

УДК 67.02

А.А. Верещака, Ю.И. Бубликов, М.Г. Оганян

**МНОГОСЛОЙНО-КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ:
МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ**

Представлены результаты исследований по повышению работоспособности концевых фрез на основе нанесения функциональных покрытий. Обоснован выбор состава, структуры, архитектуры и свойств многослойно-композиционных покрытий для нанесения на твердосплавные концевые фрезы, предназначенные для обработки жаропрочных сплавов и конструкционных сталей.

Ключевые слова: концевые фрезы, многослойно-композиционные покрытия, работоспособность, стойкость, обработка, жаропрочные сплавы, конструкционные стали.

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 существенно отличаются от традиционных непрерывных процессов резания значениями и характером изменения функциональных параметров резания (силы резания, тепловое состояние, характер контактирования инструментального и обрабатываемого материалов, 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 твердосплавного 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) является 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 связи с этим операции фрезерования твердосплавным инструментом (особенно изготовленным из чрезвычайно малотеплопроводных твердых сплавов группы ТК - WC-TiC-Co) обычно выполняют без применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). 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 выкрашивания режущих лезвий.

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 его рабочих и холостых ходов [1; 2]. Учитывая специфические условия процессов фрезерования, при нанесении функциональных покрытий на инструмент, работающий в условиях прерывистого резания, необходимо выполнять следующие требования:

1. Обеспечивать 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. Создавать условия формирования в покрытии высокого уровня остаточных сжимающих напряжений, что снижает вероятность формирования в нем трещин усталости и способствует повышению времени работы инструмента до полного отказа.

3. Обеспечивать условия, при которых адгезионная прочность покрытия 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. Так, 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 характерна 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 требования может обеспечить только многослойно-композиционное покрытие (МКП), которое должно иметь три слоя (рис. 1).

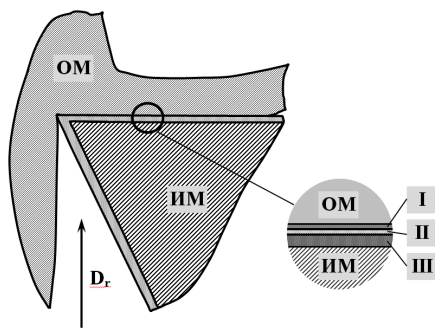


Рис. 1. Архитектура многослойно-композиционного покрытия для концевых фрез: I - износостойкий слой; II - промежуточный слой; III - адгезионный подслоя

Увеличение толщины износостойкого слоя увеличивает период его кристаллической решетки a , 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 свидетельствует об увеличении доли кристаллитов с ориентацией в кристаллической плоскости 111. При этом необходимо отметить, что наибольшее различие по абсолютной величине параметра J_{111}/J_{200} между МКП разной толщины наблюдается при малой толщине износостойкого слоя 1 (рис.1). С увеличением толщины слоя 1 это различие уменьшается.

ся, 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 β_{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 до 10 мкм приводит к росту величины β_{111} на 30 – 35 %. Для МКП с верхним слоем (Ti,Zr)N характерны более высокие значения величины β_{111} , что позволяет говорить о более высоких механических свойствах данных покрытий. Учитывая, что величина β_{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.

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 (Ti, Zr)N и TiCN при варьировании толщин их 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_c 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 ее величине.

Анализ условий высокой термостабильности многокомпонентных нанодисперсных 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- и пятикомпонентные 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 термодинамическое сродство к азоту. Замещение соответствующих атомов металлов в металлических подрешетках нитридов другими элементами (Al, Si) приводит 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 также изменение условий осаждения за счет меняющейся концентрации компонентов ионного потока, образующегося при испарении с поверхности катода пятном дуги при энергиях 1-1,2 кЭв, способствуют измельчению зерновой структуры покрытий до наноразмерного уровня. Это, в свою очередь, даёт возможность получить материал, обладающий наряду с высокой твердостью достаточно высокой вязкостью. Полученные многокомпонентные покрытия хорошо адаптированы для работы в условиях как постоянных, так и знакопеременных нагрузок.

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. 2 - 4 представлены результаты сравнительных стойкостных испытаний 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.

Анализ результатов аттестационных испытаний моделей концевых фрез, оснащенных 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) имеют стойкость в 1,5-2,7 раза выше стойкости фрез без покрытия или со стандартными покрытиями.

