

УДК 67.02

А.А. Верещака, О.Х. Хожаев

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЕЗВОЛЬФРАМОВЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ С ПОМОЩЬЮ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МНОГОСЛОЙНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Рассмотрены вопросы повышения эффективности режущего инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов путем применения нанодисперсных многослойно-композиционных покрытий, формируемых при использовании инновационных процессов фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения. Разработаны составы наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий, позволившие существенно повысить режущие свойства инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов при резании конструкционных сталей и расширить область их применения для обработки жаропрочных сплавов.

Ключевые слова: безвольфрамовые твердые сплавы, наноструктурированные многослойно-композиционные покрытия, стойкость режущего инструмента, катодно-вакуумно-дуговое осаждение.

Режущие инструменты, оснащенные сменными многогранными пластинами (СМП) из безвольфрамовых твердых сплавов (БВТС, керметы), находят все большее применение в металлообрабатывающих производствах вследствие отсутствия в их составе таких редких и дорогостоящих элементов, как вольфрам и кобальт. В частности, известно, что при изготовлении только одной тонны БВТС марки КНТ экономия вольфрама составляет более 2 т [1; 2]. При этом по некоторым своим свойствам БВТС превосходят соответствующие вольфрамсодержащие твердые сплавы. Так, БВТС на основе композиции TiC-(Ni,Mo) имеют более высокую твердость, окалиностойкость, износостойкость при повышенных температурах резания сталей. Инструменты, оснащенные СМП из БВТС, рекомендуют применять для обработки углеродистых и легированных сталей с связи с более высоким значением температуры начала адгезии (примерно на 180-200°C выше, чем для сплавов группы WC-TiC-Co) [1-5].

Механизм изнашивания инструментов из БВТС определяется структурой и свойствами обрабатываемых сталей. В частности, БВТС на основе TiC-(Ni,Mo) обладают более высокой окалиностойкостью в сравнении с твердыми сплавами WC-Co, имеют низкую плотность, хорошо смачиваются металлами, используемыми в качестве связок (Mo, Ni, Co и др.). Кроме того, эти БВТС обладают высокой термической стойкостью, низкой склонностью к диффузии, позволяют повысить такие важные выходные параметры резания, как размерная точность и шероховатость обработанной поверхности [1; 3 - 5].

Указанные свойства БВТС на основе композиции TiC-(Ni,Mo) связаны с формированием своеобразной кольцевой структуры из карбидов (Ti,Mo)C вокруг зерен TiC. Подобное строение сплава позволяет при спекании сдерживать рост зерен TiC и формировать мелкодисперсную структуру, повышает твердость, теплостойкость и износостойкость. По этим свойствам БВТС превосходят не только соответствующие вольфрамсодержащие твердые сплавы с равнозначным содержанием связки, но и некоторые марки режущей керамики [3 - 5].

Вместе с тем БВТС обладают относительно невысокой вязкостью разрушения и прочностью при изгибе, а также низким коэффициентом теплопроводности, уступая по этим свойствам не только сплавам WC-Co, но и сплавам WC-TiC-Co с содержанием связки менее 8%. Поэтому инструменты из БВТС имеют относительно невысокую стойкость при прерывистом резании, обработке жаропрочных сплавов и сталей. Кроме того, из-за низкой сопротивляемости разрушению при тепловом ударе БВТС практически не используются для напайного инструмента [4 - 6]. В связи с этим основные усилия производителе-

лей направлены на повышение работоспособности инструмента из БВТС на основе улучшения их эксплуатационных характеристик и прочностных показателей.

Наиболее эффективным способом повышения работоспособности инструмента из БВТС является осаждение на его рабочие поверхности функциональных покрытий, в наибольшей степени улучшающих его основные свойства и расширяющих область применения [6 - 8]. В работе рассмотрены вопросы разработки инновационных наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий (НМКП), осаждаемых на инструменты из БВТС при использовании методов фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО).

Научные предпосылки. При выборе архитектуры покрытия для инструмента из БВТС использовали концептуальное положение о двойственной природе покрытия как некой «промежуточной технологической среды» (ПТС) между инструментальным и обрабатываемым материалами [8]. Исходя из данной концепции покрытие должно улучшать такие важные свойства БВТС, как твердость, теплостойкость, физико-химическая пассивность по отношению к обрабатываемому материалу, и одновременно положительно трансформировать контактные процессы и параметры резания, определяющие интенсивность изнашивания инструмента. В соответствии с принятой концепцией была использована конструкция с трехслойной архитектурой, каждый из слоёв которой имеет строгое функциональное назначение [6; 7]. Покрытие включает износостойкий, промежуточный и адгезионный слой (рис.1).

