

## **Износостойкие покрытия и их применение в повышении эксплуатационных характеристик режущего инструмента**

Максимов Е.И.  
Университет машиностроения  
eugene.jack.max@mail.ru

*Аннотация.* В данной работе рассмотрены актуальные положения по износостойким покрытиям и их практическому применению в качестве основного метода повышения эксплуатационных характеристик режущего инструмента.

*Ключевые слова:* износостойкие покрытия, методы нанесения покрытий, улучшение характеристик режущего инструмента

### **Введение**

В современном производстве с ростом требований к конечным изделиям идет постоянное совершенствование конструкционных материалов. Несмотря на то, что требования к изделиям будут различные, перед переходом на следующий этап цикла использования материала он нуждается в обработке. По определенным причинам, в том числе технологическим и экономическим, в качестве метода обработки используется обработка резанием. Таким образом, встает задача совершенствования технологических процессов с применением инновационного инструмента. Для повышения эффективности обработки функциональных материалов, называемых труднообрабатываемыми, применяют инструмент, оснащенный твердым сплавом оптимального состава и многофункциональным покрытием. Процесс резания сочетает в себе группу процессов, зависящих от физико-механических свойств обрабатываемого материала, качества режущего инструмента, условий резания, состояния станка, жесткости технологической системы. При обработке резанием вследствие пластического разрушения, адгезионно-усталостного износа, температурного воздействия возникают интенсивные отказы режущей системы. Это приводит к необходимости разработки принципиально нового комплексного подхода к выбору структуры наноструктурированного износостойкого покрытия, дающего максимальный эффект в сочетании с составом твердого сплава в процессе резания.

### **1. Основные этапы совершенствования режущего инструмента**

На протяжении всех этапов развития обработки материалов прослеживается единая концепция – совершенствование материалов конечных изделий требует совершенствования материалов инструмента для их обработки.

Развитию твердых сплавов способствовало два направления в технике: появление нового метода изготовления изделий из тугоплавких металлов (порошковая металлургия) и разработка способов получения твердых «металлоподобных» веществ (карбидов). Метод порошковой металлургии остается единственно возможным, когда требуется создать сплавы, состоящие из значительно различающихся по температуре плавления компонентов [1].

Последние исследования показывают, что улучшение качества и эксплуатационных характеристик твердых сплавов происходит по следующим направлениям: совершенствование технологии; повышение свойств карбидной основы и связующей фазы; получение сплавов с регулируемой зернистостью; разработка безвольфрамовых и маловольфрамовых твердых сплавов; разработка керамических и оксиднокарбидных твердых сплавов; разработка многогранных пластин с износостойким покрытием [6].

В основе развития современного инструмента лежит принцип увеличения его стойкости за счет дополнительной обработки его поверхностного слоя. Повышение стойкости достигается в основном за счет нанесения износостойких покрытий и проведения термической обработки. Такие методы получают в промышленности все большее применение и дают значительный экономический эффект [3].

При всей эффективности термической обработки структура сплава существенно изме-

няется и возможно снижение эксплуатационных характеристик инструмента. Данный способ не универсален и применим только в неответственных системах, где изменение структуры не оказывает сильного воздействия на работу системы в целом. Так, повышение стойкости режущего инструмента за счет применения износостойких покрытий становится передовой тенденцией в промышленности [5].

В 70-е – 90-е годы прошлого века была разработана гамма процессов модификации поверхностных свойств инструментальных материалов, позволяющих в достаточно широких пределах модифицировать такие важные физико-механические свойства как твердость, теплостойкость, прочность, вязкость и оказать существенное влияние на эксплуатационные характеристики режущего инструмента [13].

