

УДК 621.91

А.С. Верещака, д-р техн. наук, А.А. Верещака, канд. техн. наук,  
Ю.И. Бубликов, канд. физ.-мат. наук, М.Г. Оганян, Москва, Россия

## **НАНОРАЗМЕРНЫЕ МНОГОСЛОЙНО-КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ**

*Запропоновано спосіб підвищення працездатності твердосплавних кінцевих фрез шляхом нанесення функціональних покриттів, які компенсують (згладжують) циклічні термомеханічні напруження, що формуються під час робочого і холостого ходів інструменту при переривчастому різанні. Проаналізовано результати атестаційних випробувань різальних властивостей твердосплавних інструментів з розробленими багатошарово-композиційними покриттями в широкому діапазоні режимів різання при фрезеруванні.*

*Предложен способ повышения работоспособности твердосплавных концевых фрез путем нанесения функциональных покрытий, компенсирующих (сглаживающих) циклические термомеханические напряжения, формируемые во время рабочего и холостого ходов инструмента при прерывистом резании. Проанализированы результаты аттестационных испытаний режущих свойств твердосплавных инструментов с разработанными многослойно-композиционными покрытиями в широком диапазоне режимов резания при фрезеровании.*

*A method is proposed to improve the working capacity of cemented-carbide end-milling cutters by means of deposition of functional coatings, which compensate (smooth) cyclic thermo-mechanical stresses generated in the cutting and noncutting passes of the tool during discontinuous cutting process. The results of validation testing of cutting properties of cemented-carbide tools with developed multilayer-composite coatings in a wide range of cutting modes are analyzed.*

### **1. Введение**

Процессы фрезерования концевыми фрезами относятся к типичным процессам прерывистого резания, при которых режущие зубья инструмента совершают циклический контакт с обрабатываемым материалом и последующий холостой ход. Подобные процессы обладают существенным отличием от традиционных непрерывных процессов резания значениями и характером изменения функциональных параметров резания (силы резания, тепловое состояние, характер контактирования инструментального и обрабатываемого материала, интенсивность и механизм изнашивания и т.д.).

Механизм изнашивания зубьев инструмента в значительной степени определяется циклическим изменением термомеханических напряжений, способствующих формированию фронта усталостных микротрещин, резко интенсифицирующих изнашивание. Причём указанный механизм более характерен для твёрдосплавного инструмента в сравнении с быстрорежущим инструментом, материал которого более устойчив относительно усталостного разрушения с первоначальным формированием усталостных трещин [1,2].

Стойкость инструмента при прерывистом резании сильно зависит от продолжительности холостого и рабочего ходов его зуба, так как температура прогрева (рабочий ход) и охлаждения (холостой ход) являются причиной формирования напряжений (растягивающих и сжимающих). Причём, с увеличением времени рабочего цикла зуба резко возрастает его нагрев и, соответственно, формируются критические растягивающие напряжения, а с увеличением времени холостого хода увеличивается время остывания зуба, формируются напряжения противоположного знака – сжимающие [2]. В этой связи операции фрезерования твердосплавным инструментом (особенно, изготовленным из чрезвычайно малотеплопроводных твердых сплавов группы ТК - WC-TiC-Co) обычно выполняют без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Причина этого в том, что СОЖ резко увеличивают перепады температур для рабочего и холостого ходов, что вместо ожидаемого повышения стойкости инструмента может привести к заметному ее снижению вследствие интенсивного формирования трещин усталости и отказа инструмента в результате выкрашиваний режущих лезвий.

Таким образом, целью настоящей работы являлась разработка способа повышения работоспособности концевых фрез на основе нанесения функциональных покрытий, компенсирующих (сглаживающих) циклические термомеханические напряжения, формируемые во время рабочего и холостого ходов инструмента при прерывистом резании.

## **2. Предпосылки**

Эффективным способом повышения работоспособности концевых фрез из твёрдого сплава, является применение наноразмерных многослойно-композиционных покрытий, способных оказывать существенное влияние на контактные процессы и термомеханические напряжения, действующие на инструмент при чередовании рабочих и холостых ходов инструмента [1]. С учётом специфических условий процессов фрезерования, функциональные покрытия, осаждаемые на инструмент, работающий в условиях прерывного резания, должны отвечать следующим требованиям.

1. Обеспечить максимальное снижение эквивалентных напряжений в режущем клине инструмента для повышения его формоустойчивости путем создания благоприятных условий контактного взаимодействия формируемой стружки и инструментального материала, особенно на передней поверхности, что предопределяет долговечность работы покрытий до разрушения с сохранением их положительного влияния на изнашивание инструмента.

2. При синтезе покрытия необходимо создавать условия формирования в нем высокого уровня остаточных сжимающих напряжений, что снижает вероятность формирования в покрытии трещин усталости и будет способствовать повышению времени работы инструмента до полного отказа.

3. В процессе формирования покрытия необходимо обеспечивать условия, при которых его адгезионная прочность относительно

твёрдосплавного субстрата будет соответствовать максимальному уровню, что также позволит увеличить его долговечность и положительные эффекты.

Анализ сформулированных требований к покрытиям для фрез свидетельствует о неэффективности применения покрытий монослойного типа. Например, наименьшие значения эквивалентных напряжений в режущем клине инструмента обеспечивают покрытия на основе нитридов тугоплавких элементов IV-VI групп Периодической таблицы, при этом минимальная их величина имеет место для инструмента с многоэлементными нитридными покрытиями. С другой стороны, карбонитридные и многоэлементные нитридные покрытия уступают одноэлементным нитридным покрытиям по прочности сцепления с инструментальной основой. Таким образом, перечисленные выше требования можно реализовать только в виде многослойно-композиционного покрытия (МКП), которое должно иметь три слоя (рис. 1).

