

К.А.Жусупов¹, Р.А.Козбагаров¹, Е.Б.Калиев¹, Ж.М.Макатова², Н.С.Камзанов³

¹Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный аграрный исследовательский университет,
Алматы, Казахстан

³Satbayev University, Алматы, Казахстан

E-mail: kenes_atabai@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ИЗНАШИВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА С МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ

Аннотация. Объектом исследования является твердосплавные пластины с многокомпонентными наноструктурированными системами. Выявлены возможности повышения эксплуатационных свойств многокомпонентных наноструктурированных систем на твердосплавных субстратах при использовании фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения. Проведены исследования механизмов изнашивания и разрушения твердосплавного инструмента с разработанными многокомпонентными наноструктурированными системами с использованием современных методов металлофизического анализа. Рассмотрены особенности и механизмы трещинообразования с многокомпонентными наноструктурированными системами. Исследования режущих свойств, проведенные при продольном течении, показали, что разработанные системы позволяют уменьшить износ в 3-4 раза по сравнению с инструментом без покрытия и в 1,5-2 раза по сравнению с инструментом со стандартным покрытием нитрида титана. Установлено, что характер изнашивания с более твердыми и менее пластичными износостойкими слоями имел существенные отличия от механизма изнашивания с менее твердыми и более пластичными износостойкими слоями, включавшими в свой состав нитриды циркония.

Ключевые слова. Покрытия, многокомпонентные системы, свойства покрытий, изнашивания инструментов, трещинообразование.

Введение.

Стойкость инструмента определяется как функция сложных процессов соприкосновения инструментального и обрабатываемого материалов, определяемых различными факторами. К таким факторам можно отнести кристалло-химические и теплофизико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, геометрические параметры режущей части инструмента, режимы обработки и т.д. В зависимости от условий резания указанные факторы могут становиться доминирующими или, наоборот, приобретают второстепенное значение.

Действительное соприкосновение контактирующих при резании участков обрабатываемого и инструментального материалов на порядок меньше их номинальной площади контакта. На участках фактического контакта локальное удельное давление достигает величины, при которой происходит пластическое течение металла, резко увеличивающее адгезию между контактирующими материалами, причём возникновение и разрушение мостиков адгезионной связи происходит с высокой частотой, достигающей нескольких тысяч разрушений в минуту [1]. Установлено, что размеры отдельных адгезионных пятен колеблются от нескольких микрометров до сотых долей миллиметра, а фактическая площадь контакта может составлять 10-60 % действительного участка

соприкосновения, при этом на одном метре пути резания каждая точка контакта подвергается воздействию сдвигающих напряжений. Таким образом, указанный процесс предопределяет знакопеременное нагружение контактных площадок передней и задней поверхностей инструмента и адгезионно-усталостное состояние их изнашивания.

Наиболее эффективным способом снижения данных видов изнашивания инструмента является повышение физико-механических свойств инструментального материала, прежде всего твердости, путем нанесения износостойких покрытий. Кроме того, покрытие, обладающее меньшим физико-химическим свойством по отношению к обрабатываемому материалу, снижает интенсивность адгезионных процессов, существенно повышая износостойкость контактных площадок инструмента.

Материалы и методы.

При разработке покрытий для инструмента необходимо использовать в первую очередь многослойную архитектуру наноразмерной структуры с увеличенной площадью межзёрных и межслойных границ. Такая архитектура позволяет получить повышенную сопротивляемость разрушению, в том числе - в условиях воздействия знакопеременных термомеханических напряжений. Применение такой архитектуры покрытия ведет к существенному увеличению его долговечности и позволяет добиться наращивания времени наработки режущего инструмента на отказ[2].

Проанализировав систематизированные требования к покрытию, как «промежуточной технологической среды» можно отметить, что однослойные (монослойные, однокомпонентные) покрытия в принципе не могут соответствовать перечисленным выше функциональным требованиям. Наиболее полно таким требованиям отвечают многослойно-композиционные покрытия, слои в которых имеют различное функциональное назначение.

Для решения задач исследований были отобраны многокомпонентные наноструктурированные системы(МНС)различного состава, отвечающие приведенным выше условиям:

- Zr-ZrN-(ZrCrAl)N, Cr-CrN-(TiCrAl)N, Ti-TiN-(NbZrTiAl)N, Zr-ZrN-(ZrNbTiAl)N, осаждаемые при использовании технологии FCVAD;

- Ti-TiAlN-TiAlN, осаждаемое при использовании технологииLARC.

