

УДК 674.055:539.23621

**А.К. Кулешов<sup>1</sup>, В.В. Углов<sup>1</sup>, В.В. Чаевский<sup>2</sup>**  
(А.К. Kuleshov, V.V. Uglov, V.V. Chayevski)  
(<sup>1</sup>БГУ, <sup>2</sup>БГТУ, г. Минск, РБ)  
E-mail для связи с авторами: kuleshak@bsu.by

**ВЫСОКОТВЕРДЫЕ И ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ  
ИЗ КАРБИДОВ НИОБИЯ И ВОЛЬФРАМА  
НА ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ**

**SUPERHARD AND WEAR RESISTANT COATINGS FROM  
CARBIDES OF NIOBIUM AND TUNGSTEN ON WOODWORKING TOOLS**

*Разработаны режимы ионно-плазменного осаждения ниобия в атмосфере метана, позволяющие формировать архитектуру слоистых покрытий из  $(Nb_{0,8}W_{0,2})C_{0,7}$  и NbC на фрезерном дереворежущем инструменте. Твердость этих покрытий достигает значений в 70 ГПа. Максимальная эксплуатационная стойкость инструмента с этими покрытиями при резании деревостружечных плит возрастает до 7 раз.*

*The modes of ion-plasma deposition of niobium in a methane atmosphere have been developed that make it possible to form the architecture of layered coatings from  $(Nb_{0,8}W_{0,2})C_{0,7}$  and NbC on a milling woodcutting tool. The hardness of these coatings reaches values of 70 GPa. The maximum operational durability of the tool with these coatings when cutting wood chipboards increases up to 7 times.*

Как известно, доминирующими процессами, определяющими износ дереворежущего твердосплавного инструмента при резании деревостружечных плит, являются трение, окисление и химическое взаимодействие компонент обрабатываемого материала и инструмента [1]. Для увеличения износостойкости твердосплавного дереворежущего инструмента применяют слоистую архитектуру защитных вакуумно-плазменных покрытий. В качестве антифрикционного верхнего слоя исследуются возможности оксида хрома, алмазоподобного углерода или других типов антифрикционных слоев.

Основной более твердый слой износостойкого покрытия содержит стойкие к окислению слои нитридных керамик, например, CrN с адгезионными подслоями на основе металлов. Создание таких композиционных или слоистых покрытий требует последовательного или одновременного применения нескольких типов вакуумно-плазменных технологий в сочетании с несколькими типами катодов.

Перспективными и менее дорогими покрытиями для увеличения износостойкости твердосплавного дереворежущего инструмента могут быть покрытия, формируемые в одном технологическом цикле ионно-плазменного осаждения. Существуют карбидные системы, например, NbC, которые в качестве более твердого, термостабильного и износостойкого покрытия для деревообработки потенциально превосходят нитридные покрытия, однако они еще недостаточно изучены [1, 2].

В данной работе исследуется фазовый и элементный состав, механические, эксплуатационные свойства при деревообработке ионно-плазменных покрытий из карбидов ниобия, вольфрама, сформированные на твердосплавном дереворежущем инструменте с использованием интенсивной и длительной по времени ионной обработки карбидов вольфрама ниобием и плазменным осаждением ниобия в среде метана.

Образцы твердого сплава в виде фрезерных деревообрабатывающих ножей состояли из карбида WC и связующего Co (3 % ат.) и имели твердость 17 ГПа.