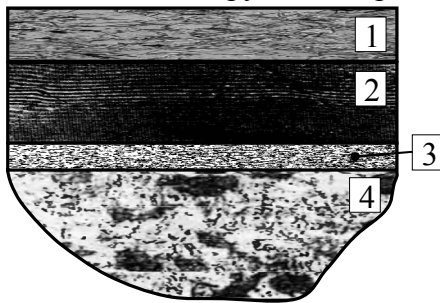


Рис.1. Архитектура 3-слойного НМКП, наносимого на инструменты из БВТС: 1 – износостойкий слой; 2 – промежуточный слой; 3 – адгезионный подслой; 4 – субстрат (БВТС)

из БВТС является адгезионно-усталостное изнашивание [8]. В соответствии с таким подходом минимизация адгезионно-усталостного изнашивания инструмента достигается при минимуме теряемой массы инструментального материала: $Ma \rightarrow \min$.

$$Ma = K_a \cdot \rho \cdot F_a (J \cdot \sigma_a / \sigma_p), \quad (1)$$

где K_a – коэффициент адгезии (объемный); ρ – плотность инструментального материала; J – интенсивность схватывания; σ_a – прочность связей в узлах схватывания; σ_p – сопротивление инструментального материала разрушению.

Интенсивность схватывания можно оценить, используя зависимость:

$$J = (N_T + N_M) F_a, \quad (2)$$

где F_a – номинальная площадь контакта; N_T, N_M – число активных центров на единицу площади контакта при термическом и механическом активировании соответственно.

Величины N_T и N_M рассчитывали, используя следующие зависимости:

$$N_T = v \cdot T \cdot e^{-Q_t / RT}, \quad (3)$$

$$N_M = \rho_1 \cdot S \cdot b, \quad (4)$$

где ν - частота собственных колебаний валентных атомов; T - время; Q_z - энергия термической активации; K - постоянная Больцмана; θ - абсолютная температура; ρ_1 - плотность дислокаций; S - средняя длина пробега дислокаций; b - вектор Бюргерса.

Зависимости (1–4) позволяют оценить склонность износостойкого слоя НМКП к адгезии с обрабатываемым материалом, а следовательно, и интенсивность адгезионно-усталостного изнашивания. К таким факторам можно отнести температуру резания, твёрдость, частоту собственных колебаний валентных атомов ν , которая коррелирует со статистическим весом атомов наиболее стабильных электронных конфигураций (СВАСК). Склонность к адгезии будет возрастать при увеличении:

- температуры (до момента начала интенсивного окисления или термического разрушения мостиков адгезионной связи);
- частоты ν собственных колебаний валентных атомов, которая коррелирует со СВАСК;
- скорости движения дислокаций V_D , которая обратно пропорциональна твердости инструментального материала или верхнего слоя 1 НМКП.

С учетом сложности оценки табулированных значений составляющих N_T и N_M использовали следующие допущения при их определении.

Термическую составляющую адгезии N_T оценивали по температуре плавления материала слоя 1 НМКП [8]:

$$N_T = C \cdot T^{\theta/\theta_{пл}},$$

где C – постоянная; θ – абсолютная температура; $\theta_{пл}$ – температура плавления соединения металлов.

Механическую составляющую N_M оценивали по твердости вещества, так как по мере роста твердости резко снижается подвижность дислокаций и соответственно уменьшается склонность износостойкого слоя 1 НМКП к адгезии с обрабатываемым материалом. Анализ свойств, в том числе твердости, соединений переходных металлов IV группы показывает, что с увеличением температуры выше 800 °С снижение СВАСК sp^3 -конфигураций компенсируется повышением стабильности d^5 -конфигураций. В результате твердость соединений на основе карбидов и нитридов металлов IV группы остается очень высокой даже при предельных температурах, возникающих при резании. Наибольший СВАСК d^5 -конфигурации имеют Mo, Cr и Nb [10]. Указанное позволяет прогнозировать повышение высокотемпературной адгезионной и диффузионной инертности износостойкого слоя 1 НМКП при легировании металлами, имеющими, с одной стороны, большой СВАСК (по сравнению с Ti), а с другой - большую стабильность при высоких температурах [8; 9]. В связи с этим для повышения свойств износостойкого слоя 1 НМКП на основе многокомпонентных нитридов необходимо использовать металлы V и VI групп (например, Nb или Mo, Cr), что должно способствовать повышению СВАСК sp - и d^5 -конфигурации износостойкого слоя и снизить его склонность к адгезионному взаимодействию с обрабатываемым материалом.