Толщины покрытий в исследованиях составили 2.44-11.7 мкм, большой разброс толщин был выбран с целью исследования действия толщины покрытия на состояние трещинообразования. Основные свойства исследуемых МНС приведены в таблице1.

Таблица 1 - Основные свойства МНС и значение периода стойкости твердосплавных инструментов с исследуемыми МНС

№	Структура МНС	Стойкость T _c (мин), [h ₃] = 0,4 мм	Толщина субслоев(нм) и общая толщина покрытия (мкм)		Прочность адгезионной связи, L _{c2} , Н	Твердость HV, ГПа
			нм	мкм		
1	Без покрытия	8	-	-	-	18
2	TiN	18	-	2,85	31	30
3	Cr-CrN-(TiCrAl)N	31	30-45	2,75	>40	38
4	Ti-TiN-(NbZrTiAl)N	35	45-60	3,30	>40	34
5	Zr-ZrN-(ZrCrAl)N	37	15-45	2,44	39	36
6	Ti-TiAlN-TiAlN	36	55-76	11,7	>40	37

Результаты стойкостных испытаний твердосплавного режущего инструмента с разработанными МНС при точении стали 45 представлены на рисунке 1.

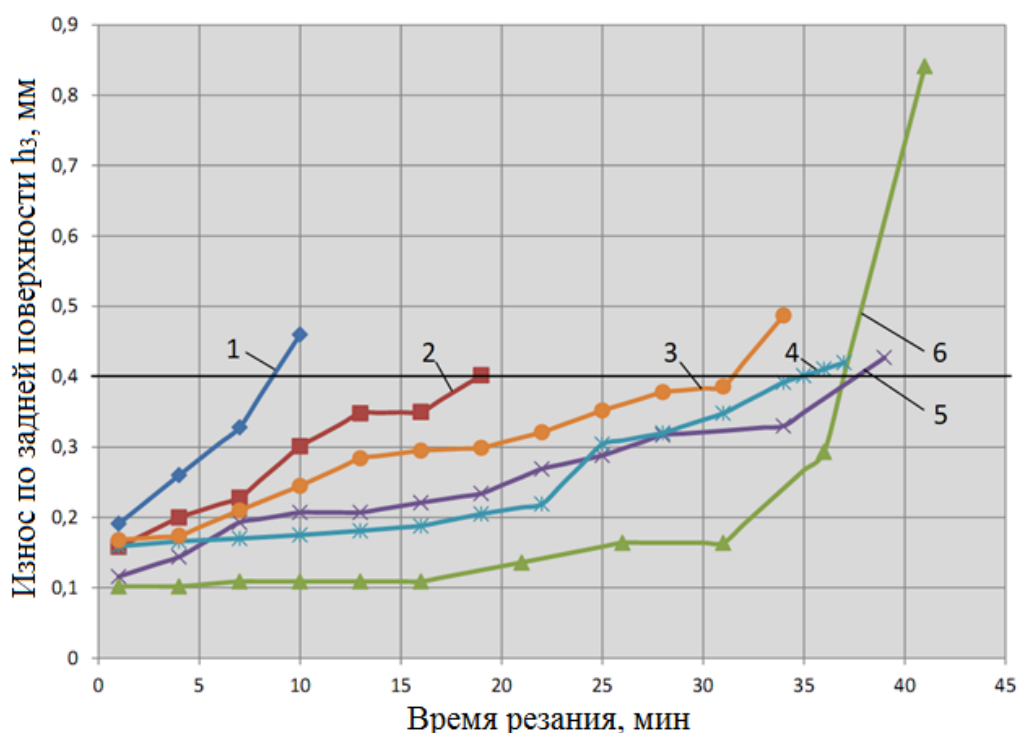


Рисунок 1 - Зависимость износа по задней поверхности h_3 от времени резания при точении стали 45

1 – без покрытия; 2 – TiN; 3 – Cr-CrN-(TiCrAl)N; 4 – Zr-ZrN-(NbZrTiAl)N;
5 – Zr-ZrN-(ZrCrAl)N; 6 – Ti-TiAlN-TiAlN

Установлено, что твердосплавные инструменты с исследуемыми МНС при продольном точении стали на используемых режимах резания имели достаточно близкие значения стойкости, составляющие 31-37 минут, при этом характер изнашивания твердосплавного инструмента с исследуемыми МНС имеет существенные отличия [3].