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 проводили при черновой обработке высоколегированной стали 30ХГСА (HRC 20...22) при средней и высокой скоростях резания. Результаты испытаний представлены в таблице.

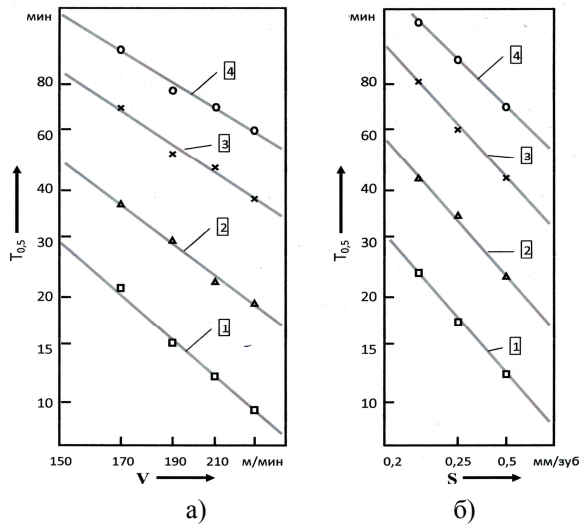


Рис. 2. Влияние скорости резания (а) ($t = 2,0$ мм; $S_z = 0,4$ мм/зуб; $V = 40$ мм) и подачи (б) ($t = 2,0$ мм; $v = 247$ м/мин; $V = 40$ мм) на стойкость моделей концевых фрез, оснащенных СМП из сплава Т14К8 ($Z=1$; $D_{фр} = 128$ мм), при сухом фрезеровании (симметричном) стали 45 (HВ 200): 1 – контрольная фреза Т14К8 без покрытия; 2 –Т14К8-ТiN (технология КИБ-МеVVA); 3 –Т14К8-(Тi,Cr)N (технология КИБ-МеVVA); 4 – Т14К8 – Тi-ТiN-ТiCrAlN (МКП, технология ФКВДО)

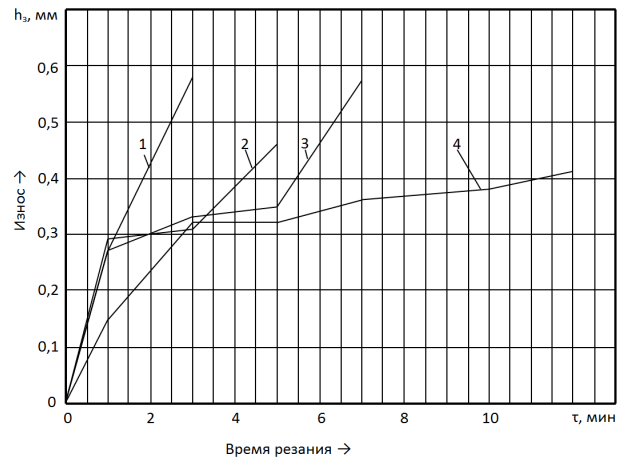


Рис. 3. Зависимость износа h_3 твердосплавных фрез от времени резания жаропрочного сплава ХН77ТЮР с $t=1,0$ мм; $S_z = 0,125$ мм/зуб; $v=30$ м/мин: 1 – ВК10-ХОМ; 2 - ВК10-ХОМ-ТiN (технология КИБ-МеVVA); 3 - ВК10-ХОМ-Тi-ТiCrAlN (технология КИБ-МеVVA); 4 - ВК10-ХОМ – Тi-ТiN-ТiCrAlN (технология ФКВДО)

Таблица

Результаты сравнительных испытаний

Фреза	Скорость резания, м/мин	Производительность на зуб фрезы, см ³ /мин	Длина резания, м	Время резания, мин	Степень износа по результатам испытания
МКП	140	1,9	3250	122	Критическая
МКП	200	3,4	1750	47	Высокая
Контр.	140	1,9	1300	49	Критическая
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 небольшими, при этом возможна обработка как на высокой скорости резания, так и на средней. МКП на основе системы $Ti-(Ti,Cr)N-TiN$ позволило 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 данного МКП, особенно при обработке на средних скоростях резания.