## **2. Износостойкие покрытия как основное направление в повышении эксплуатационных характеристик режущего инструмента**

В процессе резания возникает ряд негативных факторов [2]:

- высокая температура в зоне резания, которая приводит к разупрочнению стандартных твердых сплавов, из-за чего снижается стойкость инструмента и вынужденно уменьшается скорость резания, что влияет на конечную производительность обработки;
- высокая твердость и прочность труднообрабатываемых материалов, которые сохраняются при нагревании до высоких температур и создают в зоне резания повышенные контактные напряжения, увеличивая вероятность выхода из строя режущего инструмента вследствие его хрупкого или пластического (вязкого) разрушения;
- низкая теплопроводность и высокая прочность труднообрабатываемых материалов приводят при резании к росту мощности основных источников теплоты и ее перераспределению, в основном за счет увеличения интенсивности теплового потока в сторону инструмента, что увеличивает вероятность потери формоустойчивости режущей части инструмента и ее последующего пластического разрушения;
- высокая химическая активность большинства труднообрабатываемых материалов, особенно при высоких температурах резания, приводит к активизации физико-химических процессов на контактных площадках инструмента и является главной причиной интенсификации таких видов изнашивания режущего инструмента, как адгезионно-усталостный и диффузионный износы;
- склонность труднообрабатываемых материалов некоторых групп к механическому упрочнению в процессе пластического деформирования при резании (наклепу) приводит к росту интенсивности абразивного изнашивания; кроме того, при упрочнении металла возрастают его упругие свойства, что приводит к увеличению упругого последствия, увеличению длины контакта задней поверхности и поверхности резания, и, как следствие, увеличивается тепловыделение за счет трения, что приводит к изнашиванию контактной площадки задней поверхности.

Таким образом, встает задача получения износостойкого комплекса, разработанного с учетом специфики резания и состава инструментального материала. Одним из важнейших показателей инструментального материала в данном случае является повышенная теплостойкость, которая достигается за счет комплексного применения твердого сплава и многофункционального износостойкого покрытия. Инструментальный материал с износостойким покрытием можно рассматривать как композиционный материал с оптимальным сочетанием поверхностных (твёрдость, теплостойкость, износостойкость) и объёмных (вязкость, прочность при изгибе, сжатии) свойств [6]. Такой материал обладает балансом противоположных по эффектам свойств и может приблизиться к гипотетически «идеальному» материалу с оптимальным сочетанием твёрдости и прочности.

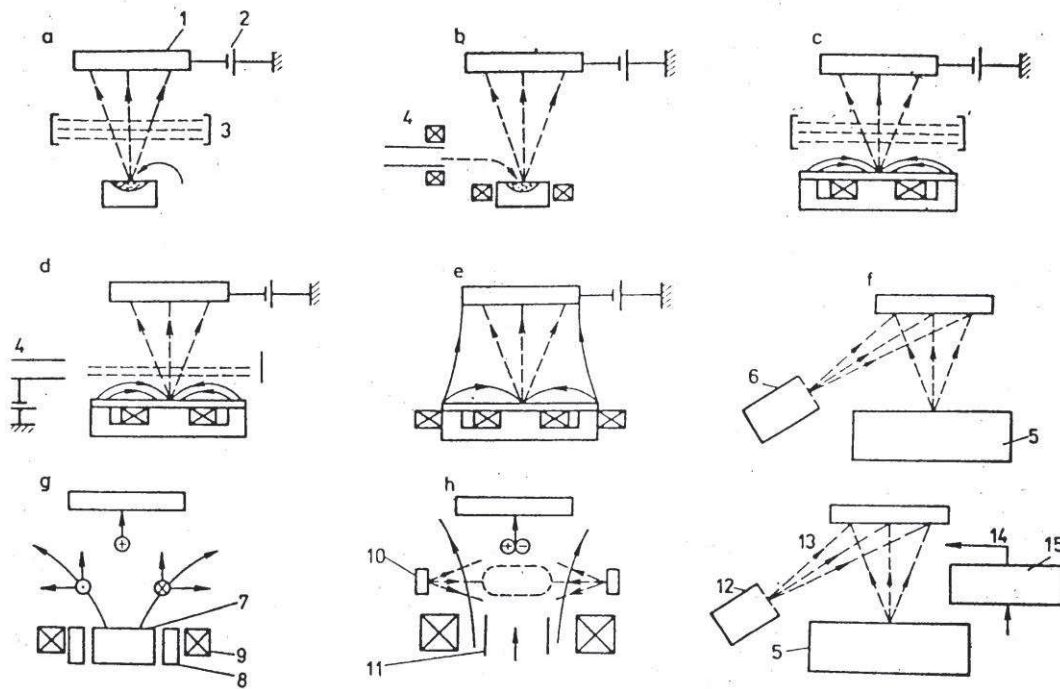
## **3. Методы нанесения износостойких покрытий**

Для усовершенствования поверхностных свойств инструментальных материалов при-

меняются методы химического (Chemical Vapor Deposition – CVD) и физического (Physical Vapor Deposition – PVD) осаждения покрытий.