В частности, МНС Zr-ZrN-(ZrCrAl)N обеспечивали наибольшее повышение стойкости инструмента, составляющее 37 минут при стабильной кинетике изнашивания на этапах приработочного, установившегося и катастрофического изнашивания. Почти столь же стабильную кинетику изнашивания показали инструменты с МНС Zr-ZrN-(NbZrTiAl)N, которые имели несколько меньшую стойкость, составляющую 35 минут (рисунок 1).

Инструменты с МНС Ti-TiAlN-TiAlN также продемонстрировали высокую стойкость, составляющую 36 минут. При этом установлена менее равномерная кинетика изнашивания инструмента, которая имела следующие особенности. Показано, что если в течение 31 минуты резания (приработочный и установившийся этапы изнашивания) интенсивность изнашивания инструмента была меньше, чем у инструмента с МНС Zr-ZrN-(ZrCrAl)N и Zr-ZrN-(NbZrTiAl)N, то после 31 минуты резания изнашивание инструмента с МНС Ti-TiAlN-TiAlN резко интенсифицировалось и приобрело характер практически катастрофического изнашивания (рисунок 1). Инструмент с МНС Cr-CrN-(TiCrAl)N имел наименьшую стойкость среди рассматриваемой группы. После 31 минуты достаточно равномерной динамики изнашивания наступила заметная интенсификация износа инструмента с МНС Cr-CrN-(TiCrAl)N.

Общий характер очагов износа твердосплавной сменной многогранной пластины (СМП) с $\text{MnCZr-ZrN-(NbZrTiAl)N}$ при продольном точении стали 45 с $v = 250$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об, $t = 1$ мм после 35 минут резания представлен на рисунок 2.

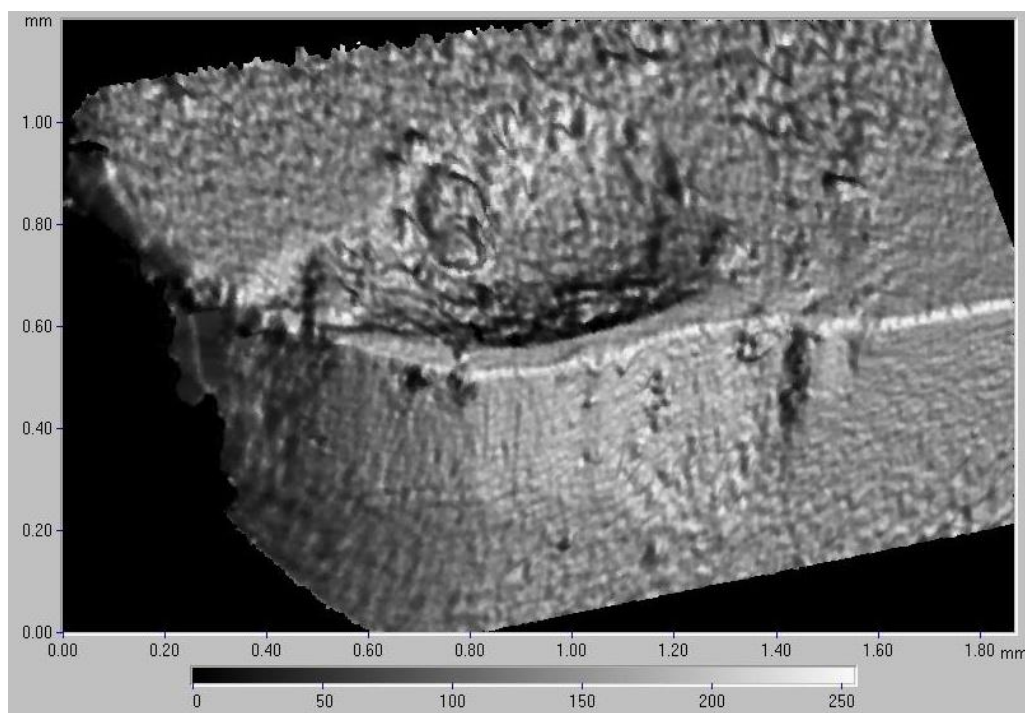


Рисунок 2 - Общий характер износа твердосплавной СМП с $\text{MnCZr-ZrN-(NbZrTiAl)N}$ при продольном точении стали 45

