа). Применение керамических слоев (2) позволяет заметно повысить износостойкость СМП из ВКК, а также сопротивляемость разрушению в условиях вибраций (виброустойчивость) и действия знакопеременных термомеханических напряжений (усталостная прочность). Формирование поверхностных слоёв (1) в виде покрытий на основе наноструктурированной композиционно – многослойной архитектуры позволяет существенно повысить износостойкость керамического слоя (2) и ВКК в целом. Кроме того, комбинированное воздействие на поверхность керамики среднеэнергетическими ионами металлогазовой плазмы с последующим синтезом ионно-плазменных износостойких покрытий на основе композиций различных соединений тугоплавких переходных металлов позволяет «залечить» наиболее опасные поверхностные дефекты керамического слоя (2), формируемые в процессе его изготовления (субмикротрещины, несплошности, субмикро- и микропоры, поверхностные области с растягивающими остаточными напряжениями и т. д.).

В статье в качестве основных процессов формирования покрытий на субстратах из ВКК использованы физические (PVD) процессы (Metal Vapor Vacuum Arc-MeVVA или КИБ), а также инновационная разновидность процессов КИБ-MeVVA, которая получила наименование «фильтруемое вакуумно-дуговое осаждение» (ФВДО) покрытий [1].

В настоящее время методы КИБ-MeVVA широко используются ведущими производителями режущего инструмента из-за высокой надежности, универсальности, возможности получения покрытий практически любой архитектуры, состава, структуры с обеспечением экологической чистоты процессов в сравнении с методами и процессами химического осаждения покрытий (методы CVD) [4; 5].

## *2. Исследование влияния параметров процесса ФВДО на характеристики ВКК с покрытием.*

Проведенные исследования [6; 7] позволили установить достаточно влияние условий получения покрытий на их фазовый состав и структуру. К таким условиям можно отнести:

- состав катода;
- параметры процесса синтеза покрытия (ток дуги –  $I_d$ , напряжение смещения –  $U_c$ , давление реакционного газа –  $P_N$ );
- свойства и субструктура поверхности субстрата.

Анализируя особенности процессов ФВДО, следует выделить ряд параметров многокомпонентного функционального покрытия (МФП), которые необходимо контролировать для объективной оценки свойств системы «ВКК-МФП», применительно к операциям резания. К параметрам МФП относятся:

- толщина и параметры архитектуры;
- прочность адгезии по отношению к субстрату;
- микротвердость;
- вязкость разрушения (хрупкость);

– химический состав.

Толщина МФП и состав ВКК с МФП. Оценку толщины МФП производили методом «калотест» (Kalotest) на сферических шлифах, полученных абразивным шариком при микроразрушении. Оценивали среднеарифметическое значение толщины МФП по результатам 5-ти измерений на плоской поверхности твердосплавных СМП из ВКК с МФП. Контрольную оценку толщины МФП производили также по электронно-сканирующим снимкам, полученным на микроскопе SEM JSM-6480LV, который использовали также для рентгеноспектральных исследований состав слоев 1 и 2 ВКК – ФМП.

Результаты сравнительных исследований СМП из ВКК (слои 2 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $\text{TiC}$  –  $\text{TiN}$  и 3 –  $\text{TiCN}$  –  $\text{Ni}$ ,  $\text{Mo}$ ) с МФП (слой 1 –  $\text{Ti}$  –  $\text{TiN}$  –  $(\text{TiAl})\text{N}$  (ФВДО)) представлены на рис. 2 и 3, которые позволяют отметить следующее.

