

УДК.865.6

*Г.И. КОСТЮК***ПОЛУЧЕНИЕ НАНО- И СУБМИКРОСТРУКТУР ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РИ ИЗ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ**

Экспериментально определен размер зерна с помощью растровой микроскопии (РЭМ-106), а также проведено теоретическое исследование объема и размера зерна наноструктур при действии ионизирующего облучения на режущий инструмент (РИ) из твердых сплавов Т15К6, ТН20, минералокерамики, Эльбор-Р, сравнение результатов которых с экспериментом по величине размера зерна позволяет говорить об адекватности теоретической модели определения размера зерна.

Ключевые слова: размер зерна, растровая электронная микроскопия, лазерное излучение, объем нанокластера.

Введение. Повышение работоспособности и эффективности требует снижения размера зерна, что приводит к повышению микротвердости, а значит – к росту износостойкости РИ к абразивному износу [1, 2]. При этом снижается модуль упругости, а значит и повышается стойкость к ударным нагрузкам, что особенно важно для черновой обработки [3, 4]. Поэтому реализация на поверхности РИ наноструктур и субмикроструктур может обеспечить высокую работоспособность и эффективность РИ. Одним из способов получения наноструктур является лазерная (ионизирующая) обработка режущего инструмента.

Всё это позволяет существенно улучшить служебные характеристики РИ и обеспечить их длительную и надежную работу.

Работа выполнена 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 интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Анализ последних исследований и литературы. В настоящее время значительное количество работ посвящено исследованию различных видов упрочнений на РИ и их эффективность, но вопрос о влиянии размера зерна на работоспособность РИ практически не исследовался, за исключением ряда наших работ [1–4]. В теоретических работах [1, 2] показана возможность теоретического прогноза размера зерна, а в работах [1–18] обобщены результаты исследований влияния наноструктур на физико-механические характеристики материалов, где также рассматриваются и материалы режущих инструментов, но в то же время, значительное количество работ

посвящены эффективности РИ [19–23], где не обозначено, какая структура материалопокрываний и основного материала РИ была исследована. Всё это говорит о необходимости комплексного экспериментально-теоретического исследования получения нано- и субмикроструктурных поверхностных слоев на РИ, что позволит оценить адекватность ранее предложенных моделей, выявить вероятность получения нано- и субмикроструктурных слоев при действии лазерного излучения на конструкционные материалы, а также выявить адекватность модели.

Целью работы является исследование влияния технологических параметров лазерного излучения на возможность получения нано- и субмикроструктурных слоев. Причем исследования проводятся как теоретически, так и экспериментально.

Постановка проблемы. Получение нано- и субмикроструктур при действии ионизирующего излучения рассматривалось в довольно незначительном количестве экспериментальных и теоретических работ, а использование лазерного излучения для получения наноструктур на РИ практически не исследовалось. Предложенная в работе проблематика позволит оценить перспективы получения наноструктур и субмикроструктур на РИ, что говорит об актуальности и важности проводимых исследований.

Материалы исследований. В работе исследовались РИ из твердых сплавов Т15К6 и ТН20, а также минералокерамики Эльбор-Р. Экспериментальное исследование размера зерна проводилось благодаря электронно-металлографическим исследованиям на растровом электронном микроскопе РЭМ-106. Теоретическое исследование проводилось на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия ионизирующего излучения при варьировании плотности теплового потока и времени его действия и размера пятна.

Результаты исследования. Проведенные теоретические исследования позволяют получить зависимости объема нанокластера (НК) в зависимости от плотности теплового потока ионизирующего излучения и времени его действия при различных радиусах пятна. Такие зависимости представлены на рис. 1, а для случая действия лазерного излучения на твердый сплав Т15К6, при радиусах пятна от $2 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ м. Очевидно, что с ростом времени действия теплового потока растёт объем нанокластера, а затем

© Г.И. Костюк, 2015

наблюдается некоторое уменьшение размера зерна (рис. 1,а). С ростом времени действия теплового потока от 10^{-9} до 10^{-4} с наблюдается существенный рост объема нанозерна, который может составлять несколько порядков. Влияние размера радиуса пятна существенно и для $3 \cdot 10^{-3}$ м, размер зерна практически на 2-3 порядка больше, чем для $R > 10^{-4}$ м.