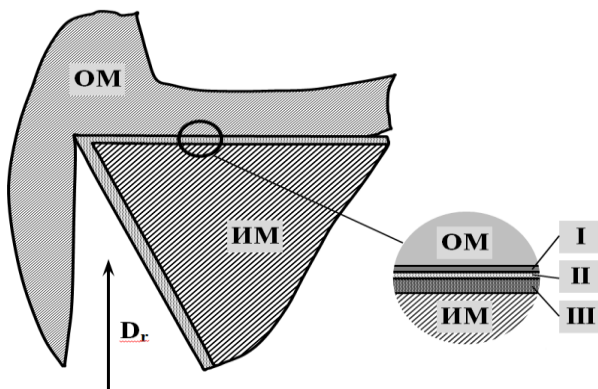


Рисунок 1 – Архитектура многослойно-композиционного покрытия (МКП) для концевых фрез:

I – износостойкий слой; II – промежуточный слой;  
III – адгезионный подслоя

В работе предлагается использование трехкомпонентного МКП, которое должно обеспечивать гамму функций, способствующих повышению стойкости концевых фрез:

I – износостойкий слой обеспечивает снижение уровня адгезионного взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов для максимального снижения эквивалентных напряжений в режущем клине инструмента и повышения его формоустойчивости; в процессе формирования

слоя I необходимо обеспечивать высокий уровень остаточных сжимающих напряжения для снижения интенсивности трещинообразования в покрытии;

II – промежуточный слой обеспечивает высокую прочность адгезии между слоями I и III, а также выполняет дополнительные функции, связанные со снижением интенсивности тепловых потоков от контактных площадок инструмента в инструментальный материал, служит барьером интердиффузии между инструментальным и обрабатываемым материалами и т.д.

III – адгезионный подслой обеспечивает высокую прочность адгезионной связи между инструментальным материалом и покрытием в целом. Структурные параметры и механические свойства МКП во многом определяются параметрами архитектуры, к которым можно отнести толщины отдельных слоев МКП и толщину МКП в целом (рис. 2) [1, 2].

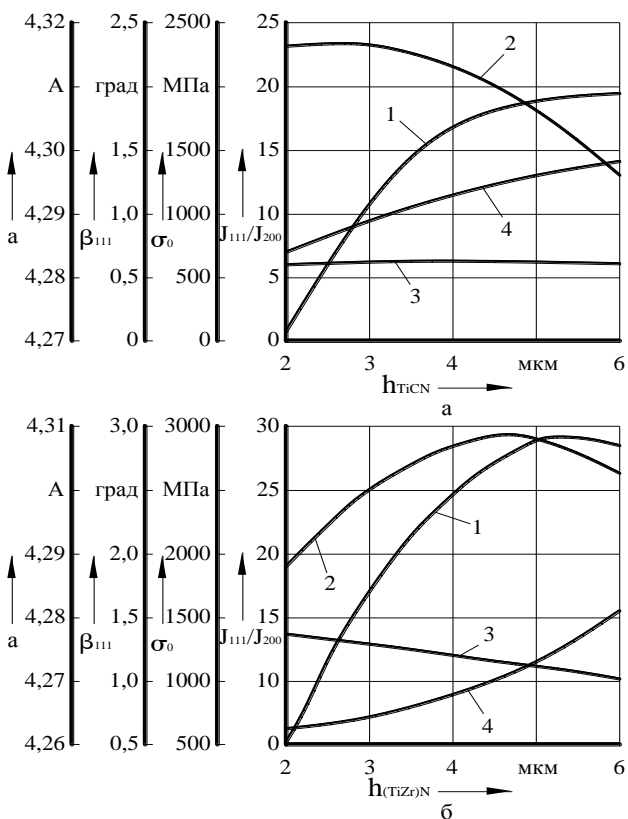


Рисунок 2 – Влияние толщины износостойкого слоя (на примере TiCN (а) и (Ti,Zr)N (б)) на период кристаллической решетки  $a$  (1), текстуру  $J_{111}/J_{200}$  (2), полуширину рентгеновской линии  $\beta_{111}$  (3) и остаточные напряжения  $\sigma_0$  (4) многослойных покрытий толщиной 8 мкм [2]

Увеличение толщины износостойкого слоя повышает период его кристаллической решётки «а», что свидетельствует о росте степени ее искажения. Независимо от толщины покрытия характер изменения периода решетки сохраняется одинаковым. Параметр текстуры  $J_{111}/J_{200}$  в целом имеет тенденцию к росту с увеличением общей толщины покрытия, что говорит об увеличении доли кристаллитов с ориентацией в кристаллической плоскости 111. При этом необходимо отметить, что наибольшее отличие по абсолютной величине параметра  $J_{111}/J_{200}$  между МКП разной толщины наблюдается при малой толщине износостойкого слоя 1 (см. рис. 1). С увеличением толщины слоя 1 это различие уменьшается, при этом абсолютные значения параметра текстуры снижаются.

Преимущественная ориентация кристаллитов в одинаковом направлении способствует анизотропии свойств материала МКП, что с одной стороны может благоприятно влиять на эксплуатационные параметры, приводя, например, к росту микротвердости и износостойкости. Однако, при разрушении МКП в результате процессов трещинообразования, развитие трещин может происходить по границам кристаллитов, и в этом случае одинаковая ориентация может сыграть отрицательную роль.

Изменение толщины отдельных слоев покрытия практически не влияет на величину  $\beta_{111}$ . Данный параметр изменяется в пределах 10% при различном сочетании слоев МКП. Превалирующее влияние на него оказывает общая толщина МКП. Например, увеличение толщины МКП с 6 мкм до 10 мкм приводит к росту величины  $\beta_{111}$  на (30-35) % . Для МКП с верхним слоем (Ti,Zr)N характерны более высокие значения величины  $\beta_{111}$ , что позволяет говорить о более высоких механических свойствах данных покрытий. Учитывая, что величина  $\beta_{111}$  свидетельствует об упрочнении материала МКП, можно предположить, что большую микротвердость будут иметь МКП с толщиной верхнего слоя в пределах 3-5 мкм, для которых отмечаются большие значения полуширины рентгеновской линии.

