

СЛОИСТЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ С НАНО-ДИСПЕРСНЫМ ПОКРЫТИЕМ

У цієї статті розглядається розробка шаруватого композиційного матеріалу, що включає твердосплавний субстрат, керамічний шар і нано-дисперсне багатослойове покриття. Кожен елемент шаруватого інструментального матеріалу виконує індивідуальні функції. Карбідний шар забезпечує підвищену в'язкість і міцність інструментального матеріалу, керамічний шар забезпечує опірність матеріалу окисленню, корозії і високотемпературне зменшення при підвищенні температури, нано-дисперсне багатослойове покриття знижує термо-механічні напруження на передній поверхні інструмента і зменшує поверхневі дефекти кераміки.

В настоящей статье рассматривается разработка слоистого композиционного материала, включающего твердосплавный субстрат, керамический слой и нано-дисперсное многослойное покрытие. Каждый элемент слоистого инструментального материала выполняет индивидуальные функции. Карбидный слой обеспечивает повышенную вязкость и прочность инструментального материала, керамический слой обеспечивает сопротивляемость материала окислению, коррозии и высокотемпературному разупрочнению при повышении температуры, нано-дисперсное многослойное покрытие снижает термо-механические напряжения на передней поверхности инструмента и уменьшает поверхностные дефекты керамики.

In the present paper the development of layered composite material build up on a carbide substrate, a ceramic layer and a nano-scale multilayered coating is reviewed. Each element of a layered tool material fulfills individual functions. The carbide layer provides the raised toughness and strength of tool material, the ceramic layer provides resistance of a tool material to oxidation, corrosion and high-temperature weakening at elevated temperatures, the nano-scale multilayered coating decrease of thermal-mechanical stresses on the rake face of the tool and eliminates superficial defects of the ceramic.

Ключевые слова: слоистая композиционная керамика; многослойно-композиционное нанодисперсионное покрытие; фильтруемое катодное вакуумно-дуговое осаждение; обработка; стойкость инструмента

1. Введение

Одним из ключевых звеньев технологической системы резания является режущий инструмент. В процессе резания инструмент подвергается воздействию высоких термомеханических напряжений, особенно для таких продвинутых процессов как сухое резание, высокоскоростная обработка, резание с большими сечениями среза, резание труднообрабатываемых материалов. Разработка новых высокотехнологичных процессов обработки требует применения адаптированного режущего инструмента.

Основными инструментальными материалами являются: легированные углеродистые стали, быстрорежущие стали, твердые сплавы, сверхтвердые инструментальные материалы (алмазные и из кубического нитрида бора).

Всем группам инструментальных материалов присуща двойственность основных свойств [1-3]. Более твердые и более износостойкие материалы об-

34

ладают меньшей вязкостью и стабильностью свойств при циклических нагрузках, также как при нестабильных условиях или при прерывистом резании. Материалы, которые лучше сопротивляются различным механическим и термическим нагрузкам часто хуже сопротивляются изнашиванию. Инструментальный материал с идеальными свойствами должен обладать сбалансированным сочетанием высокой твердости и вязкости, иметь химическую инертность относительно материала заготовки и сохранять свойства при повышении температуры. В частности, твердость и вязкость являются противоположными свойствами и в настоящее время не существует инструментального материала, который бы интегрировал все указанные свойства одновременно [1-3]. Для преодоления двойственности противоречий свойств производят различные инструментальные материалы композиционного типа. В частности, все более широкое применение получают инструменты из быстрорежущей стали и твердого сплава с износостойкими покрытиями, а также инструменты с модифицированными поверхностными свойствами [1,2,4-7]. Разработаны слоистые инструментальные материалы, в которых комбинируются слои из вязких и прочных твердых сплавов и высокотвердой и теплоустойчивой керамики [8].

Применение инструментального материала способного сопротивляться термическому разупрочнению и интенсивному разрушению режущей части инструмента представляется простым решением проблемы [5,8,9]. Таким материалом могла бы стать керамика, комбинирующая при спекании однофазной или многофазной структурами на основе окислов, карбидов или нитридов металла. В отличие от спеченных твердых сплавов, керамика не содержит металлической связки и сохраняет высокую твердость при нагреве до температур выше 1200 °С [8,10,11]. Кроме того керамика из нитрида кремния (Si₃N₄) обладает такими свойствами как: высокая твердость, сопротивляемость окислению, повышенной теплопроводностью и сопротивляемостью «термошоку» [11]. Керамический инструмент способен вести обработку на скоростях резания обычно превышающих 500 м/мин.