Процессы CVD основаны на гетерогенных термохимических реакциях, приводящих к адсорбции и хемосорбции с последующим формированием соединений, образующих покрытие как в парогазовой среде окружающей инструмент, так и непосредственно на его рабочих поверхностях. Исходными продуктами служат газообразные галогениды металлов MeG, при взаимодействии которых с другими компонентами газовых смесей ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_3$ , Ar и др.) синтезируется покрытие. Для осаждения тугоплавких соединений путем водородного восстановления используют реакционные парогазовые смеси галогенидов металлов, соединений, являющихся поставщиком второго компонента и водорода, который служит одновременно газом-транспортером и восстановителем [2].

Процессы CVD часто не соответствуют стандартам экологической безопасности, осуществляются при высоких температурах ( $800 \div 1500^\circ C$ ) и большой длительности. Наиболее важные направления совершенствования технологий CVD связаны с созданием комбинированных процессов интегрирующих преимущества химических и физических методов синтеза покрытий. Такие методы позволяют значительно снизить температуру процессов синтеза покрытий до  $200 \div 600^\circ C$  и уменьшить время осаждения [3].



**Рисунок 1. Схемы процессов физического осаждения покрытий PVD:**

**1 – субстрат, 2 – напряжение смещения, 3 – ионизация, 4 – полый катод, 5 – испарение или распыление, 6 – источник ионов, 7 – катод, 8 – анод, 10 – система распыления, 11 – направление потока ионов, 12 – лазерный источник, 13 – поток фотонов, 14 – активированный реакционный газ, 15 – разряд**

Процессы PVD основаны на генерации вещества в вакуумное пространство камеры с подачей реакционного газа ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$  и др.). Различие технологий PVD состоит в принципах генерации вещества, различной степени ионизации паро-ионного потока, конструктивных и технологических особенностях установок. На рисунке 1 представлены принципиальные схемы различных устройств для реализации процессов PVD [2]:

- испарение электронными пучками при высоко- (a) или низковольтном напряжении с использованием полого катода (b);
- магнетронное распыление (c, d, e) с ионизацией плазменного потока различными метода-

ми – электронным лучом (*c*), с использованием полого катода (*d*) или электрического разряда (*e*);

- распыление независимым ионным пучком (*f*);
- испарение ионов низковольтной, сильноточной дугой (*g*);
- систему распыления плазмой неоднородного магнитного поля (*h*);
- испарение потоком фотонов (лазерным лучом) (*i*).

Размер и форма инструмента, на который можно нанести покрытие при использовании методов PVD, ограничиваются только пространством вакуумной камеры и возможностями перемещения изделия в рабочей камере установки. Производительность процессов PVD превышает производительность процессов CVD в десятки раз, что связано с возможностью ускорения высокоионизированного потока или повышением его плотности.

Итак, в процессах PVD переход осаждаемых металлических компонентов, ионизируемых различными способами, от твердой к паровой фазе может быть выполнен путем нагрева источника испарения (как в катодной дуге) или распылением мишени (как в магнетронном распылении). Катодная дуга и магнетронное распыление позволяют испарять металлы с различными температурами плавления, такие как Ti и Al, из Ti–Al сплавов катода/мишени (в случае магнетронного распыления источник металла называется мишенью, в случае катодно-дугового осаждения – катодом) [8].

В Таблице 1 приводится обзор типичных параметров и количество ионизированных атомов мишени для некоторых PVD-процессов. Энергия в процессе осаждения зависит от атомных масс участвующих ионизированных атомов, которые контролируют передачу импульса. Общая атомная масса участвующих ионов самая высокая в случае процесса катодно-дугового осаждения из-за возможности испарения большого процента металлических ионов из катода, результатом чего является высокая энергия осаждения и плотное покрытие. Эффективность ионного осаждения катодно-дугового метода выше, чем у обычных методов магнетронного распыления. Покрытия, полученные катодно-дуговым осаждением, также демонстрируют высокий уровень адгезии к подложке из-за эффекта ионной бомбардировки или ионного травления. Для очистки и нагрева подложки активные ионы металла в процессе ионной бомбардировки выбивают некоторые атомы металла изнутри подложки или могут проникать в решетку подложки на ангстремном (0,1 нм) уровне. Это приводит к дефектам и шероховатости подложки на атомном уровне, а такая шероховатость ответственна за улучшение адгезии покрытия [9].

