

УДК 621.785:669.14.08.29

## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА

В.Е. Овчаренко, Ю.Ф. Иванов\*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

\*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Юргинский технологический институт ТПУ

E-mail: ove45@mail.ru

*Приведены результаты исследования зависимостей глубины резания алмазным контртелом, площади поперечного сечения канавки резания поверхности металлокерамического сплава TiC-(Ni-Cr) и коэффициента трения на поверхности металлокерамического сплава от характера наноструктурной модификации поверхностного слоя сплава при импульсном электронно-пучковом облучении его поверхности. Показано, что наноструктуризация металлического связующего в поверхностном слое металлокерамического сплава снижает коэффициент трения на его поверхности.*

### Ключевые слова:

*Физика конденсированного состояния, трибологические свойства, межфазное взаимодействие, композиционные материалы, структурно-неравновесные состояния, наноструктура, дефектная субструктура, фазовые превращения, модификация.*

Общепринятыми в материаловедении приемами повышения ресурса работы режущего инструмента являются подбор компонентов инструментального материала, оптимизация их соотношения в материале и формирование заданной микроструктуры материала на режущей кромке инструмента. Известно, что оптимальной для износостойкого материала является структура равномерно распределенных в металлической матрице (связке) высокотвердых частиц заданной дисперсности. Наиболее перспективными компонентами структуры указанного материала являются карбид титана, характеризующийся высокими значениями твердости, окалинстойкости, малыми значениями коэффициента трения по большинству металлов и сравнительно низкой стоимостью, и жаростойкие никелевые сплавы в качестве металлического связующего карбидных частиц. Например, никельхромовые сплавы, легированные элементами, приводящими к дисперсному упрочнению сплава при выделении  $\gamma'$ -фазы в процессе термообработки сплава. Металлокерамические сплавы на основе карбида титана с никельхромовой связкой имеют износостойкость в 2...3 раза выше износостойкости твердых сплавов на основе карбида вольфрама с кобальтовой связкой и в 50 раз выше износостойкости инструментальных сплавов, легированных вольфрамом и молибденом.

Основными проблемами при изготовлении металлокерамического инструмента спеканием порошковой смеси карбида титана с никельхромовым сплавом являются значительный разброс в размерах частиц карбида титана (стандартный порошок карбида титана имеет размерность от 3 до 15 мкм) и повышенная остаточная пористость (до 3 % при содержании карбидной фазы 50 об. % и до 5 % при 60 об. % карбидной фазы в композиции). Наличие в металлокерамическом сплаве карбидных частиц достаточно большого размера и остаточной после спекания пористости оказывают отрицательное влияние на класс чистоты режущей

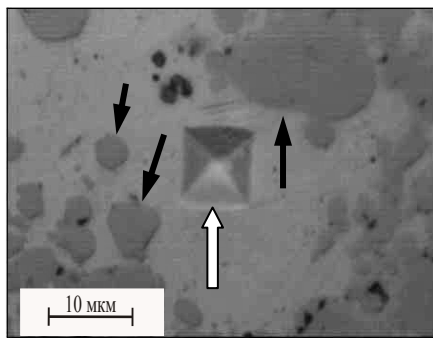
кромки металлокерамического инструмента: высота неровностей рельефа непосредственно на режущей кромке после прецизионной шлифовки достигают размера крупных частиц карбида титана. Локальные микровпадины на режущей кромке инициируют ее ускоренный износ путем образования очагов разрушения материала непосредственно на режущей кромке, приводящих к выкрашиванию частиц карбида титана и ускоренному износу режущей кромки инструмента.

Импульсная электронно-пучковая обработка поверхности металлокерамического сплава позволяет принципиальным образом модифицировать микроструктуру его поверхностного слоя. В соответствии с параметрами электронно-пучкового облучения в поверхностном слое металлокерамического сплава образуется либо стеклообразная структура, состоящая из субмикроструктурных частиц карбида титана с металлическим связующим в наноструктурном состоянии, либо структура дисперсного строения «частицы карбида в металлической связке» с металлической связкой в наноструктурном состоянии [1, 2]. Указанная модификация микроструктуры поверхностного слоя металлокерамического сплава сопровождается кратным повышением стойкости металлокерамического сплава в условиях резания металла [3–7]. Очевидно, что столь значительное изменение стойкостных свойств металлокерамического сплава обусловлено изменением его трибологических свойств в результате модификации микроструктуры поверхностного слоя. В настоящей работе приведены результаты исследования зависимости трибологических свойств поверхностного слоя металлокерамического сплава TiC-(Ni-Cr) от характера его микроструктуры.

