

The Bulletin of Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev
ISSN 1609-1817
2017, Vol. 103, No. 4, pp. 116-122

MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES OF FILTERED CATHODIC-VACUUM-ARC DEPOSITION OF COATINGS FOR VARIOUS CUTTING TREATMENT CONDITIONS

Seitkulov Abdumalik Rahimovich, Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor, Kazakh National Research Technical University named after K.I.Satpayev, Almaty, Kazakhstan, a.seitkulov@mail.ru

Zhussupov Kenes Amirlovich, Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor, Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpayev, Almaty, Kazakhstan, kenes_atabai@mail.ru

Karabashev Oralbek Ernazarovich, master, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan, oralbek_89@mail.ru

Abstract. The process of filtered cathodic-vacuum-arc deposition of coatings is studied. The use of this technology makes it possible to synthesize multicomponent nitrides and to form defectless structures of the no-microdrop phase that occur in standard arc deposition processes. The obtained nanostructured multicomponent nanodispersed systems provide a significant increase in wear resistance of the proposed complex. A mathematical model of the deposition of coatings is proposed. The interval of variation of the process parameters was chosen in such a way that the values of the variable parameters within the selected region were practically realizable, and the developed model was valid for the entire control area of the process of formation of multicomponent coatings. A mathematical model that establishes the links between the most significant parameters of the process of deposition of coatings and the resistance of the tool has been used to optimize the technology of coating application. The influence of structure, parameters, morphology and composition of layers on tool resistance was established. The morphology of the surface of the wear-resistant layer obtained using the developed technology clearly demonstrates a significant improvement in the quality of the surface layer in the absence of microdroplets. The influence and interrelation of the main parameters of the coating process on its important performance characteristics are studied. Investigation of the wear mechanism of a tool from a hard alloy with various wear-resistant complexes has shown that the prevailing mechanism of wear of a cutting tool over a wide range of processing conditions is adhesive-fatigue wear. The developed methodology for the formation of wear-resistant complexes was used for cutting various processed materials for finishing, semi-finished and heavy-loaded cutting processes. Tests of various types of cutting tools with developed coatings showed an increase in tool life several times when turning structural steels and hard-to-work materials. The results of testing the cutting properties of high-speed drills and end mills with the developed compositions of wear-resistant complexes indicate the significant advantages of high-speed drills with the developed compositions not only in comparison with control drills without coatings, but also with drills with standard coatings.

Keywords: tool, coating, wear, structure, durability.

УДК 621.9.07

А.Р.Сейткулов¹, К.А.Жусупов², О.Э.Карабашев¹

¹Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И.Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

²Казахская академия транспорта и коммуникаций им.М.Тынышпаева, г. Алматы, Казахстан

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРУЕМОГО КАТОДНО-ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Аннотация. Исследован процесс фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения покрытий. Предложена математическая модель процесса осаждения покрытий. Установлено влияние структуры, параметров, морфологии и состав слоев на стойкость

инструмента. Изучено влияние и взаимосвязь основных параметров процесса нанесения покрытий на его важные эксплуатационные характеристики. Испытания различных типов режущего инструмента с разработанными покрытиями показали повышение стойкости инструмента в несколько раз при точении конструкционных сталей и труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: инструмент, покрытия, изнашивание, структура, стойкость.

Режущие инструменты с покрытием получили широкое применение для высокопроизводительных процессов обработки резанием большой гаммы обрабатываемых материалов вследствие относительной сбалансированности твердости и вязкости композита «покрытие-субстрат» и существенного повышения эксплуатационных свойств инструмента. Между тем, использование инструмента с покрытием достаточно ограничено для резания труднообрабатываемых материалов, прерывистых процессов, черновых и супертяжелых операций обработки. Это предопределяется относительно низкой стабильностью свойств при нагреве до температур начала активных релаксационных процессов, каковыми являются температуры, возникающие при резании на наиболее употребительных режимах обработки.