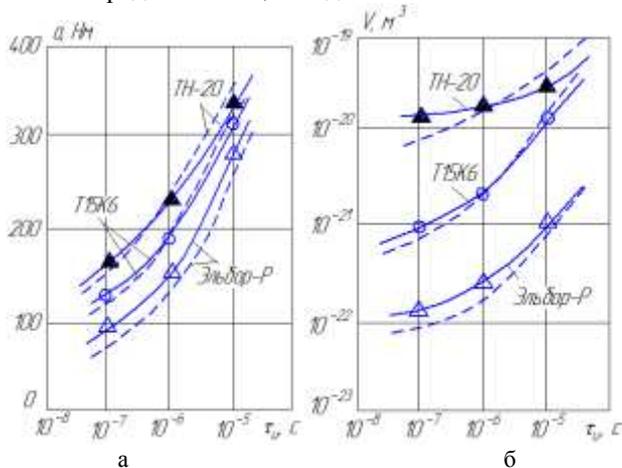


Рис. 1 – Сравнение теоретических (штриховые кривые) и экспериментальных зависимостей (сплошные кривые): а – размера зерна от времени действия ионизирующего облучения τ_a при плотности теплового потока $q = 10^{11}$ Вт/м²; б – объема нанокластера V от времени действия ионизирующего облучения τ_a при плотности теплового потока $q = 10^{11}$ Вт/м²

Для экспериментального исследования, которое проводилось для этого же твердого сплава Т15К6, получены размеры зерна и их зависимости от времени действия теплового потока и представлены на рис. 1, б. Очевидно, что с ростом времени действия теплового потока возрастает размер зерна, то есть характер зависимости совпадает с теоретическим (см., например, микрофотографию поверхности РИ при действии лазерного излучения $q = 10^{11}$ Вт/м² $\tau = 10^{-7}$ с) (рис. 2).

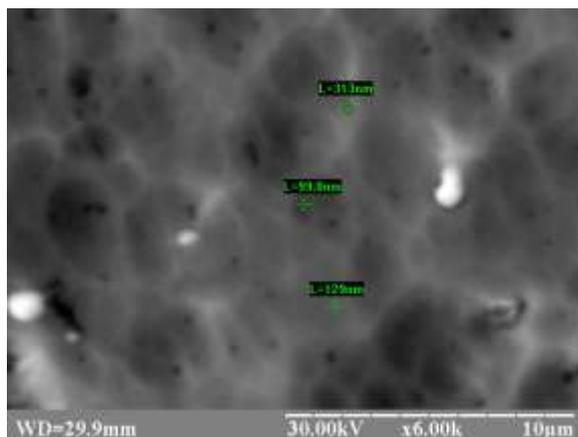


Рис. 2 – Микрофотография поверхности РИ из Эльбор-Р после лазерной обработки импульсами плотностью теплового потока $q = 10^{11}$ Вт/м² и временем его действия 10^{-7} с

Очевидно, что размер зерна лежит в диапазоне от 125 до 221 Нм. Аналогичные фотографии для остальных РИ из ТН20 и Эльбор-Р также позволяют

построить зависимости размера зерна от времени действия теплового потока, которые представлены на рис. 1, б. Очевидно, что только для Эльбора-Р можно реализовать наноструктуру и то при высокой плотности теплового потока 10^{11} Вт/м² и времени действия 10^{-7} с.

Для того чтобы провести сопоставление результатов расчетов и экспериментов были рассчитаны размеры зерна по величине его объема полученного ранее. На рис. 1, б представлены также зависимости размера зерна от времени его действия при плотности теплового потока 10^{11} Вт/м². Видно, что результаты экспериментов и расчетов близки, что говорит об адекватности теоретической модели. В то же время результаты показывают, что в исследованном диапазоне плотностей теплового потока и времен его действия вероятность образования наноструктур невелика, а субмикроструктуры образуются практически всегда.