Модификацию поверхностного слоя образцов металлокерамического сплава осуществляли на установке «SOLO» [8] электронным пучком с длительностью импульсов 50, 100, 150 и 200 мкс в режиме одиночных импульсов (число импульсов

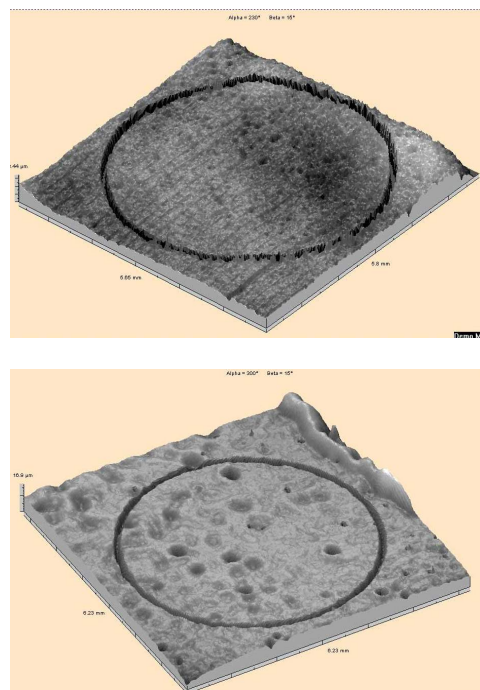
облучения 15) с плотностью энергии электронов в пучке 40 Дж/см<sup>2</sup>. Исследования коэффициента трения по поверхности металлокерамического сплава были проведены на трибометре «CSEM Tribo-meter High Temperature S/N 07-142», CSEM Instruments, Швейцария. В качестве контртела, из-за высокой износостойкости исследуемого металлокерамического сплава на основе карбида титана, был выбран алмазный конус. Измерения были проведены по схеме «вращение образца при неподвижном контртеле». Нагрузка на алмазный конус составляла 5 Н, конечное число оборотов образца – 2500. С помощью микрометрической системы «Micromesure System STIL» (Science et Techniques Industrielles de la Lumiere. STILS. A, Франция) в непрерывном режиме фиксировали силы трения с последующим пересчетом в абсолютные значения коэффициента трения.

С использованием 3D-профилометра MICRO MEASURE 3D station французской фирмы STIL были проведены измерения профиля поперечного сечения канавки резания алмазным контртелом поверхности металлокерамических образцов с количественным определением глубины резания и площади поперечного сечения канавки резания. Измерения нанотвердости поверхностного слоя образцов металлокерамического сплава были проведены на приборе «CSEM Nano Hardness Tester» при нагрузке 50 мН, статистический анализ проводили по 30–40 уколам в свободных от карбидных частиц местах. Одновременно с определением нанотвердости осуществляли съемку поверхности в области тестирования материала. Характерное изображение участка поверхности металлокерамики в исходном состоянии с отпечатком укола алмазной пирамидки приведено на рис. 1.



**Рис. 1.** Характерное изображение участка поверхности металлокерамического сплава TiC-(Ni-Cr) в исходном состоянии с отпечатком укола алмазной пирамидки (отпечаток указан светлой стрелкой, кристаллиты карбида титана – темными)

Типичные фотографии поверхности образцов металлокерамического сплава после испытаний на износостойкость приведены на рис. 2. Фрагменты треков резания, представленные на рис. 3, позволили провести качественный анализ характера взаимодействия алмазного контртела с поверхностным слоем металлокерамических образцов в различном структурно-фазовом состоянии.



