

УДК 621.865.6

Г. И. КОСТЮК<sup>1</sup>, Е. В. МИРГОРОДСКАЯ<sup>1</sup>, О. О. БРУЯКА<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*<sup>2</sup> *Автомобильно-дорожный институт при ДонНТУ, Горловка*

## МИКРОТВЕРДОСТЬ НАНО- И СУБМИКРОСТРУКТУР В ПОКРЫТИИ НА РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТАХ ИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Приведены результаты исследования взаимосвязи микротвердости покрытия  $0,18 \text{ HfN} + 0,82 \text{ ZrN}$  на режущих инструментах из твердых сплавов ВК8, Т15К6, МС221 и Сандвик Коромант и размером зерна (измерялся РЭМ-106). Показано, что рост размера зерна приводит к снижению микротвердости, а для двухслойного покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3 + (0,18 \text{ HfN} + 0,82 \text{ ZrN})$  микротвердость практически не зависит от размера зерна для наноструктурного покрытия, а снижение ее величины связано с наличием первого слоя из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , имеющего низкую микротвердость. Переход от наноструктурного покрытия к субмикроструктурному приводит к существенному уменьшению микротвердости.

**Ключевые слова:** микротвердость, наноструктуры, режущий инструмент, твердый сплав, покрытие, субмикроструктура.

### Введение

Широкое применение наноструктур и нанопокровтий в авиастроении может существенно улучшить служебные характеристики деталей и режущего инструмента (РИ), но необоснованное применение наноструктур и нанопокровтий может загубить саму идею их использования. Все это говорит о необходимости исследования влияния наноструктур в покрытиях и основном материале детали или РИ на их физико-механические характеристики и работоспособность.

Поэтому данная работа посвященная исследованию влияния размера зерна на микротвердость РИ из твердых сплавов ВК8, МС221, Т15К6 и Сандвик Коромант с однослойным и многослойным покрытием и без покрытия, является важной и актуальной для применения покрытий с наноструктурами в авиастроении, двигателестроении и агрегатостроении.

Работа выполнялась в рамках госбюджетных тем, финансируемых Министерством образования и науки Украины: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрирования технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники», «Концепция создания наноструктур, нано и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей авиационной техники, авиационных двигателей и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

### 1. Постановка задачи

В настоящее время есть значительное число экспериментальных работ по изучению наноструктур, результаты их обобщения представлены в монографиях [1...10], но оригинальных работ по применению наноструктурных покрытий для упрочнения режущего инструмента очень мало и в монографиях этим вопросам уделено незначительное место, в лучшем случае несколько страниц [8], а в основном только декларируется возможность применения наноструктур для повышения работоспособности РИ [9].

Целью данной работы является выявление возможностей реализации нанесения наноструктурного покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$  на режущий инструмент из твердых сплавов, что позволит при наличии наноструктур существенно повысить его износостойкость и снимаемый объем материала за период стойкости.

### 2. Оборудование и методы исследования

Нанесение покрытий осуществилось на установке Булат-6 модернизированной для нанесения равномерных покрытий, размер зерна в покрытии и в основном материале режущего инструмента определялся с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-106, а микротвердость – прибором ПМТ-3.

### 3. Микротвердость и размер зерна в однослойном покрытии 0,2 HfN + 0,8 ZrN и в двухслойном покрытии Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,2 HfN + 0,8 ZrN на РИ из твердых сплавов ВК8, Т15К6, МС221 и Сандвик Коромант

Микротвердость режущих и твердых сплавов с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN измерялась на микротвердомере ПМТ-3 и выбиралось среднее значение из 5-ти измерений.

Размер зерна измерялся на электронном микроскопе РЭМ-106 для покрытий 0,2 HfN + 0,8 ZrN на пластинах из твердого сплава ВК-8 (производства СССР) (рис. 1, 1), Сандвик Коромант (пластина Н13) (рис. 1, 2) и Сандвик Коромант с двухслойным покрытием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (слой на передней поверхности) и 0,2 HfN + 0,8 ZrN (слой непосредственно на пластине на передних поверхностях и на боковых поверхностях – задняя поверхность РИ) (рис. 1, 3).