Для более детального исследования характера изнашивания и разрушения режущего клина СМП с $\text{MnCZr-ZrN-(NbZrTiAl)N}$ был изготовлен поперечный шлиф образца СМП, нормально расположенного относительно очагов износа его передней и задней поверхностей после 35 минут резания (рисунок 3). Были проведены исследования данного шлифа с использованием сканирующего электронного микроскопа, получены микрофотографии нормального поперечного сечения очагов износа передней и задней поверхности СИ (рисунок 4).

Результаты и обсуждение.

Как видно из представленных данных (рисунки 2 и 3), развитие очагов изнашивания передней и задней поверхностей твердосплавных СМП с $\text{MnCZr-ZrN-(NbZrTiAl)N}$ носит равномерно-сбалансированный характер без видимых сколов и очагов хрупкого разрушения. Это свидетельствует о благоприятном распределении напряжений, действующих на контактных площадках передней и задней поверхностей СМП и улучшении теплового состояния зоны её изнашивания [4].

Механизм изнашивания на передней поверхности СМП с $\text{MnCZr-ZrN-(NbZrTiAl)N}$ имеет сложную природу.

В начальной стадии при изнашивании передней поверхности преобладают адгезионно-усталостные процессы с высокой частотой колебаний контактных напряжений, существенно превышающих по величине напряжения, действующие на задней поверхности инструмента. Это приводит на следующем этапе изнашивания к разупрочнению локальных приповерхностных участков передней поверхности твердосплавной пластины и интенсифицирует процессы абразивного изнашивания (рисунок 5).

На рисунке 5 видны образования сквозных и тупиковых трещин (1-3) и проникающие в структуру покрытия микрокапель материала катода (1, 2), способствующих интенсификации изнашивания инструмента. Для зоны активного разрушения покрытия, непосредственно прилегающего к режущей кромке инструмента, характерны механизмы как абразивного, так и адгезионно-усталостного изнашивания, приводящие к активному трещинообразованию.

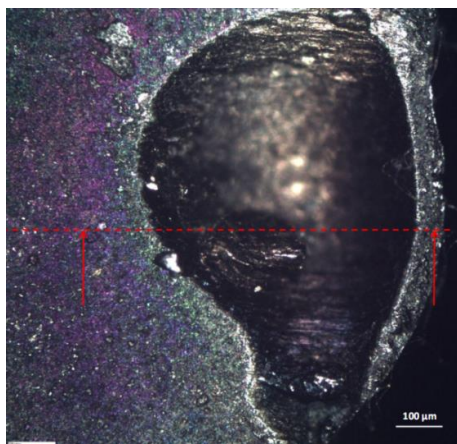


Рисунок 3- Положение поперечного шлифа относительно лунки износа передней поверхности СМП с МНС Zr-ZrN-(NbZrTiAl)N