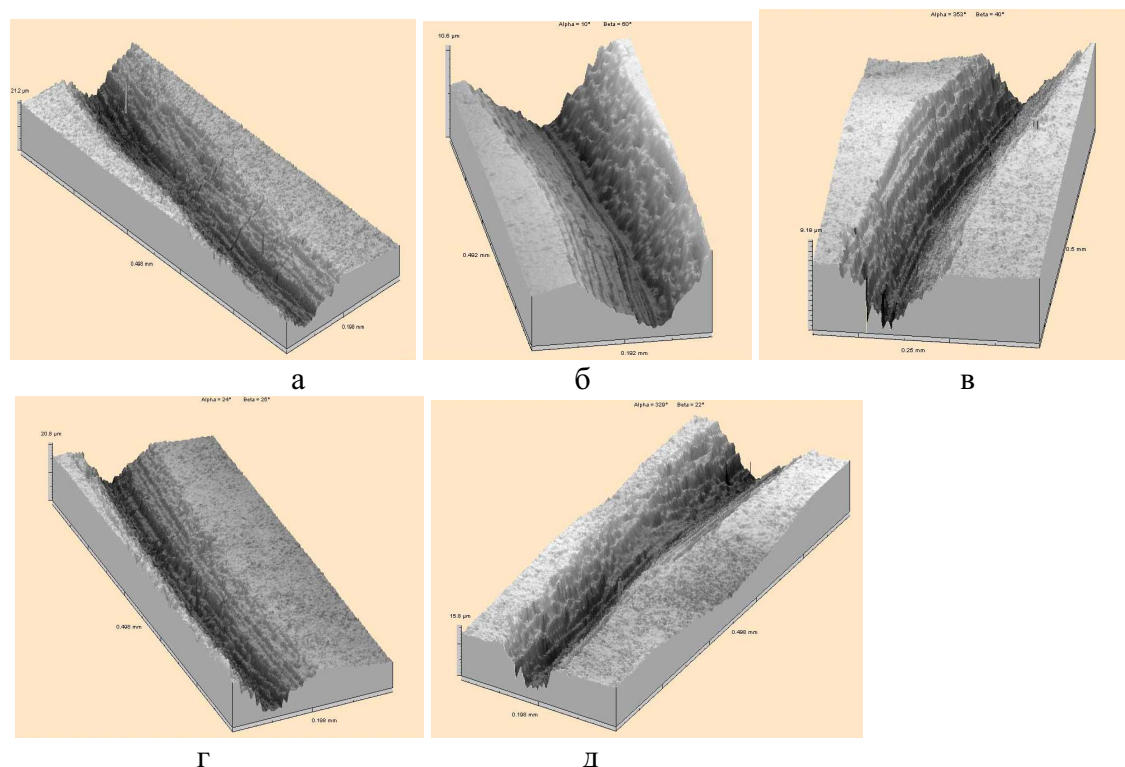
**Рис. 2.** Треки резания поверхности металлокерамического сплава алмазным контртелом: а) исходное состояние, б) после облучения электронным пучком. Диаметр кольца резания 5,6 мм

На внутренней поверхности трека резания поверхности металлокерамики в исходном состоянии наблюдаются микротрещины, которые располагаются поперек канавки резания примерно на одинаковом расстоянии друг от друга (хрупкое разрушение металлокерамики при взаимодействии с алмазным контртелом) (рис. 3, а). После электронно-пучкового облучения внутренняя поверхность треков резания не имеет микротрещин (рис. 3, б–д). С увеличением длительности импульсов облучения внутренняя поверхность треков резания становится более однородной.

