

УДК 621. УДК 621.9.06-9.11

**О.О. БАРАНОВ, Г.И. КОСТЮК****ОСАЖДЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО РАВНОТОЛЩИННОГО ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ТВЕРДОСПЛАВНЫЙ РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ ПРИ ОБРАБОТКЕ БОЛЬШИХ ПАРТИЙ**

Предложена схема технологического устройства для осаждения качественного равнотолщинного вакуумно-дугового покрытия на твердосплавный режущий инструмент при обработке больших партий на подложках диаметром до 400 мм. Управление потоками плазмы вакуумно-дугового источника осуществляется путем создания системы магнитных ловушек на пути распространения потока плазмы, а для ионной очистки и предварительного разогрева изделий используется магнетронный разряд. Управляющие магнитные поля создаются системой электромагнитов, размещенных под подложкой.

**Ключевые слова:** металорезальный верстат, пружна система, підсистема, жорсткість, тензор, просторова модель

**Введение.** Покрытия, осажденные на режущий инструмент из потоков плазмы вакуумно-дугового источника по методу конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ), позволяют в 3–5 раз повысить стойкость инструмента, снизить силы резания и улучшить качество механической обработки за счет изменения характера износа [1]. При осаждении покрытия на большие партии инструмента актуальным становится вопрос равномерной обработки и формирования равнотолщинных покрытий на все инструменты партии, независимо от их положения относительно источника плазмы.

**Анализ последних исследований и литературы.** Как показали результаты [2], режущие инструменты достигают режима насыщения зависимости микротвердости от толщины покрытия, когда толщина покрытия достигает 5 мкм при давлении реактивного газа в камере в диапазоне  $3 \cdot 10^{-2}$ – $3 \cdot 10^{-1}$  Па. Максимум прочностных характеристик покрытия также приходится на его толщину в пределах 5–10 мкм [3]. Ранее было показано [4], что зависимость толщины покрытия от плотности ионного тока вдоль поверхности подложки имеет нелинейный характер. Уменьшение плотности ионного тока от центра подложки к ее краю приводит к осаждению менее плотных покрытий, что соответствует характерным изменениям на диаграмме структурных зон. Исследование показало хорошую работоспособность покрытий с толщиной порядка 5 мкм, осажденных при плотности ионного тока не менее 30 А/м<sup>2</sup>. Толщина покрытий из TiN главным образом зависит от расположения инструмента в вакуумной камере относительно вакуумно-дугового источника плазмы. На торцевой и боковой поверхности в зависимости от размера инструмента она может отличаться (это же относится и к задним, закрытым поверхностям). Толщина покрытия также зависит от разнотолщинности изделия и условий его крепления к оснастке, что определяет разную температуру нагрева в различных зонах. Таким образом, обеспечение одинаковой толщины покрытий, осажденных на режущие пластины, находящиеся на разном удалении от выхода плазмоведа, позволяет стабилизировать фазовый состав покрытий, а следовательно, избежать разброса стойкости инструмента. Для решения этой задачи необходимо обеспечить не

только равномерную обработку поверхности режущих пластин потоками ионов, но и провести тщательную ионную очистку и нагрев заготовок.

**Целью** данной работы является разработка технологического устройства, которое позволяет проводить комплексную плазменно-ионную обработку твердосплавного режущего инструмента для осаждения равнотолщинных покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками.

**Постановка проблемы.** Наши исследования в представляемой работе направлены на применение ранее разработанного метода управления потоками ионов газа и металлов с помощью системы магнитных ловушек электронов плазмы [5] для обработки режущего инструмента ионным потоком с заданным распределением плотности вдоль поверхности подложки.

**Материалы исследований.** Схема технологической установки и оснастки для реализации технологического процесса осаждения качественных равнотолщинных вакуумно-дуговых покрытий на твердосплавный режущий инструмент представлена на рис. 1. Осаждение покрытия проводилось вакуумно-дуговым методом [6] на установке «Булат-6», схема расположения резцов в вакуумной камере соответствует описанию, приведенному в [7].

Плазменно-ионной обработке подвергались сменные многогранные пластины с отверстием и стружколомающими канавками на одной стороне, изготовленные из твердого сплава марки Т15К6 и предназначенные для токарных проходных резцов.

