

Исследование влияния размера зерна в покрытии на микротвердость, снимаемый объем материала за период стойкости, и стойкость РИ при тчении специального чугуна

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Проведено экспериментальное исследование влияния размера зерна в однослойном покрытии $0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$ и двухслойном покрытии $\text{Al}_2\text{O}_3 + (0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN})$ на твердосплавных РИ из ВК8, МС221 и Сандвик Коромант (пластина Н13). Показано, что уменьшение размера зерна приводит к росту микротвердости для РИ из ВК8 и Сандвик Коромант с покрытием $0,2\text{HfN}+0,8\text{ZrN}$ (наиболее существенно для ВК-8). Для двухслойного покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3+(0,2\text{HfN}+0,8\text{ZrN})$ увеличение практически незначительно и величина микротвердости относительно невелика 16,08–17,14 ГПа. Снимаемый объем материала за период стойкости также растет с уменьшением размера зерна для всех покрытий и материалов пластин, но применение пластин Сандвик Коромант с двухслойным покрытием приводит к повышению снимаемого объема материала за период стойкости и стойкости практически на порядок.

Ключевые слова: микротвердость, снимаемый объем за период стойкости, стойкость.

Введение

Широкое применение наноструктур и нанопокровтий может существенно улучшить служебные характеристики деталей и режущего инструмента (РИ) но не обоснованное 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 посвящена исследованию влияния размера зерна на микротвердость, снимаемый объем материала за период стойкости и стойкость РИ из твердых сплавов ВК8, МС221 и Сандвик Коромант с однослойным и многослойным покрытием и без покрытия является важной и актуальной для применения покрытий с наноструктурами в промышленности.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «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 АТ, АД и РИ», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

1. Состояние вопроса

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 посвящено незначительное место, в лучшем случае несколько страниц [8], а в основном только декларируется возможность применения наноструктур для повышения работоспособности РИ [9].

2. Оборудование и методы исследования

Нанесение покрытий осуществилось на установке Булат-6 модернизированной для нанесения равнотолщинных покрытий, размер зерна в покрытии и в основном материале режущего инструмента определялся с помощью электронного микроскопа РЭМ-106.

Микротвердость измерялась прибором ПМТ-3. Эксперименты по определению стойкости проводились на станке 16К20 с динамометром УД100 и СИИТ стойкость определялась по критически быстрому росту силы резания P_2 при точении специального чугуна НВ.

В качестве критерия эффективности работы РИ использовались снимаемый объем материала, за период стойкости которой на наш взгляд, является наиболее полным и объективным по сравнению со стойкостью режущего инструмента, на которую влияют режимы резания и при заниженных режимах резания можем получить высокую стойкость, но объем снимаемого припуска будет значительно ниже чем при меньшей стойкости, но более жестких режимах резания с высоким снимаемым объемом материала за период стойкости.

3. Микротвердость и размер зерна в однослойном покрытии 0,2 HfN + 0,8 ZrN и в двухслойном покрытии Al_2O_3 + 0,2 HfN + 0,8 ZrN

Микротвердость режущих и твердых сплавов с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN измерялась на микротвердомере ПМТ-3 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, а), Сандвик Коромант (пластина Н13) (рис. 1, б) и Сандвик Коромант двухслойным покрытием Al_2O_3 (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, в).

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

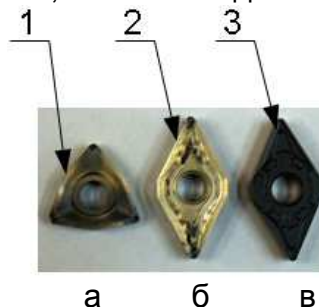


Рис. 1. Внешний вид пластин из ВК8 (а), Сандвик Коромант (Н13, б) и покрытий 0,2 HfN + 0,8 ZrN и Сандвик Коромант с двухслойным покрытием Al_2O_3 + 0,2 HfN + 0,8 ZrN (в)

На рис. 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 $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$ (33...63 нм) (рис. 2).