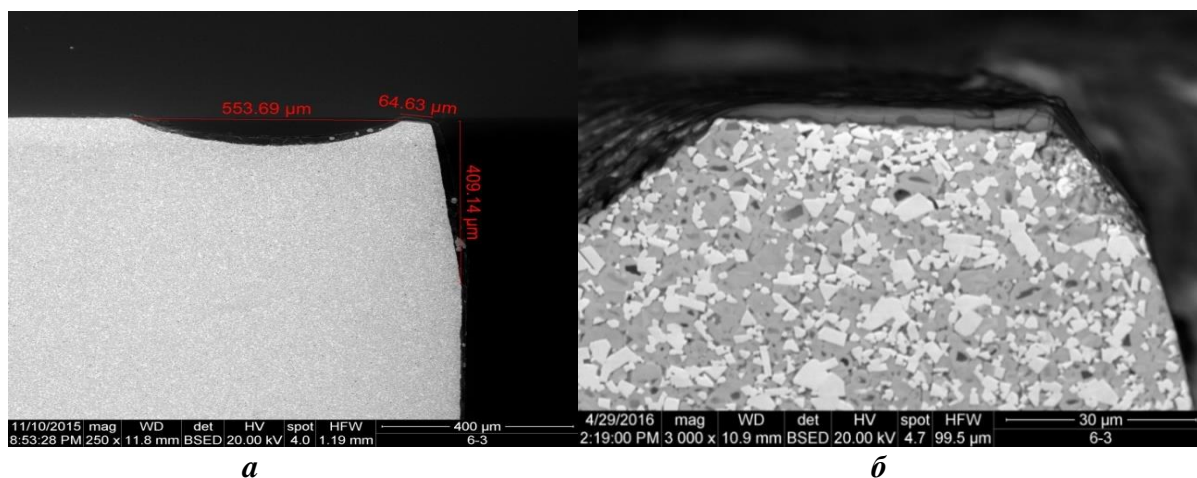


Рисунок 4- Характер износа твердосплавной СМП с МНС Zr-ZrN-(NbZrTiAl)N при продольном точении стали 45

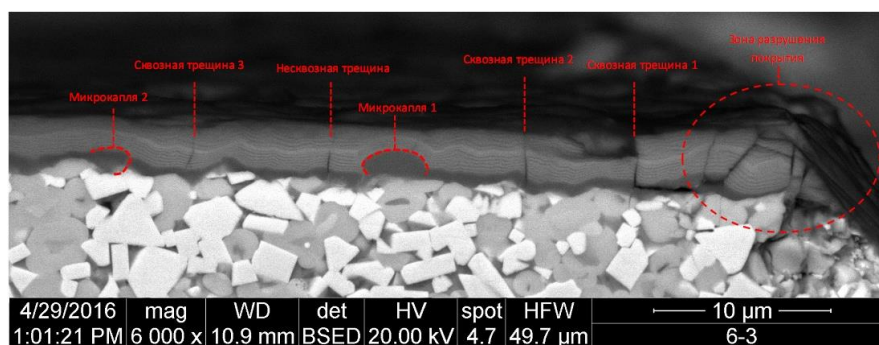
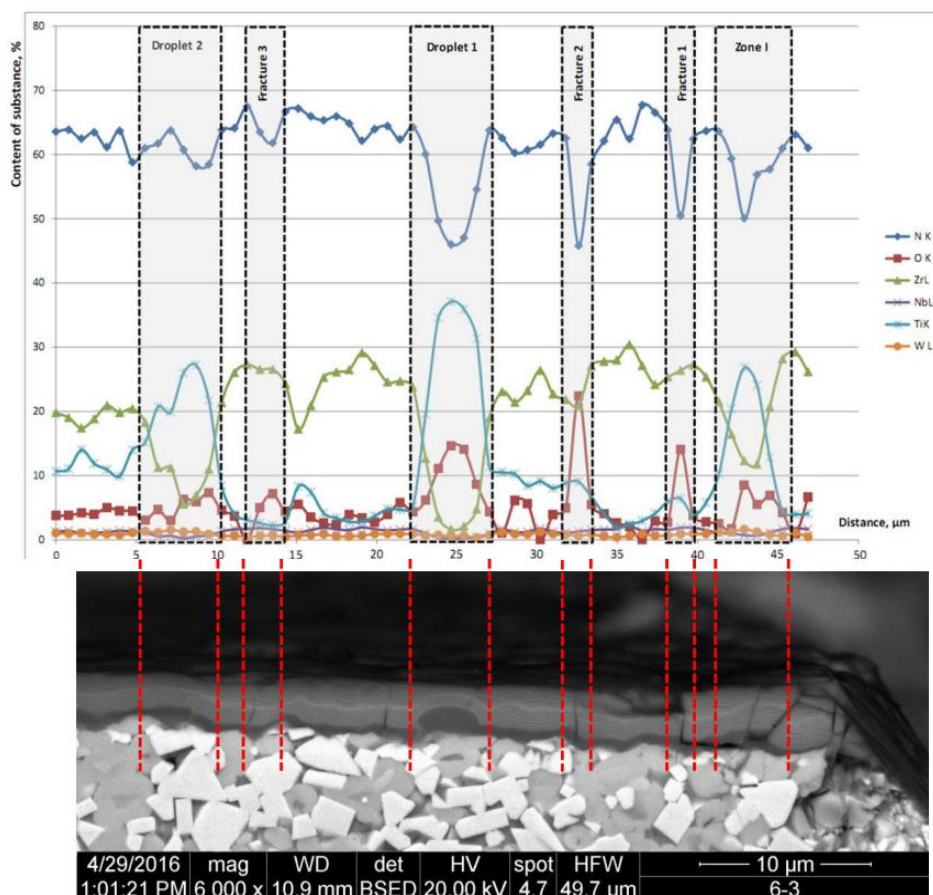