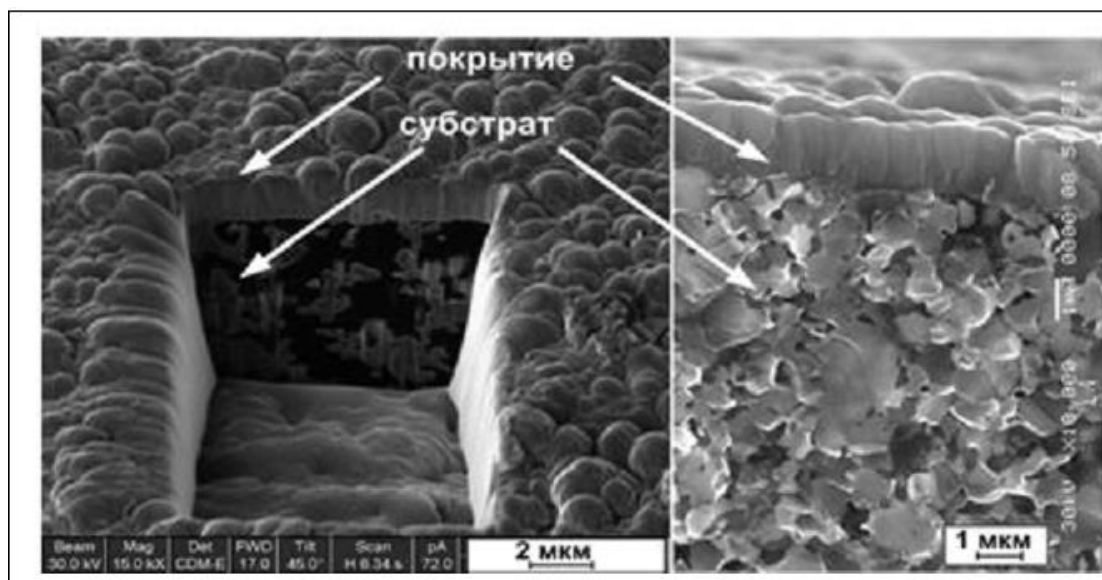


Рис. 2. Микрофотографии ВКК –  $\text{Ti}$  –  $\text{TiN}$  –  $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$  (ФВДО), полученные на установке Strata<sup>TM</sup> FIB201 (слева) и микроскопе SEM-JSM-6480LV (справа)

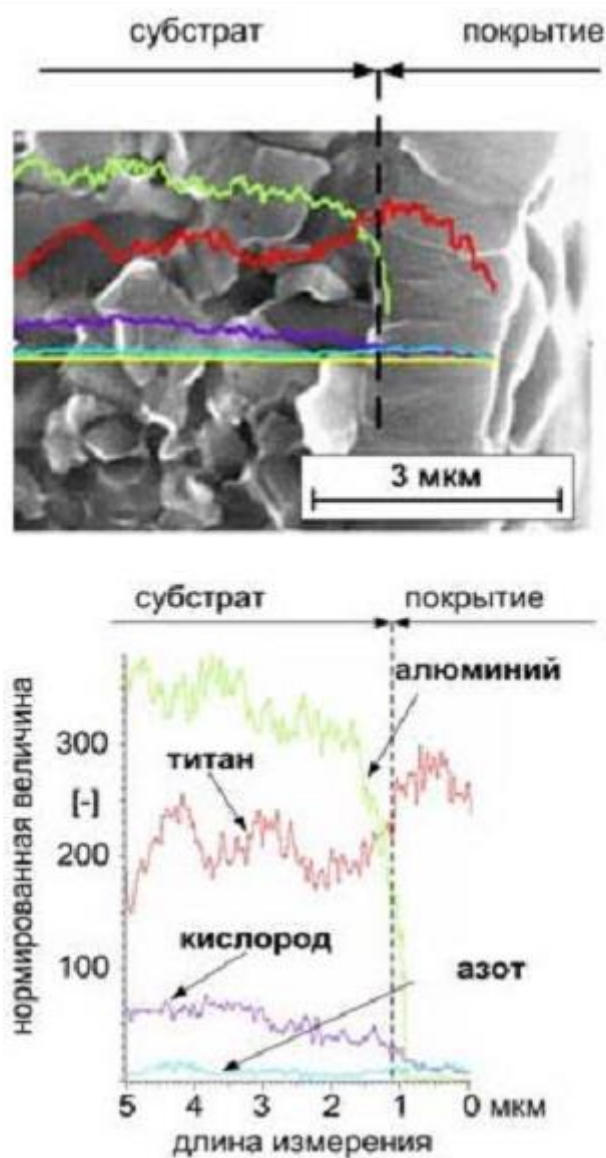


Рис. 3. Микрорентгеноспектральный анализ слоев 2 и 1 СМП из ВКК с МФП, произведенный на электронно-сканирующем микроскопе SEM JSM-6480LV