Рис. 1. Внешний вид пластин: 1 – из ВК8, 2 – Сандвик Коромант (Н13) и покрытие 0,2 HfN + 0,8 ZrN, 3 – Сандвик Коромант с двухслойным покрытием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,2 HfN + 0,8 ZrN

Также исследовались пластины из твердого сплава МС221 (производства России) с покрытиями 0,2 HfN + 0,8 ZrN и Сандвик Коромант (Н13) с покрытием и без покрытия.

На рисунках 2 – 6 представлены наиболее характерные участки поверхности покрытий на режущем инструменте, где даны размеры характерных зерен для каждого типа покрытий. Видно, что минимальные размеры зерна реализуются на двухслойном покрытии Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,2 HfN + 0,8 ZrN (33...63 нм) (рис. 2).

Относительно невысокие размеры зерна в покрытии 0,2 HfN + 0,8 ZrN реализуются на пластинах из твердого сплава ВК-8, они имеют значения в диапазоне 84...119 нм, т.е. реализуются как наноструктуры ( $\alpha \leq 100$  нм) так и субмикроструктуры в диапазоне размеров зерна от 100 до 119 нм (рис. 3, а, б).

Фотография в зоне излома покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN дает возможность оценить его

толщину, которая в зоне изнашивания покрытия составляет  $\approx 1-2$  мкм, тогда как в зоне не подтвержденной интенсивному износу она близка к первоначальному, порядка 10 мкм (рис. 3, в).

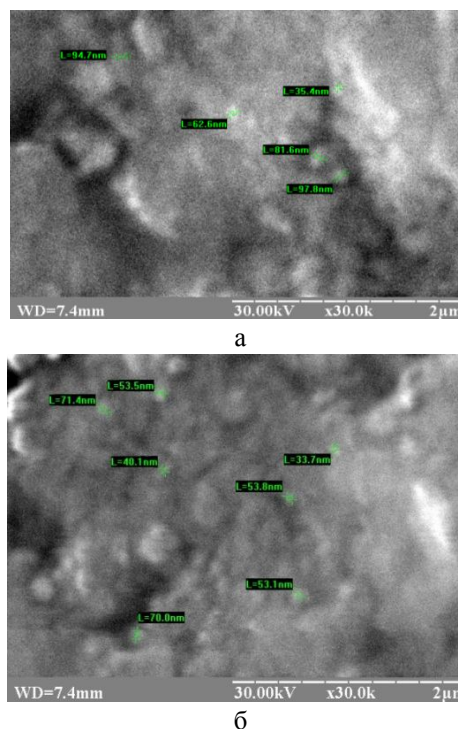


Рис. 2. Микрофотография поверхности покрытия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,2 HfN + 0,8 ZrN на твердом сплаве Сандвик Коромант получены на электронном микроскопе (для снижения влияния заряда на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> использовалось покрытие Си) для различных зон передней поверхности: а – вблизи вершины, б – в средней части передней поверхности пластины

Для пластин из твердого сплава Сандвик Коромант (Н13) с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN реализуются размеры зерна от 84 до 200 нм, где размер зерна субмикроструктур от 100 до 200 нм, но есть значительное число нанокластеров с размером зерна от 84 до 100 нм (рис. 4).

Фотографии покрытия на твердом сплаве МС221 представлены на рис. 5. Видно, что реализуются размеры зерна от 36,5 до 105 нм, причем зерен с размером 100–105 нм очень мало, практически преобладают зерна с размерами 36–58 нм, т.е. практически все покрытие является наноструктурным.

Фотографии твердого сплава Сандвик Коромант (Н13) без покрытия представлены на рис. 6. Видно, что размеры зерна лежат в пределах от 35,6 до 115 нм, причем значительное число зерен лежит в диапазоне от 40 до 88 нм, т.е. реализуются наноструктуры в достаточно большой части объема пластины.