Однако применение керамики чрезвычайно ограничено вследствие её низкой прочности и вязкости разрушения в сравнении с твердосплавным сплавом. В процессе резания, особенно в условиях колебания механических и термических напряжений, наблюдается формирование микротрещин ведущих к микро скалыванию режущей кромки или полному хрупкому разрушению режущей части керамического инструмента [8-11].

В этой связи разработка материала в виде слоистого композита, интегрирующего свойства твердого сплава, керамики и нанодисперсного покрытия в едином геометрическом теле режущего инструмента является актуальной научной проблемой, рассматриваемой в настоящей статье.

2. Слоистая композиционная керамика с нанодисперсным многослойным покрытием

2.1. Предварительные условия (постановка научных задач)

С учетом тяжелых условий термомеханического нагружения режущей части инструмента для продвинутых технологий обработки была сформулирована концепция инструментального материала со сбалансированным сочетанием основных свойств (рис.1). Такой материал имеет трехслойную архитектуру, включающую слой из твердого сплава (3), слой из керамики (2) и нано-дисперсное покрытие (1). В подобном материале интегрируются свойства всех трех элементов, входящих в его состав. В частности, твердосплавный субстрат обеспечивает достаточную прочность и вязкость, керамический слой обеспечивает высокую твердость, теплоустойчивость и износостойкость, нанодисперсное многослойное покрытие (НМП) обеспечивает благоприятную трансформацию термо-механических напряжений и залечивает поверхностные дефекты керамического слоя. Разрабатываемый материал получил наименование «слоисто-композиционная керамика» (СКК).

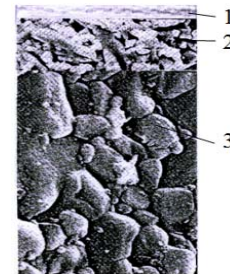


Рисунок 1 – Архитектура слоисто-композиционной керамики (СКК) с нанодисперсным многослойно-композиционным покрытием (НМП): 1 – нано-дисперсное многослойно-композиционное покрытие; 2 – керамический слой; 3 – твердосплавный субстрат.

Введение НМП в архитектуру СКК обосновывается следующим.

Свойства керамического слоя СКК чрезвычайно чувствительны к поверхностным дефектам, которые формируются в процессе его обработки. В частности при шлифовании и доводке в поверхность керамического слоя формируются дефекты в виде микротрещин, микропор, механических повреждений, остаточных растягивающих напряжений и так далее [8]. Подобные дефекты оказывают сильное негативное влияние на свойства керамического слоя.

Кроме того, керамический режущий инструмент характеризуется высоким уровнем нормальных контактных напряжений на передней поверхности инструмента и концентрацией термических напряжений непосредственно у режущей кромки [8,9,10]. Указанное выше является основной причиной высокой вероятности хрупкого разрушения инструмента из СКК, которое характеризуется микровыкрашиванием режущей кромки или полным хрупким разрушением режущей части инструмента.

Улучшение поверхностных свойств керамического слоя СКК и снижение вероятности хрупкого разрушения инструмента производили путем нанесения покрытия (НМП), формируемого при использовании процесса фильтруемого катодного вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) [4,8,12-14].

При этом достигали следующие эффекты:

- зализывание упомянутых поверхностных дефектов керамического слоя и формирование благоприятных остаточных напряжений сжатия путем ионной бомбардировки в процессе ФКВДО;
- снижение нормальных контактных напряжений и уменьшение концентрации термических напряжений на передней поверхности инструмента путем некоторого роста трения и длины контакта при незначительном увеличении нормального усилия.

Проведение предварительных исследований позволило выбрать следующие составы элементов слоистого композита (см. рис. 1): субстрат 3 на основе твердого сплава WC-TaC-Co с ультрадисперсной структурой; керамический слой 2 на основе сложной композиции (Al_2O_3-AlN or $Al_2O_3-ZrO_2$; or $(Si_3N_4-TiC-Y_2O_3)$); слой 1 на в виде нано размерного многослойного покрытия на основе трехслойной системы Ti-TiN-(TiCrAlN) [5,8].

