

воде, используемой для генерации металлических (Ag) наночастиц. Результаты обработки изображений показали изменение температуры в диапазоне 3000 и 6000 К по объему плазмы. Анализ пространственного распределения температуры и плотности вдоль оси разлета плазмы позволил выделить гипотетическую зону конденсации, в которой возможно образование НЧ. Экспериментальные результаты показывают важность исследований плазменной фазы для понимания механизмов зарождения и роста НЧ при лазерной абляции в жидких средах.

Работа выполнена при поддержке Национальной академии наук Беларуси (проект Конвергенция 2.2.05) и БРФФИ (грант Ф21УКРГ-009).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang D., Gökce B., Barcikowski S. Chemical Reviews, 117–5 (2017) 3990–4103.
2. Dell'Aglio M., Gaudiuso R., De Pascale O., De Giacomo A. Applied Surface Science, 348 (2015) 4–9.
3. Зельдович, Я.Б. Физика ударных волн и низкотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1966.

УДК 674.055:621.934(043.3)

Директор М.А. Андреев¹; доц. В.В. Чаевский²

¹ОХП «Институт сварки и защитных покрытий» НАН Беларуси, г. Минск;

²БГТУ, г. Минск)

СИНТЕЗ Hf – Zr – ZrN ПОКРЫТИЙ НА НОЖАХ ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА

Современное развитие технологии деревообработки требует применения износостойкого материала инструмента, выдерживающего большие динамические и вибрационные нагрузки в связи с использованием высоких скоростей резания. В быстрорежущих инструментальных сталях больше легирующих элементов, что увеличивает твердость, прочность и износостойкость инструмента. Тем не менее, возможен быстрый химический износ стального ножа инструмента из-за коррозии и механического износа, который объясняется присутствием экстрактивных веществ и кремнезема в древесине и древесных композитах [1]. В настоящее время достигнут существенный прогресс в улучшении ключевых характеристик инструментальных материалов путем нанесения модифицирующих покрытий с применением различных технологий их осаждения, среди которых наблюдаются две ос-

новные тенденции: 1) нанесение многослойных многофункциональных покрытий методом КИБ [2]; 2) развитие многооперационных – гибридных (комбинированных) технологий [3]. Целью данной работы был синтез на лезвиях строгальных ножей из стали 9ХФ дереворежущего фрезерного инструмента Hf – Zr – ZrN покрытий и исследование структуры, фазового состава и физико-механических свойств сформированных слоев.

Фазовый состав сформированных покрытий исследовался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) при помощи дифрактометра Ultima IV (Rugaku) в Cu-K_α излучении. Морфология поверхностей покрытий и элементный состав образцов исследовались методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) с помощью электронного микроскопа MIRA 3 (TESCAN). Микротвердость испытуемых покрытий определялась при нагрузках 50, 100 и 300 г по методу Виккерса на микротвердомере Wilson Instrumets 402MVD.

Hf – Zr – ZrN покрытия были сформированы методами ионно-лучевого распыления и КИБ. Перед осаждением Hf – Zr – ZrN покрытия проводилась ионная очистка содержащей цирконий (Zr) и гафний (Hf) мишени ЦГ20 потоком ионов аргона при давлении аргона (3–3,5) 10^{-2} Па в вакуумной камере в течение 25–30 мин. На первом этапе на образцы ножей методом ионно-лучевого распыления синтезированной мишени с помощью двухлучевого распылительного ионного источника ИРЛУ-2 оборудования ННВ 6.6-И1 осаждались пленки Hf. После чего методом КИБ осаждалось ZrN покрытие. В результате формировалось слоистое Hf – Zr – ZrN покрытие на поверхностях лезвий ножей фрезы.

Рис. 1 показывает, что сформированные покрытия содержат фазы фазы α -Hf, нитрида циркония ZrN и твёрдого раствора замещения (Hf, Zr)N. Значение среднего параметра решетки Hf – Zr – ZrN покрытия, рассчитанного по методу Гаусса определения центра тяжести рентгеновского пика (111) $2\theta = 33,4637^\circ$, $a = 0,4634$ нм превосходит значение $a = 0,4577$ нм ZrN (JC PDS 35-0753). С учетом исследований [4], показавших, что металлы Ti, Hf, Zr, V, Nb замещают друг друга в металлической подрешётке, при этом азот внедряется в октаэдрические поры кристаллической решётки, был сделан вывод о формировании твёрдого раствора замещения (Hf, Zr)N. Hf – Zr – ZrN покрытие повторяет рельеф поверхности основы (рис. 2а), что можно объяснить выполненной подготовкой поверхности ножа перед нанесением покрытия (в том числе и операцией шлифования), которая способствует достаточно высокой степени адгезии покрытия, проявляющейся в ис-

тирании кромок лезвий ножей с Hf – Zr – ZrN покрытием в процессе их износа (рис. 2а). Наблюдается также скалывание частей покрытия в местах их неравномерного формирования на поверхности лезвия (рис. 2б) в процессе резания древесины. По измеренным величинам сколов покрытия была определена толщина 3–4 мкм Hf – Zr – ZrN покрытий ножей.