Ионно-плазменная обработка покрытий при использовании катода ниобия на образцы сплава проводилась при следующих режимах:

а) «стандартный режим», обозначенный в работе как NbC<sub>1</sub>: ток горения катодно-вакуумной дуги на катоде из ниобия 180 А, время бомбардировки ионами ниобия – 1 минута. Потенциал ионной бомбардировки – 1 кВ, потенциал при осаждении покрытия – 120 В, время осаждения – 5 минут, давление метана при осаждении – 10<sup>-1</sup> Па;

б) режим NbC<sub>2</sub>. В нем изменены следующие параметры по отношению к режиму NbC<sub>1</sub>: ионная бомбардировка – 2 минуты, потенциал осаждения покрытия – 200 В;

в) режим NbC<sub>3</sub>: ионная бомбардировка – 3 минуты, потенциал осаждения покрытия – 200 В;

г) режимы I2 и I3: проводилась только ионная бомбардировка в течение 2 и 3 минут соответственно ионами ниобия при токе горения катодной дуги 180 А, потенциале смещения в 1 кВ (без последующего осаждения покрытия).

Для определения значений концентрации элементов по глубине в покрытиях и твердом сплаве изготавливались поперечные шлифы и использовался метод растровой электронной микроскопии (прибор LEO 1455 VP). Микротвердость поверхностных слоев измерялась методом Кнуппа на приборе Wilson Instruments 402MVD при нагрузке 0,5 Н. Измерение адгезионной прочности образцов с покрытиями проводилось на установке «скретч-тестер». Принцип работы «скретч-тестера» основан на методе склерометрии – царапании поверхности покрытия алмазным индентором (радиус закругления – 0,5 мм) при пропорционально возрастающей нагрузке и определении критической нагрузки, при которой происходит отрыв или разрушение покрытия.

Скорость движения индентора была 20 мм/мин, максимальная нагрузка на индентор в конце трека достигала 150 Н.

Для определения удельного объемного износа твердосплавного инструмента применялась следующая методика. На установке «скретч-тестер» алмазный индентор с закруглением 0,5 мм под нагрузкой 20 Н совершал возвратно-поступательное движение по поверхности инструмента длиной 7 мм со скоростью 20 мм/мин в течение 30 минут. Сформированный трек износа на поверхности инструмента измерялся профилометром, и затем по 10 профилограммам из разных мест трека рассчитывался усредненный удельный объемный износ.

Эксплуатационные испытания проводились при обработке ламинированных ДСтП плит лезвийными неперетачиваемыми пластинами с нанесенными покрытиями на многооперационном станке с числовым программным управлением ROVER B 4.35 до появления заметных дефектов на кромке обрабатываемых плит в виде выкрашивания, сколов и др.

Как известно, увеличение интенсивности и времени ионного воздействия влияет на температуру нагрева инструмента и процессов последующего плазменного осаждения. Были измерены температурные поля на образцах твердого сплава во время ионной бомбардировки ниобием с использованием оптического тепловизора. Результаты этих экспериментов показали, что ионная бомбардировка ниобием в режиме NbC<sub>1</sub>–NbC<sub>3</sub> позволяет через 40 секунд ионного воздействия достичь температуры поверхности сплава в 1 250–1 350°С. Дальнейшее увеличение времени ионного воздействия не изменяет значений достигнутых температур.

Результаты экспериментов показали, что использование режима NbC<sub>1</sub> при ионной бомбардировке в течение 1 минуты создает переходную область между покрытием и твердым сплавом толщиной не более 0,2 мкм (рис. 1, а). При применении режима NbC<sub>2</sub> плазменного осаждения (рис. 1, б) переходный слой между твердым сплавом и осаждаемым покрытием отчетливо виден на СЭМ изображении шлифа, и толщина его возрастает до значений 0,5–0,8 мкм. В этом слое (рис. 1, в) наблюдается увеличение

содержания W до 20–30 атомарных долей при одновременном уменьшении содержания Nb на такое же значение атомарных долей.