2.2. Технология изготовления слоисто-композиционной керамики (СКК).

Технология производства ЛСС включала следующие процессы: горячее прессование, гидростатическое уплотнение и газо-статическое доуплотнение материала. Использование указанных технологий позволили успешно решить чрезвычайно трудную научно-техническую проблему соединения таких гетерогенных материалов как "керамика - твердый сплав", "керамика - покрытие", и т.д.

Большое внимание было уделено выбору материалов керамического слоя и твердосплавного субстрата. Такой выбор был достаточно ограничен вследствие необходимости соблюдения требований совместимости теплофизических и механических свойства соединяемых материалов. (коэффициент теплового расширения, модуль упругости, и т.д.). Прочная адгезия между границами слоев являлась одним из главных условий для нормального функционирования инструментов из СКК. При разработке СКК предпочтение отдавали составам слоев 2 и 3 (см. рис.1) формирующих границы с диффузионным слоем [8].

Технологическая схема изготовления СКК включала следующие процессы:

1. Прессование трехкомпонентного порошка из WC, TaC, Co, что обеспечивает получение карбидного слоя толщиной 2,5-3 мм.
2. Горячее прессование в графитовой прессформе заготовки из Al_2O_3 с добавкой 10 % AlN толщиной 1,5 – 2,0 мм.
3. Проведение повторного горячего прессования слоистого композита при температуре 1400 °C с выдержкой в течение 5 мин., при давлении 345 Н/мм².

4. Шлифование пластин из СКК с получением следующих толщин слоев: толщина твердосплавного слоя – 3,5 мм; толщина керамического слоя 1,5 мм.

Реализация представленной технологии позволила получить партию пластин формы SNUN (стандарт ISO) из СКК, которые были использованы для дальнейших исследований.

2.3. Технология формирования нано-дисперсных многослойно-композиционных покрытий.

Концепцию покрытия, осаждаемого на пластины из керамики, основывали на положениях рассмотренных выше. Осаждаемое покрытие должно максимально уменьшить количество поверхностных дефектов керамики и осуществить благоприятную трансформацию термо-механических напряжений на передней поверхности инструмента [4,5,8]. Необходимо также было решить задачу осаждения покрытия на субстрат с низкой электропроводностью при использовании дугового источника плазмы.

В соответствии с принятыми концептуальными положениями была разработана архитектура нано-дисперсных покрытий, содержащих несколько слоев с индивидуальными функциональными свойствами. Подобное покрытие имеет трехслойную архитектуру и включает адгезионный слой 3, износостойкий слой 1 и переходный слой 2 (Рис.2) [4,5,8].

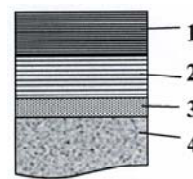


Рисунок 2 – Концепция архитектуры нано-дисперсного многослойно-композиционного покрытия: 1 – наружный слой с нано-толщинами субслоев (пример TiCrAlN, ZrCrAlN, TiCrAlSiN и т.д.); 2 – промежуточный слой (пример TiN, ZrN, CrN); 3 – адгезионный подслой (пример Ti,Zr,TiN,ZrN); 4 – субстрат (керамика).

Каждый из слоев НМП имеет индивидуальное функциональное предназначение:

- износостойкий слой 1 уменьшает сопротивляемость инструмента окислению и коррозии, снижает физико-химическую активность инструментального материала и адгезию по отношению к обрабатываемому материалу, повышает износостойкость инструмента;
- промежуточный слой 2 поддерживает повышенную адгезию со слоями 1 и 3;
- адгезионный подслой 3 обеспечивает высокую прочность адгезии НМП с керамическим субстратом 4, «залечивает» поверхностные дефекты керамического субстрата.

Синтез нано-дисперсного многослойно-композиционного покрытия (НМП) производили при использовании фильтруемого катодного вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО). ФКВДО было использовано как многообещающая технология получения покрытий с хорошей адгезией по отношению к субстрату, высокой плотности и нано-дисперсной структурой, которая способствует повышению режущих свойств инструмента. Процессы ФКВДО были реализованы на экспериментальной установке ВИТ-2 оснащенной следующими устройствами для: фильтрации паро-ионного потока от микрокапельной составляющей испаряемого металла (Ti,Zr,Cr,Al и др.); гашения микродуг; динамического смешивания газов; генерации высоко-энергетических ионов (рис.3).