Установлено, что слой 2 субстрата из ВКК включает следующие элементы: Al, Ti, O, что соответствует составу керамического слоя 2 (см. рис. 1). Некоторое количество азота, обнаруженное в субстрате, скорее всего свидетельствует о диффузии азота из покрытия в субстрат.

Содержание алюминия и кислорода в покрытиях Ti – TiN – (TiAl)N падает до нуля, что соответствует составу покрытия, при этом установлено некоторое увеличение процентного содержания Ti. Результаты показали, что нанесение покрытия, в составе которого содержатся такие же химические элементы, как и в субстрате, не ведет к значительному изменению таких свойств, как микротвердость.

Результаты оценки влияния параметров  $I_{Ti}$ ,  $U_C$ ,  $P_N$  процессов КИБ-МеVVA и ФВДО на толщину покрытия на основе системы Ti – TiN –  $Ti_{0.22}Al_{0.22}N_{0.56}$ , нанесенного на твердосплавные СМП из ВКК, представлены на рис. 4 и 5.

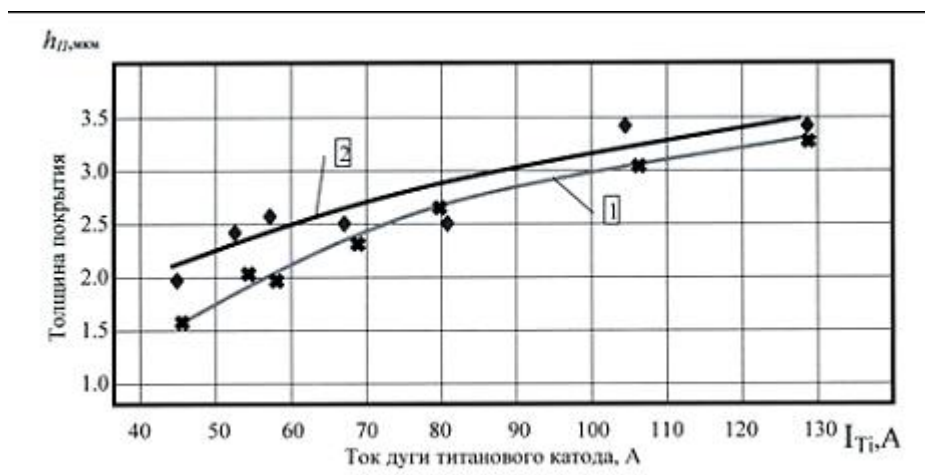


Рис. 4. Влияния тока дуги  $I_{Ti}$  на толщину  $h_P$  ФП на основе системы Ti – TiN – TiAlN: 1 – МФП, процесс КИБ-МеVVA; 2-МФП, процесс ФВДО