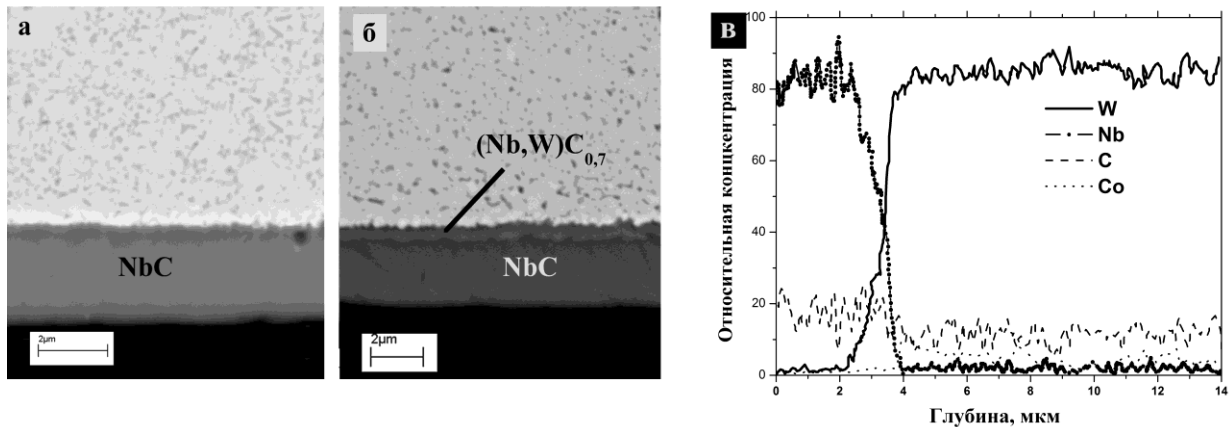


Рис. 1. Растровые электронно-микроскопические изображения шлифов твердого сплава с ионно-плазменными покрытиями, созданными при режимах NbC\_1 (а); NbC\_2 (б); в – распределение по глубине шлифа твердого сплава с покрытием, созданным при режиме NbC\_2, интенсивности характеристического рентгеновского излучения от элементов W, Nb, C, Co

Это означает, что между вольфрамом и ниобием образуется соединение. Подтверждением формирования переходного слоя с соединением Nb и W является более светлый однородный, не имеющий выделений, элементный контраст в электронно-микроскопическом изображении этого слоя по отношению к контрасту изображения покрытия из NbC (рис. 1, а, б).

При использовании только ионной бомбардировки Nb (I2) (рис. 2) в твердом сплаве формируются поверхностные слои толщиной 0,6–0,7 мкм, содержащие атомные доли Nb и W в процентном соотношении 80 к 20, таким же как и в переходной зоне для NbC2 (см. рис. 1).

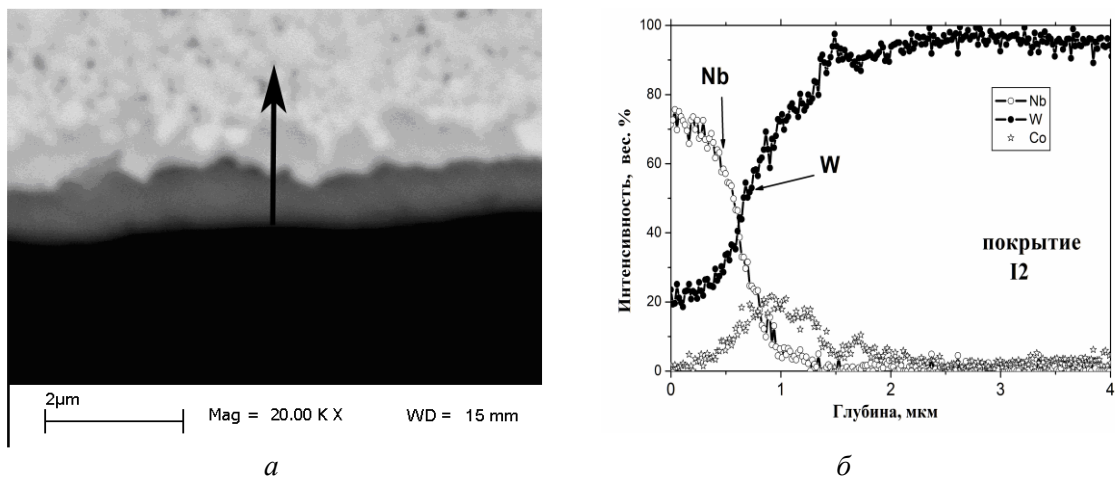


Рис. 2. Ионная бомбардировка Nb (I2) в твердом сплаве:  
а – в сканирующем электронном микроскопе поперечного шлифа образца твердого сплава после ионной бомбардировки в режиме I2;  
б – распределение по глубине в образце I2 относительных интенсивностей характеристического рентгеновского излучения элементов W, Nb, Co