Изменение толщины отдельных слоев МКП существенно отражается на величине остаточных напряжений (см. рис. 2), величина которых растёт с повышением общей толщины покрытия. Так, например, для покрытия Ti-TiN-TiCN, увеличение толщины слоя TiCN вызывает рост  $\sigma_0$ , уровень которых выше для более толстых МКП. Согласно [1,2], увеличение уровня остаточных напряжений косвенно свидетельствует об увеличении микротвердости покрытия, рост которой положительно отражается на работоспособности инструмента. Повышение толщины слоев TiN или TiCN приводит к сближению структурных параметров МКП к значениям соответствующих параметров однослойных покрытий TiN и TiCN, что указывает на отсутствие, либо слабое влияние слоев на структурные параметры друг друга.

В работе [2] было показано, что максимальные остаточные напряжения имеют МКП общей толщиной 10 мкм. Для покрытий с толщинами 6 и 8 мкм

уровень напряжений на 26-31 % ниже в зависимости от толщины верхнего слоя, что связано с меньшим количеством дефектов в более тонких покрытиях, при этом изменение структурных параметров МКП с верхними слоями TiZrN и TiCN при варьировании толщин его слоев носит одинаковый характер.

Микротвердость МКП также зависит от толщины и состава износостойкого слоя. Независимо от общей толщины МКП увеличение толщины износостойкого слоя ведет к росту микротвердости. При этом влияние слоя (Ti,Zr)N на величину  $H_u$  более значительно, чем TiCN. Так, при общей толщине МКП, равной 6 мкм, увеличение толщины износостойкого слоя с 2 до 4 мкм приводит к росту микротвердости покрытия TiN-TiCN на 14 %, а покрытия TiN-(Ti,Zr)N – на 23,5 %. Данный факт объясняется большей микротвердостью покрытия (Ti,Zr)N по сравнению с TiCN. Такая же тенденция изменения микротвердости наблюдается и для более толстых МКП. Увеличение общей толщины МКП в меньшей степени сказывается на его величине.

Анализ условий высокой термостабильности многокомпонентных нанодispersных нитридных систем переходных тугоплавких металлов при температурах до 800-1000 °С, показывает, что подобные покрытия могут быть получены при использовании процессов фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) [6-9], позволяющих синтезировать четырех - пяти компонентные нитриды на различных субстратах (керамика, твердые сплавы, специальные субстраты) [6-13]. Формирование таких материалов в качестве покрытий связано с процессами нитридообразования в соответствующих системах с появлением нитридных фаз элементов, имеющих наибольшее термодинамические средства к азоту. Замещение соответствующих атомов металлов в металлических подрешетках нитридов другими элементами (Al, Si) приводят к появлению в формируемом материале покрытия значительных микродеформаций (до 1-2 %), повышающих твердость покрытия до 45-50 ГПа. Одновременно с этим, высокий уровень микронапряжений, а так же изменение условий осаждения за счет меняющейся концентрации компонентов ионного потока, образующего при испарении с поверхности катода пятном дуги при энергиях 1-1,2 кЭв, способствуют значительному измельчению зерновой структуры покрытий до наноразмерного уровня. Это, в свою очередь, даёт возможность получить материал, обладающий наряду с высокой твёрдостью достаточно высокой вязкостью. Полученные многокомпонентные покрытия хорошо адаптированы для работы, как в условиях постоянных, так и знакопеременных нагрузок.

### **3. Методика исследований**

Сравнительные экспериментальные исследования работоспособности концевых фрез с покрытием и без покрытия проводили при использовании

цельнотвердосплавных концевых фрез из сплава BK10-XOM, а также специально изготовленных однозубых имитирующих работу торцовых и периферийных зубьев концевых фрез. Использовали однозубые модели фрез, которые исключали влияние на изнашивание инструмента таких параметров фрезерования, как торцовое и осевое биение зубьев.

Модели концевых фрез оснащали сменными многогранными пластинами (СМП) из твердых сплавов BK10-XOM, ВРК-15 квадратной формы (SNUN ISO 513, ГОСТ 19049-80). Геометрические параметры режущей части моделей :  $\gamma_{\phi} = -8^{\circ}$ ;  $\alpha = 8^{\circ}$ ;  $\varphi = 75^{\circ}$ ;  $\varphi_1 = 15^{\circ}$ ;  $\lambda = 0$ . Критерием отказа фрез служил износ по задней поверхности равный  $h_3=0,3-0,4$  мм.

Обрабатываемые материалы, используемые при проведении экспериментальных исследований, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства обрабатываемых материалов

Марка	Физико-механические свойства					
	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$a_n \cdot 10^5$ , Дж·м <sup>-2</sup>	НВ
Сталь 45	550-630	400	17-18	28-60	3-6	255-310
Сплав ВТ9	1050-1250	950-1150	8-12	30	-	-
Сплав ХН77ТЮР	1000	650	20	21	-	-

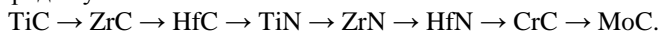
Исследование проводили на вертикально-фрезерном станке модели 6Т12, который полностью соответствовал техническим требованиям при проведении экспериментов. Для получения необходимой информации о составляющих сил резания использовали универсальный тензометрический динамометр УДМ-600, оснащённый интерфейсом и компьютерной программой для обработки полученных экспериментальных данных.

При разработке концепции покрытий для цельнотвердосплавных концевых фрез учитывали особенности контактных процессов, возникающих при фрезеровании широкой гаммы конструкционных материалов. К таким особенностям можно отнести:

- высокий уровень контактных (особенно нормальных) напряжений, возникающих на передней поверхности инструмента из твердого сплава вследствие интенсивного снижения длины (площади) контакта и существенно менее интенсивного уменьшения нормальных нагрузок, действующих на переднюю поверхность;
- концентрацию температурных напряжений на контактных площадках передней и задней поверхностей инструмента, возникающую из-за чрезвычайно низкой теплопроводности твердого сплава и высокого уровня коэффициента его термического расширения;

• практически полное отсутствие застойной зоны обрабатываемого материала и возникающего при ее наличии нароста, выполняющего функции защиты контактных площадок от изнашивания.