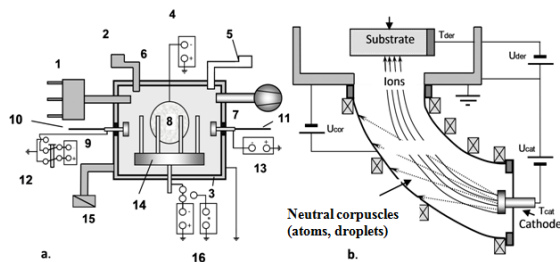


Рисунок 3 – Схема установки ВИТ-2 (а) и устройства для фильтрации паро-ионного потока (б): 1 – смеситель газа; 2 – система подачи газа (нагреватель газа); 3 – корпус установки; 4 – источник энергии для фильтрующего устройства; 5 – система мониторинга температуры; 6 – вакуумная система; 7,9 – стандартные испарители; 8 – система фильтрации паро-ионного потока; 10,11 – интегральные охлаждающие системы для испарителей; 12, 13 – источники энергии для испарителей; 14 – поворотный стол для размещения образцов для нанесения покрытий; 15 – система охлаждения и нагрева камеры установки; 16 – система подачи напряжения в импульсном режиме на объект нанесения покрытий.

Пластины из СКК перед размещением в камере установки подвергали предварительной химико-механической обработке с целью предварительной подготовки (ультразвуковая очистка, промывка, сушка). В процессе осаждения покрытия пластины из СКК совершали планетарное перемещение в камере установки, что обеспечивало получение покрытий равномерной толщины. Формирование НМП осуществляли при следующих условиях [4,5]:

- производили бомбардировку осаждаемого конденсата металлическими или газовыми ионами (энергии 0,5-1,5 кэВ) с целью перемешивания осаждаемого конденсата и повышения вероятности формирования нано-дисперсных покрытий;
- устанавливали температуру осаждаемого конденсата, уровень которой способствовал повышению степени ионизации паро-ионного потока и предотвращал рост размеров зерен покрытия;
- изменяли скорость перемещения и угловую позицию поверхности субстрата из СКК по отношению к паро-ионному потоку, что способствовало формированию наноразмерных толщин субслоев слоев НМП.

3. Методика экспериментальных исследований

3.1. Оборудование

Объектом исследования служили режущие пластины из СКК с МНП разработанные для сухой обработки, высокоскоростного резания, обработки материалов в твердом виде и резания труднообрабатываемых материалов.

Исследования физико-механических свойств выполняли для режущих пластин со стандартным покрытием, полученным при использовании стандартных arc-PVD технологий и разработанными МНП, осаждаемыми при использовании технологии ФКВДО. Исследовали кристалло-химические свойства при использовании электронно-сканирующего (SEM) микроскопа JSM-6700F с приставкой для дисперсионно-спектральной метрометрии (EMF) JED-2300F компании Jeol. Исследовали также состав и структуру композиции «твердый сплав-керамика», «покрытие-керамика».

Были изготовлены экспериментальные образцы в виде режущих пластин из СКК, соответствующие форме SNUN (стандарт ISO) с радиусом при вершине $r=0,8$ мм. Пластины были разделены на группы, одну из которых использовали для проведения исследований физико-механических и кристалло-химических свойств, другую – для исследования режущих свойств.

Использовали режущий инструмент с механическим креплением режущих пластин из разработанных СКК с МНП, а также режущими пластинами из стандартных твердых сплавов и керамики со стандартным покрытием и без покрытия. Все пластины имели форму SNUN. Режущий инструмент имел следующие значения параметров режущей части: передний угол $\gamma = -(8-10)^\circ$; задний угол $\alpha = (6-8)^\circ$; угол в плане $\phi = \phi_1 = 45^\circ$; радиус округления режущей кромки $\rho = 15 \mu\text{m}$; размеры фаски $-0,2 \times 45^\circ$.