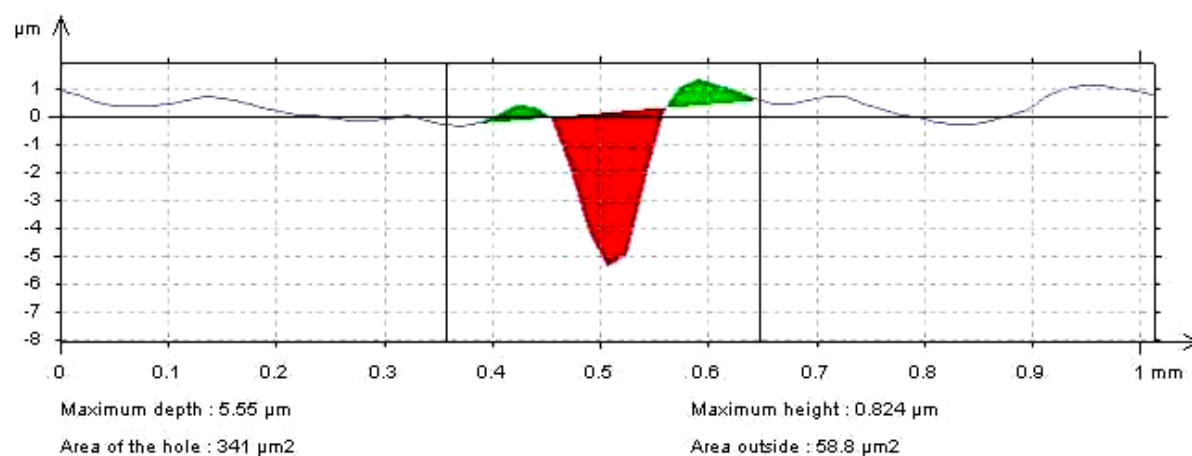
В соответствии с эволюцией микроструктуры поверхностного слоя металлокерамического сплава изменяется и стойкость его поверхности при взаимодействии с алмазным контртелом. Профиль канавки резания поверхности представлен на рис. 4. Получаемый профиль позволяет количественно оценить глубину резания поверхности металлокерамического образца и площадь поперечного сечения канавки резания.

На рис. 5 представлены зависимости глубины (кривая 1) и площади поперечного сечения (кривая 2) канавки резания поверхности металлокерамического сплава в исходном состоянии и после электронно-пучкового облучения импульсами длительностью от 50 до 200 мкс.

Глубина резания поверхности металлокерамического сплава алмазным контртелом и величина площади поперечного сечения канавки резания в зависимости от длительности импульсов электронно-пучкового облучения поверхности при по-



**Рис. 3.** Фрагменты треков резания алмазным контртелом поверхности металлокерамических образцов в различных структурно-фазовых состояниях после облучения импульсами длительностью: б) 50; в) 100; г) 150; д) 200 мкс; а) исходное состояние. Значения глубин канавок резания представлены ниже

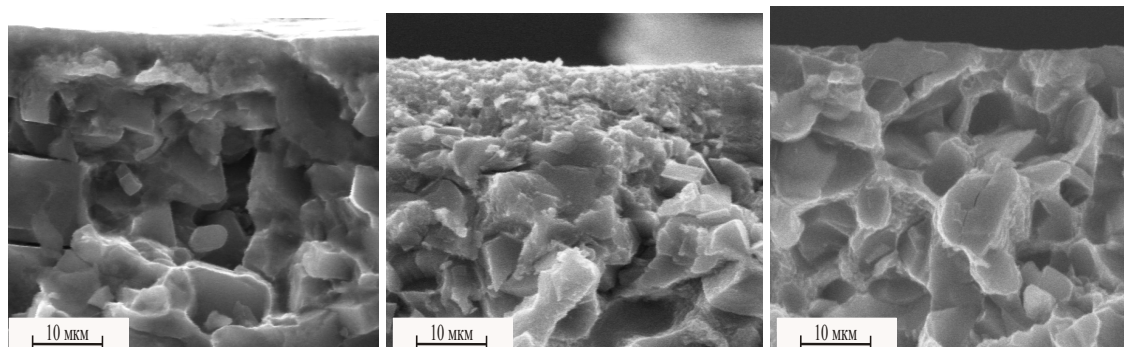


**Рис. 4.** Характерный профиль канавки резания поверхности металлокерамического сплава алмазным контртелом

стоянных значениях плотности энергии в электронном пучке и количества импульсов облучения изменяются практически синхронно: с увеличением длительности импульсов до 100 мкс их значения кратно снижаются и с увеличением длительности импульсов облучения кратно увеличиваются. Столь значительное повышение износостойкости поверхности металлокерамического сплава при его электронно-пучковом облучении импульсами длительностью 50 и 100 мкс обусловлено образованием на поверхности стекловидного слоя, влияние которого снижается с увеличением длительности им-

пульсов облучения до 150 мкс и полностью прекращается при длительности импульсов облучения 200 мкс.