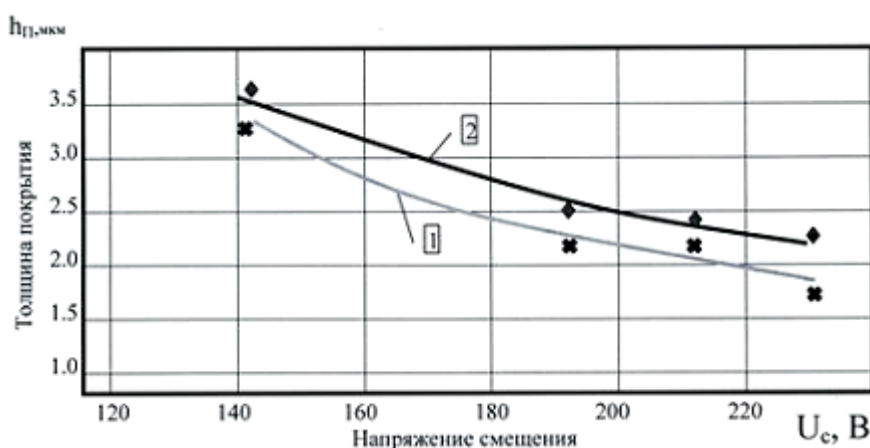


Рис. 5. Влияние напряжения смещения  $U_c$  на толщину  $h_{Ti}$  МКП: 1-МФП, процесс КИБ-МеVVA; 2-МФП, процесс ФВДО

Установлено, что для исследуемых процессов КИБ-МеVVA и ФВДО с ростом величины тока титанового катода  $I_{Ti}$  толщина МФП увеличивается, а с ростом напряжения смещения  $U_c$  – уменьшается, при этом давление азота  $P_N$  вакуумной камеры установки ВИТ – 2 при нанесении МФП не оказывало существенного влияния на толщину покрытия.

Следует отметить, что, несмотря на уменьшение весовой массы вещества на единицу площади вследствие сепарации макро- и микрокапельной составляющей пароионного потока для процесса ФВДО по сравнению с процессом КИБ-МеVVA, толщина покрытия для обоих процессов для всего исследуемого диапазона параметров процессов нанесения МФП отличается весьма незначительно (см. рис. 4 и 5). Указанное связано с более высокой скоростью пароионного потока для процесса ФВДО [7], что несомненно компенсирует несколько меньшую плотность осаждаемого конденсата.

Адгезионная прочность. Оценку прочности адгезии в системе «МКП – субстрат» в зависимости от параметров процессов КИБ-MeVVA и ФВДО производили методом скрайбирования («Scratchtest») по критическому значению усилия, прикладываемого к скрайбирующему (царапывающему) индентору, при котором происходит разрушение покрытия вдоль царапины, а также методом вдавливания конуса твердомера Роквелл согласно стандарту VDI-3198 (стандарт DIN 50 103 T1.3.84).

В качестве примера на рис.6 показано влияния  $I_{Ti}$  на критическое значение силы  $P_{кр}$ , при которой происходит отслаивание покрытия вдоль царапины.

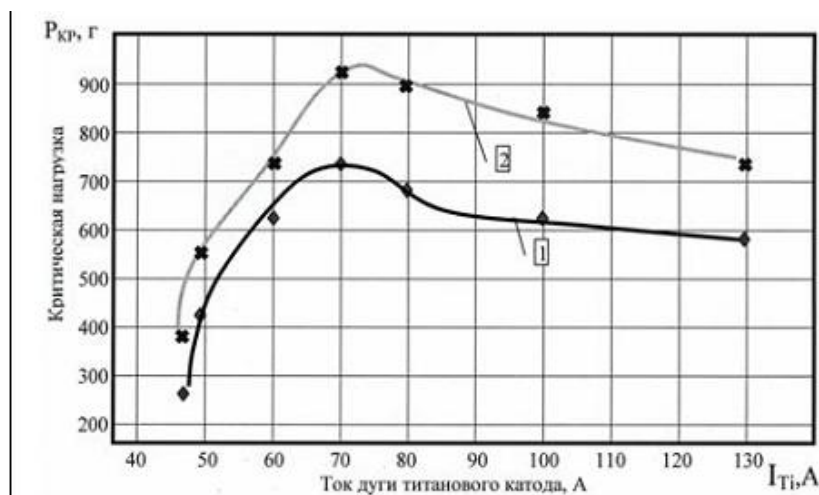


Рис. 6. Зависимость критической (разрушающей) нагрузки от тока титанового катода  $I_{Ti}$  для МКП, осажденного на СМП из сплава Т14К8: 1-МКП, КИБ-MeVVA; 2-МКП, ФВДО

Анализ данных по исследованию параметров  $I_{Ti}$ ,  $U_c$ ,  $P_N$  на критическую силу позволяет отметить следующее.