Исследования проводили при продольном и поперечном точении стали 45 после термообработки (HRC 42-45) и стали 50Г (HRC 58) на универсальном токарном станке 16К20 со скоростью резания $V=80-350$ м/мин; подаче $S=0,1-0,25$ мм/об; глубине резания $t=0,5-1,15$ мм, а также жаропрочного сплава ХН77ТЮК (19-22 % Cr; 2,4-2,8 Ti; 1% Al, $\sigma_b = 930-1080$ МПа) при $v=20-40$ м/мин; $S=0,1-0,15$ мм/rev; $t=0,5-1,0$ мм.

3.2. Результаты исследований и обсуждение.

Результаты сравнительных исследований свойств разработанных СКК с НМП и других инструментальных материалов представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Физико-механические свойства пластин из различных инструментальных материалов

Инструментальные материалы	Свойства				Фазовые композиции
	лотность ρ , [g/cm ³]	Микротвердость H^u_{50} , [МПа]	Прочность при изгибе σ_m , [МПа]	Коэффициент стойкости K_{TL}^*	
Керамический слой (2) СКК	3,76	2300-2350	650	1,2**	Al ₂ O ₃ , AlN
Carbide layer (3) of LCC (VK6M)	15,1	1550-1600	1420	0,6**	WC, TaC, Co
LCC with NMC	-	2300	1200-1230	1,7**	-
Mixed ceramic VOK-71	4,5-4,6	2100-2200	700-750	1**	60%Al ₂ O ₃ -40%TiC

$K_{TL}^* = K_{CTI}/K_2$ – коэффициент стойкости при точении стали 45 с $v = 270$ м/мин; $f = 0,2$ мм/rev; $a_p = 0,5$ мм, определяемый как отношение стойкости инструмента с покрытием к стойкости инструмента без покрытия; ** - данные по стойкости инструмента с покрытием получаемым при использовании технологии ФКВДО

Экспериментальные данные по оценке физико-механических свойств показали, что прочность разработанной СКК существенно выше прочности стандартной керамики. Более того, прочность при изгибе образцов СКК с НМП практически не уступает прочности при изгибе образцов из стандартных твердых сплавов ВК6-М (область применения K10-K20 (ISO стандарт).

Износостойкий слой (1) НМП полученный при использовании технологии ФКВДО имеет наноструктуру с размерами зерен порядка 40-60 нм в сравнении с размерами зерен порядка 120-140 нм для стандартных arc-PVD покрытий (см. табл. 2).

Анализ параметров НМП позволяет отметить следующее.

Качество НМП (ФКВДО), разработанных для нанесения на пластины из СКК существенно превосходит качество стандартных arc-PVD покрытий аналогичной композиции. Кроме того, использование разработанной технологии ФКВДО позволяет формировать высококачественную поверхность практически без микрокапель, характерных для стандартной arc-PVD технологии.

Микрокапли являются опасным дефектом стандартных покрытий, поэтому их фильтрация позволяет повысить прочность адгезионной связи, увеличить сопротивляемость СКК окислению и коррозии, повысить износостойкость.

Таблица 2 – Параметры структуры разработанных пластин из СКК с НМП

Материалы	Фазовый состав	Фазовые характеристики				
		Размер зерен, нм	Покрытие h_c и Суб-слой h_{sl} толщина, нм	HV, ГПа	F** Н	ΔP^* , мг/см ²
СКК Субстрат 3 (VK6-M)	86%WC, 8%TaC, 6%Co	1500-2000	-	16.00	-	54.9
СКК Слой керамики 2	90% Al ₂ O ₃ , 10% AlN	500-650	-	-	-	-
Композиция (Ti, Cr, Al)N (Стандартный КИБ)	Ti _{0,25} Cr _{0,25} Al _{0,15} N _{0,35}	120-160	$h_c = 300$	25-36	80-100	14.7
Слой НМП 1 (Ti, Cr, Al)N (Технология ФКВДО)	Ti _{0,25} Cr _{0,25} Al _{0,15} N _{0,35}	40-60	$h_c = 280$ $h_{sl} = 20-25$	31-32	120-130	15.7

ΔP^* -окисление на воздухе при 900 °C в течение 1 часа; F** the critical to the indent at scratch test on coating surfaces (criterion of adhesion)