Использовались пластины трех видов:

- пятигранной формы PNMM-110416 с длиной режущей кромки  $l = 11,5$  мм, толщиной  $s = 4,76$  мм;
- квадратной формы SNMM-150416 с длиной режущей кромки  $l = 15,875$  мм, толщиной  $s = 4,76$  мм;
- шестигранной формы с углом  $80^\circ$  WNUM-080404 с длиной режущей кромки  $l = 8,7$  мм, толщиной  $s = 4,76$  мм.

Ионная очистка и нагрев заготовок проводились в среде магнетронного и дугового разряда. Магнетронный разряд используется для очистки и нагрева основной массы заготовок, а дуговой – для очистки и нагрева заготовок, которые расположены в центральной части подложки, в области слабого действия магнетронного разряда.

© О.О. Баранов, Г.И. Костюк, 2015

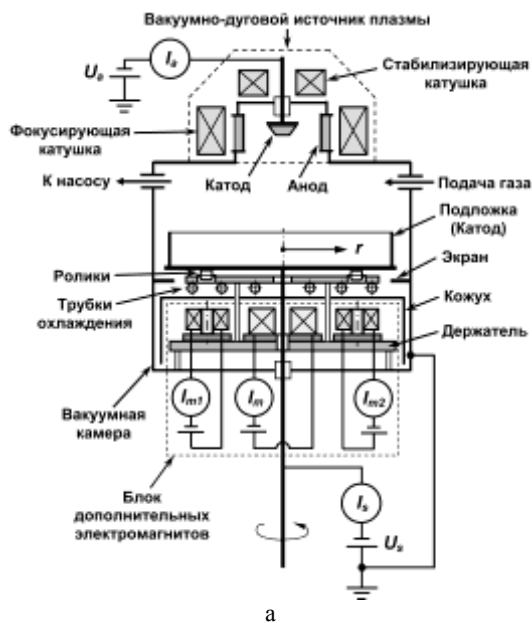


Рис. 1 – Установка для реализации технологического процесса осаждения качественных вакуумно-дуговых покрытий на твердосплавный режущий инструмент при обработке больших партий: а – схема; б – подложка с оснасткой для размещения режущих пластин

Для обработки в магнетронном разряде используется центральный электромагнит, а для обработки в дуговом – два боковых электромагнита (рис. 1), которые работают в режиме фокусировки плазмы в центр подложки в сочетании с вращением подложки. Затем следует осаждение тонкого покрытия Ti, после чего проводится напыление основного слоя TiN; на этом этапе боковые электромагниты работают в режиме расфокусировки плазменного потока, что в сочетании с вращением подложки должно обеспечить осаждение равномерного покрытия.

Был разработан процесс нанесения покрытия TiN на поверхность твердосплавных пластин для обеспечения равной толщины и стойкости пластин. Перед проведением техпроцесса с использованием управляющих магнитных полей были согласованы направления магнитных полей дополнительных электромагнитов с направлением магнитных полей стабилизирующей и фокусирующей катушек (магнитное поле источника). Токи электромагнита, когда созданное им поле направлено согласно с магнитным полем

источника, обозначены в символе « $\uparrow$ ». Токи, создающие противоположно направленное магнитное поле, обозначены символом « $\downarrow$ ». Ток дуги  $I_a$  при отключенных дополнительных электромагнитах должен быть равен 110 А, чтобы при включении магнитного блока произошло его уменьшение до 100 А, что соответствует техпроцессу.

Осаждение вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN на поверхности твердосплавных пластин согласно техпроцессу с использованием управляющих магнитных полей осуществлялось на таких режимах:

- 1) ионная очистка в магнетронном разряде: давление газа  $P = 1$  Па, напряжение на подложке  $U_s = 1200$  В, ток электромагнита  $I_m = 1$  А, время обработки  $t = 5$  минут;
- 2) нагрев заготовок в магнетронном разряде: давление газа  $P = 1$  Па, ток на подложку  $I_s = 12$  А, ток центрального электромагнита  $I_m = 2,2$  А, время обработки  $t = 4$  минуты;
- 3) ионная очистка в дуговом разряде ионами Ti: давление  $P = 6,65 \cdot 10^{-3}$  Па, напряжение на подложке  $U_s = 1000$  В, ток дуги  $I_a = 100$  А, ток стабилизирующей катушки  $I_f = 1,6$  А, ток фокусирующей катушки  $I_g = 0,6$  А, время обработки  $t = 1$  минута;
- 4) нанесение покрытия Ti: давление  $P = 6,65 \cdot 10^{-3}$  Па, напряжение на подложке  $U_s = 230$  В, ток дуги  $I_a = 100$  А, ток стабилизирующей катушки  $I_f = 1,6$  А, ток фокусирующей катушки  $I_g = 0,6$  А;