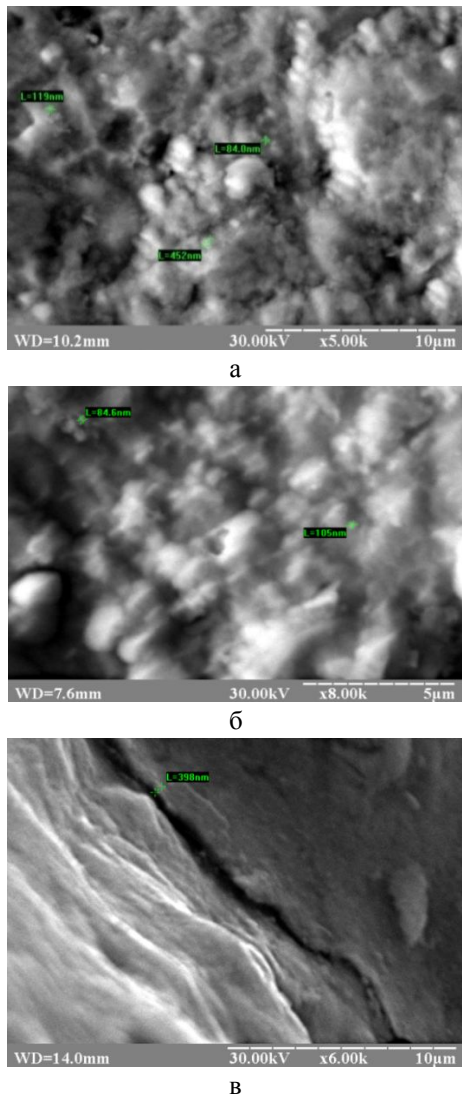


Рис. 3. Микрофотографии пластины с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN на BK8:  
а – вблизи вершины, б – в средней части пластины, в – вблизи от зоны излома покрытия

Все, выше изложенное, говорит о том, что не только в покрытии, но и в основном материале режущих инструментов реально получать наноструктуры.

Зависимость микротвердости этих пластин с покрытиями от размера зерна представлена на рис. 7, где наблюдается снижение микротвердости с ростом размера зерна. Наибольшая микротвердость реализуется для пластин BK-8 (производство СССР), но в тоже время для него реализуется и самый быстрый спад микротвердости до величины 14,67 ГПа ( $\alpha = 119$  нм), тогда как для Сандвик Коромант с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN такого снижения достигаем практически до того же значения (14 ГПа), при размере зерна 200 нм. Для пластин Сандвик Коромант с двуслойным покрытием  $Al_2O_3$  и 0,2 HfN + 0,8 ZrN микротвердость колеблется в небольших пределах 16,08–17,14 ГПа размер зерна

меняется в пределах 33,7–63,8 нм, т.е. практически всегда реализуются наноструктуры.

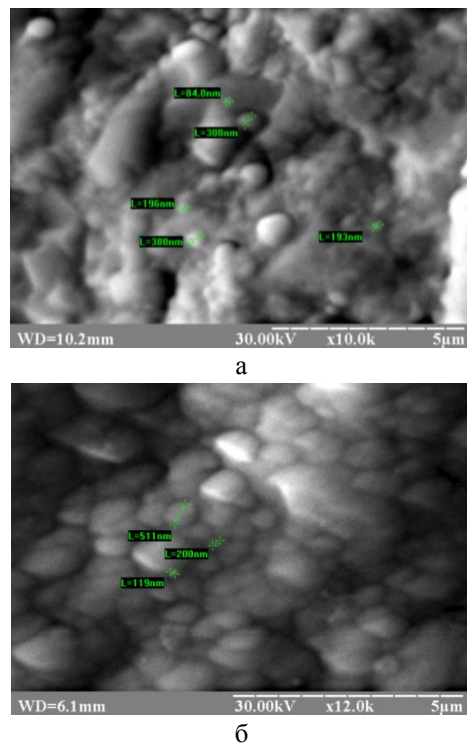


Рис. 4. Микрофотография пластины из Сандвик Коромант с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN:  
а – вблизи вершины; б – в средней части пластины на передней поверхности