Методика проведения экспериментальных исследований. Объектом исследований служили режущие пластины (РП) из БВТС КНТ-16 формы SNUN (ISO) с радиусом при вершине $r = 0,8$ мм с покрытием и без покрытия. Для получения НМКП с нанодисперсной структурой использовали процессы ФКВДО, которые реализовывали на установке ВИТ-2 конструкции «Станкин» - «Экотек» [2; 6; 7]. Процедура подготовки образцов инструмента из БВТС с НМКП для исследований включала предварительную мойку режущих пластин из быстрорежущей стали и твёрдого сплава в химически активированной жидкости с применением ультразвука и последующую тонкую очистку спиртом с протиркой фланелью, просушку РП; закрепление РП в специальных приспособлениях и размещение в вакуумной

камере установки ВИТ-2 (поддерживает процесс и технологию ФКВДО); создание вакуума порядка $p=0,01$ Па с последующей тонкой (ионной) очисткой РП ионами Ag или металла (Ti, Zr, Cr) и термоактивацией образцов инструмента электронами, генерируемыми из тлеющего разряда; формирование на поверхностях РП из РК и СВК НМКП соответствующего состава и свойств. В качестве обрабатываемого материала использовали сталь 45 (НВ 200-210) и труднообрабатываемый сплав на хромовой основе Х65НВФТ (31-35% Ni; 1-3% W; 0,1-0,4% V; 0,05-0,3% Ti). Эксперименты проводили на универсальном станке 16К20 с бесступенчатым тиристорным приводом, что позволяло поддерживать необходимую скорость резания при изменении диаметра заготовки. Для фиксирования величины износа по задней поверхности керамического инструмента $V_{B_{max}}$ использовали большой инструментальный микроскоп ВМИ-1С. В качестве критерия отказа инструментов из БВТС с НМКП и без покрытия был принят износ по задней поверхности $V_B=0,3$ мм. Исследования проведены при варьировании режимов резания в следующем диапазоне: при обработке стали 45 – $a_p=1,0$ мм, $f=0,3$ мм/об, $v=250-350$ м/мин; при обработке жаропрочного сплава Х65НВФТ – $a_p=1,0$ мм, $f=0,1$ мм/об; $v=20-40$ м/мин.

Обсуждение результатов исследований. Параметры структуры РП из БВТС с разработанным покрытием на примере НМКП на основе Ti-TiN-TiCrAlN представлены в таблице. Экспериментальные данные по оценке кристаллохимических свойств разработанных НМКП позволяют отметить следующее. Размеры зёрен износостойкого слоя 1 НМКП, полученного при использовании технологии ФКВДО, составили 15-20 нм, что позволяет классифицировать это НМКП как нанодисперсное, в то время как размеры зёрен аналогичных по составу покрытий, полученных при использовании стандартной технологии КИБ-МеVVA, составили 120-160 нм. Среднее значение содержания Ti, Cr и Al в TiCrAlN-слое составило соответственно 43,31; 30,31 и 26,38 %.

Таблица

Кристаллохимические свойства НМКП

Инструментальный материал	Состав износостойкого слоя	Соотношение элементов, %	Размеры зёрен, нм
КНТ-16	-	-	1000-2000
КНТ-16-(Ti-TiN-Ti _{1-x} Cr _x)N (КИБ-МеVVA)	(Ti _{1-x} Cr _x)N	45,2/54,8	120-160
КНТ-16-(Ti-TiN-Ti _{1-x-y} Cr _x Al _y)N (ФКВДО)	(Ti _{1-x-y} Cr _x Al _y)N	43,31/30,31/26,38	15-20

Использование разработанной технологии ФКВДО, реализуемой на установке ВИТ-2, позволяет формировать высококачественную поверхность покрытий практически без микрокапель, характерных для стандартной технологии arc-PVD. Микрокапли, особенно расположенные на поверхности НМКП и на границе НМКП -БВТС, являются опасным дефектом, поэтому их фильтрация позволяет повысить прочность адгезионной связи, сопротивляемость БВТС окислению и коррозии, износостойкость.

Точение конструкционных сталей (область применения P10-P20, ISO). Результаты исследований стойкостных свойств инструмента, оснащенного РП из БВТС, представлены на рис. 2.