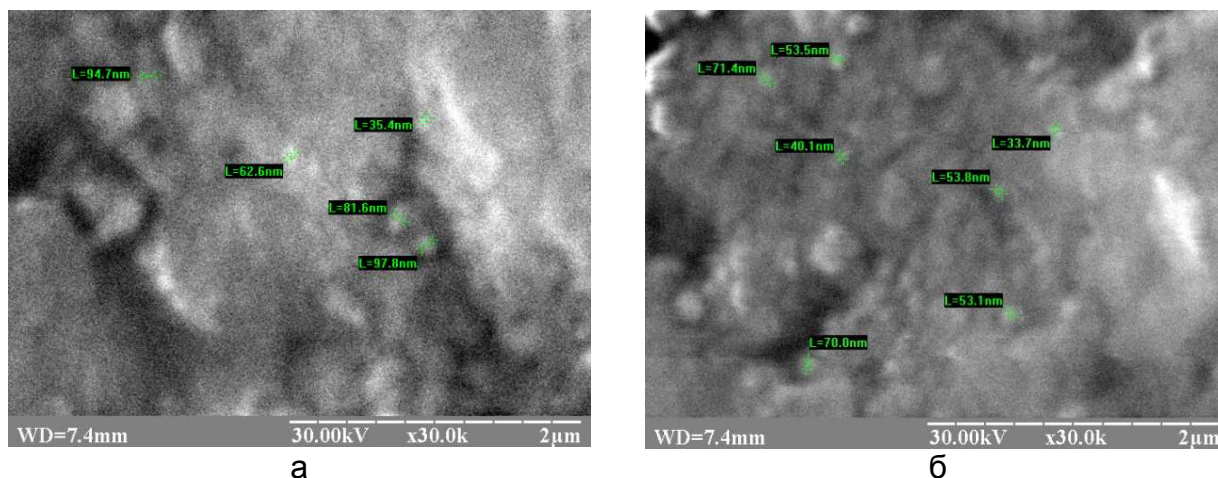


Рис. 2. Микрофотография поверхности покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$ на твердом сплаве Сандвик Коромант, полученных на электронном микроскопе (для снижения влияния заряда на Al_2O_3 использовалось покрытие Cu) для различных зон передней поверхности: а – вблизи вершины, б – в средней части передней поверхности пластины и вблизи отверстия для крепления

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

Фотография в зоне излома покрытия $0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$ дает возможность оценить его толщину, которая в зоне изнашивания покрытия составляет $\approx 1\text{--}2 \text{ мкм}$, тогда как в зоне не подтвержденной интенсивному износу она близка к первоначальному порядку 10 мкм (рис. 3, в).