В полном соответствии с изменением глубины резания алмазным контртелом поверхности металлокерамического сплава в зависимости от длительности импульсов электронно-пучкового облучения находится зависимость нанотвердости поверхности сплава от длительности импульсов облучения (рис. 6, а). При облучении поверхности металлокерамического сплава импульсами длительностью до 100 мкс нанотвердость поверхности увеличивается



Исходное состояние  
поверхностного слоя  
металлокерамического  
сплава: частицы  
карбида титана с никель-  
хромовой связкой

Слоистая структура  
поверхностного слоя:  
тонкий слой стекловидной  
структуры на поверхности,  
переходящий в структуру  
металлокерамического  
сплава

Наноструктурированный  
поверхностный слой  
металлокерамического  
сплава: частицы карбида  
титана с никельхромовой  
связкой в наноструктурном  
состоянии

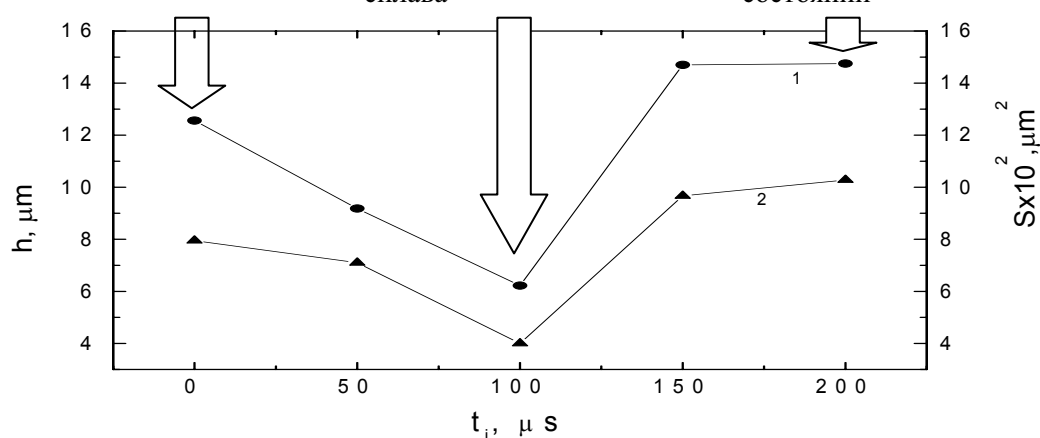


Рис. 5. Зависимости глубины  $h$  (кривая 1) и площади поперечного сечения  $S$  (кривая 2) канавки резания поверхности металлокерамического сплава от длительности импульсов электронно-пучкового облучения поверхности сплава

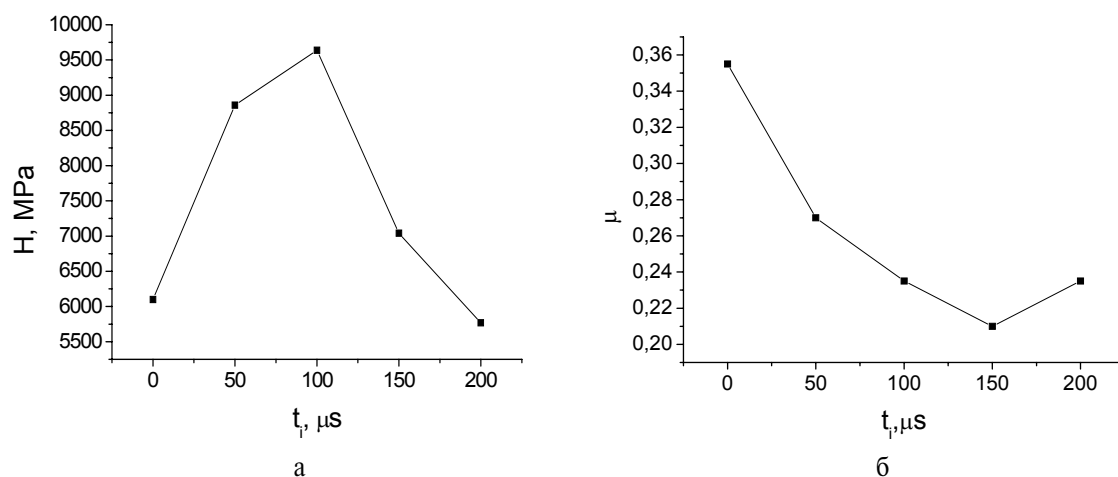


Рис. 6. Зависимости величин нанотвердости  $H$  (а) и коэффициента трения  $\mu$  (б) на поверхности металлокерамического сплава от длительности импульсов облучения сплава

почти в 2 раза, а затем при увеличении длительности импульсов до 200 мкс опускается ниже значения для исходного состояния металлокерамического сплава (рис. 6, а).