Результаты исследований, приведённые в работах [1-4], показали возможности влияния состава, структуры и свойств покрытий на функциональные параметры резания, характеристики контактных процессов и стружкообразование при резании стали твердосплавным режущим инструментом. Значения длин полного контакта  $C_\gamma$ , длины пластичного контакта  $C_{\gamma 1}$ , угла сдвига  $\Phi$ , усадки стружки  $\xi$ , составляющих сил резания  $P_z$  и  $P_y$  зависят не только от состава покрытия, но и от его структуры. При этом значения параметров, влияющих на стружкообразование и контактные процессы, коррелирует с порядковым номером металла соединения (нитриды, карбиды) в каждой из групп (IV – VI) Периодической системы химических элементов с некоторой аномалией для нитридов VI группы. Установлено уменьшение величин  $C_\gamma$ ,  $C_{\gamma 1}$ ,  $\mu_\gamma$ ,  $\mu_\alpha$ ,  $\xi$  для карбидов и нитридов металлов IV – VI групп в порядке убывания:



В работе [1] отмечена также тенденция снижения значений  $C_\gamma$ ,  $C_{\gamma 1}$ ,  $\mu_\gamma$ ,  $\mu_\alpha$ ,  $\xi$  при переходе от карбидов к нитридам, от карбидов тугоплавких металлов IV группы, для которых характерно превалирующее содержание СВАК  $sp^3$ , к карбидам металлов V и особенно VI групп, т.е. при увеличении содержания в покрытии СВАК  $d^5$ . Эта же тенденция отмечена и для нитридов по мере перехода от нитридов металлов IV группы (TiN, ZrN, HfN) к нитридам металлов V группы, т.е. при уменьшении содержания СВАК  $s^2p^6$  и росте СВАК  $d^5$ .

Исходя из рассмотренной концепции покрытий, наиболее пригодных для нанесения на фрезерный инструмент, для исследований были отобраны следующие составы многослойно-композиционных покрытий: Ti-TiN-TiCrAlN; Zr-ZrN-ZrCrAlN.

Нанесение покрытий на цельнотвердосплавные фрезы и твердосплавные СМП для оснащения моделирующего инструмента производили на установке ВИТ-2 конструкции «ИКТИ РАН-СТАНКИН-ЭКОТЕК», реализующей процессы фильтрующего катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) (рис. 3). Установка оснащена специальными источниками ионов, позволяющими реализовать несколько принципиально важных процессов. В частности, установка оснащена дополнительным модулем, позволяющим производить фильтрацию паро-ионного потока и сепарировать нейтральные частицы (микрокапельную фазу) в результате отклонения заряженных частиц ионного потока (ионов, электронов) мощным магнитным полем. Кроме того, данный модуль может выполнять роль ускорителя ионов, служить источником электронов для термоактивации инструмента и источником высокозаряженных ионов газа (например, азота) для стимулированной



химико-термической обработки инструмента [5].

Технология получения покрытий для цельнотвердосплавных фрез и твердосплавным СМП включала: - предварительную очистку и мойку инструмента; - загрузку инструмента в вакуумную камеру установки; - предварительную (глубокую) вакуумизацию камеры, ионную очистку поверхности пластин и термическую активацию пластин; - последовательное осаждение адгезионного подслоя, переходного и износостойкого слоев.

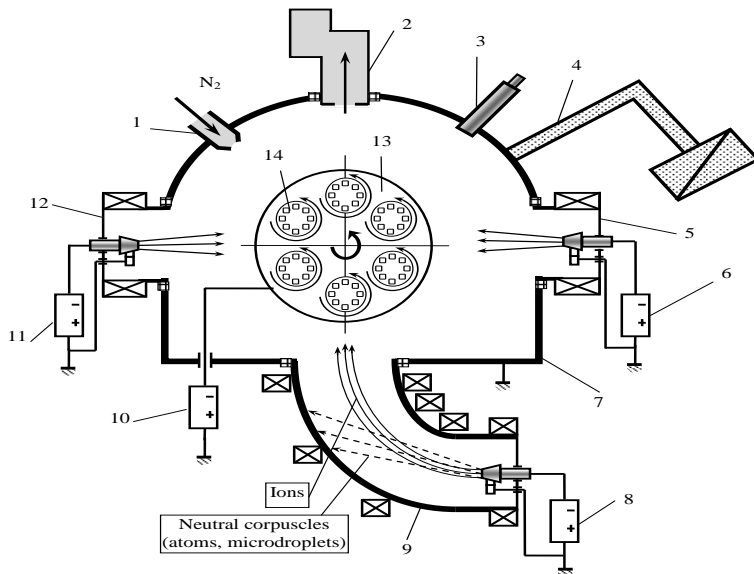


Рисунок 3 – Схема плазменно-дуговой установки ВИТ-2 для нанесения покрытий на режущий инструмент:

- 1 – натекагель реакционного газа; 2 – вакуумная система; 3 – система контроля температуры; 4 – система нагрева и охлаждения образцов; 5,12 – стандартные дуговые испарители; 6,11 – источники электропитания испарителей; 7 – вакуумная камера; 8 – источник электропитания фильтрующего испарителя; 9 – фильтрующий модуль установки; 10 – система импульсной подачи напряжения смещения на образцы инструмента; 13 – рабочий стол для размещения образцов инструмента; 14 – образцы инструмента

## 4. Результаты исследований

### 4.1. Результаты исследований свойств МКП

Пример рентгеноспектрограммы полученной с поверхности МКП на основе системы Ti-TiN-TiCrAlN, необходимой для расшифровки химического состава МКП показан на рис. 4. Параметры структуры СМП из твердого

сплава BK10-XOM с разработанным покрытием Ti-TiN-TiCrAlN представлены в табл. 2 и 3.