Рисунок 5 - Особенности изнашивания и разрушения покрытия на площадке передней поверхности между режущей кромкой и лункой износа

Анализ характеристического рентгеновского излучения, испускаемого из области, в которую попадает пучок электронов, показывает качественную и количественную информацию о составе объекта по частям [5].

Состав МНС по элементам исследовался вдоль условных линий, начинающихся в области, непосредственно примыкающей к вершине резания, и продолжающихся на расстоянии около 45 мкм от данной области вдоль передней поверхности инструмента. Первая линия располагалась на расстоянии около 0.1 мкм от границы «покрытие – обрабатываемый материал», вторая – на расстоянии около 1.5 мкм от данной границы. Полученные результаты исследований представлены на рисунки 6 и 7.



Рисунки 6 - Результаты анализа содержания химических элементов, в том числе из состава МНС Zr-ZrN-(NbZrTiAl)N (N, O, Zr, Nb, Ti, W)

Анализируя результатов рисунков 6 и 7, можно отметить, что характер изменения содержания основных химических элементов (N, O, Zr, Nb, Ti, W) в МНС Zr-ZrN-(NbZrTiAl)N связан с существенным ростом содержания кислорода и снижением содержания азота в зонах сквозных трещин – в зонах 1, 2 и 3 (смотри рисунок 5). При этом повышение содержания кислорода и снижение содержания азота в зоне сквозных трещин замечается в трещинах вблизи режущей кромки СМП и в зоне разрушения покрытия. Повышенное содержание кислорода и снижение содержания азота наблюдается также в зонах покрытия с повышенным содержанием микрокапель, состоящих преимущественно из α -Ti фазы. Причем эти процессы более заметны для зон с присутствием более крупных микрокапель (зона I, рисунок 5). Активное трещинообразование с разрушением покрытия, рост содержания кислорода и снижение азота замечаются в зоне I. В то же время, для зон МНС, содержащих тупиковые микротрещины, отмечено незначительное изменение содержания азота и кислорода.