Использование технологии фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО), позволяющей синтезировать четырех – пятикомпонентные нитриды на различных субстратах (керамика, твердые сплавы, специальные субстраты медицинского назначения и т.д.) в широком диапазоне изменения температур синтеза 200-800⁰С и формировать бездефектные структуры практически с полным отсутствием макро- и микрокапельной составляющих пароионного потока, свойственных для стандартных процессов дугового осаждения. Кроме того, использование процессов ФКВДО позволяет синтезировать мультифазные, супермногослойные, наноструктурированные многокомпонентные нанодисперсные системы (МНС), способные существенно повысить

износостойкость композита «МНС–субстрат» при воздействии внешних термомеханических напряжений стационарного и прерывистого характера [1].

Следует отметить некоторую специфику формирования МНС при использовании процессов ФКВДО. В частности, введение в состав МНС алюминия, имеющего при температурах осаждения покрытий 600-700⁰С максимальный коэффициент диффузии в твердосплавный субстрат (например, субстрат из сплава Т14К8) среди всех элементов в составе многокомпонентных систем МНС, способствует формированию на границах «покрытие – субстрат» диффузионной зоны, резко увеличивающего адгезионную прочность между МНС и твердосплавным субстратом (до 70-120 Н).

Исследование свойств МНС, синтезируемых на различных субстратах позволили установить их высокие характеристики по жаростойкости. Известно, что температуры начала интенсивного окисления МНС возрастает на 25-30 %. Это связано с образованием на поверхности многокомпонентных нитридов при окислении стабильных оксидных плёнок Al₂O₃ и Cr₂O₃, а так же сложного оксида типа шпинели из компонентов металлической подрешетки нитрида.

Исследование механизма отказа (изнашивания) инструмента из твёрдого сплава с МНС показала, что материал МНС обладает высокой термостабильностью. Например, в процессе исследования состава, структуры и физико-механических свойств МНС осаждённой на твёрдосплавный инструмент после 30-40 минут резания при

температурах резания порядка 800-1000°C, свидетельствуют об отсутствии разупрочнения материала МНС при стабильных параметрах микроструктуры. Результатом указанного является 4-5 кратное повышение стойкости инструмента на операциях непрерывного (продольное точение) и прерывистого (симметричное торцовое фрезерование) резания. Таким образом, инструментальный материал с МНС можно рассматривать как композиционный материал с оптимальным сочетанием поверхностных (твердость, теплостойкость, износостойкость и т.д.) и «объемных» (вязкость, прочность при изгибе, сжатии и т.д.) свойств. Такой материал обладает сбалансированным сочетанием обычно противоположных по своим эффектам свойств материала и может приблизиться к свойствам гипотетического «идеального» инструментального материала с оптимальным сочетанием твердости и прочности.

Причиной наблюдаемого эффекта может являться то, что многокомпонентные нитриды, предлагаемые в качестве покрытий, могут быть отнесены к так называемым, высокоэнтропийным соединениям. Высокая стабильность состава, структуры, а значит и свойств высокоэнтропийных соединений может быть связана с минимизацией свободной энергии образования из-за максимально возможной конфигурационной составляющей их энтропии [2].

При использовании технологии ФКВДО формирование наноструктурированных покрытий на рабочих поверхностях режущих инструментов осуществляли при следующих процессах:

- ассилирующей бомбардировки (импульсной или постоянной) металлическими или газовыми ионами с энергиями от 10 до 200 КэВ для эффективного смешивания элементов осаждаемого конденсата;

- имплантации в осаждаемый конденсат элементов внедрения (ионов металла или газа) для сдерживания роста размеров зерен при температурах синтеза покрытия и обеспечения высокой прочности адгезионной связи между покрытием и субстратом (инструментальным материалом);

- повышения степени ионизации конденсируемого паро-плазменного потока для снижения температуры синтеза покрытия и сдерживания роста размеров зерен;

- планетарного перемещения инструмента относительно плазменного потока с различными скоростями для создания слоев наноразмерной толщины многослойно- композиционного покрытия конденсируемого на субстрат.