Установлено, что при скорости резания $v=250$ м/мин не наблюдается заметного преимущества инструментов, оснащенных РП из БВТС с покрытиями TiN, TiCrN (стандартная технология arc-PVD), по сравнению с инструментом без покрытия. При этом использование СМП с разработанными НМКП на основе системы Ti-TiN-TiCrAlN (технология ФКВДО) обеспечивает повышение стойкости инструмента до 3-4 раз по сравнению как с контрольным инструментом КНТ-16, так и с инструментом со стандартными покрытиями TiN, TiCrN. С повышением скорости резания от 250 до 350 м/мин преимущество

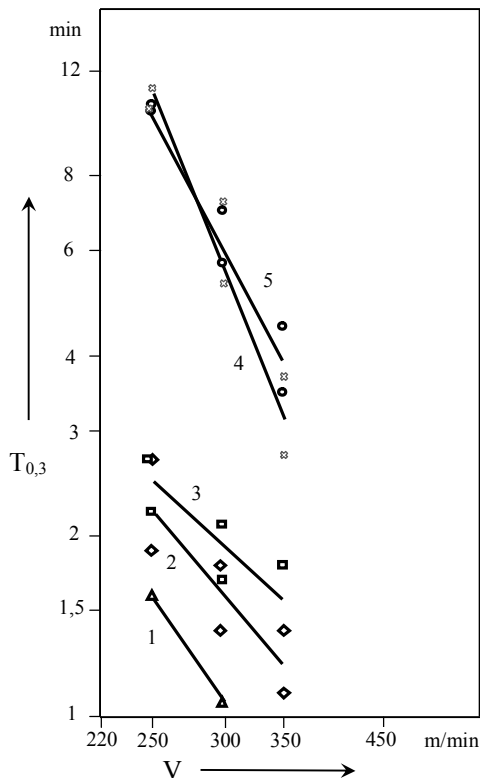


Рис. 2. Влияние скорости резания на стойкость инструмента, оснащенного пластинами КНТ-16 с различными НМКП, при точении стали 45 (НВ 180), $a_p = 1,0$ мм; $f = 0,3$ мм/об: 1 – исходный КНТ-16; 2 – КНТ-16-(Ti-TiN); 3 – КНТ-16-(Ti-TiN-TiCrN); 4 – КНТ-16-(Ti-TiN-TiAlCrN); 5 – КНТ-16-(Ti-TiN-TiZrCrN)

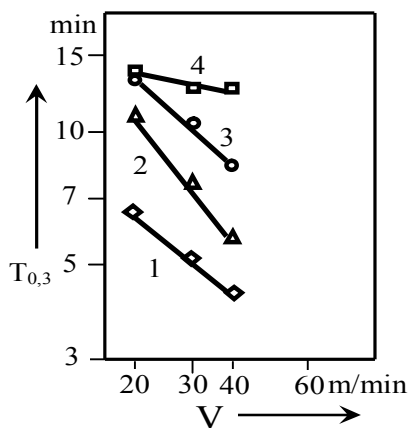


Рис. 3. Влияние скорости резания на стойкость инструмента, оснащенного пластинами КНТ-16 с различными НМКП, при точении жаропрочного сплава на основе хрома (X65HBF), $t = 1,0$ мм; $s = 0,1$ мм/об: 1 – КНТ-16; 2 – КНТ-16-(Ti-TiN-TiZrCrN); 3 – КНТ-16-(Ti-TiN-TiAlZrCrN); 4 – КНТ-16-(Ti-TiN-TiAlCrN)

инструмента с разработанными НМКП несколько снижается, однако остается значительным. Максимальное повышение стойкости обеспечивают СМП из БВТС с разработанными НМКП на основе сложнокомпозиционных систем Ti-TiN-TiCrAlN и Ti-TiN-TiZrCrN. В частности, СМП из КНТ-16 с разработанными НМКП обеспечивают повышение стойкости до 6-8 раз по сравнению с контрольным инструментом и в 3-5 раз – по сравнению с инструментом из КНТ-16 со стандартными покрытиями.

Точение жаропрочных сплавов (область применения S05-S10, ISO). На рис. 3 представлены результаты стойкостных исследований инструмента, оснащенного РП из БВТС с разработанными НМКП, при продольном точении жаропрочного сплава X65HBF, который был разработан специально для использования в авиакосмическом двигателестроении. X65HBF является тугоплавким сплавом, обладающим одновременно жаропрочностью и жаростойкостью. Сплавы на основе хрома также устойчивы против газовой коррозии в продуктах сгорания топлива, содержащего серу, и существенно дешевле традиционных никелевых сплавов. Полученные результаты свидетельствуют о заметных преимуществах инструмента с разработанными НМКП на основе систем Ti-TiN-TiZrCrN, Ti-TiN-TiAlZrCrN и Ti-TiN-TiCrAlN. РП с разработанными покрытиями в 2 - 3 раза превосходили по стойкости РП из КНТ-16 без покрытия.