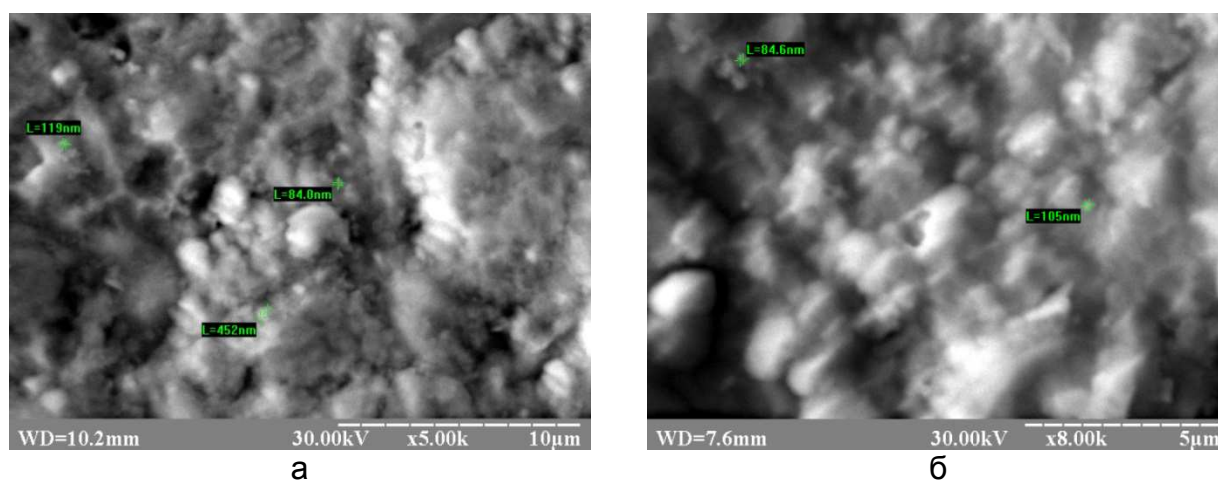
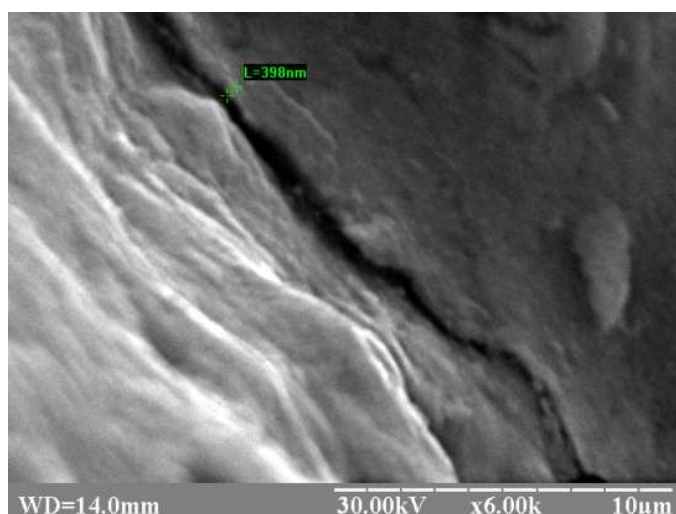


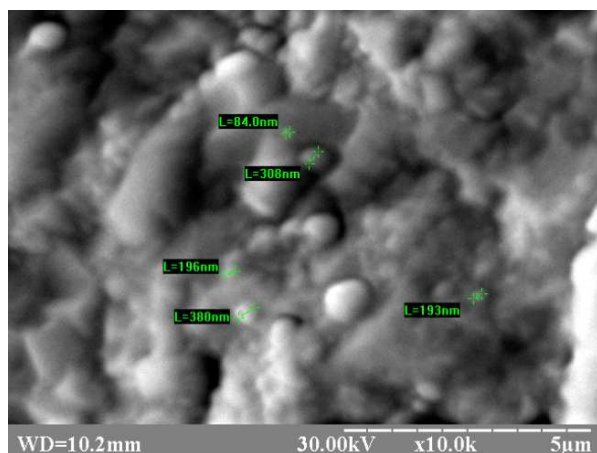
Рис. 3. Микрофотографии пластины с покрытием $0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$ на ВК8: а – вблизи вершины; б – в средней части пластины; в – вблизи от зоны излома покрытия



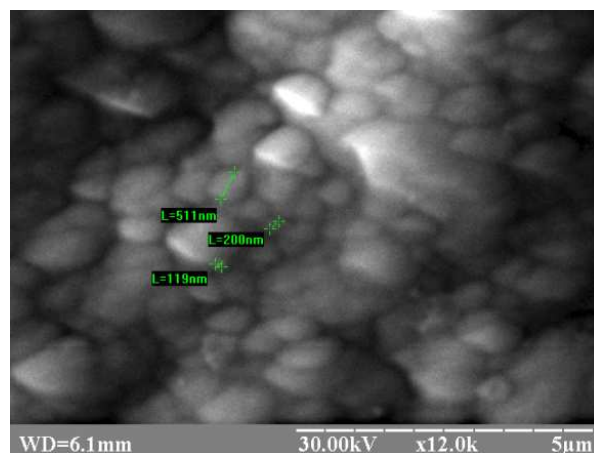
В

Окончание рис. 3

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 100 до 200 нм хотя и превагирует, но есть значительное число нанокластеров размер зерна от 84 до 100 нм (рис. 4).