Для выбора состава слоев многослойно-композиционно- наноструктурного покрытия (МКНП) необходимо использование модели изнашивания режущего инструмента. Для указанной цели было принято ключевое положение о том, что превалирующим механизмом изнашивания режущего инструмента в широком диапазоне изменения условий обработки является адгезионно-усталостное изнашивание [1,3]. В соответствии с таким подходом минимизация уровня 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 – сопротивляемость 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, соответственно при термическом и механическом активировании.

Величину N_T можно оценить по формуле:

$$N_T = v \cdot T \cdot e - Q_T / K\theta, \quad (3)$$

где v – частота собственных валентных колебаний атомов; T – время; Q_T – энергия термической активации; K – постоянная Больцмана; θ – абсолютная температура. Величину N_M можно также установить при использовании следующей зависимости:

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

где ρ_1 – плотность дислокаций; S – средняя длина пробега дислокации; b – вектор Бюргерса.

Скорость движения дислокаций можно оценить по формуле:

$$V_D = S \cdot \tau^n, \quad (5)$$

где τ – напряжение; n – показатель степени, зависящий от твердости материала.

По формулам (1) – (5) можно качественно оценить влияние различных факторов на склонность покрытия и обрабатываемого материала к адгезии. Эта склонность будет возрастать при следующих условиях:

- при увеличении температуры (до момента начала интенсивного окисления и термического разупрочнения «мостиков адгезии»);

- при увеличении частоты собственных колебаний валентных атомов, которая коррелирует со статистическим весом атомов наиболее стабильных электронных конфигураций;

- при росте подвижности дислокаций V_D , которая обратно пропорциональна твердости ИМ (покрытия).

Термическую составляющую схватывания можно оценить по температуре плавления вещества (соединения):

$$N = C \cdot T \cdot \theta / \theta_{пл}, \quad (6)$$

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

При оптимальном составе наружного слоя МКНП достигается соблюдение условия $Ma \rightarrow \min$.

Анализ зависимостей (1-6) позволяет констатировать, что при выборе материала износостойкого слоя многослойно-композиционного покрытия, предпочтение следует отдавать твердым тугоплавким соединениям, содержащим максимальное количество устойчивых конфигураций типа sp^3 (материалы с преимущественно металлическими связями), s^2p^6 (материалы со смешанными типами связей) и d^5 (материалы с ковалентными и ионными связями).

Для качественной оценки составов слоев многослойно-композиционного покрытия была произведена систематизация тугоплавких соединений по видам кристаллохимических связей принципиально пригодных для использования в композиционно-многослойном покрытии.

Для формирования МКНП использовали установку ВИТ-2, которая позволяет реализовывать инновационные процессы ФКВДО.

Реализацию методологических положений по формированию МКНП производили применительно к нескольким типам режущего инструмента – резцам и торцовым фрезам с механическим креплением сменных многогранных пластин (СМП), цельнотвердосплавным и быстрорежущим сверлам и концевых фрезам.

Количественный анализ МКНП на основе $Ti-TiN-(Ti,Al)N$ показал, что соотношение Ti/Al в износостойком слое $(Ti,Al)N$ слое существенно изменяется при изменении таких параметров процесса

ФКВДО, как – ток дуги при испарении титана I , давление азота p и напряжение смещения при осаждении покрытия U . В частности, изменение I от 40 до 80 А приводит к изменению массовой доли Ti в покрытии от 21,3 до 38,3 % при соответствующем изменении массовой доли Al от 44,7 до 33,0 %, что полностью подтверждает положения работ. Очевидно, что изменение состава слоев МКНП оказывает сильное влияние и на режущие свойства инструмента.

Изучено и установлено сильное влияние основных параметров процесса ФКВДО (I, p, U) при формировании износостойкого слоя $(Ti, Al)N$ на его важнейшие характеристики – микротвердость, толщина, прочность адгезии с промежуточным слоем TiN .

Установлено, что с увеличением U изменение микротвердости слоя $(Ti, Al)N$ имеет экстремальный характер, в то время как его толщина уменьшается, а прочность адгезии со слоем TiN возрастает.