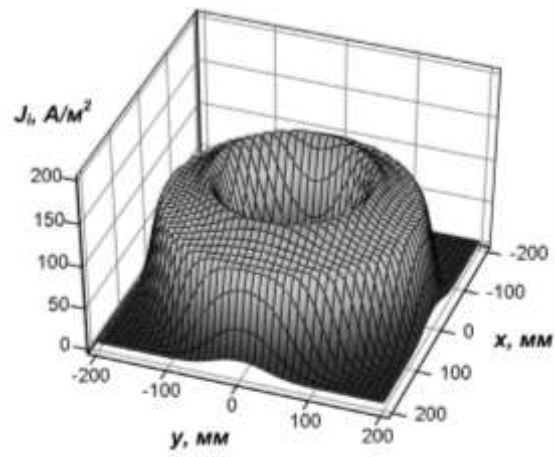
схема включения боковых электромагнитов такая:

- $I_{m1} = 2$  А $\downarrow$  и  $I_{m2} = 0$  А – 54 секунды, затем переключение на режим;  
 $I_{m1} = 2$  А $\downarrow$  и  $I_{m2} = 2$  А $\uparrow$  – 54 секунды, затем переключение на режим;  
 $I_{m1} = 2$  А $\downarrow$  и  $I_{m2} = 4$  А $\uparrow$  – 54 секунды, затем переключение на режим;  
 $I_{m1} = 0$  А и  $I_{m2} = 4$  А $\uparrow$  – 18 секунд, конец цикла, время обработки  $t = 3$  минуты (1 цикл);  
 5) нанесение покрытия TiN: давление  $P = 0,05$  Па, напряжение на подложке  $U_s = 230$  В, ток дуги  $I_a = 100$  А, ток стабилизирующей катушки  $I_f = 1,6$  А, ток фокусирующей катушки  $I_g = 1,6$  А;  
 схема включения боковых электромагнитов такая:  
 $I_{m1} = 2$  А $\downarrow$  и  $I_{m2} = 0$  А – 1 минуты, затем переключение на режим;

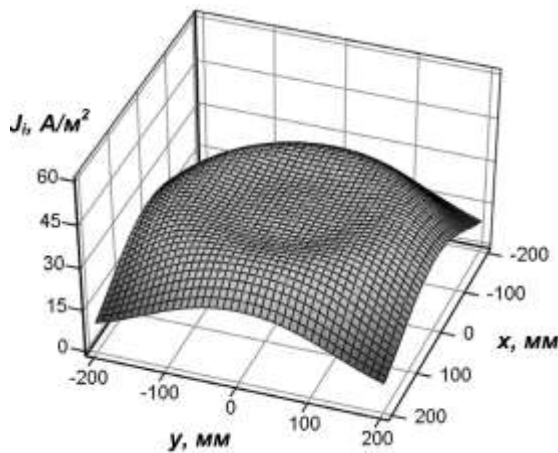
- $I_{m1} = 2$  А $\downarrow$  и  $I_{m2} = 2$  А $\uparrow$  – 1 минуты, затем переключение на режим;  
 $I_{m1} = 2$  А $\downarrow$  и  $I_{m2} = 4$  А $\uparrow$  – 1 минуты, затем переключение на режим;  
 $I_{m1} = 0$  А и  $I_{m2} = 4$  А $\uparrow$  – 20 секунд, затем переключение на начало цикла, пока количество циклов не достигнет 12;  
 время обработки  $t = 40$  минут (12 циклов), используемый газ – азот  $N_2$ .