Таблица 1

### Типичные параметры и количество ионов мишени для различных PVD-процессов

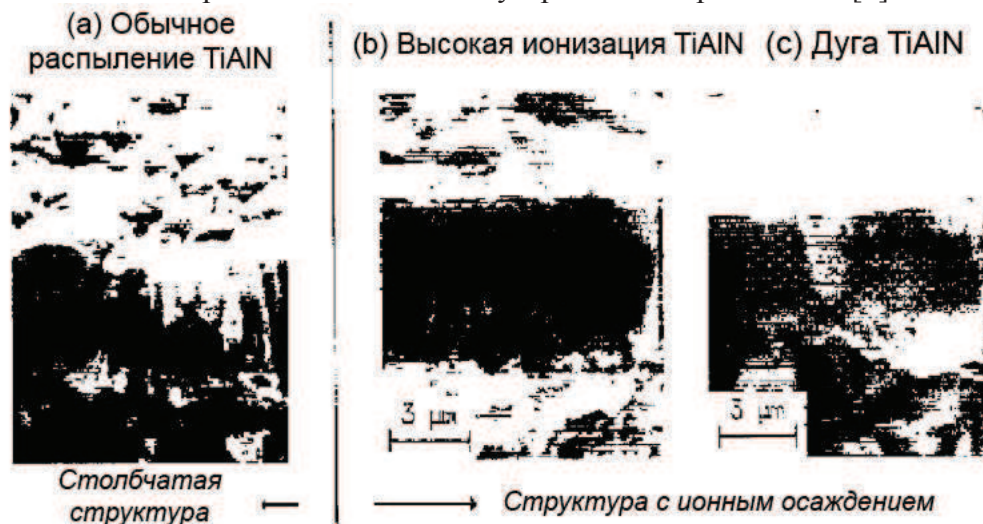
Параметры	Процесс			
	Магнетронное распыление	Анодно-дуговое ионное осаждение	Электронно-лучевое ионное осаждение	Катодно-дуговое ионное осаждение
Инструмент испарения	Эффект распыления	Электронный луч	Электронный луч	Термическая дуга
Фазовая трансформация	Твердое тело – пар	Твердое тело – пар	Жидкость – пар	Твердое тело – пар
Геометрия мишени/катода	Гибкая	Ограниченная	Ограниченная	Гибкая
Количество ионизированных атомов мишени (%)	1 – 5	5 – 40	< 1	50 – 100
Дополнительная ионизация	Нацеленная	Редкая	Нацеленная	Не требуется
Необходимость инертного газа	Да	Нет	Варьируется	Нет
Возможность реактивного осаждения	Да	Да	Да	Да

Травление мишени и очень низкая степень ионизации – два недостатка традиционного магнетронно-распылительного процесса. Степень осаждения магнетронно-распыленных (Ti,Al)N покрытий уменьшается с увеличением парциального давления N<sub>2</sub>. Это уменьшение