Выводы

1. Для режущих инструментов из твердых сплавов Т15К6, ТН20 и Эльбор-Р показано, что вероятность получения наноструктур невысока при действии лазерного излучения при высоких плотностях теплового потока 10^{11} Вт/м² и временах его действия 10^{-7} с. Тогда как субмикроструктуры, также обладающие более высокими физико-механическими характеристиками, чем микроструктуры, образуются практически всегда.

2. Теоретически обнаружено, что с ростом времени действия теплового потока (при одинаковой плотности теплового потока) наблюдается сначала рост размера зерна, а затем его снижение, что, очевидно, связано с характером развития температурного поля, которое при увеличении времени действия существенно перемещается вглубь материала РИ и на поверхности температуры уменьшаются, что понижает вероятность появления зерна небольшого размера, а следовательно, и наноструктур.

3. Экспериментально-теоретическое рассмотрение позволяет утверждать, что, увеличивая плотности теплового потока и существенно уменьшая время его действия до 10^{-9} с, можно получать наноструктуры. Это показано на примере Эльбора-Р, где есть вероятность появления наноструктур.

Список литературы: 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] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с. 4. 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 парамет-

ров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с. **5.** 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. **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. – М.: Вид-во АИИУ, 2003. – Кн. 2. – 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 эрозийных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с. **12.** Хаякава, С. Ядерно-физический аспект: в 2 кн. [Текст] / С. Хаякава. – М.: Мир, 1973. – Кн. 2. – 701 с. **13.** Готт, Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст] / Ю.В. Готт. – М.: Атомиздат, 1978. – 271 с. **14.** Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А.И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с. **15.** Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с. **16.** Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130. **17.** Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56. **18.** 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. 82 – 87. **19.** Бреус, А. А. Исследование стойкости режущего инструмента при обработке конструкционных материалов на станках с ЧПУ [Текст] / А. А. Бреус, Г.И. Костюк / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 65. – Х.-2014. – С.49-53. **20.** Костюк, Г.И. Получение наноструктур в покрытии на твердосплавном режущем инструменте из VK8 и T15K6 [Текст] / Г. И. Костюк, О. Д. Григор / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 66. – Х.-2014. – С.69-74. **21.** Костюк, Г.И. Микротвердость нано- и субмикроструктур в покрытии на режущих инструментах из твердых сплавов [Текст] / Г.И. Костюк, Е.В. Миргородская, О.О. Бруйка // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – 6(113). – С. 24-29. **22.** Костюк, Г.И. Размер зерна в покрытии на режущем инструменте и его влияние на эффективность обработки [Текст] / Г. И. Костюк, А.П. Тарасюк, О.О. Бруйка / Наука и образование: сб. тр. VII Междунар. науч. конф., 27 февраля – 6 марта 2015. – г. Дубай (ОАЭ), 2015. – с. 69-72. **23.** Костюк, Г.И. Микротвердость нано- и субмикроструктурных покрытий на твердосплавных режущих инструментах и эффективность их работы [Текст] / Г.И. Костюк / Наука и образование: сб. тр. VII Междунар. науч. конф., 27 февраля – 6 марта 2015. – г. Дубай (ОАЭ), 2015. – с. 72-75.

Bibliography (transliterated): 1. Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruk-tur [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2014. - 472 P. Print 2. Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy [Текст]: monogr. / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovatP. tekhnologiy, 2012. - 648 P. Print 3. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya,

lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo AINU, 2002. - Kn.1: Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennyykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy. -596 P. Print 4. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Текст] / G.I. Kostyuk. - Kiev: Izd-vo AINU, 2002. - Kn. 2: Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya. - 482 P. 5. Kostyuk, G.I. Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov.: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t», 2009. - 406 P. 6. Kostyuk, G.I. Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov.: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t», 2008. - 552 P. Print 7. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav.monogr.- / G.I. Kostyuk. - Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t», 2007. - 633 P. Print 8. Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Текст]: sprav.monogr.- / G.I. Kostyuk. - Kiev: Vid-vo AINU, 2003. - 412 P. Print 9. Kostyuk, G.I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva [Текст]: ucheb.posobiye / G.I. Kostyuk. - Kharkov: NatP. aerokosm. un-t «Khark. aviatP. in-t», 2006. - 614 P. Print 10. Grechikhin, L.I. Fizikano-nachastits i nanotekhnologiy [Текст] / L.I. Grechikhin. - Moscow: UP «Tekhnoprint», 2004. - 397 P. Print 11. Aksenov, I.I. Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy [Текст] / I.I. Aksenov. - Kharkov.: Izd-vo NII «KhFTI», 2005. - 211 P. Print 12. Khayakava, P. Yadernofizicheskiy aspekt: v 2 kn. [Текст] / P. Khayakava. - Moscow: Mir, 1973. - Kn. 2. - 701 pP. Print 13. Gott, YU.V. Vzaimodeystviye chastits s veshchestvom v plazmennyykh issledovaniyakh [Текст] / YU.V. Gott. - Moscow: Atomizdat, 1978. - 271 P. Print 14. Gusev, A.I. Nanokristalicheskkiye materialy: metody polucheniya i svoystva [Текст] / A.I. Gusev. - Yekaterinburg: Izd-vo RAN, Ural'skoye otd-niye, 1998. - 302 P. 15. Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii [Текст] / A.I. Gusev. - Moscow: Fizmatlit, 2005. - 416 P. 16. Reshetnyak, Ye.N. Sintez uprochnyayushchikh nanostrukturnykh pokrytiy [Текст] / Ye.N. Reshetnyak, A.I. Strel'niyskiy // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. - 2008. - No 2. - P. 119 - 130. 17. Andriyevskiy, R.A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Текст] / R.A. Andriyevskiy // Fizika metallov i metallovedeniye. - 2003. - T. 91, № 1. - P.50 - 56. 18. Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnykh plenok boridov tantala [Текст] / A.A. Goncharov, P.I. Ignatenko, V.V. Petukhov i dr. // ZHTF. - 2006. - T. 76, vyP. 10. - P. 82 - 87. 19. Breus, A. A. Issledovaniye stoykosti rezhushchego instrumenta pri obrabotke konstruktсионnykh materialov na stankakh s CHPU [Текст] / A. A. Breus, G.I. Kostyuk / Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii: sb. nauch. tr. NatP. aerokosm. un-ta im. N.Ye. Zhukovskogo «KhAI». - VyP. 65.- Kharkov. - 2014. - P. 49-53. 20. Kostyuk, G.I. Polu-cheniye nanostruktur v pokrytiye na tverdosplavnykh rezhushchikh instrumente iz VK8 i T15K6 [Текст] / G. I. Kostyuk, A. D. Grigor'yev / Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii: sb. nauch. tr. NatP. aerokosm. un-ta im. N.Ye. Zhukovskogo «KhAI». - VyP. 66.- Kharkov. - 2014. - P. 69-74. 21. Kostyuk, G.I. Mikrotverdost' nano- i submikrostruktur v pokrytiye na rezhushchikh instrumentakh iz tverdyykh splavov [Текст] / G.I. Kostyuk, Ye.V. Mirgorodskaya, A.A. Bruyaka // Aviatсионно-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. - 2014. - 6 (113). - P. 24-29. 22. Kostyuk, G.I. Razmer zerna v tpokrytiy na rezhushchiy instrumente i yego vliyaniye na effektivnost' obrabotki [Текст] / G. I. Kostyuk, A.P. Tarasyuk, A.A. Bruyaka / Nauka i obrazovaniye: sb. tr. VII Mezhdunar. nauch. konf., 27 fevralya-6 marta 2015.- g. Dubay (OAE), 2015.- P. 69-72. 23. Kostyuk, G.I. Mikrotverdost' nano- i submikrostrukturnykh pokrytiy na tverdosplavnykh rezhushchikh instrumentakh i effektivnost' ikh raboty [Текст] / G.I. Kostyuk / Nauka i obrazovaniye: sb. tr. VII Mezhdunar. nauch. konf., 27 fevralya-6 marta 2015.- g. Dubay (OAE), 2015.-P. 72-75.

Поступила (received) 25.05.2015

Костюк Геннадий Игоревич – д-р техн. наук, проф., проф. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovskiy, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.