Другой характер имеет зависимость величины коэффициента трения на поверхности металлокерамического сплава от длительности импульсов электронно-пучкового облучения (рис. 6, б). С увеличением длительности импульсов электронно-пучкового облучения до 150 мкс величина коэффициента трения снижается почти в 1,7 раза и незначительно повышается при увеличении длительности импульсов облучения до 200 мкс. Указанная зависимость коэффициента трения от длительности импульсов электронно-пучкового облучения поверхности металлокерамического сплава находится в хорошем соответствии с зависимостью стойкости металлокерамического сплава в условиях резания металла от длительности импульсов облучения: с увеличением длительности импульсов облучения до 200 мкс (при плотности энергии электронов в пучке 40 Дж/см<sup>2</sup> и количестве импульсов 15) стойкость металлокерамического сплава при резании металла повышается более чем в 2 раза [4–7].

Таким образом, наноструктурная модификация поверхностного слоя металлокерамического сплава

TiC-(Ni-Cr) при импульсном электронно-пучковом облучении сопровождается существенным изменением физических (износостойкость и нанотвердость) и трибологических (коэффициент трения) свойств его поверхности. Совместный анализ результатов исследования физических, трибологических и стойкостных свойств металлокерамического сплава с модифицированной структурой его поверхностного слоя показывает, что физическая сущность эффекта повышения стойкости металлокерамического сплава в результате наноструктурной модификации поверхностного слоя при электронно-пучковом облучении определяется, в первую очередь, изменением трибологических свойств поверхностного слоя металлокерамического сплава. Наименьшие значения коэффициента трения на поверхности металлокерамического сплава соответствуют наиболее значительному повышению стойкости металлокерамического сплава при резании металла и определяются модифицированной в результате импульсного электронно-пучкового облучения структурой поверхностного слоя металлокерамического сплава — частицы карбида титана с металлической связкой в наноструктурном состоянии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 07-08-00209-а, 08-08-99076-р\_офи).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Лапшин О.В. Электронная обработка безвольфрамовой металлокерамики. II. Структурные превращения в приповерхностном слое // Физика и химия обработки материалов. — 2005. — № 1. — С. 31–34.
2. Yu Baohai, Ovcharenko V.E., Psakhie S.G., Lapshin O.V. Electron-beam Treatment of Tungsten-free TiC/NiCr Cermet II: Structural Transformation in the Subsurface Layer // Journal Materials Science & Technology. — 2006. — V. 22. — № 4. — P. 511–513.
3. Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Лапшин О.В., Колобова Е.Г. Модификация металлокерамического сплава электронно-импульсной обработкой его поверхности // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 6. — С. 75–80.
4. Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Колобова Е.Г. Электронная обработка безвольфрамовой металлокерамики. I. Влияние на микроструктуру поверхности и стойкость в режиме резания // Физика и химия обработки материалов. — 2004. — № 5. — С. 17–20.
5. Ovcharenko V.E., Psakhie S.G., Savitskii A.P. Influence of Electronic Radiation on Resistance to Wear of TiC-NiCr Hard Alloy at Cutting Steel // EURO PM 2005 Congress and Exhibition in Prague: Proc. — Prague, 2005. — V. 3. — P. 267–273.
6. Ovcharenko V.E., Yu Baohai, Psakhie S.G. Electron-beam Treatment of Tungsten-free TiC/NiCr Cermet. I: Influence of Subsurface Layer Microstructure on Resistance to Wear during Cutting of Metals // Journal Materials Science & Technology. — 2005. — V. 21. — № 3. — P. 427–429.
7. Овчаренко В.Е., Иванов Ю.Ф., Юй Баохай. Наноструктурное упрочнение инструментального металлокерамического сплава при электронно-пучковом облучении его поверхности // Перспективные материалы. — 2007. — Спец. выпуск, сентябрь. — С. 450–455.
8. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoryev V.P., Koval T.V. Generation and propagation of high-current low-energy electron beams // Laser and Particle Beams. — 2003. — V. 21. — P. 243–248.

*Поступила 23.04.2008 г.*