Результирующие распределения плотности ионного тока представлены на рис. 2, а – при обработке ионами газа в среде магнетронного разряда на этапе ионной очистки и нагрева, и на рис. 2, б – при обработке

в среде вакуумно-дугового разряда на этапе осаждения покрытия



а



б

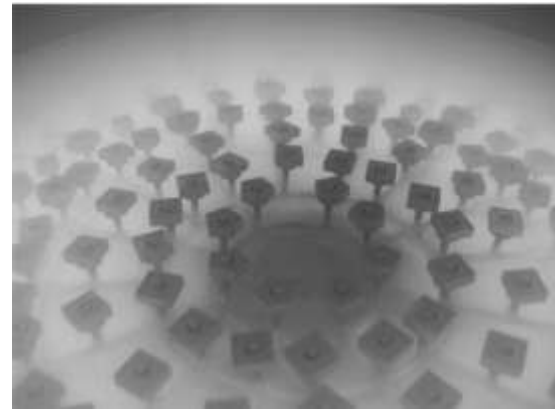
Рис. 2 – Распределение плотности ионного тока при обработке твердосплавного режущего инструмента на этапах: а – очистки и нагрева в магнетронном разряде; б – осаждения вакуумно-дугового покрытия

Фотографии процесса обработки представлены на рис. 3, а – при обработке среде магнетронного разряда на этапе ионной очистки и нагрева, и на рис. 3, б – при обработке плазмой вакуумно-дугового разряда на этапе осаждения покрытия.

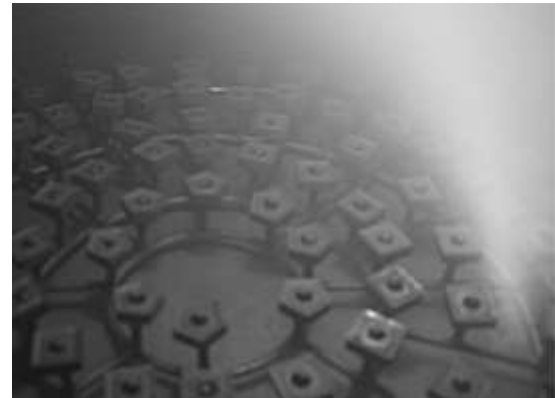
**Результаты исследований.** После осаждения покрытия пластины были исследованы в целях определения распределения толщины покрытия в зависимости от места, которое пластина занимала на подложке при осаждении, для чего были сделаны микрошлифы. Фотография микрошлифа представлена на рис. 4, а; распределение толщины покрытия вдоль радиуса подложки – на рис. 4, б.

Измерения показали, что покрытия на режущих пластинах имеют толщину в пределах 4,2 мкм с коэффициентом неравномерности порядка 4 % при радиусе подложки до 150 мм, после чего толщина покрытия уменьшается до 3,72 мкм при радиусе 160 мм. Таким образом, при диаметре подложки 300 мм предложенный метод позволяет осажда́ть равнотолщин-

ные покрытия, удовлетворяющие требованиям электронной промышленности (< 5 %, [85]).



а



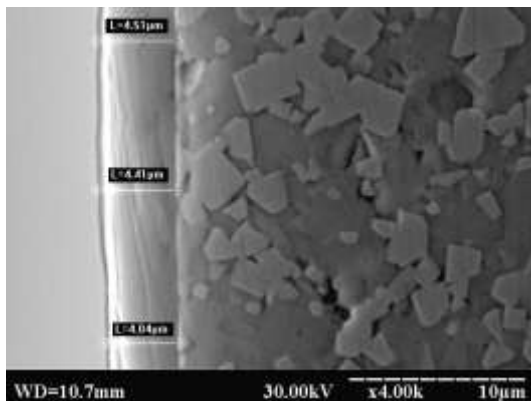
б

Рис. 3 – Процесс ионной обработки для осаждения равнотолщинного вакуумно-дугового покрытия: а – очистка и нагрев в магнетронном разряде; б – осаждение покрытия

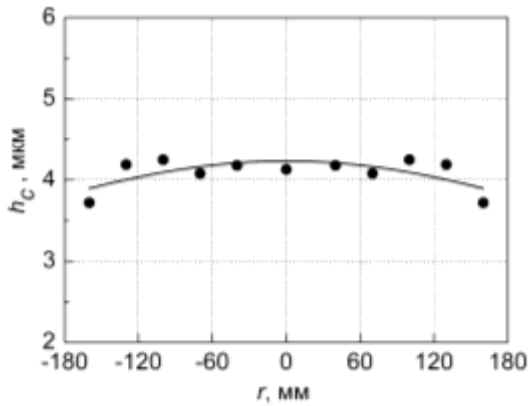
При обработке подложек диаметром 320 мм средняя толщина покрытия снижается до 4,1 мкм, а неравномерность увеличивается до 13 % за счет уменьшения толщины покрытия на краях подложки вследствие уменьшения плотности ионного тока. Однако подобная неравномерность может быть некритичной для менее требовательных технологий (осаждение декоративных или защитных покрытий), что позволяет обрабатывать подложки диаметром до 400 мм. Для определения размеров подложки, которая позволяет осажда́ть покрытия, одинаковые с точки зрения износостойкости инструмента, были проведены исследования пластин с покрытием на износ.