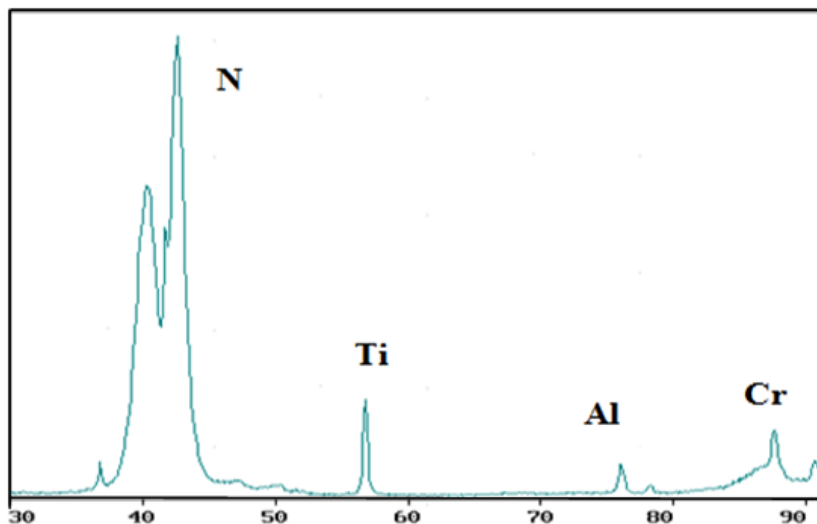


Рисунок 4 – Химический состав износостойкого слоя МКП (система Ti-TiN-TiCrAlN)

Экспериментальные данные по оценке кристаллохимических свойств разработанных МКП позволяют отметить следующее.

Размеры зёрен износостойкого слоя МКП полученного при использовании технологии ФКВДО составили 15-20 нм, что позволяет классифицировать полученное МКП как нанодисперсное, в то время как размеры зёрен аналогичных по составу покрытий полученных при использовании стандартной технологии КИБ-МеVVA составляют в 120-160 нм (см. табл. 2). Среднее значение содержания Ti, Cr и Al в TiCrAlN-слое составило соответственно 43,31/30,31/26,38.

Качество МКП (ФКВДО), разработанных для нанесения на цельнотвердосплавные концевые фрезы и СМП из твердого сплава, существенно превосходит качество стандартных МКП, формируемых при использовании стандартной технологии КИБ-МеVVA. Кроме того, использование разработанной технологии ФКВДО позволяет формировать высококачественную поверхность покрытий практически без микрокапель, характерных для стандартной технологии (рис. 5)

Таблица 2 – Химический состав (элементное соотношение) и зернистость износостойкого слоя разработанных покрытий

Инструментальный материал	Химический состав (атомная концентрация %)		Размеры зерен, нм	Коэффициент трения $\mu$ , (относительно $Al_2O_3$ )
	Состав износостойкого слоя	Соотношение элементов		
ВК10-ХОМ	–	–	1000-2000	
ВК10-ХОМ-(Ti-TiN-Ti <sub>1-x</sub> Cr <sub>x</sub> )N (КИВ-МеVVA)	(Ti <sub>1-x</sub> Cr <sub>x</sub> )N	45,2/54,8	120-160	0,65
ВК10-ХОМ-(Ti-TiN-Ti <sub>1-x-y</sub> Cr <sub>x</sub> Al <sub>y</sub> )N (ФКВДО)	(Ti <sub>1-x-y</sub> Cr <sub>x</sub> Al <sub>y</sub> )N	43,31/30,31/26,38	15-20	0,4

Таблица 3 – Параметры структуры разработанной МКНП – Ti-TiN-TiCrAlN

Архитектура элементов МКНП на основе Ti-TiN-TiCrAlN	Толщина слоев и субслоев МКП	Микротвердость, Н <sub>μ</sub> , МПа*	Прочность адгезии МКП**, Р <sub>крит</sub> , Н
Адгезионный подслоя Ti (3) (монослойный)	$h_a = 0,4$ мкм	–	110
Износостойкий слой TiCrAlN (1) (многослойный)	Ti <sub>43,31</sub> Cr <sub>30,31</sub> Al <sub>26,38</sub> N $h_u = 1,8$ мкм $h_c = 20$ нм	3100	
Промежуточный слой TiN (2) (многослойный)	$h_n = 1,8$ мкм $h_c = 18$ нм	–	

$h_a$  – толщина адгезионного подслоя;  $h_u, h_n$  – толщина износостойкого и промежуточного слоев;  $h_c$  – толщина субслоев износостойкого и промежуточного слоев; \* - значение микротвердости получено на наноиндентометре с поверхности образца; \*\* - Р<sub>крит</sub> - критическое значение усилия, прилагаемого к крайбирующему (царапывающему) индентору, при котором происходит разрушение МКНП вдоль цапаины

Между тем, микрокапли, особенно расположенные на поверхности МКП и на границе «МКП-твердый сплав», являются опасным дефектом покрытия, поэтому их фильтрация позволяет повысить прочность адгезионной связи системы «МКП-твердый сплав», увеличить сопротивляемость твердого сплава (ТС) окислению и коррозии, что позволяет повысить износостойкость инструмента в целом.