Результаты сравнительной оценки режущих свойств пластин, изготовленных из различных инструментальных материалов и разработанных СКК с НМП при поперечном точении стали 45 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Режущие свойства пластин изготовленных из различных инструментальных материалов при поперечном точении стали 45

Режущий материал	Режущие свойства пластины при сухом поперечном точении стали 45 с $v = 420$ м/мин; $S=0,1$ мм/об; $t=0,5$ мм.	
	Стойкость при $VB_{max} = 0,25$ мм, мин	Коэффициент стойкости K_{TL}
BK6-M (86%WC, 8%TaC, 6%Co)	1,22	1
BK6-M – (Ti, Al)N (arc-PVD)	2,8	2,3
VOK-71	2,6	2,13
VOK-71-TiAlN (arc-PVD)	3,2	2,62
СКК	5,3	4,34
СКК с НМП* (FCVAD)	8,0	6,56
СКК с НМП** (FCVAD)	9,6	7,87

*нано-дисперсное покрытие Zr-ZrCrN-CrN; ** нанодисперсное покрытие Ti-TiN-(Ti, Cr, Al)N.

Лучшие режущие свойства при поперечном точении стали 45 с изменяющейся скоростью резания имели пластины из СКК с НМП на основе Ti-TiN-TiCrAlN с $K_{TL}=7,87$ в сравнении с пластинами из стандартной смешанной керамики без покрытия $K_{TL}=2,13$ (VOK-71, mixed Al₂O₃-TiC) и со стандартным покрытием $K_{TL}=2,62$ (VOK-71- TiAlN стандартная технология arc-PVD), а также в сравнении с пластинами из твердого сплава ВК6-М без покрытия $K_{TL}=1,0$ и твердого сплава ВК6-М со стандартным покрытием TiAlN.

Сравнительные результаты испытаний режущих свойств пластин из разработанных СКК с НМП при продольном точении стали 50Г и жаропрочного Ni-сплава ХН77ТЮК представлены на рис.4 и рис.5. Эти результаты также свидетельствуют о более высоких режущих свойствах пластин из СКК с НМП, особенно при резании труднообрабатываемого жаропрочного сплава (см. рис.5)

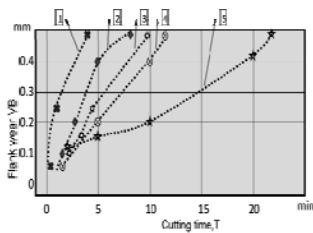


Рисунок 4 – Влияние времени резания T на величину фаски износа задней поверхности h_3 при различных условиях продольного точения стали 50Г (HRC 58) при $V = 340$ м/мин; $S=0,15$ мм/об; $t = 0,15$ мм/об; 1 – ВК6-М; dry machining; 2-ВК6-М – резание с применением рекомендованной смазочной жидкости; 3 – VOK-71, сухое резание; 4 – СКК, сухое резание; 5 – СКК с НМП, экологически дружелюбное сухое резание.

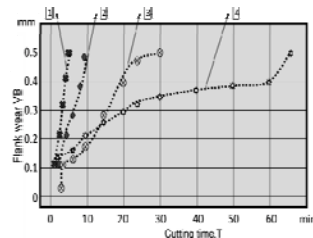


Рисунок 5 – Влияние времени резания T на износ по задней поверхности пластины h_3 при продольном точении Ni-сплава: 1 – ВК6-М, сухое резание; 2 – ВК6-М, резание с рекомендованной смазочной жидкостью; 3 – VOK-71 – сухое резание; 4 - LCC с НМП, экологически дружелюбное сухое резание.

Анализ механизма изнашивания разработанных СКК с НМП на основе Ti-TiN-TiCrAlN при сухом резании или резании с рекомендованными охлаждающими жидкостями позволяют отметить равномерное изнашивание главной задней поверхности и полное отсутствие микровыкрашиваний режущей кромки или хрупкое разрушение режущей части для всего диапазона исследованных условий резания (табл.3, рис.4 и рис.5). В тоже время для инструмента из стандартной керамики (mixed ceramic VOK-71) с покрытием или без

покрытия отказы инструмента определяются микровыкрашиваниями режущей кромки или полным разрушением режущей части инструмента.

Заключение

Разработана и исследована концепция инструментального материала в форму слоистой композиционной керамики (СКК) с нано-дисперсным многослойно-композиционным покрытием (НМП) для обработки закаленных сталей и труднообрабатываемых Ni-сплавов.