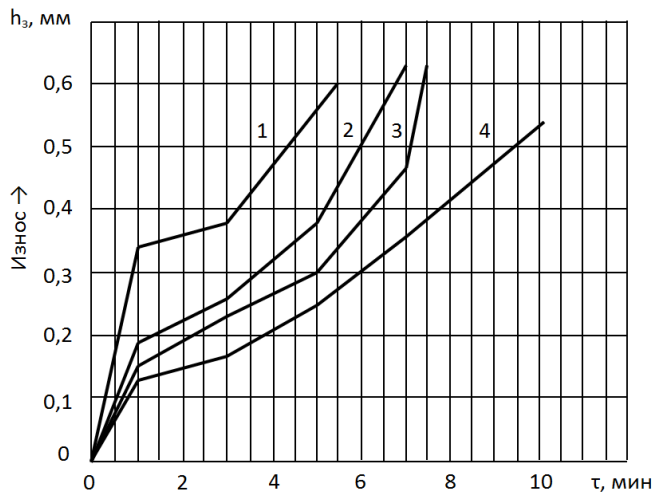


Рис. 4. Зависимость износа h_3 твердосплавных фрез от времени резания титанового сплава ВТ9 с $t=1,0$ мм, $S_z=0,05$ мм/зуб; $v=157$ м/мин: 1 – ВРК-15; 2 – ВРК-15-ZrN (технология КИБ-МеVVA); 3-ВРК-15-ZrCrAlN (технология КИБ-МеVVA); 4- ВРК -15-ZrN-ZrCrAlN (технология ФКВДО)

Разработан процесс фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения для формирования МКП, позволяющий повысить качество МКП за счет практически полной (до 90-95 %) фильтрации макро- и микрокапельной составляющей пароионного потока, исключить электроэрозионное растравливание режущих кромок и рабочих поверхностей инструмента, формировать нанодисперсную зерновую структуру МКП и наноразмерную толщину субслоев всех его элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. Табаков, В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В.П. Табаков. – М.: Машиностроение, 2008.-310 с.
3. Полетика, М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструментов / М.Ф. Полетика. – М.: Машгиз, 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. – Саратов: СГТУ, 2006. – С. 101-105.
5. Vereshchaka, A. A. Nano-scale multilayered-composite coatings for the cutting tools / A. A. Vereshchaka, A. S. Vereshchaka, O. Mgaloblishvili, M. N. Morgan, A. D. Batako // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – V. 72, Is. 1-4. – P. 303-317.
6. Vereshchaka, A.S. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings / A.S. Vereshchaka, A.A. Vereschaka, A.K. Kirillov // Precision machining VI Book Series: Key Engineering Materials. – 2012. – V. 496. – P. 67-74.
7. Grigoriev, S.N. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings / S.N. Grigoriev, A.A. Vereschaka, A.S. Vereschaka, A.A. Kutin // Fifth cirp conference on high performance cutting 2012 Book Series: Procedia CIRP. – 2012. – V. 1. – P. 301-306.
8. Vereschaka, A.S. Improving the efficiency of the cutting tools made of mixed ceramics by applying modifying nano-scale multilayered coatings / A.S. Vereschaka, S.N. Grigoriev, E.S. Sotova, A.A. Vereschaka // 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. Improving the efficiency of the cutting tool made of ceramic when machining hardened steel by applying nano-dispersed multi-layered coatings / A.S. Vereschaka, S.N. Grigoriev, V.P. Tabakov, E.S. Soto-

- va, A.A. Vereschaka, M.Yu. Kulikov // Precision machining VII Book Series: Key Engineering Materials. – 2014. – V. 581. – P. 68-73.
10. Tabakov, V.P. Development of technological means for formation of multilayer composite coatings, providing increased wear resistance of carbide tools, for different machining conditions / V.P. Tabakov, A.S. Vereschaka // Precision machining VII Book Series: Key Engineering Materials. – 2014. – V. 581. – P. 55-61.
 11. Vereschaka, A.A. Carbide Tools with Nano-Dispersed Coating for High-Performance Cutting of Hard-To-Cut Materials / A.A. Vereschaka, A.S. Vereschaka, A.I. Anikeev // 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. Structure and Phase Formation of Nanostructural Ion-Plasma Ti-Cr-Al-N Coatings on a Hard Alloy Cutting Tool / S.G. Blinkov, A.V. Tsareva, A.O. Zentseva, V.I. Volkhonsky, N.N. Stepareva // Russian Journal of Non Ferrous Metals. - 2010. - Vol. 51. - P. 483.

Материал поступил в редколлегию 18.07.14.