Стойкость режущего инструмента на износ исследовалась при токарной обработке коррозионно-стойкой, жаропрочной стали мартенситно-ферритного класса 14X17H2 (ЭИ268) [8]. Для механической обработки были выбраны такие режимы точения продольной подачей [9]:

- получистовая обработка: скорость резания  $V_p = 230$  м/мин, глубина резания  $t_p = 1,0$  мм при подаче  $s = 0,21$  мм/об;
- чистовая обработка: скорость резания  $V_p = 280$  м/мин, глубина резания  $t_p = 0,5$  мм при подаче  $s = 0,11$  мм/об.



а



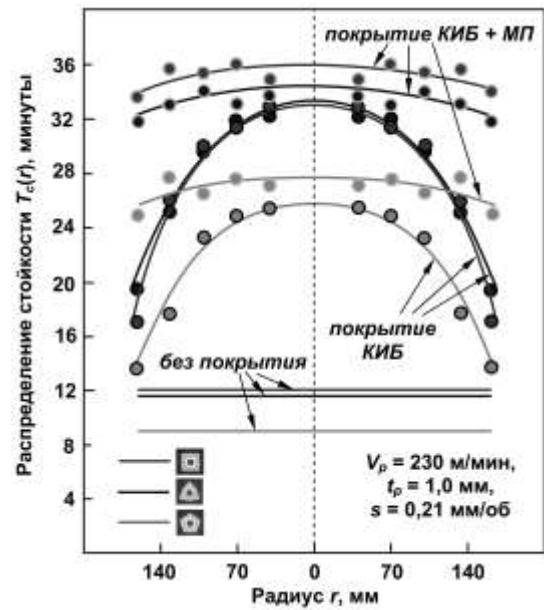
б

Рис. 4 – Результаты измерений распределения толщины покрытия вдоль поверхности подложки для процесса с управляющими магнитными полями: а – фотография микрошлифа; б – распределение толщины покрытия

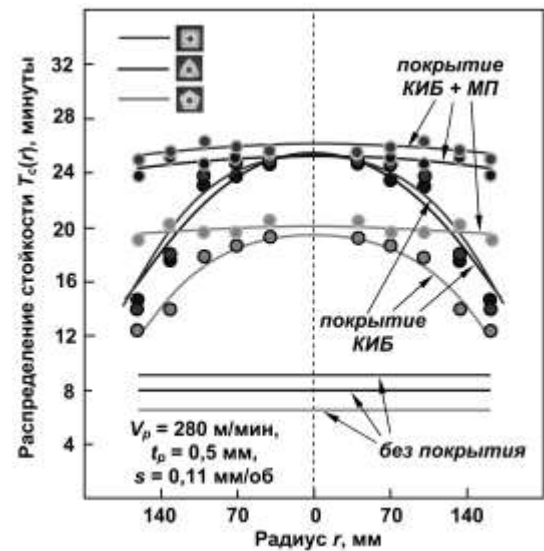
При определении износа использовался инструментальный микроскоп БМИ-1Ц с ценой деления 5 мкм. В качестве критериев износа режущих пластин для операций получистовой и чистовой обработки были выбраны износ по задней поверхности резца 0,4 и 0,3 мм, соответственно [9]. Зависимости  $h_z$  износа главной задней поверхности твердосплавных режущих пластин с покрытием, осажденным согласно технологическому процессу с использованием управляющих магнитных полей, показали существенные отличия по сравнению с базовой технологией в характере распределения стойкости режущих пластин с покрытием, осажденным на образцы в различных зонах осаждения, на различных удалениях от центра подложки [7]. По результатам измерений отмечен некоторый рост стойкости примерно на 7 %, который предположительно объясняется воздействием ионов повышенной энергии (потенциал смещения 230 В вместо 200 В для базового варианта) [10].