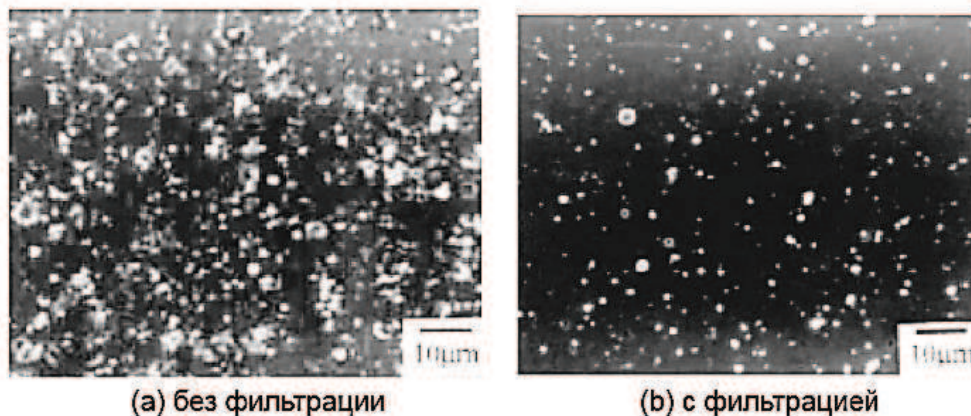
обусловлено повышенной степенью охвата мишени абсорбированным азотом, т.е. азотированием (травлением) мишени. Для повышения степени ионизации разработаны методы высокоионизированного магнетронного распыления, позволяющие осаждать (Ti,Al)N покрытия с более высокой степенью ионизации, чем традиционные методы распыления. При магнетронном распылении с высокочастотной плазмой, плотность плазмы перед мишенью значительно возрастает, приводя к десятикратному увеличению степени ионизации металла. Осажденные покрытия в основном имеют столбчатую структуру и гладкую поверхность покрытия без присутствия макрочастиц (типичная проблема для дугового испарения). Сканирование электронной микроскопии (Scanning Electron Micrographs – SEM) (Ti,Al)N покрытий, осажденных различными PVD-процессами, выявляет различные микроструктурные характеристики (рисунок 2). (Ti,Al)N покрытия, полученные традиционным распылением (рисунок 2а), имеют открытую столбчатую структуру, которая становится более компактной и свободной от пор в случае высокоионизированных распыленных покрытий (рисунок 2б). (Ti,Al)N покрытия с дуговым осаждением также имеют свободную от пор плотную структуру, но грубую поверхность из-за наличия макрочастиц (рисунок 2с) [11].

Основным недостатком катодно-дуговых процессов является образование макрочастиц. Макрочастицы – это результат образования капель при дуговом испарении материалов с низкой температурой плавления (например, алюминия в случае (Ti,Al)N покрытий). Очень быстрое испарение при катодно-дуговых процессах производит избыток атомов, которые не полностью ионизированы при достижении поверхности подложки. Эти избыточные нейтральные атомы могут соединяться с образованными макрочастицами во время полета. Для решения этой проблемы дуга была усовершенствована путем использования «распределенного разряда через накаливаемый катод» и «усиленной дуги» [8]. Подход Колла и др. к распределению дугового разряда на теплоизолированный катод (накаливаемый катод) привел к значительному сокращению макрокапель. В другом способе Колл и др. очистили поток плазмы с помощью электромагнитного поля и устранили макрочастицы [7].



**Рисунок 2. Типичная микроструктура PVD-(Ti,Al)N покрытий: (а) – осажденных обычным процессом распыления; (б) – осажденных процессом с высокой ионизацией; (с) – осажденных дуговым испарением**

Вон и др. использовали прямой канал фракционного фильтра для уменьшения выброса макрочастиц с катодного источника и повышения интенсивности плазмы перед катодной поверхностью. Число макрочастиц было значительно снижено при помощи катодно-дугового процесса с фильтрацией в отличие от традиционного катодно-дугового метода без фильтрации (рисунок 3) [12]. Система фильтруемого дугового осаждения (Filtered Arc Deposition – FAD), основанная на принципе «усиленной дуги», подходит для нанесения высококачественных покрытий.



**Рисунок 3. Улучшения в структуре покрытия в фильтруемой катодно-дуговой системе**

Недавняя тенденция заключается в комбинировании преимуществ распыления и катодно-дугового осаждения. PVD-метод дугового распыления (Arc Bond Sputter – ABS) был разработан путем комбинирования функций управляемой катодной дуги и неустойчивых магнитных процессов. Эта методика дает покрытия с высоким уровнем адгезии, плотной структурой и обеспечивает гладкую поверхность, свободную от макрочастиц. В ABS-методике катоды могут быть испарены либо дуговым методом, либо методом распыления. В некоторых случаях принцип дуги был использован только для травления ионами металла или бомбардирования подложки перед фактическим нанесением покрытия несбалансированным магнетронным распылением. Гибридный магнитно-дуговой процесс (где магнетронное распыление чистого алюминиевого катода было объединено с катодно-дуговым испарением катода из TiAl сплава) привел к (Ti,Al)N покрытию с низким числом макрочастиц и потрясающей адгезией [8].