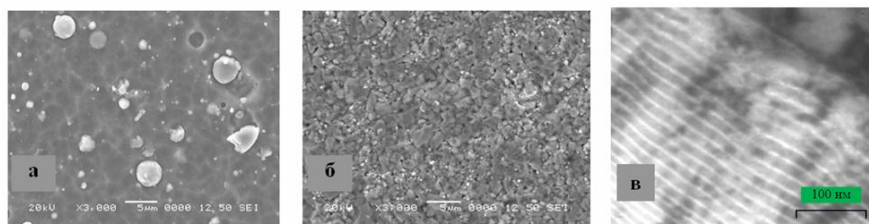


Рисунок 5 – Морфологии поверхностей и структура износостойкого слоя (1):  
а – TiCrN, полученное при использовании стандартной технологии КИБ-МеVVA;  
б – TiCrAlN, полученное при использовании процесса ФКВДО;  
в – поперечное сечение слоя TiCrAlN (ФКВДО)

Следует отметить, что более высокая температура плавления катода из Cr (1870 °C) способствует образованию существенно меньшего количества микрокапель по сравнению с относительно высоко каплеобразующими катодами из Ti и Al (или сплавного катода Ti/Al), имеющими более низкую температуру плавления (1450 °C). Физико-механические свойства покрытий на основе TiAlN существенно улучшаются при легировании хромом (Cr). При легировании TiN алюминием (Al), температура начала интенсивного окисления увеличивается от 600 °C до 800 °C, а при дополнительном легировании хромом (Cr) она достигает величины 920 °C. Диффузия элементов субстрата в составе покрытия обнаруживается лишь при температуре 950 °C. Установлено [14, 15], что при оптимальном содержании хрома в соединении TiCrAlN, составляющем до 30 % (атм.), обеспечивается максимальная стойкость к окислению. Скорость окисления соединения TiCrAlN ничтожно мала при температурах до 900 °C, и резко возрастает при нагреве свыше этой величины. С увеличением содержания хрома от 17 % до 30 % снижается скорость окисления и повышается сопротивляемость к отслоению покрытия от субстрата при повышенных температурах.

Так как хром (Cr) и цирконий (Zr) образуют стабильные оксиды, то их добавление в гранцентрированную решетку TiN также приводит к существенному повышению ее свойств.

#### **4.2. Исследование режущих свойств концевых фрез с МКП**

Проведены аттестационные испытания режущих свойств твердосплавных инструментов с разработанными МКП в широком диапазоне изменения режимов резания ( $v$ ,  $S_z$ ) при фрезеровании. На рис. 6, 7, 8 представлены сравнительные стойкостные испытания моделей твердосплавных концевых фрез, оснащенных СМП из твердого сплава при сухом фрезеровании различных материалов.

Анализ представленных данных позволяет отметить следующее.

Фрезы, оснащенные СМП из твердых сплавов с разработанными МКП, получаемыми при использовании технологии ФКВДО, превосходят по режущим свойствам как контрольные фрезы без покрытия, так и фрезы со стандартными покрытиями (см. рис.6, 7, 8).

Анализ результатов аттестационных испытаний моделей концевых фрез, оснащённых СМП из твердых сплавов с разработанными МКП при сухом фрезеровании различных материалов позволяет отметить, что инструменты с разработанными МКП (Ti-TiN-TiCrAlN – для обработки стали 45 и сплава ХН77ТЮР и Zr-ZrN-ZrCrAlN – для обработки титанового сплава ВТ9) имели стойкость в 1,5-2,7 раза выше стойкости фрез без покрытия или со стандартными покрытиями.

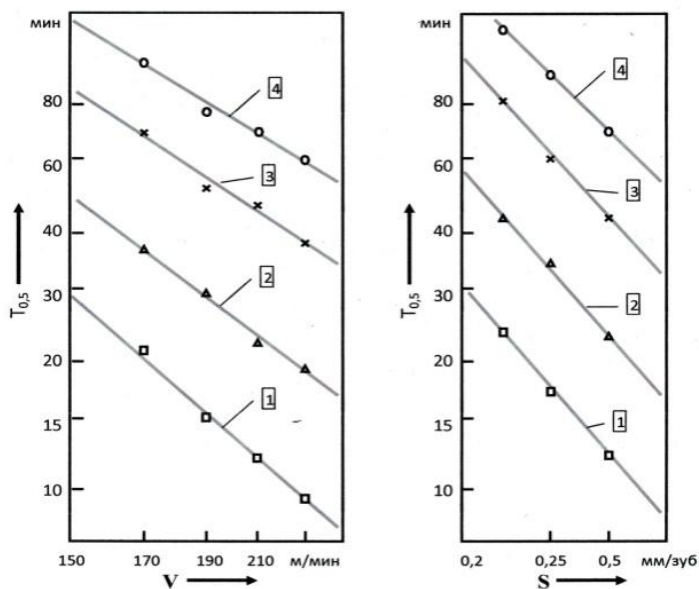


Рисунок 6 – Влияние скорости резания (а,  $t = 2,0$  мм;  $S_z = 0,4$  мм/зуб;  $V = 40$  мм) и подачи (б,  $t = 2,0$  мм;  $v = 247$  м/мин;  $V = 40$  мм) на стойкость моделей концевых фрез, оснащенных СМП из сплава Т14К8 ( $Z=1$ ;  $D_{фр} = 128$  мм) при сухом фрезеровании (симметричном) стали 45 (HB200): 1 – контрольная фреза Т14К8 без покрытия; 2 – Т14К8-TiN (технология КИБ-МеVVA); 3 – Т14К8-(Ti,Cr)N (технология КИБ-МеVVA); 4 – Т14К8 – Ti-TiN-TiCrAlN (МКП, технология ФКВДО)

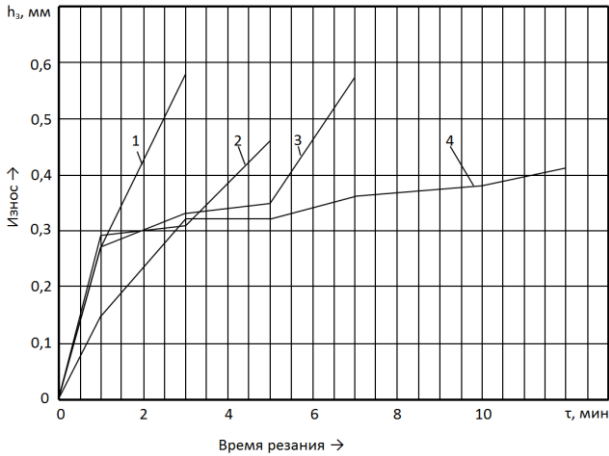


Рисунок 7 – Зависимость износа  $h_3$  твердосплавных фрез от времени резания жаропрочного сплава ХН77ТЮР с  $t=1,0$  мм;  $S=0,125$  /зуб;  $v=30$  м/мин:

- 1 – ВК10-ХОМ; 2- ВК10-ХОМ-TiN (технология КИБ-МеVVA);
- 3 - ВК10-ХОМ-Ti-TiCrAlN (технология КИБ-МеVVA);
- 4-ВК10-ХОМ – Ti-TiN-TiCrAlN (технология ФКВДО)

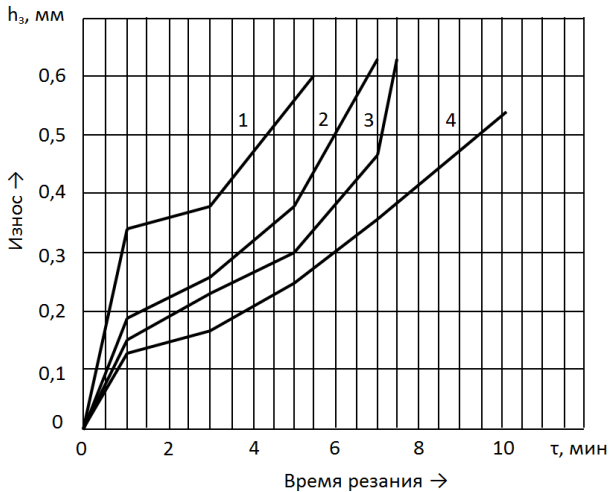


Рисунок 8 – Зависимость износа  $h_3$  твердосплавных фрез от времени резания титанового сплава ВТ9 с  $t=1,0$ мм,  $S_z=0,05$  мм/зуб;  $v=157$  м/мин:

- 1 – ВРК-15; 2 - ВРК-15-ZrN (технология КИБ-МеVVA);
- 3-ВРК-15-ZrCrAlN (технология КИБ-МеVVA);
- 4- ВРК -15-Zr-ZrN-ZrCrAlN (технология ФКВДО)

Проведены также аттестационные испытания цельнотвердосплавных концевых фрез  $D=16$  мм,  $Z=4$  одного из ведущих производителей твердосплавного инструмента с МКП на основе композиции  $Ti-(Ti,Cr)N-TiN$ , нанесенным на инструмент при использовании инновационной технологии ФКВДО. Испытания производили при черновой обработке высоколегированной стали 30ХГСА (HRC 20...22) при средней и высокой скоростях резания. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты сравнительных испытаний

№	Фреза	Скорость резания, м/мин	Производительность на зуб фрезы, см <sup>3</sup> /мин	Длина резания, м	Время резания, мин	Степень износа по результатам испытания
1	МКП	140	1,9	3250	122	Критическая
2	МКП	200	3,4	1750	47	Высокая
3	Контр.	140	1,9	1300	49	Критическая
4	Контр.	200	3,4	1100	30	Критическая

Представленные данные позволяют отметить, что при обработке фрезами без покрытия длина пути резания и объем снимаемого материала оказываются невысокими, при этом возможна обработка, как на высокой скорости резания, так и на средней. Концевые фрезы с МКП на основе системы  $Ti-(Ti,Cr)N-TiN$  позволили увеличить стойкость инструмента при скорости резания 140 м/мин – в 2,5 раза, а при скорости резания 200 м/мин – в 1,6 раза, что свидетельствует об эффективности МКП  $Ti-(Ti,Cr)N-TiN$  особенно при обработке на средних скоростях резания.

### **Заключение**

Разработана методика получения трехкомпонентных многослойно-композиционных покрытий с нано-размерной зерновой структурой и толщинами субслоев, позволяющая существенно повысить работоспособность твердосплавных концевых фрез.

Предложены и обоснованы методические принципы формирования покрытий многослойно-композиционной архитектуры с наноразмерной структурой для концевых твердосплавных фрез, содержащие три ключевых компонента, каждый из которых имеет строго функциональное назначение, определяющее высокую износостойкость, прочную адгезионную связь с инструментальным материалом и барьерные свойства относительно тепловых потоков и диффузии, что позволяют повысить работоспособность твердосплавных концевых фрез.

Разработан процесс фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) для формирования МКП, позволяющий увеличить качество МКП за счет практически полной (до 90-95 %) фильтрации макро- и микро капельной составляющей паро-ионного потока, исключать электроэрозионное растравливание режущих кромок и рабочих поверхностей инструмента, формировать нано-дисперсную зерновую структуру **МКП** и нано-размерную толщину субслоев всех его элементов.