Далее следует слой твердого сплава порядка 0,4 мкм, обогащенный Со. Содержание Со в этом слое достигает 20 атомных долей, что значительно превышает усредненную по объему образца сплава концентрацию Со. Известно, что при увеличении концентрации Со в твердом сплаве возрастает его сопротивляемость к хрупкому разрушению.

Результаты рентгеноструктурного анализа с учетом литературных данных [3, 4] позволили установить фазовый состав карбидных покрытий и слоев, синтезированных на твердосплавном дереворежущем инструменте (в зависимости от режимов ионного воздействия и плазменного синтеза (см. таблицу)).

Фазовый состав покрытий, слоев, синтезированных на твердосплавном дереворежущем инструменте, в зависимости от режимов ионного воздействия и плазменного синтеза и их механические, износостойкие и эксплуатационные свойства

| Режим формирования покрытий | Фазовый состав покрытий   | Твердость, ГПа | Адгезия, критическая нагрузка отслоения, Н | Износ, $10^{-15}$ м <sup>3</sup> /Н·м | Стойкость, метры погонные |
|-----------------------------|---|----------------|--|---------------------------------------|---------------------------|
| Исходный сплав              | –   | 17 ± 1         | –  | 2,8                                   | 3 600                     |
| «Стандарт»                  | TiN   | 24 ± 3         | 80, полное отслоение                       | 2,3                                   | 4 320                     |
| NbC1                        | NbC   | 37 ± 3         | 60, полное отслоение                       | 5,3                                   | 4 800                     |
| NbC2                        | NbC + (Nb <sub>0,8</sub> W <sub>0,2</sub> )C <sub>0,7</sub>                     | 62 ± 5         | 150, частичное отслоение                   | 0,67                                  | 21 820                    |
| NbC3                        | NbC + (Nb <sub>0,8</sub> W <sub>0,2</sub> )C <sub>0,7</sub> + Nb <sub>2</sub> C | 70 ± 5         | 140, частичное отслоение                   | 1                                     | 14 050                    |
| I2                          | (Nb <sub>0,8</sub> W <sub>0,2</sub> )C <sub>0,7</sub>                           | 41 ± 3         | –  | 0,35                                  | 16 400                    |
| I3                          | (Nb <sub>0,8</sub> W <sub>0,2</sub> )C <sub>0,7</sub> + Nb <sub>2</sub> C       | 48 ± 3         | –  | 0,83                                  | 9 150                     |

Из этих данных следует, что увеличение времени ионной бомбардировки ниобием формирует слои нестехиометрических карбидов ниобия следующего фазового состава – от (Nb<sub>0,8</sub>W<sub>0,2</sub>)C<sub>0,7</sub> до (Nb<sub>0,8</sub>W<sub>0,2</sub>)C<sub>0,7</sub> + Nb<sub>2</sub>C. При плазменном осаждении синтезируется NbC. Твердость плазменных покрытий из NbC, нанесенных на твердый сплав без формирования подслоев, содержащих карбиды ниобия и вольфрама, в результате ионного воздействия достигает значений 36–40 ГПа (см. таблицу). Значительное увеличение твердости слоистых карбидных покрытий до 70 ГПа происходит в результате создания ионной бомбардировкой подслоя из карбидов ниобия. Предполагается, что мелкодисперсность кристаллитов синтезируемых карбидов ниобия и высокий уровень микронапряжений в них также является причиной полученных высоких значений твердости синтезированных покрытий.