Донохью и др. предложили осаждение высокоактивных элементов, таких как элементы IV группы, путем способа управляемой дуги, а менее активных элементов – способом несбалансированного магнетронного распыления. Подход Донохью и др. минимизировал травление мишеней химически активными газами, особенно когда химическая активность элементов значительно отличается [10].

При нанесении покрытий важен выбор материалов катода/мишени и подложки, на которую данное покрытие наносится. В качестве параметров осаждения покрытий выступают катодный ток (в случае катода из однородного металла), напряжение смещения на подложке, парциальное давление газа, промежуточный слой между покрытием и подложкой и концентрация мощности магнетрона. Эти параметры, главным образом, влияют на состав, твердость, износостойкость и морфологию покрытия [8].

#### **4. Анализ методики применения износостойких покрытий для повышения эксплуатационных характеристик режущего инструмента**

Износостойкие покрытия позволяют решать многие задачи создания надежного инструмента, имеющего повышенную трещиностойкость, высокую прочность адгезии с субстратом, сбалансированное соотношение между твердостью и вязкостью [6]. Однако в настоящее время практически не сформулированы методические принципы получения таких покрытий. Это обусловлено тем, что при создании таких покрытий необходимо учитывать множество факторов. На сегодняшний день существует огромное разнообразие обрабатываемых материалов, и при подборе обрабатывающего инструмента необходимо учитывать специфику обработки конкретного материала. Необходимо исключить вредные взаимовлияния инструмента и обрабатываемого материала в условиях массового производства. А, как известно, на производстве должны учитываться не только технологические, но и ряд других факторов (экологические, экономические и т.п.).

Процесс изучения должен происходить от параметров нанесения покрытий, выбора ма-

териала катода/мишени и подложки до влияния полученных покрытий на износ инструмента, силы резания, теплостойкость, твердость и т.д. Следует понимать, что механические свойства будут определяться общим поведением дефектов, а не связью между атомами и электронами. Даже поведение одного единственного дефекта чаще всего не имеет значения. Например, существует огромное количество микроскопических анализов деформируемого твердого тела, которые пытаются связать наблюдаемые диаграммы дефектов с механическими свойствами, характеризуемых кривыми напряжения-деформирования. Тем не менее, несмотря на огромные усилия, которые были вложены как в теоретические, так и практические работы, четкой физической картины, которая смогла бы предопределить хотя бы одну кривую напряжения-деформирования и повреждения из-за распространяющихся трещин покрытия, по-прежнему нет. Причина вполне очевидна – в пластической деформации и разрушении мы сталкиваемся с весьма нелинейными эффектами. Это явление необратимо и далеко от равновесия и, следовательно, не может рассматриваться основными подходами физики твердого тела. К счастью, ситуация меняется по двум причинам. Первая причина кроется в новых инструментальных разработках, которые позволяют микроструктурный контроль в нанометрических масштабах, часто сложной обработки. Вторая причина – в обработке стали возможны механические эксперименты при контролируемых условиях в сочетании с микроскопическими анализами для получения как структурной, так и химической информации. Это особенно актуально при разработки новых покрытий в области инженерии поверхности [4].

Таким образом, в настоящее время ведется обширная работа по анализу различных типов покрытий с различной структурой. Меняется число компонентов покрытия (популярны трехкомпонентные и четырехкомпонентные), варьируются добавочные элементы (кремний, цирконий, бор, хром, итрий), меняется число слоев покрытия (создание многослойных структур) [8]. Методика получения необходимого инструмента сводится к разработке инструментального материала оптимального состава с учетом приведенных особенностей процесса резания труднообрабатываемых материалов и износостойкого комплекса. Данный процесс можно разбить на следующие основные этапы:

- выявление особенности обработки выбранного труднообрабатываемого материала;
- выбор метода нанесения покрытия с учетом его параметров;
- создание нескольких покрытий с различным составом для сравнительного анализа;
- оценка влияния покрытий на эксплуатационные характеристики инструмента.

### Заключение

Вопрос по составу твердого сплава и покрытия для обработки резанием труднообрабатываемых материалов стоит довольно остро. В настоящее время ведутся работы по созданию оптимального состава новых инструментальных материалов по различным направлениям: уменьшение размера зерен, нанесение многослойных композиционных покрытий с толщиной слоя в несколько нанометров и т.д. Использование инструментов с износостойкими покрытиями позволяет решить целый ряд задач технологических операций резания, связанных с повышением производительности, точности и качества обработки, снижением расхода дорогостоящих материалов. Появление новых материалов заготовок, инструментальных и плечных материалов, эволюция сложных методов составления характеристик покрытий и постоянная потребность в высоких темпах производительности сопутствуют росту промышленного и научного интереса к дальнейшему развитию этой области.