Распределение стойкости пластин с покрытием, полученным согласно различным техпроцессам, вдоль радиуса подложки представлены на рис. 5, а – для получистовой и на рис. 5, б – для чистовой обработки.

Полученные результаты можно объяснить таким образом. Стойкость инструмента с покрытием зависит от толщины покрытия [11], а также плотности ионного тока.



а



б

Рис. 3 – Распределение стойкости твердосплавных режущих пластин вдоль радиуса подложки: а –  $V_p = 230$  м/мин,  $t_p = 1,0$  мм,  $s = 0,21$  мм/об; б –  $V_p = 280$  м/мин,  $t_p = 0,5$  мм,  $s = 0,11$  мм/об

Получение стехиометрического или близкого к нему состава и формирование нитрида титана происходит при достижении толщины покрытия порядка 4–5 мкм [2], что объясняет влияние толщины покрытия на микротвердость [2] и стойкость инструмента. Зависимость микротвердости от толщины имеет нелинейный характер, причем при толщине покрытия менее 4 мкм происходит увеличение стойкости при увеличении толщины, затем стойкость практически не изменяется при толщине покрытия 4–5 мкм. При этом для всех участков подложки возможно формирование покрытия оптимального фазового состава и получение одинаково высоких значений стойкости инструмента.

**Выводы.**

По сравнению с базовым техпроцессом КИБ [7] общее время обработки потоками плазмы твердосплавных режущих пластин в вакуумной камере при реализации предлагаемого техпроцесса увеличивается до 53 минут, причем 43 минуты из них составляет время осаждения тонкого покрытия Ti и основного покрытия TiN. Аналогичное время для базового техпроцесса КИБ составляет 54,5 и 28,5 минут. Таким образом, общее время обработки для обоих техпроцессов практически одинаково, хотя время осаждения покрытия для техпроцесса КИБ с использованием дополнительных магнитных полей увеличивается в 1,5 раза. При необходимости осаждают покрытия с обеспечением одинаковой стойкости режущих пластин базовый техпроцесс позволяет обработать площадь порядка  $3,14 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$  (круг диаметром до 20 см с центром в центре подложки). Техпроцесс с использованием дополнительных магнитных полей позволяет обрабатывать площадь порядка  $8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$  (диаметр до 32 см), что сопровождается увеличением в 2,6 раза количества одновременно обрабатываемых режущих пластин. В результате этого предлагаемый техпроцесс позволяет повысить производительность всего процесса плазменно-ионной обработки в 2,6 раза. На основании чего можно сделать вывод о его экономической эффективности и целесообразности внедрения на предприятиях.

**Список литературы:** 1. Костюк Г. И. Физико-технические основы напыления покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования: моногр. [Текст] / Г. И. Костюк. – К. : Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2. – 441 с. 2. Мацевитый, В. М. Покрытия для режущих инструментов [Текст] / В. М. Мацевитый. – Х. : Вища шк. Изд-во Харьк. ун-та, 1987. – 128 с. 3. Андреев, А. А. Влияние давления азота при осаждении сверхтвердых TiN покрытий на их свойства [Текст] / А. А. Андреев, В. М. Шулаев, В. Ф. Горбань, В. А. Столбовой // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5, № 3-4. – С. 203-206. 4. Baranov, O. Effect of ion current density on the properties of vacuum arc-deposited TiN coatings [Text] / O. Baranov, J. Fang, A. Rider, P. Kumar, K. Ostrikov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – V. 41, № 12. – P. 3640–3644. 5. Baranov, O. Effective control of ion fluxes over large areas by magnetic fields: from narrow beams to highly uniform fluxes [Text] / O. Baranov, M. Romanov, K. Ostrikov // Physics of plasma P. – 2009. – № 16. – P. 053505-1-053505-5. 6. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия [Текст] / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев,