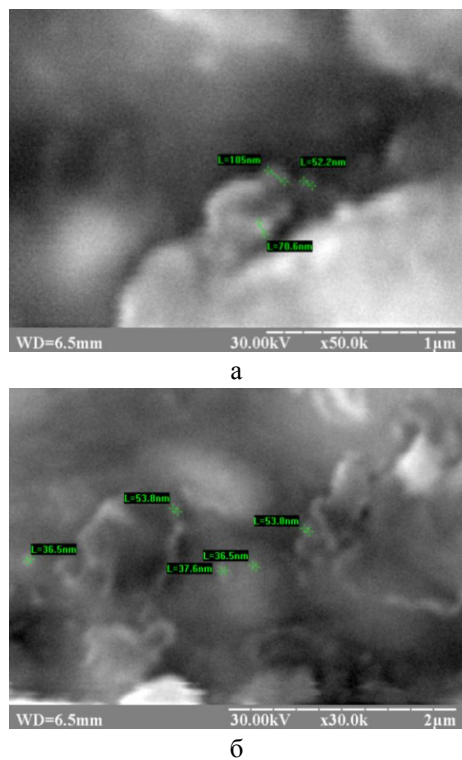
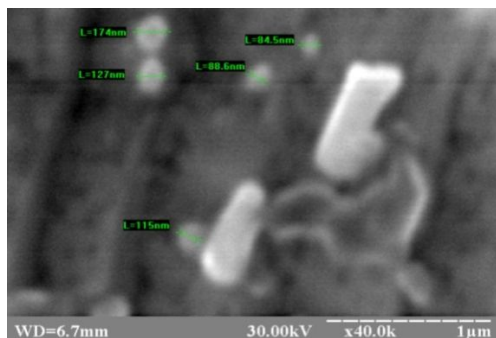
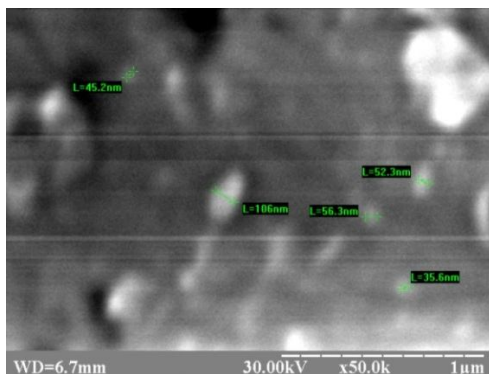


Рис. 5. Микрофотография покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на твердом сплаве MC221



а



б

Рис. 6. Микрофотография твердого сплава Сандвик Кормант (H13) без покрытия

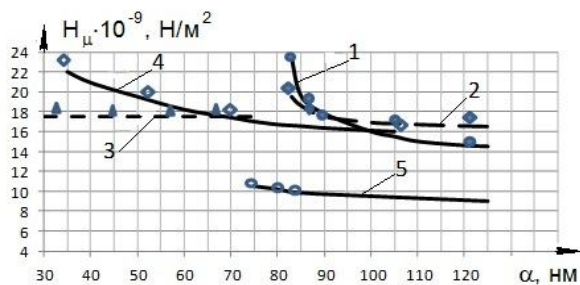


Рис. 7. Зависимость микротвердости от размера зерна для покрытия:

- 1 – 0,2 HfN + 0,8 ZrN на BK8; 2 – на Сандвик Кормант (пластин H13); 3 – для двуслойного покрытия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,2 HfN + 0,8 ZrN на Сандвик Кормант;
- 4 – покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на MC221;
- 5 – для Сандвик Кормант без покрытия (H13)

Для режущего инструмента из MC221 с покрытием микротвердость составляет 22,28 ГПа для зерна размером порядка 36 нм с ростом его размера микротвердость снижается и при размере зерна 105 нм становится равной 16,08 ГПа (рис. 7, кривая 5).

Микротвердость относительно слабо меняется от размера зерна для пластин Сандвик Кормант без покрытия (рис. 7). Видно, что изменение размера зерна от 36 до 176 нм приводит к снижению микротвердости от 10,42 до 8,9 ГПа.

Также небольшое изменение микротвердости в

твердом сплаве Сандвик Кормант говорит о достаточно высокой изотропности структуры, а значит и качественной технологии изготовления пластины (рис. 7, кривая 5).

Для покрытия 0,18HfN+0,82ZrN на T15K6 аналогичные зависимости микротвердости от размера зерна представлены на рис. 8 (размер зерна рассматривался как среднестатистический, измеренный на РЭМ-106, а микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3).