а



б

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

Фотографии покрытия на твердом сплаве MC221 представлены на рис. 5. Видно, что реализуются размеры зерна от 36,5 до 105 нм, причем зерен с размером 100–105 нм очень мало, а практически превагируют зерна с размерами 36–58 нм, т.е. практически все покрытие является наноструктурным.

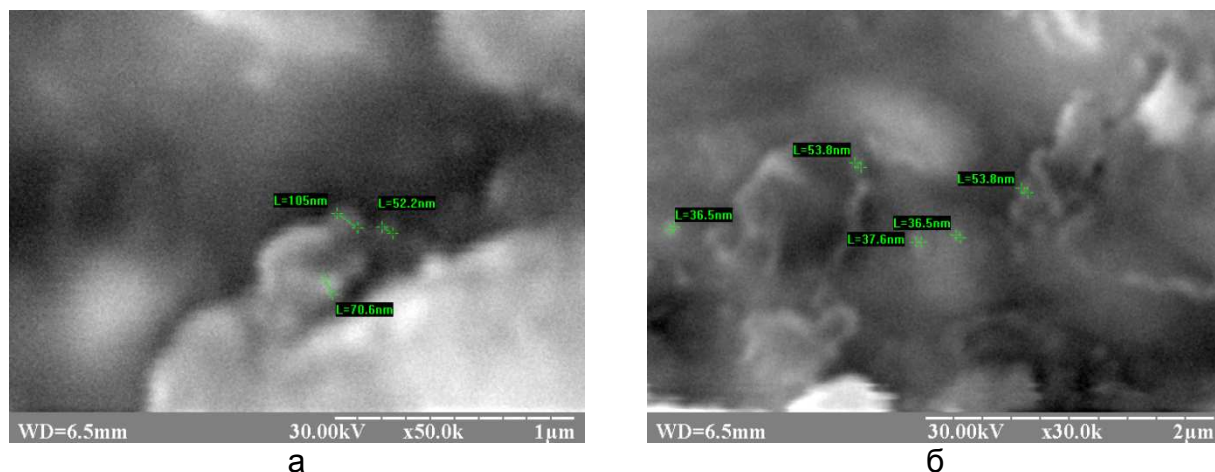


Рис. 5. Фотография покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на твердом сплаве MC221

Фотография твердого сплава Сандвик Коромант (H13) без покрытия представлены на рис. 6. Видно, что размеры зерна лежат в пределах от 35,6 до 115 нм, причем значительное число зерен лежат в диапазоне от 40 до 88 нм, т.е. реализуются наноструктуры в достаточно большой части объема пластины.