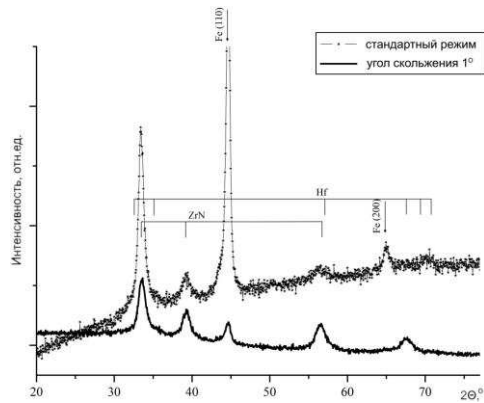


Рисунок 1 – Рентгенограмма Hf – Zr – ZrN покрытия

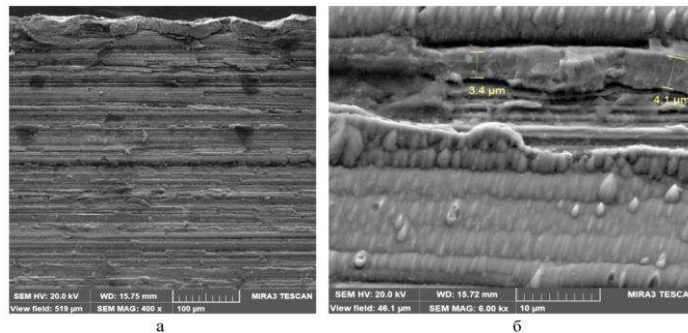


Рисунок 2 – СЭМ-снимки лезвия строгального ножа с Hf – Zr – ZrN покрытием: (а) плоскости поверхности с кромкой, (б) плоскости поверхности с толщиной слоя скола

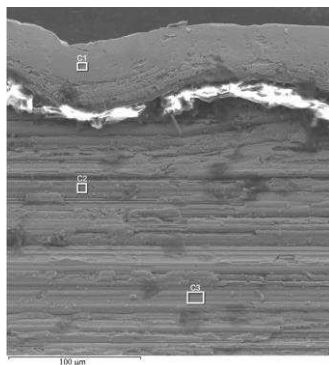


Рисунок 3 – СЭМ-снимок поверхности с кромкой лезвия ножа с Hf – Zr – ZrN покрытием после испытаний и указанием областей PCMA

Исследования элементного состава лезвий ножей с покрытием после проведенных опытно-промышленных испытаний на период стойкости модифицированных фрез показали (рис. 3, табл. 1), что по-

крытие, истираясь на кромке лезвия, обладает высокой износостойкостью практически на всей поверхности лезвия ножа.

Таблица 1 – РСМА лезвия ножа с Hf – Zr – ZrN покрытием после испытаний

Название спектра	Fe, вес.%	Zr, вес.%	Hf, вес.%	C, O, N..., вес.%
C1	98,0	1,0	–	остальное
C2	–	96,8	1,0	остальное
C3	–	97,1	0,8	остальное

Значение микротвердости сформированных на строгальных ножах Hf – Zr – ZrN покрытий ($6,6 \pm 0,3$ ГПа) превышает твердость ($5,2 \pm 0,2$ ГПа) стальных ножей без покрытия.

Проведенные на ПУП «Мебельная фабрика «Пинскдрев-Адриана» опытно-промышленные испытания фрезерного инструмента с строгальными ножами из стали 9ХФ с Hf – Zr – ZrN покрытиями показали увеличение их периода стойкости в 2,3–2,5 раза по сравнению с необработанным инструментом при резании заготовок из древесины хвойных пород, подтвердив высокие физико-механические характеристики Hf – Zr – ZrN покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1 Kowaluk, G. Examination of tools of different materials edge geometry for MDF milling / G. Kowaluk, W. Szymanski, B. Palubicki, P. Beer // European Journal of Wood and Wood Products, 2009. – Vol. 67, no. 2. – P. 173–176.

2 Investigation of Properties of the Zr,Hf-(Zr,Hf)N-(Zr,Hf,Me,Al)N coatings, where Me means Cr, Ti, or Mo / A. Vereschaka [et al.] // Coatings, 2021. – No. 11. – P. 1471.

3 Structural and mechanical properties of the ZrC/Ni-nanodiamond coating synthesized by the PVD and electroplating processes for the cutting knives / V. Chayauski [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance, 2019. – Vol. 28, no. 3. – P. 1278–1285.

4 Константинов, С.В. Структурно-фазовое состояние наноструктурированных нитридных покрытий на основе высокоэнтропийного сплава TiHfZrVNb / С.В. Константинов, Ф.Ф. Комаров // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы междунар. конф., г. Минск, 12–14 сентября 2018 г. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 95-107.