Инструмент из СКК может быть использован для обработки закаленной стали с применением охлаждающей жидкости или для сухой обработки (H10-H20 ISO Standard), а также для обработки труднообрабатываемого жаропрочного Ni-сплава (S10-S29 ISO стандарт). Анализ результатов исследований при обработке закаленных сталей и никелевого сплава инструментом из СКК с НМП позволяет отметить следующее. Стойкость инструмента из СКК с НМП превосходит стойкость твердосплавного инструмента с покрытием и стойкость стандартного инструмента из керамики с покрытием в 2,5-8,0 раз. Разработанные инструменты из СКК с НМП (технология ФКВДО) позволяют увеличить производительность резания в 1,2-1,5 раза не только по сравнению с производительностью резания твердосплавным инструментом с покрытием, но также и в сравнении с производительностью инструмента из стандартной керамики с покрытием.

Список использованной литературы: [1] A.S. Vereschaka. Working capacity of the cutting tool with wear resistant coatings - M: Mashinostroenie, 1993. 336 p. (In Russian). [2] G.Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena. Advancing Cutting Technology. Annals of the CIRP, 52/2/2003. (In English). [3] W. König, F. Klocke. Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Boren (Springer, Berlin 2007) (In German). [4] A.S. Vereschaka, A.A. Vereschaka. Methodology for creation of functional coatings for an edge tools. State-of-the-art manufacturing technology. The collector scientific papers. ISBN 978-966-384-059-8. - NTU «KhPI», 2007, pp.192-235. (In Russian). [5] A.S. Vereschaka, A.A. Vereschaka. Functional coatings for an edge cutting tools. Technology of hardening and coatings. 2010. № 6. P. 28-37. (In Russian). [6] Metel Alexander; Grigoriev Sergei; Melnik Yuri et al. Cutting Tools Nitriding in Plasma Produced by a Fast Neutral Molecule Beam // Japanese Journal of Applied Physics. 2011. V 50 No. 8. Page/Article 08JG04 (In English). [7] Metel A.S.; Grigoriev S.N.; Melnik Yu.A.; et al. Glow discharge with electrostatic confinement of electrons in a chamber bombarded by fast electrons // Plasma physics reports. 2011. Vol.37, № 7, pp. 628-637. (In Russian). [8] A.V. Elutin, V.N. Anikin, I.V. Blinkov, A.S. Vereschaka. Methodological principles of creation for high-strength layered ceramics with a coating for high-speed dry cutting. Transaction of the congress «Desain-Technological Information Science 2000». V.1-M.: MSUT STANKIN, 2000, pp.180 - 182. (In Russian). [9] Czechowski K., Pofelska-Filip I., Krollicka B. Effect of nitride nano-scale multilayer coatings on functional properties of composite ceramic cutting inserts. Bulletin of Polish Academy of the Science, Technical Scienc. Vol. 53, No. 4, 2005 (In English). [10] Whitney, T.D., 1994, Ceramic cutting tools – materials, development and performance, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A. (In English). [11] N.N., 2003, Praxis-Report No. 17: “SL 800/SL 550 C: A new generation of uncoated and coated silicon nitride ceramics”, CeramTec AG, Plochingen. (In English). [12] Metel A.S., Grigoriev S.N., Melnik Yu.A., Panin V.V. Filling the vacuum chamber of a technological system with homogeneous plasma using a stationary glow discharge // Plasma Physics Reports. 2010. Vol. 35(12), P. 1058-1067. (In Russian). [13] Sablev L.P., Andreev A.A., Kunchenko V.V., Grigoriev S.N. Vacuum-arc evaporator of metals with an extended planar cathode // Materials Science Forum. 1998. 287-288. P. 323-326. (In Russian) Reports. 2010. Vol. 35(12), P. 1058-1067. [14] Vetter J., Krug T., von der Heide V., AITiCrNO coatings for dry cutting deposited by reactive cathodic vacuum arc evaporation. Surface & Coatings Technology 174 –175 (2003) 615–619. (In English). [15] Sselte T. Nanostrukturierte Schichten in der Werkstatt. Platin AG. Werkzeugtagung 2002. (In German).