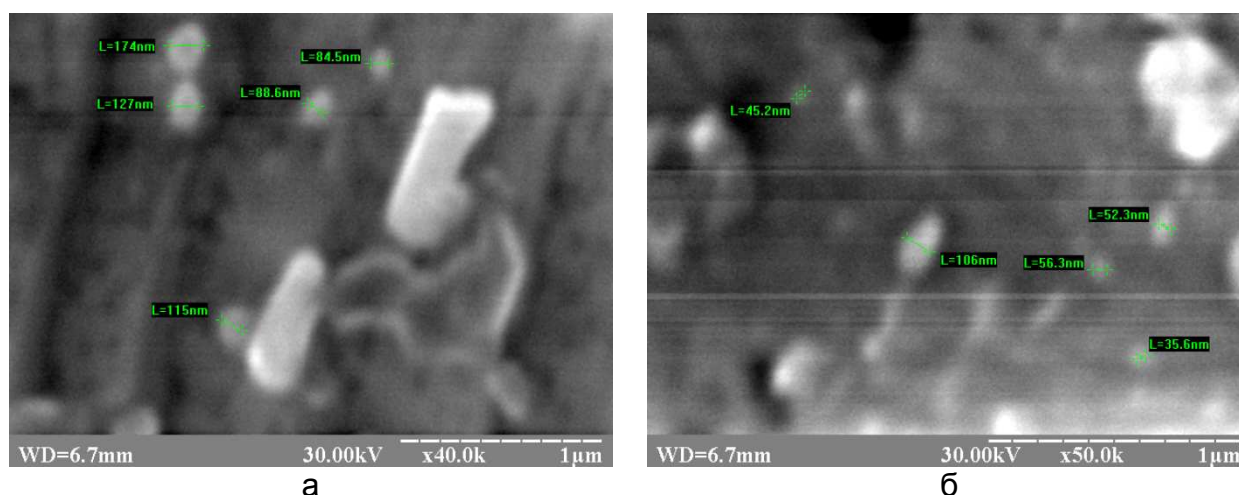


Рис. 6. Фотография твердого сплава Сандвик Коромант (H13) без покрытия

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 представлены на рис. 7, где наблюдается снижение микротвердости с ростом размера зерна. Наибольшая микротвердость реализуется для пластин ВК-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 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.

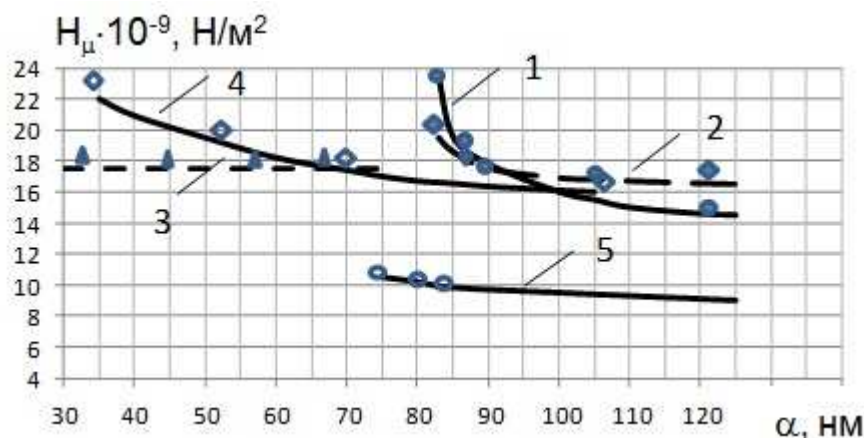


Рис. 7. Зависимость микротвердости от размера зерна для покрытия: 1 – 0,2 HfN + 0,8 ZrN на VK8; 2 – на Сандвик Коромант (пластин H13); 3 – для двуслойного покрытия $Al_2O_3 + 0,2 HfN + 0,8 ZrN$ на Сандвик Коромант; 4 – покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на MC221; 5 – для Сандвик Коромант без покрытия (H13)

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

Микротвердость относительно слабо меняется от размера зерна для пластин Сандвик Коромант 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 микротвердость в твердом сплаве Сандвик Коромант говорит о высокой изотропности структуры, а значит и качественной технологии изготовления пластины (рис. 7, кривая 5).

4. Эффективность обработки чугуна в зависимости от размера зерна покрытия или основного материала РИ

Основным критерием эффективности обработки очевидно необходимо считать снимаемый объем материала за период стойкости РИ как обобщенный критерий. Исследования проводились для покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на пластинах из VK8 (СССР), на пластинах Сандвик Коромант (H13), для двуслойного покрытия $Al_2O_3 + (0,2 HfN + 0,8 ZrN)$ на Сандвик Коромант, для покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на пластинах из MC221, и для Сандвик Коромант без покрытия (рис. 8). Так зависимость снимаемого объема материала за период стойкости от размера зерна для рассматриваемых покрытий и материалов РИ представлены на рис. 8. Видно, что для покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на VK8 (СССР) снимаемый объем материала РИ за период стойкости (G) колеблется вблизи 10^6 мм³. При наноструктурном зерне 80–90 нм микротвердость $\mu_{H1} = 18,6–22,1$ ГПа, тогда как увеличение размера зерна до 119 нм, эта величина снижается до $5,8 \cdot 10^5$ мм³. Для того же покрытия на пластинах Сандвик Коромант снимаемый объем за период стойкости хоть и при размере зерна вблизи 80 нм и приближаемся к значению как и для VK8, но с ростом зерна быстро падает до $3,3 \cdot 10^5$ мм³ при $\alpha = 130$ нм. Для двухслойного покрытия $Al_2O_3 + (0,2 HfN + 0,8 ZrN)$ на Сандвик Коромант практически всегда реализуются наноструктуры ($\alpha = 45,6–63,8$ нм), а с учетом того, что адгезия верхнего покрытия Al_2O_3 к чугуну минимальна снимаемый объем материала за период стойкости практически превышает или равен $9 \cdot 10^6$ мм³.