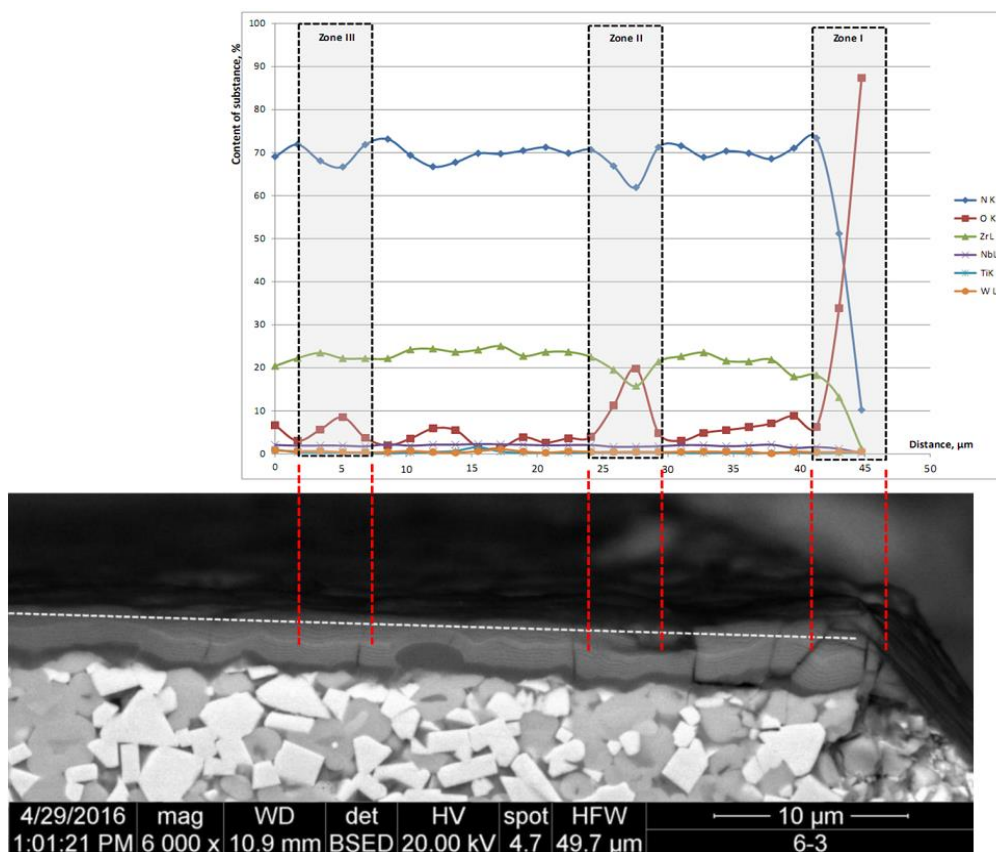


Рисунок7 - Характер изменения содержания основных химических элементов(N, O, Zr, Nb, Ti, W) на длине 45 мкм, проходящего в зоне разрушения покрытия

Результаты анализа позволяют констатировать частичную диссоциацию сложных нитридов МНС и интенсификацию окислительных процессов.

Заклучение.

Анализ полученных данных приводит к выводам.

Установленный резкий рост содержания кислорода при значительном снижении содержания азота свидетельствует о высокой вероятности интенсивного формирования твердых и относительно малопрочных оксидных образований типа TiN_2 , Al_2O_3 , разрушение которых может резко интенсифицировать процессы абразивного изнашивания контактных площадок инструмента и снизить эффективность покрытий, наносимых на твердосплавные субстраты. В этой связи при использовании процессов arc-PVD для формирования износостойких покрытий на твёрдосплавном инструменте следует использовать фильтрующие системы, блокирующие формирования макро- и микрокапель, что заметно повысит эффективность покрытий для различных операций обработки резанием.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методические принципы создания функциональных покрытий нового поколения в инструментальном производстве //Инженерный журнал, 2011,№12,С.13-22

[2] Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями // М.: Машиностроение, 2012, С.336

[3] А.Д. Коротаев, Д. П. Борисов, В.Ю. Машков, С.В. Овчинников, А.Н. Тюменцев. Особенности структурно-фазового и упругонапряженного состояния нанокompозитных сверхтвердых покрытий на основе TiN. Физическая механика №5, 2011. С. 87-97.

[4] А.А. Каменева. Закономерности структурообразования наноструктурированных покрытий на основе сложных нитридов, получаемых вакуумно-дуговым испарением. Конструкции из композиционных материалов, №3, 2007. С.49-57.

[5] Верещака А.С., Сейткулов А.Р., Жусупов К.А. Исследование работоспособности инструментов из быстрорежущих сталей с комплексной обработкой при протягивании жаропрочных сплавов // Наука и мир, №10, 2016, С.35-39.

REFERENCES*

[1] Vereshhaka A.S., Grigor'ev S.N., Tabakov V.P. Metodicheskie principy sozdaniya funkcional'nyh pokrytii novogo pokolenija v instrumental'nom proizvodstve //Inzhenernyi zhurnal, 2011, №12, S.13-22

[2] Vereshhaka A.S. Rabotosposobnost' rezhushhego instrumenta s iznosostoikimi pokrytiami // M.: Mashinostroenie, 2012, S. 336

[3] A.D. Korotaev, D.P. Borisov, V.Yu. Mashkov, S.V. Ovchinnikov, A.N. Tyumentsev, Osobennosti strukturno-fazovogo i uprugonastryajennogo sosnoyania nanokompозитnyh sverhtverdyh pokryti na osnove TiN // Phizicheskaja mehanika №5, 2011. S.87-97

[4] A.A. Kameneva. Zakonomernosti strukturoobrazovanija nanostrukturirovannyh pokrytii na osnove nitridov, polychaemyh vakyymno-dygovym ispareniem. Konstrykicii iz kompozicionnyh materialov, №3, 2007. S.49-57.