Основные параметры процессов вакуумно-дугового осаждения МФП оказывают значительное влияние на один из важнейших параметров инструмента с по-

крытием прочность адгезии между покрытием и субстратом. При увеличении параметров синтеза МФП  $I_{Ti}$ ,  $U_C$  и  $P_N$  критическая нагрузка  $P_{кр}$  имеет выраженный экстремальный характер, причем во всех случаях для наноструктурированных МФП, формируемых при использовании процесса ФВДО, отмечается более высокая прочность адгезионной связи по сравнению с аналогичным параметром для МФП, осаждаемого при использовании стандартной технологии КИБ-МеVVA. Наиболее сильное влияние на адгезию оказывает ток дуги (рис. 6), причем при  $I_{Ti} = 65\text{--}70$  А сила  $P_{кр}$  разрушения МКП при царапании алмазным индентором достигает 750 гр и 920 гр для процессов осаждения КИБ-Ме VVA и ФВДО соответственно.

Заметно большая прочность адгезии МФП, формируемых при использовании процессов ФВДО, по видимому, связана с зарождением большого количества центров конденсации слоев МКП и центров адгезии с субстратом, чем для процессов КИБ-МеVVA, а также более высокими значениями энергии и скорости конденсируемых ионов, что способствует интенсификации диффузионных процессов между адгезионным подслоем (3) МКП и субстратом.

### *3. Исследование режущих свойств инструмента из ВКК с покрытием (МКП).*

*Методика исследований.* Исследования режущих свойств режущего инструмента, оснащенного СМП из ВКК с разработанными составами МФП, для оценки его эффективности проводили при продольном точении.

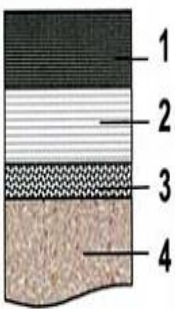
*Обрабатываемый материал.* При проведении исследований использовали закаленную сталь 50Г с твердостью HRC 52–54 и высоколегированную закаленную сталь X53CrMoV12 с твердостью HRC 58–60, а также закаленную сталь ХВГ с твердостью 58–60.

*Оборудование.* Для возможности проведения исследований, близких к производственным, использовали стенды на базе универсального токарного станка 16К20, а также токарного станка с ЧПУ GU 600, оснащенных устройствами для измерения сил резания, шероховатости обработанной поверхности.

*Режущий инструмент.* Объектом исследования служили СМП из ВКК и стандартных твердых сплавов формы SNUN и SNGN, которые закрепляли в специальные державках повышенной жесткости, что обеспечивало следующие значения геометрических параметров режущей части инструмента: для СМП формы SNUN:  $\gamma = -7^\circ$ ;  $\alpha = 6 - 8^\circ$ ;  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ;  $\lambda = -5^\circ$ ;  $r = 0.8 - 1.2$  мм; для СМП формы SNGN:  $\gamma = -7^\circ$ ;  $\alpha = 6 - 8^\circ$ ;  $\varphi = 75^\circ$ ;  $\varphi_1 = 15^\circ$ ;  $\lambda = 0^\circ$ ;  $r = 0.8 - 1.2$  мм. Архитектура и назначение элементов МФП представлены в таблице 1.

Таблица 1

### Архитектура МФП

Архитектура слоя 1 МФП	Составы слоев МФП	Функциональное назначение
 <p>Рис. 7. Архитектура слоя 1 МФП</p>	<p>1) наружный слой с наноразмерными субслоями (пример: (Ti, Al; TiCrAlN; ZrCrAlN, TiCrAlSiN и др.);</p> <p>2) промежуточный слой с наноразмерными субслоями (пример: TiN, ZrN, CrN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.);</p> <p>3) адгезионный подслой (пример: Ti, Zr, Cr, TiN, CrN и др.)</p>	<p>1) повышение износостойкости композита ВКК, снижение физико-химической и адгезионной активности ВКК, управление контактными процессами;</p> <p>2) обеспечение адгезии между слоями 1 и 3, барьерные функции (относительно диффузии, тепловых потоков и др.);</p> <p>3) обеспечение высокой адгезионной прочности между слоем 3 и керамическим субстратом (слой 4)</p>