### Литература

1. Арзамасов В.Б., Волчков А.Н., Головин В.А. и др. Материаловедение и технология конструкционных материалов // Учебник. М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 448 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями // Монография. – М.: Машиностроение, 1993, – 336 с.



3. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента // Монография. – М.: Машиностроение, 2008, – 310 с.
4. Albano Cavaliero, Jeff Th. M. De Hosson Nanostructured coatings: монография – USA: Springer, 2006, – 671 с.
5. Верещака А.А., Верещака А.С., Зинченко Г.В., Козлов А.А., Устинов А.А. Инновационные функциональные покрытия для режущего инструмента: статья // М.: ИКТИ РАН, МГТУ «СТАНКИН», МГТУ «МАМИ», 2012. – 12 с.
6. Максимов Ю.В., Бубликов Ю.И., Верещака А.А., Верещака А.С., Хаустова О.Ю., Козлов А.А., Ходжаев О. Нанодисперсные многослойно-композиционные покрытия для режущих инструментов / Известия МГТУ «МАМИ», № 2 (14), т. 2, с. 222 – 230. – М.: МГТУ «МАМИ», 2012. – 377 с.
7. B.F. Coll, R. Fontana, A. Gates, P. Sathrum Materials Science and Engineering A140, p. 816 – 824. – USA: Elsevier, 1991.
8. S. PalDey, S.C. Deevi Single layer and multilayer wear resistant coating of (Ti,Al)N // Materials Science and Engineering A342, p. 58 – 79. – USA: Elsevier, 2003.
9. E. Lugscheider, C. Barimani, C. Wolff, S. Guerreiro, G. Doepper Surface and Coatings Technology, № 86 – 87, p. 177 – 183. – USA: Elsevier, 1996.
10. L.A. Donohue, W.D. Munz, D.B. Lewis, J. Cawley, T. Hurkmans, T. Trinh, I. Petrov, J.E. Greene Surface and Coatings Technology, № 93, p. 69 – 87. – USA: Elsevier, 1997.
11. H.G. Prengel, A.T. Santhanam, R.M. Penich, P.C. Jindal, K.H. Wendt Surface and Coatings Technology, № 94 – 95, p. 597 – 602 /. – USA: Elsevier, 1997.
12. D.Y. Wang, C.L. Chang, K.W. Wong, Y.W. Li, W.Y. Ho Surface and Coatings Technology, № 120 – 121, p. 388 – 394. – USA: Elsevier, 1999.
13. Дачева А.В. Повышение режущих свойств инструмента путем выбора рациональных сочетаний параметров сплавов ВПК и наноструктурированных функциональных покрытий: диссертация. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2011.

УДК 621.791.957.55: 621.89

### **Структура и износостойкость многослойного карбидосодержащего покрытия после ацетиленокислородной наплавки**

к.т.н. проф. Паркин А.А., к.т.н. доц. Жаткин С.С., Минаков Е.А., Семин А.Б.  
Самарский государственный технический университет «СамГТУ», ОАО «Волгабурмаш»  
8 (846) 332-42-27, laser@samgtu.ru, sergejat@mail.ru, goodspik@yandex.ru,  
8 (846) 220-89-38, a.seminar.dtc@gmail.com

*Аннотация.* Работа посвящена исследованию структуры, механических свойств и износостойкости многослойного покрытия, сформированного ацетиленокислородной наплавкой из карбидосодержащего прутка, порошкового материала с подслоем никеля. Установлены зависимости изменения величины износа от структуры наплавленного материала и условий наплавки.

*Ключевые слова:* ацетиленокислородная наплавка, износостойкость, микроструктура, микротвердость, рентгеноспектральный микроанализ, карбиды вольфрама.

#### **Введение**

Долговечность изделий во многом определяется износостойкостью их рабочих поверхностей различных элементов, которая часто обеспечивается определенными физико-химическими методами обработки поверхности [1 – 4]. В частности, в буровых долотах ре-