**Список использованных источников:** 1. *Верещака А.С.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с. 2. *Табakov В.П.* Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – Москва: Машиностроение, 2008.-310 с. 3. *Поletика М.Ф.* Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструментов. – М.: Mashgiz, 1962. – 150 с. 4. *Кирюшин Д.Е.* Напряжённо-деформированное состояние при высокоскоростной обработке титановых сплавов / Д.Е. Кирюшин, Т.Г. Насад // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. / СГТУ. – Саратов, 2006. – с. 101-105. 5. *Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Mgaloblishvili O., Morgan M.N., Batako A.D.* Nano-scale multilayered-composite coatings for the cutting tools // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – V. 72, Is. 1-4. – P. 303-317. 6. *Vereshchaka A.S., Vereschaka A.A., Kirillov A.K.* Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings // PRECISION MACHINING VI Book Series: Key Engineering Materials. – 2012. – V. 496. – P. 67-74. 7. *Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka, A.S., Kutin A.A.* Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings // FIFTH CIRP CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE CUTTING 2012 Book Series: Procedia CIRP. – 2012. – V. 1. – P. 301-306. 8. *Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Sotova E.S., Vereschaka A.A.* Improving the efficiency of the cutting tools made of mixed ceramics by applying modifying nano-scale multilayered coatings // ADVANCES IN MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING, PTS 1-4 Book Series: Advanced Materials Research. – 2013. – V. 712-715. – P. 391-394. 9. *Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Tabakov V.P., Sotova E.S., Vereschaka A.A., Kulikov M.Yu.* Improving the efficiency of the cutting tool made of ceramic when machining hardened steel by applying nano-dispersed multi-layered coatings // PRECISION MACHINING VII Book Series: Key Engineering Materials. – 2014. – V. 581. – P. 68-73. 10. *Tabakov V.P., Vereschaka A.S.* Development of technological means for formation of multilayer composite coatings, providing increased wear resistance of carbide tools, for different machining conditions // PRECISION MACHINING VII Book Series: Key Engineering Materials. – 2014. – V. 581. – P. 55-61. 11. *Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Anikeev A.I.* Carbide Tools with Nano-Dispersed Coating for High-Performance Cutting of Hard-To-Cut Materials // APPLIED MECHANICS, FLUID AND SOLID MECHANICS Book Series: Advanced Materials Research. – 2014. – V. 871. – P. 164-170. 12. Nanometric-layered CrN/TiN thin films mechanical strength and thermal stability/ X.T. Zeng, S. Zhang, C.Q. Sun, Y.C. Liu// Thin Solid Films, 424 (2003), p. 99. 13. *Blinkov S.G. Tsareva A.V. Zentseva A.O. Volkhonsky V.I. Buzanov and N.N. Stepareva.* Structure and Phase Formation of Nanostructural Ion-Plasma Ti-Cr-Al-N Coatings on a Hard\_Alloy Cutting Tool. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2010. Vol. 51, p. 483 14. *Luo W.M. Rainforth W.D.* Mu.nz, Wear 74 (1999) 225\_229. 15. P.E Q. Hovsepian, D.B. Lewis, W.D. Mu.nz, Surf. Coat. Technol. 133\_134 (2000) 166-175.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vereshhaka A.S. Rabotosposobnost' rezhushhego instrumenta s iznosostojkimi pokrytijami. – М.: Mashinostroenie, 1993. – 336 s. 2. Tabakov V.P. Formirovanie iznosostojkih ionno-plazmennyh pokrytij rezhushhego instrumenta. – Moskva.: Mashinostroenie, 2008.-310 s. 3. Poletika M.F. Kontaktnye nagruzki na rezhushhiih poverhnostjah instrumentov. – М.: Mashgiz, 1962. – 150 s. 4. Kirjushin, D.E. Naprjazhjonno-deformirovanoe sostojanie pri vysokoskorostnoj obrabotke titanovyh splavov / D.E. Kirjushin, T.G. Nasad // Avtomatizacija i upravlenie v mashino- i



priborostroenii: sb. nauch. tr. / SGTU. – Saratov, 2006. – s. 101-105. **5.** Vereshchaka A. A., Vereshchaka A. S., Mgaloblishvili O., Morgan M. N., Batako A. D. Nano-scale multilayered-composite coatings for the cutting tools // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – V. 72, Is. 1-4. – P. 303-317. **6.** Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A., Kirillov A.K. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings // PRECISION MACHINING VI Book Series: Key Engineering Materials. – 2012. – V. 496. – P. 67-74. **7.** Grigoriev S.N., Vereshchaka A.A., Vereshchaka, A.S., Kutin A.A. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings // FIFTH CIRP CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE CUTTING 2012 Book Series: Procedia CIRP. – 2012. – V. 1. – P. 301-306. **8.** Vereshchaka A.S., Grigoriev S.N., Sotova E.S., Vereshchaka A.A. Improving the efficiency of the cutting tools made of mixed ceramics by applying modifying nano-scale multilayered coatings // ADVANCES IN MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING, PTS 1-4 Book Series: Advanced Materials Research. – 2013. – V. 712-715. – P. 391-394. **9.** Vereshchaka A.S., Grigoriev S.N., Tabakov V.P., Sotova E.S., Vereshchaka A.A., Kulikov M.Yu. Improving the efficiency of the cutting tool made of ceramic when machining hardened steel by applying nano-dispersed multi-layered coatings // PRECISION MACHINING VII Book Series: Key Engineering Materials. – 2014. – V. 581. – P. 68-73. **10.** Tabakov V.P., Vereshchaka A.S. Development of technological means for formation of multilayer composite coatings, providing increased wear resistance of carbide tools, for different machining conditions // PRECISION MACHINING VII Book Series: Key Engineering Materials. – 2014. – V. 581. – P. 55-61. **11.** Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Anikeev A.I. Carbide Tools with Nano-Dispersed Coating for High-Performance Cutting of Hard-To-Cut Materials // APPLIED MECHANICS, FLUID AND SOLID MECHANICS Book Series: Advanced Materials Research. – 2014. – V. 871. – P. 164-170. **12.** Nanometric-layered CrN/TiN thin films mechanical strength and thermal stability/ X.T. Zeng, S. Zhang, C.Q. Sun, Y.C. Liu// Thin Solid Films, 424 (2003), p. 99. **13.** Blinkov, S.G. Tsareva, A.V. Zentseva, A.O. Volkhonsky, V.I. Buzanov, and N.N. Stepareva. Structure and Phase Formation of Nanostructural Ion-Plasma Ti-Cr-Al-N Coatings on a Hard\_Alloy Cutting Tool. Russian Journal of Non\_Ferrous Metals. 2010. Vol. 51, p. 483 **14.** Luo, W.M. Rainforth, W.D. Mu.nz, Wear 74 (1999) 225\_/229. **15.** P.E Q. Hovsepian, D.B. Lewis, W.D. Mu.nz, Surf. Coat. Technol. 133\_/134 (2000) 166-175.

*Поступила в редколлегию 23.04.2014*