Результаты исследований представлены на рис. 8. Оценка кинетики развития очагов изнашивания СМП из ВКК с МФП характерна существенно меньшей интенсивностью изнашивания по сравнению с контрольными СМП из ВКК (без покрытия). Такой вывод соответствует результатам проведенных исследований и соответствует ранее полученным результатам исследований интенсивности изнашивания керамических инструментов с покрытием [2; 6; 7].

Для уяснения кинетики изнашивания СМП из ВКК с различными вариантами покрытий были получены графические зависимости изнашивания от времени резания  $\tau$ -« $h_3 - \tau$ » и изнашивания от длины пути резания  $L$ -« $h_3 - L$ » (рис. 8 а, б). Анализ данных рисунка позволяет отметить следующее:

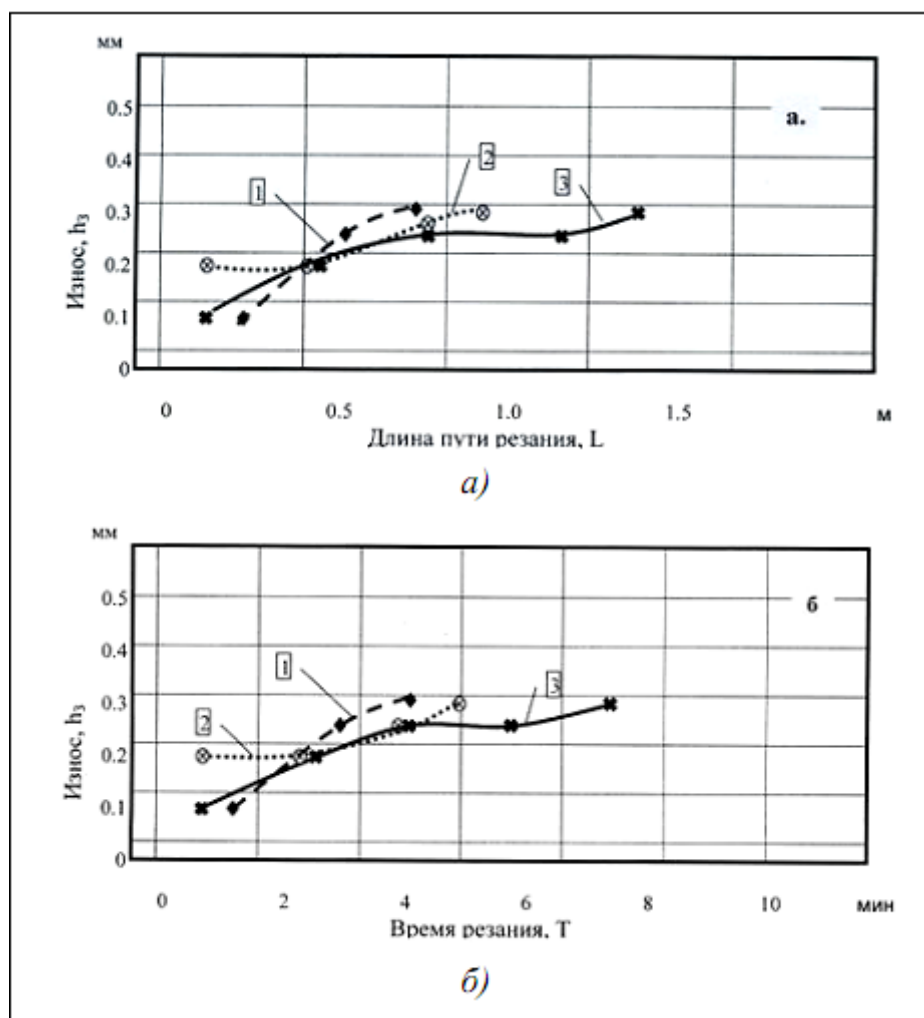


Рис. 8. Влияние длины пути  $L(a)$  и времени  $T$  резания (б) на изнашивание задней поверхности инструмента  $h_3$  для инструмента, оснащенного СМП из ВКК при точении закаленной стали X53CrMoV12 с  $v = 350$  м/мин;  $t = 0.2$  мм;  $S = 0.15$  мм/об: 1 – контрольные СМП из ВКК без покрытия; 2 – СМП из ВКК со стандартным покрытием TiN (КИБ – MeVVA); 3 – СМП из ВКК с МФП на основе наноструктурированной системы Ti – TiN – (Ti, Al)N (ФВДО)

1. Интенсивность изнашивания для СМП из ВКК с МФП заметно снижается по сравнению с изнашиванием СМП из ВКК без покрытий (см. рис. 8, сравнение кривую 1 с кривыми 2 и 3). Максимальное снижение интенсивности изнашивания при критическом значений  $h_3 = 0.3$  мм имеют СМП с МФП на основе наноструктурированной системы Ti – TiN – (Ti, Al), получаемой при использовании вакуумно – дугового процесса ФВДО (см. рис. 8, кривая 3), стойкость которых превышает в 1.8–2.0 раза стойкость контрольных СМП из ВКК без покрытия, но и в 1.5–1.7 раза превышает стойкость СМП из ВКК со стандартным покрытием TiN (КИБ-MeVVA).

2. Повышение износостойкости СМП из ВКК с разработанным МФП связано с наиболее сильным снижением силовых и температурных нагрузок на контактные площадки инструмента, оснащенного СМП из ВКК с Ti – TiN – (Ti, Al).

3. Отмечено более интенсивное изнашивание СМП из ВКК с покрытием на стадиях приработочного изнашивания инструмента, что связано с более интенсивным разрушением более хрупких локальных структур керамического слоя