[5] Vereshhaka A.S., Seitkulov A.R., Zhussupov K.A. Issledovanie rabotosposobnosti instrumentov iz bystrorezhushhih stalei s kompleksnoi obrabotkoi pri protjagivanii zharoprochnykh splavov // Nauka i mir, №10,2016, S.35-39.

Кенес Жусупов, т.ғ.к., профессор, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, gystem_1968@mail.ru

Рустем Козбагаров, т.ғ.к., профессор, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, gystem_1968@mail.ru

Ербол Калиев, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, kaliyev.ye@mail.ru

Жанаркуль Макатова, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан, zhanarkul-84@mail.ru

Нурбол Камзанов, PhD, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, n.kamzanov@mail.ru

КӨП КОМПОНЕНТТІ НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ ЖҮЙЕДЕРДЕГІ ҚАТТЫ ҚОРЫТПАЛЫ АСПАПТЫҢ ТОЗУ ЖӘНЕ БҰЗЫЛУ МЕХАНИЗМДЕРІН ЗЕРТТЕУ

Андатпа. Зерттеу нысаны ретінде көп компонентті наноқұрылымды жүйелері бар қатты қорытпалы табақшалар алынған. Сүзілетін катодты-вакуумды-доғалы тұндыруды пайдалану кезінде қатты қорытпалы субстраттардағы көп компонентті наноқұрылымды жүйелердің пайдалану қасиеттерін арттыру мүмкіндіктері анықталды. Металдық-физикалық талдаудың заманауи әдістерін қолдана отырып, көп компонентті наноқұрылымды жүйелермен қатты қорытпалы құралдың тозу және бұзылу механизмдеріне зерттеулер жүргізілді. Көп компонентті наноқұрылымды жүйелері бар жарықшақтардың пайда болу ерекшеліктері мен механизмдері қарастырылады. Аспаппен

бойлық өңдеу кезінде жүргізілген кесу қасиеттерінің зерттеулері көрсеткендей, өңделген жүйелер тозудың кемуіне жабынсыз құралмен салыстырғанда 3-4 есе және титан нитридті стандартты жабыны бар аспаппен салыстырғанда 1,5-2 есе мүмкіндік береді. Қатты және иілгіштігі аздау тозуға төзімді қабаттары бар тозу сипатының құрамына цирконий нитридтері кіретін қаттылығы аздау және иілуге икемділігі жоғарылау тозуға төзімді қабаттары бар тозу механизмінен айтарлықтай айырмашылықтарға ие екендігі анықталды.

Түйінді сөздер. Жабындар, көп компонентті жүйелер, жабындардың қасиеттері, аспаптардың тозуы, жарықшақтардың түзілуі.

Kenes Zhussupov, candidate of technical sciences, professor, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, ryctem_1968@mail.ru

Rustem Kozbagarov, candidate of technical sciences, professor, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, ryctem_1968@mail.ru

Erbol Kaliev, candidate of technical sciences, associate professor, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, kaliyev.ye@mail.ru

Zhanarkul Makatova, candidate of technical sciences, associate professor, Kazakh National Agrarian Research University, Almaty, Kazakhstan, zhanarkul-84@mail.ru

Nurbol Kamzanov, PhD, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, n.kamzanov@mail.ru

STUDIES OF THE MECHANISMS OF WEAR AND DESTRUCTION OF HARD-ALLOY TOOLS WITH MULTICOMPONENT NANOSTRUCTURED SYSTEMS

Abstract. The object of the study is carbide plates with multicomponent nanostructured systems. The possibilities of increasing the operational properties of multicomponent nanostructured systems on carbide substrates using filtered cathode-vacuum-arc deposition are revealed. The mechanisms of wear and destruction of a carbide tool with the developed multicomponent nanostructured systems using modern methods of metallophysical analysis have been studied. The features and mechanisms of cracking with multicomponent nanostructured systems are considered. Studies of cutting properties carried out during longitudinal turning have shown that the developed systems can reduce wear by 3-4 times compared to a tool without coating and by 1.5-2 times compared to a tool with a standard titanium nitride coating. It was found that the wear pattern with harder and less elastic wear-resistant layers had significant differences from the wear mechanism with less hard and more plastic wear-resistant layers, which included zirconium nitrides in their composition.

Keywords. Coatings, multicomponent systems, coating properties, tool wear, cracking.