С. Н. Григорьев. – Х. : ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с. 7. Эффективность вакуумно-плазменного покрытия TiN на твердосплавном режущем инструменте при токарной обработке стали 14X17H2 [Текст] / О. О. Баранов, М. С. Романов, А. А. Бреус, Р. В. Воропай // Вестник Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: сб. науч. тр. Нац. техн. ун-та «ХПИ». – Вып. 40. – Х., 2011. – С. 164–169. 8. Стали и сплавы. Марочник: справ. / В. Г. Сорокин, М. А. Гервасьев, В. С. Палеев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с. 9. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справ. / Я. Л. Гуревич, М. В. Горохов, В. И. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с. 10. Андреев, А. А. Вакуумно-дуговое модифицирование поверхности стальных изделий [Текст] / А. А. Андреев // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5, № 3-4. – С. 140-148. 11. Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями [Текст] / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kostjuk G. I. Fiziko-tehnicheskie osnovy napylenija pokrytij, ionnoj implantacii i ionnogo legirovanija, lazernoj obrabotki i uprochnenija, kombinirovannyh tehnologij. Spravochnik dlja rascheta osnovnyh fizicheskix i tehnologicheskix parametrov, ocenki vozmozhnostej, vybora tipa tehnologij i oborudovanija: monogr. [Текст] / Г. И. Костюк. – Киев : Изд-во АИНУ, 2002. – Book 2. – 441 P. 2. Macevityj, V. M. Pokrytija dlja rezhushhih instrumentov [Текст] / V. M. Macevityj. – Kharkov : Vishha shkola. Izd-vo Har'kovskogo un-ta, 1987. – 128 P. 3. Andreev, A. A. Vlijanie davlenija azota pri osazhdenii sverhtverdyh TiN pokrytij na ih svojstva [Текст] / A. A. Andreev, V. M. Shulaev, V. F. Gorban', V. A. Stolbovoj // Fizicheskaja inzhenerija poverhnosti. – 2007. Vol. 5, No 3-4. P. 203–206. 4. Baranov, O. Effect of ion current density on the properties of vacuum arc-deposited TiN coatings [Text] / O. Baranov, J. Fang, A. Rider, P. Kumar, K. Ostrikov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, No 12. – P. 3640–3644. 5. Baranov, O. Effective control of ion fluxes over large areas by magnetic fields: from narrow beams to highly uniform fluxes [Text] / O. Baranov, M. Romanov, K. Ostrikov // Physics of plasma P. – 2009. – No 16. – P. 053505-1-053505-5. 6. Vakuumno-dugovye ustrojstva i pokrytija [Текст] / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев, П. Н. Григор'ев. – Kharkov : NNC HFTI, 2005. – 236 P. 7. Jeffektivnost' vakuumno-plazmennogo pokrytija TiN na tverdosplavnom rezhushhem instrumente pri tokarnoj obrabotke stali 14H17N2 [Текст] / О. О. Баранов, М. С. Романов, А. А. Бреус, Р. В. Воропай // Vestnik Nacional'nogo tehniceskogo universiteta «Har'kovskij politehnicheskij institut»: sb. nauch. tr. Nac. tehn. un-ta «KhPI». – VyP. 40. – H., 2011. – С. 164–169. 8. Stali i splavy. Marochnik: sprav. / V.G. Sorokin, M.A. Gervas'ev, V.P. Paleev i dr. – Moscow: Intermet Inzhiniring, 2001. – 608 P. 9. Rezhimy rezanija trudnoobrabatyvaemyh materialov: sprav. / Ja.L. Gurevich, M.V. Gorohov, V.I. Zaharov i dr. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 240 P. 10. Andreev, A. A. Vakuumno-dugovoe modifizirovanie poverhnosti stal'nyh izdelij [Текст] / А. А. Андреев // Fizicheskaja inzhenerija poverhnosti. – 2007. Vol. 5, No 3-4 – P. 140–148. 11. Vereshhaka, A. P. Rezhushhie instrumenty s iznosostojkimi pokry-tijami [Текст] / А. П. Vereshhaka, I. P. Tret'jakov. – Moscow: Mashino-stroenie, 1986. – 192 P.

Поступила (received) 20.06.2015

**Баранов Олег Олегович** – канд. техн. наук, доц. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: [olbaranov@yahoo.com](mailto:olbaranov@yahoo.com);

**Baranov Oleh Olehovych** – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06; e-mail: [olbaranov@yahoo.com](mailto:olbaranov@yahoo.com);

**Костюк Геннадий Игоревич** – док. техн. наук, проф. НАУ «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: [g.kostyuk206@yandex.ru](mailto:g.kostyuk206@yandex.ru);

**Kostyuk Gennadiy Igorevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06, e-mail: [g.kostyuk206@yandex.ru](mailto:g.kostyuk206@yandex.ru);