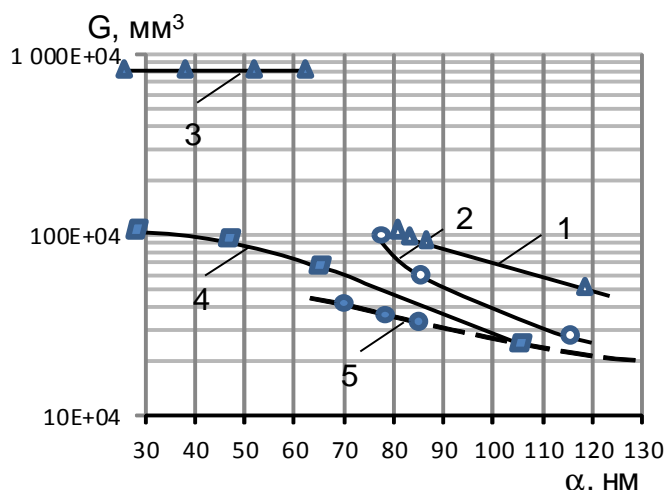


Рис. 8. Зависимость снимаемого объема материала за период стойкости от размера зерна: 1 – для покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на BK8; 2 – покрытия на Сандвик Коромант (пластин Н13); 3 – для двуслойного покрытия $Al_2O_3 + (0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN})$ на Сандвик Коромант; 4 – покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на MC221; 5 – для Сандвик Коромант без покрытия (Н13) при обработке специального чугуна (НВ)

Применение покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на пластинах MC221 позволяет получить довольно значительный снимаемый объем материала за период стойкости (порядка 10^6 мм^3), реализуется для наноструктурных покрытий с размером зерна от 36 до 70 нм, тогда как увеличение размера наноструктур снижает его до $3,23 \cdot 10^5 \text{ мм}^3$.

Аналогичные исследования для пластин Сандвик Коромант без покрытия показали, что для пластин с наноструктурным слоем ($\alpha = 73\text{--}82 \text{ нм}$) снимаемый объем материала за период стойкости колеблется в пределах $(5,04 \dots 5,4) \cdot 10^5 \text{ мм}^3$, тогда как для субмикроразмера он снижается до $1,9 \cdot 10^5 \text{ мм}^3$.

5. Влияние размера зерна на стойкость твердосплавных режущих инструментов

Проведено исследование следующих пластин из твердосплавных режущих инструментов: BK8 (СССР) + 0,2 HfN + 0,8 ZrN, Сандвик Коромант (Н13) + 0,2 HfN + 0,8 ZrN; Сандвик Коромант + $Al_2O_3 + 0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$, MC221 + 0,2 HfN + 0,8 ZrN и Сандвик Коромант (Н13) без покрытия. На рис. 9 представлены зависимости стойкости этих пластин от размера зерна при обработке специального чугуна (номера кривых соответствуют последовательности описания).