Результаты адгезионных испытаний показали (см. таблицу), что критические нагрузки отслоения покрытий NbC, нанесенных на твердый сплав без формирования подслоев, не превышают 60 Н; для «классического» TiN это значение не превышает 80 Н. Для покрытий NbC с созданными подслоями на основе (Nb<sub>0,8</sub>W<sub>0,2</sub>)C<sub>0,7</sub> полного отслоения покрытия при максимальной нагрузке адгезионных испытаний в 150 Н не наблюдается, происходит только начальное отслоение маленьких участков покрытия, которые едва различимы в оптический микроскоп и которые указаны в таблице. Как следует из данных таблицы, наименьший объемный износ и лучшая эксплуатационная

стойкость при резании ламинированных деревостружечных плит характерны для фрезерного инструмента с покрытиями NbC, имеющими подслои из  $(\text{Nb}_{0,8}\text{W}_{0,2})\text{C}_{0,7}$ , а также инструмент с покрытиями, сформированными только ионной бомбардировкой в режиме I2.

## *Выводы*

Установлено, что увеличение времени ионной бомбардировки твердого сплава ниобием с энергией 1 кэВ с 1 до 2, 3 минут позволяет создать слой с толщиной до 0,8 мкм на основе карбида  $(\text{Nb}_{0,8}\text{W}_{0,2})\text{C}_{0,7}$  с твердостью до 50 ГПа. Последующее плазменное осаждение ниобия в среде метана при потенциале смещения 200 В на этот слой создает покрытие из NbC. Твердость этих слоистых покрытий на основе карбидов ниобия и вольфрама достигает значений до 70 ГПа. Определено, что наименьший объемный износ и лучшая эксплуатационная стойкость при резании ламинированных деревостружечных плит характерны для фрезерного инструмента с покрытиями NbC, имеющими подслои из  $(\text{Nb}_{0,8}\text{W}_{0,2})\text{C}_{0,7}$ , а также инструмента с покрытиями, сформированными только ионной бомбардировкой в течение не более 2 минут.

## **Библиографический список**

1. Advanced characterization methods for wear resistant hard coatings: a review on recent progress / M. Tkadletz, N. Schalk, R. Daniel, J. Keckes, C. Czettel, C. Mitterer // Surface and Coatings Technology. 2016. V. 285. Pp. 31–46.
2. Rafael A.M., Christopher A. Schuha Tool steel coatings based on niobium carbide and carbonitride compounds // Surface and Coatings Technology. 2016. V. 285. Pp. 31–46.
3. JCPDS Data Cards, 72-0097 / International Center of Diffraction Data. Swarthmore: PA, 1997.
4. Курлов А.С., Гусев А.И. Учет нестехиометрии карбида ниобия NbC<sub>у</sub> при размоле до нанокристаллического состояния // Физика твердого тела. Т. 55. 2013. Вып. 12. С. 2 398–2 405.

**УДК 674.07**

**В.С. Паскарь, О.А. Рублева, Н.А. Тарбеева**

(V.S. Paskar', O.A. Rubleva, N.A. Tarbeeva)

(ВятГУ, г. Киров, РФ)

E-mail для связи с авторами: ru\_olga\_ru@mail.ru

## **ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПЛОСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ДЕКОРИРОВАНИЯ ФАСАДОВ ИЗДЕЛИЙ**

### **ADVANTAGES OF TECHNOLOGIES FOR CREATION OF PLANE IMAGES FOR DECORATION OF FACADE SURFACES**

*В статье рассмотрены современные подходы к способам декорирования деталей из древесных материалов за счет нанесения плоских изображений на фасадные поверхности изделий. Проведен сравнительный анализ древесных материалов с точки зрения возможностей их отделки. Выявлено, что известные способы отделки фасадных поверхностей древесных материалов применимы на практике, но требуют обособления их применения.*