Разработку математических моделей процесса ФКВДО проводили

$$T = 2,39 \cdot I_{Ti}^{-8,60} \cdot p_N^{-3,29} \cdot U_c^{-0,33} \exp(8,26 \cdot 10^{-2} I_{Ti} + 13,7 p_N + 7,88 \cdot 10^{-3} U_c)$$

Проведены широкие исследования структуры, параметров, морфологии и состав слоев МКНП на основе системы $Ti-TiN-TiAlN$, результаты которых позволяют отметить следующее.

Износостойкий слой $(Ti, Al)N$ имеет ультрадисперсную структуру с толщиной субслоев порядка 15-25 нм. Среднее значение соотношения Ti и Al в слое $(Ti, Al)N$ составило 2,6. Слой $(Ti, Al)N$ имеет столбчатую структуру, ориентированную перпендикулярно к плоскости подслоя TiN .

Толщина субслоев промежуточного TiN -слоя также составляет порядка 25 нм, что позволяет классифицировать многослойно-композиционное покрытие как наноструктурированное.

Структура слоя $(Ti, Al)N$ свидетельствует о наноразмерной толщине субслоев слоя. Морфология поверхности

применительно к осаждению МКНП $Ti-TiN-(Ti, Al)N$ на твердосплавные СМП, предназначенные для чистовой и получистовой обработки сталей и чугунов (области применения (K01-K20, P01-P20)). Диапазон варьирования факторов p, U, I выбирали таким образом, чтобы разрабатываемая модель была справедлива для всей области управления, а значения варьируемых факторов внутри выбранной области были практически реализуемы.

Выбранные диапазоны варьируемых факторов имели следующие значения: $p = 5 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-1}$ Па, $U = 75 - 200$ В, $I = 40 - 130$ А. Математическая модель, устанавливающая связи между наиболее значимыми параметрами процесса ФКВДО I, p, U и стойкостью инструмента T , оснащенного СМП из T14K8 с МКНП $Ti-TiN-TiAlN$ применительно к продольному точению стали 45 НВ 200 с $t=1,0-4,0$ мм; $S=0,15-0,6$ мм/об и $v=150-350$ м/мин, была использована для процедуры оптимизации процесса ФКВДО и имела следующий вид:

износостойкого слоя $(Ti, Al)N$, полученного при использовании стандартной и разработанной ФКВДО технологий, наглядно демонстрирует существенное улучшение качества поверхностного слоя при практически полном отсутствии микрокапель.

Разработанную методологию формирования МКНП использовали и для получения составов МКНП для вариантов чистового, получистового и тяжелого резания широкой гаммы обрабатываемых материалов.

Для оценки режущих свойств различных типов инструмента с разработанными МКНП были проведены широкие лабораторные и производственные исследования различных типов режущего инструмента с разработанными покрытиями.

Эффективность полученных многослойно-композиционных покрытий сравнивали с соответствующими характеристиками инструмента, имеющего стандартные покрытия.

Исследования проводили при сухом резании или использовании смазочно-охлаждающих технологических сред при точении, сверлении, фрезеровании сталей и труднообрабатываемых материалов с использованием стандартного станочного оборудования.

Основные условия точения стали 45 (180 HB) твердосплавным инструментом, оснащенным СМП SNMG 120408 (ISO P25) следующие: $v = 200-350$ м/мин; $S = 0,201$ м/мин; $t = 1,0$ мм. Геометрические параметры режущей части резца имели следующие значения: $\phi = \phi_1 = 45^0$; $\gamma = -9^0$; $\alpha = 6^0$; $\lambda = 0$.

Полученные данные испытаний СМП с разработанными составами покрытий показали их высокую эффективность не только при продольном точении стали 45, но и при точении и фрезеровании труднообрабатываемых хромоникелевых сплавов типа ХН77ТЮР. В частности, применение разработанных составов покрытий с наноразмерными

субслоями как при сухом резании, так и при резании с жидкими смазочно-охлаждающими технологическими средами позволяет повысить стойкость инструмента в 2..5 раз при точении конструкционных сталей (на примере стали 45) и труднообрабатываемых материалов (на примере хромоникелевого сплава ХН77ТЮР).