ВКК с покрытием в период приработки и обуславливает снижение интенсивности изнашивания инструмента в период нормального изнашивания.

4. Установлено также, что осаждение многокомпонентных функциональных покрытий различного состава и структуры на ВКК – субстраты позволяет направленно управлять процессами контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материала за счет роста адгезии, увеличения длины полного контакта стружки с передней поверхностью и соответствующего снижения величины нормального контактного напряжения. Указанное является главной причиной снижения вероятности хрупкого разрушения керамики и приводит к сбалансированного изнашиванию контактных площадок инструмента при весьма высокой сопротивляемости такому изнашиванию режущей керамики всех типов.

---

### *Список литературы*

1) Верещака А.С. Тенденции совершенствования технологиях производственных систем / А.С. Верещака // Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – С. 16–38.

2) Кириллов А.К. Разработка и исследование технологии сухого резания труднообрабатываемых материалов с компенсацией физических функций СОТС / А.К. Кириллов, А.С. Верещака, А.А. Козлов [и др.] // СТИН. – 2009. – №1. – С. 35–40.

3) Верещака А.С. Функциональные покрытия для режущего инструмента / А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №6. – С. 28–37.

4) Григорьев С.Н. Модификация поверхности режущего инструмента из быстро режущей стали путем вакуумно-плазменной обработки / С.Н. Григорьева, М.А. Волосова, В.Н. Климов // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – №5 – С. 11–18.

5) Волосова М.А. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном производстве / М.А. Волосова, С.Н. Григорьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №6. – С. 37–42.

6) Верещака А.С. Основные аспекты применения и совершенствования режущих инструментов с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – СТИН. – 2000. – №9. – С. 33–39.

7) Vereshchaka A. High Precision/ High Speed Machining Technologies / A. Vereshchaka, W.Y. Lee. – Cheonan: Edition of HRDI, 2002. – 393 p.

---

**Дин Кай Цзянь** – канд. техн. наук, профессор Технологического университета Китая, Китайская Народная Республика, Гуанчжоу.

---