Отсутствие экстремума кривых функции $T = f(v)$ для исследуемого диапазона условий резания, осуществляемого как для РП из КНТ-16 без покрытия, так и для инструментов с разработанными НМКП, свидетельствует о постоянстве механизма адгезионно-усталостного изнашивания и стабильности термомеханических напряжений в зоне контактирования НМКП и X65HBF. Максимальную эффективность при обработке сплава X65HBF показали НМКП на основе Ti-TiN-TiAlCrN, которые с ростом скорости резания обеспечивали наименьшую интенсивность изнашивания инструмента.

Итак, разработана методология рационального выбора функций и компонентных параметров архитектуры многослойно-композиционных нанодисперсных покрытий, формируемых при использовании про-

цессов фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения, для инструмента из безвольфрамовых твёрдых сплавов. Установлена высокая эффективность разработанных покрытий при обработке как конструкционных сталей, так и жаропрочных сплавов. Предлагаемая архитектура наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий включает три основных слоя, каждый из которых имеет строгое функциональное назначение, и обеспечивает высокую износостойкость, прочную адгезионную связь с инструментальным материалом и барьерные свойства относительно тепловых потоков и диффузии. Это позволяет решать широкую гамму задач при проектировании покрытий для режущего инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов.

Исследованиями режущих свойств инструмента из безвольфрамовых твердых сплавов с разработанными покрытиями при точении стали 45 (область применения P10-P20) и жаропрочного сплава X65HВФТ (область применения S05-S15) установлено повышение стойкости инструмента соответственно в 2,5-4 и 3-4 раза по сравнению со стойкостью инструмента без покрытия и со стандартными покрытиями. Полученный результат устанавливает возможность расширения области применения безвольфрамовых твердых сплавов с разработанными многослойно-композиционными нанодисперсными покрытиями для операций чистовой и получистовой обработки жаропрочных сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них: учеб. пособие для вузов / В. С. Панов, А.М. Чувилин. –М.: МИСИС, 2001. - 428 с.
2. Максимов, Ю.В. Нанодисперсные многослойно-композиционные покрытия для режущих инструментов / Ю.В. Максимов, Ю.И. Бубликов, А.А. Верещака, А.А. Козлов, О.Х. Хожаев, О.Ю. Хаустова // Изв. МГТУ «МАМИ». – 2012. - № 2 (14). - С. 220-230.
3. Jaworska, L. Functionally graded cermets / L. Jaworska, M. Rozmus, B. Królicka, A. Twardowska // Materials Engineering Department. - Krakow: Institute of Advanced Manufacturing Technology.
4. Hussainova, I. Effect of microstructure on the erosive wear of titanium carbide-based cermets / I. Hussainova // Wear. - 255 (2003). - P. 121-128.
5. Хожаев, О. Х. Безвольфрамовые твердые сплавы как альтернатива стандартным вольфрамосодержащим твердым сплавам / О.Х. Хожаев // Труды Всероссийской научно-образовательной конференции «Машиностроение – традиции и инновации» (МТИ-2011): сб. докл. – М.: МГТУ «Станкин», 2011. – С. 122-125.
6. Vereschaka, A.A. Development and research of environmentally friendly dry technological machining system with compensation of physical function of cutting fluids / A.A. Vereschaka, A.S. Vereschaka, S.N. Grigoriev, A.K. Kirillov, O.U. Khaustova // Procedia CIRP. - 7 (2013). – P. 311 – 316.
7. Vereschaka, A.S. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coating / A.S. Vereschaka, A.A. Vereschaka, A.K. Kirillov // Key Engineering Materials. - 2012. - Vol.496. - P. 67.
8. Vereschaka, A.S. Working capacity of the cutting tool with wear resistant coatings / A.S.Vereschaka. – М.: Машиностроение,1993. – 336 p.
9. Береснев, В.М. Многокомпонентные и многослойные вакуумно-дуговые покрытия для режущего инструмента / В.М. Береснев, М.Ю. Копейкина, С.А. Клименко // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники». – 2008. - № 1. – С. 152 – 158.

Материал поступил в редколлегию 18.07.14.