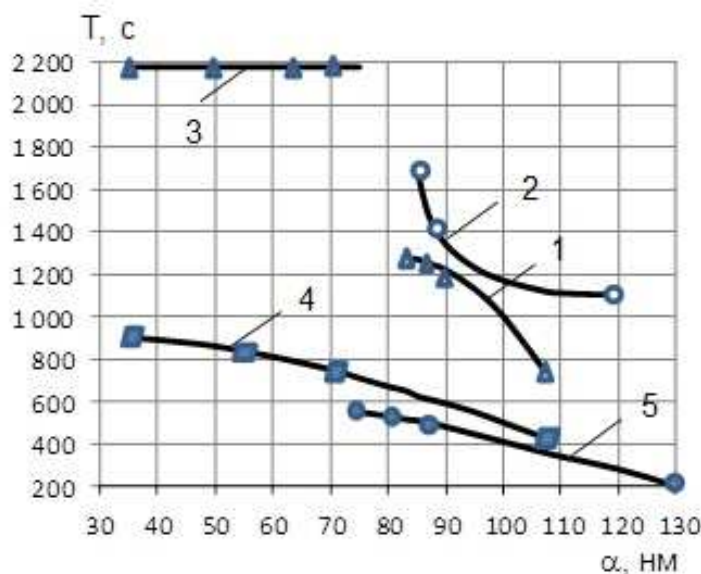
Видно, что для пластин BK8 с покрытием стойкость значительной величины реализуется только для наноструктурных покрытий ($T = 1128\text{--}1280 \text{ с}$) при размере зерна $\alpha = 84\text{--}88 \text{ нм}$, при увеличении размера зерна даже до 115 нм стойкость снижается до 780 с (рис. 9 кривая 1). Для пластин Сандвик Коромант (Н13) с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN максимум стойкости (1695 с) реализуется при размере зерна вблизи 84 нм дальнейшее увеличение зерна до 119 и даже 106 нм приводит к снижению стойкости до 1395 и 1292 с, стойкость остается еще довольно высокой.

Для пластин Сандвик Коромант с двухслойным покрытием $Al_2O_3 + 0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$ реализуется стойкость около 9000 с практически для всех пластин так как размер зерна изменяется от 45 до 64 нм, т.е. всегда реализуются наноструктуры и учитывая малую адгезию первого слоя из Al_2O_3 к обрабатываемому материалу (чугуна), что дополнительно повышает работоспособность пластины, что говорит

о важности учета адгезионного взаимодействия обрабатываемого материала и материала покрытия или основного материала РИ.

Рис. 9. Зависимость стойкости РИ от размера зерна:

- 1 – для покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на BK8;
- 2 – покрытия на Сандвик Коромант (пластина H13);
- 3 – для двухслойного покрытия $Al_2O_3 + (0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN})$ на Сандвик Коромант;
- 4 – покрытия 0,2 HfN + 0,8 ZrN на MC221; 5 – для Сандвик Коромант без покрытия (H13) при обработке специального чугуна (НВ)



Для пластины из MC221 с покрытием 0,2 HfN + 0,8 ZrN реализуется относительно не высокие T и составляет 980, 947 и 672 с для размеров зерна 36, 53, 71 нм дальнейший рост зерна снижает стойкость до 447 с и в этом случае реализуется субмикроструктура.

При обработке специального чугуна пластинами из твердого сплава Сандвик Коромант (H13) без покрытия стойкость существенно снижается до 520–568 с при наноструктурном зерне ($\alpha = 84–88$ нм), а при субмикроструктурном зерне ($\alpha = 106$ нм) стойкость снижается до 207 с.

Видно, что наличие наноструктур приводит к повышению стойкости РИ при их наличии в нанопокрывтии или в основном материале РИ, что требует учета повышения стойкости и снимаемого объема материала за период стойкости за счет образования наноструктур.

Величина стойкость РИ является определяющей при обработке длинномерных деталей, когда для эффективного использования РИ необходимо, чтобы стойкость РИ была равна или кратна времени обработки длиной поверхности. Это позволит избежать смены инструмента, при условиях, когда обработка длинной поверхности не закончена, что особенно важно для чистовой обработки.