Результаты исследований режущих свойств быстрорежущих сверл и концевых фрез с разработанными составами износостойких комплексов свидетельствуют о существенных преимуществах быстрорежущих сверл с разработанными составами не только по сравнению с контрольными сверлами без покрытий (стойкость до 10 раз выше), но и со сверлами со стандартными покрытиями (стойкость до 3,5-5 раз выше).

Получена математическая модель, устанавливающая связь между наиболее значимыми параметрами процесса ФКВДО и стойкостью инструмента. Установлено, что непосредственными причинами интенсивного разрушения покрытий в широком диапазоне изменения условий обработки является адгезионно-усталостное изнашивание.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Верещака А.С. Некоторые методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента. В кн. Высокие технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – С. 210-231.
- [2] E. Trent, P. Wright. *MetalCutting*. Seconded. Butterworth-Heinemann, Boston, 2000.
- [3] Волхонский А. Разработка мультислойных наноструктурных покрытий для режущего твердосплавного инструмента расширенной области применения. Дис. на соискание учёной степени к.т.н.: - М.: НИТУ «МИСиС». 2012. - С. 145.

REFERENCES

- [1] A.S. Vereshchaka. *Nekotorye metodologicheskie principy sozdaniya funkcional'nyh pokrytij dlya rezhushchego instrumenta*. [in Russian: Some methodological principles of creating functional coatings for cutting tools] In the book High technologies in mechanical engineering. Kharkiv: NTU "KhPI" Publ., 2007, pp. 210-231.
- [2] E. Trent, P. Wright. *MetalCutting*. Seconded. Butterworth-Heinemann, Boston, 2000.
- [3] Volkhonsky A. *Razrabotka mul'tislojnyh nanostrukturnyh pokrytij dlya rezhushchego tverdosplavnogo instrumenta rasshirennoj oblasti primeneniya*. [in Russian: Development of multilayer nanostructured coatings for the cutting carbide tool of the extended field of application] Dis. for the academic degree of the Ph.D. Moscow, NITU "MISiS" Publ., 2012, 145 p.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРУЕМОГО КАТОДНО-ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Сейткулов Абдумалик Рахимович, к.т.н., асс. профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан, a.seitkulov@mail.ru

Жусупов Кенес Амирлович, к.т.н., доцент, Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М.Тынышпаева, г. Алматы, Казахстан, kenes_atabai@mail.ru

Карабашев Оралбек Эрназарович, магистр, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И.Сатпаева, г. Алматы, Казахстан, oralbek_89@mail.ru

КЕСУМЕН ӨНДЕУДІҢ ӘР ТҮРЛІ ШАРТТАРЫНА ҚАПТАМАЛАРДЫ ШӨКТИРУДІҢ ФИЛЬТРЛЕНЕТІН КАТОДТЫ-ВАКУУМДЫ-ДОҒАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Сейткулов Абдумалик Рахимович, т.ғ.к., асс. профессор, Қ.И.Сатбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан, a.seitkulov@mail.ru

Жусупов Кенес Амирлович, т.ғ.к., доцент, М.Тынышбаев атындағы Қазақ көлік және коммуникациялар академиясы, Алматы қ., Қазақстан, kenes_atabai@mail.ru

Карабашев Оралбек Эрназарович, магистр, Қ.И. Сатбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан, oralbek_89@mail.ru

Андатпа. Филтрленетін катодты-вакуумды-доғалық процес зерттелді. Қаптамаларды шөктіру процесінің математикалық моделі ұсынылды. Құрал шыдамдылығына қабаттар құрылымының, параметрлерінің және құрамының әсері анықталды. Қаптамалар жапсыру процесінің негізгі параметрлерінің оның маңызды пайдалану сипаттамаларына әсері мен өзара байланысы зерттелді. Жобаланған қаптамалармен жасалған әр түрлі құралдарды сынағанда құрылымдық болаттар мен қиын өңделетін материалдарды жонғанда кесу құралдарының шыдамдылығының бірнеше есе өскенін көрсетті.

Түйінді сөздер: құрал, қаптама, тозу, құрылым, шыдамдылық.

Статья поступила в редакцию 07.11.17. Актуализирована 15.11.17. Принята к публикации 24.11.17