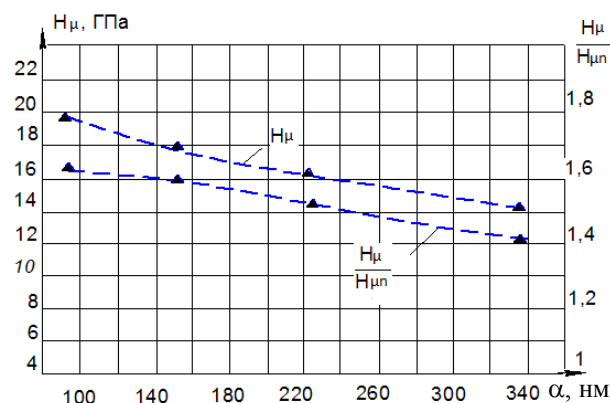


Рис. 8. Зависимость микротвердости T15K6 с покрытием 0,18 HfN + 0,82 ZrN – H<sub>µn</sub> и относительной микротвердости от размера зерна – α, нм

Видно, что с ростом размера зерна микротвердость покрытия снижается, но все равно остается большей, чем каждого из нитридов гафния и циркония. В связи с тем, что наноструктуры реализуются в одном режиме, при энергии ионов 110 эВ (рис. 9), то очевидно ожидать достаточно эффективной работы РИ из T15K6 не представляется возможным.

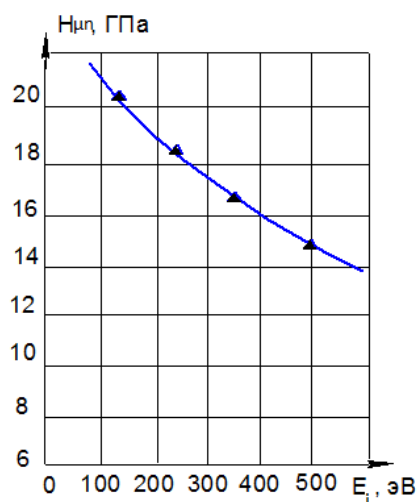


Рис. 9. Зависимость микротвердости от энергии ионов

Относительное изменение микротвердости (РИ с покрытием по отношению к РИ без покрытия) от

размера зерна представлено на рис. 8. Видно, что максимальное повышение микротвердости реализуется в случае наноструктурного покрытия.

Все это подтверждает тезис, что наноструктуры существенно повышают микротвердость.

Выше изложенное говорит о том, что для эффективного применения покрытий необходимо условие – размер зерна в покрытии должен быть меньше, чем в основном материале РИ и предпочтительно, чтобы реализовывались наноструктуры.

### Заключение

1. Обнаружено снижение микротвердости с ростом размера зерна для ВК8, Сандвик Коромант, МС221 с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN.

2. Микротвердость Сандвик Коромант с двухслойным покрытием  $Al_2O_3 + (0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN})$  изменяется незначительно, (в связи с тем, что реализуются практически всегда наноструктуры) с ростом зерна (33,7...63,8 нм,  $H_c = 16,08...17,14$  ГПа).

3. Микротвердость Т15К6 с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN ниже, чем у остальных твердых сплавов с тем же покрытием, что связано с существенно большим размером зерна, которое от наноструктурного при  $E_i = 110$  эВ переходит в субмикроструктурное при  $E_i = 250...500$  эВ.

4. Критерием эффективного применения покрытия будет условие: размер зерна в покрытии должен быть меньше, чем в основном материале РИ.

5. Показана наиболее эффективная работа покрытий с наноструктурами.

### Литература

1. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст] : моногр. / Г. И. Костюк. – К. : Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
2. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст] : моногр. / Г. И. Костюк. – К. : Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
3. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] : в 2 кн. / Г. И. Костюк. – К. : Изд-во АИНУ, 2002. – 1030 с.
4. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокрyтия: перспективы и реальность [Текст] : учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. Костюк, Г. И. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах [Текст] : моногр.- справ. / Г. И. Ко-

стюк. – К. : Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 728 с.

6. Костюк, Г. И. Научные основы создания современных технологий [Текст] : учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.

7. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст] : моногр.- справ. / Г. И. Костюк. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.

8. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст] : справ. / Г. И. Костюк. – К. : Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.

9. Костюк, Г. И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст] : учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.

10. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л. И. Гречихин. – М. : УП «Технопринт», 2004. – 397 с.

11. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов. – Х. : Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.

12. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А. И. Гусев. – Екатеринбург : Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.

13. Гусев, А. И. Наноматериалы наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М. : Физматлит, 2005. – 416 с.

14. Решетняк, Е. Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е. Н. Решетняк, А. И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.

15. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С. 50 – 56.

16. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А. А. Гончаров, П. И. Игнатенко, В. В. Петухов и др. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 17 – 25.

17. Костюк, Г. И. Оценка объема нанокластера и глубин его залегания в алюминиевом сплаве при действии ионов различных энергий [Текст] / Г. И. Костюк, Т. А. Постельник, А. Н. Костюк // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 64. – Х., 2014. – С. 129 – 141.

18. Костюк, Г. И. Исследование влияния размера зерна в покрытии на микротвердость, снимаемый объем материала за период стойкости и стойкость РИ при точении специального чугуна [Текст] / Г. И. Костюк, А. А. Шматко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 64. – Х., 2014. – С. 142 – 151.

Поступила в редакцию 24.10.2014, рассмотрена на редколлегии 19.11.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. производства двигателей летательных аппаратов, декан факультета авиационных двигателей А. И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ» им. Н. Е. Жуковского, Харьков.

### МІКРОТВЕРДІСТЬ НАНО- ТА СУБМІКРОСТРУКТУР В ПОКРИТТІ НА РІЖУЧИХ ІНСТРУМЕНТАХ З ТВЕРДИХ СПЛАВІВ

*Г. І. Костюк, К. В. Миргородська, О. О. Бруяка*

Наведено результати дослідження взаємозв'язку мікротвердості покриття  $0,18 \text{ HfN} + 0,82 \text{ ZrN}$  на ріжучих інструментах з твердих сплавів VK8, T15K6, MC221 і Сандвик Коромант і розміром зерна (вимірювався РЕМ-106). Показано, що зростання розміру зерна призводить до зниження мікротвердості, а для двошарового покриття  $\text{Al}_2\text{O}_3 + (0,18 \text{ HfN} + 0,82 \text{ ZrN})$  мікротвердість практично не залежить від розміру зерна для наноструктурного покриття, а зниження її величини пов'язано з наявністю першого шару з  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що має низьку мікротвердість. Перехід від наноструктурного покриття до субмікроструктурного призводить до суттєвого зменшення мікротвердості.

**Ключові слова:** мікротвердість, наноструктури, ріжучий інструмент, твердий сплав, покриття, субмікроструктура.

### MICROHARDNESS NANO AND SUBMICROSTRUCTURE IN COATINGS ON SOLID CARBIDE CUTTING TOOL

*G. I. Kostyuk, E. V. Mirgorodskaya, O. O. Bruyaka*

The results of studies on the relationship coating microhardness  $0,18 \text{ HfN} + 0,82 \text{ ZrN}$  on cutting tools with carbide VK8, T15K6, MS221 and Sandvik Koromant and grain size (measured by REM-106). It was shown that growth of grain size leads to a reduction of microhardness, and for two-layer coating  $\text{Al}_2\text{O}_3 + (0,18 \text{ HfN} + 0,82 \text{ ZrN})$  the microhardness is practically independent of time, to measure the grain nanostructured coating and decrease its value associated with the presence of the first layer  $\text{Al}_2\text{O}_3$  having a lowest microhardness. Transition from a nanostructured coating to submicrostructure loosed leads to a substantial decrease in microhardness.

**Keywords:** microhardness, nanostructures, cutting tools, tungsten carbide coating, submicrostructure.

**Костюк Геннадий Игоревич** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: g.kostyuk206@mail.ru.

**Миргородская Екатерина Викторовна** – аспирант каф. теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

**Бруяка Ольга Олеговна** – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. физики, Автомобильно-дорожный институт при Донецком национальном техническом университете, г. Горловка, Украина.