Выводы

1. Обнаружено снижение микротвердости с ростом размера зерна для BK8, Сандвик Коромант, MC221 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 реализуется практически всегда наноструктуры) с ростом зерна (33,7...63,8 нм, $H_{\mu} = 16,08...17,14$ ГПа)
3. Обнаружено влияние размера зерна на снимаемый объем материала за период стойкости, который тем выше, чем меньше размер зерна в покрытии или основном материале режущего инструмента (РИ без покрытия).

4. Показано, что существенное влияние на величину снимаемого объема материала за период стойкости, оказывает адгезионное взаимодействие обрабатываемого материала с материалом покрытия или материалом РИ (без покрытия);

5. Получено, что применение двуслойного покрытия $Al_2O_3 + (0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN})$ приводит к повышению снимаемого объема материала практически на порядок по сравнению с одним покрытием $0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$ даже наноструктурированным;

6. Отличие величин снимаемого объема материала за период стойкости с наноструктурированным покрытием и субмикро-структурированными материалами составляет 5 раз, тогда как на наноструктурированное покрытие и материал РИ имеют незначительное отличие (в 1,1–1,5 раза по G), а при большом размере зерна отличия по G не будет.

7. Наличие наноструктур приводит к повышению стойкости РИ с покрытием и без него.

8. Обнаружено, что МС221 даже при малой стойкости обеспечивает высокий снимаемый объем материала за период стойкости.

Список литературы

1. 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.

2. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с.

3. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 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. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.

6. 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.

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

8. 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.

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

10. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и

свойства [Текст] / А. И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.

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

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

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. Долматов А. И., Национальный аэрокосмический университет «ХАИ» им. Н.Е. Жуковского, Харьков
Поступила в редакцию 11.06.2014

Дослідження впливу розміру зерна в покритті на мікротвердість, що знімається обсяг матеріалу за період стійкості та стійкість, РІ при точінні спеціального чавуну

Проведено експериментальне дослідження впливу розміру зерна в одношаровому покритті 0,2 HfN + 0,8 ZrN і двошаровому покритті $Al_2O_3 + (0,2 HfN + 0,8 ZrN)$ на твердосплавних РІ з ВК8, MS221 і Сандвик Коромант (пластина Н13). Показано, що зменшення розміру зерна призводить до зростання мікротвердості для РІ з ВК8 і Сандвик Коромант з покриттям 0,2 HfN + 0,8 ZrN (найбільш істотно для ВК-8). Для двошарового покриття $Al_2O_3 + (0,2 HfN + 0,8 ZrN)$ збільшення практично незначне і величина мікротвердості відносно невелика – 16,08–17,14 ГПа. Обсяг матеріалу, що знімається за період стійкості також зростає зі зменшенням розміру зерна для всіх покриттів і матеріалів пластин, але застосування пластин Сандвик Коромант з двошаровим покриттям призводить до підвищення обсягу матеріалу, що знімається за період стійкості, та стійкості практично на порядок.

Ключові слова: мікротвердість, обсяг, що знімається за період стійкості, стійкість.

Investigation of the influence of grain size in the coating microhardness, removable volume of material for the period of resistance and resistance RT in turning special cast iron

An experimental investigation of the influence of grain size in the single-layer coated 0,2 HfN + 0,8 ZrN and dual-layer coating $Al_2O_3 + (0,2 HfN + 0,8 ZrN)$ on hard-alloyed VK8 of RI, MS221 and Sandvik Koromant (plate H13). A decrease in grain size leads to an increase of microhardness RT VK8 and Sandvik Koromant coated 0,2 HfN + 0,8 ZrN (most significantly for the VK-8). For two-layer coating $Al_2O_3 + (0,2 HfN + 0,8 ZrN)$ increase almost negligible and the microhardness is relatively small 16,08–17,14 GPa. The recorded amount of material between resistance also increases with decreasing grain size for all coatings and materials plates, but the use of plates Sandvik Koromant Double layer leads to an increase in the volume of material filmed for the period resistance and almost an order of magnitude.

Keywords: microhardness, removable volume for the period resistance, resistance.