

мом прутке по длине кристаллизатора. Решение уравнения дает возможность рассчитать минимальную длину кристаллизатора. Проведенные расчеты пока-

зали, что минимальная длина кристаллизатора 330 мм соответствует скорости вытягивания прутка не более 0,6 м/с.

Литература

1. Хахалин, В. Д. Труболитейное производство [Текст] / В. Д. Хахалин, В. И. Семко, А. Н. Смоляков, А. С. Черезов, Н. М. Боковой – М.: Металлургия, 1977. – 224 с.
2. Гецелев, З. Н. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор [Текст] / З. Н. Гецелев, Г. А. Балахонцев, Ф. И. Квасов, Г. В. Черепок, И. И. Варга, Г. И. Мартынов - М.: Металлургия, 1983. – 152 с.
3. Скачков, В. А. Исследование кристаллизации трубок малого диаметра из алюминиевых сплавов прецизионной точности [Текст] / В. А. Скачков, О. Р. Бережная, О. Р. Оверчук, Г. А. Колобов // Обробка матеріалів тиском. - Збірник наукових праць – Краматорськ: ДГМА, 2012. - №4 (33). С.212 – 215.
4. Pavlicevic M., Matijasevic B., Karaj N. (1997) Hicast: a new approach to high speed casting // Rev. Met. – CIT. 1997. Oct. P. 1215, 1217 – 1223.
5. Ганкин, В. Гильзовые кристаллизаторы для высокоскоростной разливки стали [Текст] / В. Ганкин, А. Белитченко, Н. Богданов. Тр. VI Конгр. сталеплавильщиков. М., 2001. С. 461 – 469.
6. Bertoletti C., Courbe P., Joliver J. M. (1998) Meniscus free casting: metallurgical and technological results //3rd Europ. Conf. Continuous Casting. 1998. P. 65 – 74.
7. Кондо, К. Разработка технологии высокоскоростной разливки низкоуглеродистых сталей [Текст] / К. Кондо, Я. Сакамито, К. Хара // Dzaıjre to ruğosehsu. 1999. T.7. №1. С. 280.
8. Исаченко, В. П. Теплоотдача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. - М.: Энергия, 1981. – 416 с.
9. Самойлович, Ю. А. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю. А. Самойлович, С. А. Крулевецкий, В. А. Горянов, З. К. Кабаков // М.: Металлургия, 1982. – 152с.
10. Троицкий, В. А. Металлургия алюминия [Текст] / В. А. Троицкий, В. А. Железнов. – М.: Металлургия, 1984. – 400 с.

Методом іонної імплантації отримані модифіковані покриття нітридів титану та хрому на підкладках вуглецевої і конструкційної легованої сталей. Вивчені структура та фізичні властивості цих покриттів, а також їх використання в якості захисних покриттів на дрібно розмірному волоочильному інструменті

Ключові слова: іонна імплантаци́я, титан, хром, модифіковане покриття, мікротвердість, зносостійкість, експлуатаційна стійкість

Методом ионной имплантации получены модифицированные покрытия нитридов титана и хрома на подложках углеродистой и конструкционной легированной сталей. Изучены структура и физические свойства этих покрытий, а также их использование в качестве защитных покрытий на мелкоразмерном волоочильном инструменте

Ключевые слова: ионная имплантация, титан, хром, модифицированное покрытие, микротвердость, износостойкость, эксплуатационная стойкость

УДК 533.59

ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МЕЛКО- РАЗМЕРНОГО СТАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

Л. А. Васецкая

Кандидат технических наук, старший преподаватель
Кафедра общей физики и технической механики
Институт химических технологий
Восточноукраинского национального университета
им. Владимира Даля (г. Рубежное)
ул. Ленина, 31, г. Рубежное,
Луганская обл., Украина, 93009
E-mail: VasLa@i.ua

1. Введение

В настоящее время снижение расходов на приобретение износостойкого инструмента имеет

экономические выгоды для производителя. Одним из способов такого снижения расходов является замена дорогостоящих материалов более дешевыми. Однако подобная замена приводит к

резкому снижению прочностных характеристик инструмента.

Износостойкость и твердость поверхностей металлов зависят от химического состава и микроструктуры приповерхностной области, которые возможно изменять под действием ионной имплантации [1, 2]. Ее использование при серийном производстве для поверхностной обработки может стать одним из перспективных путей повышения эксплуатационных свойств небольших, но имеющих ключевое значение деталей станков и агрегатов.

2. Литературный обзор и постановка проблемы

Известные технологии обработки отличаются существенным повышением температуры или же требуют более дорогостоящего сочетания нескольких методов для достижения эффекта упрочнения поверхностного слоя [3 – 12]. Проблема обработки стального мелкоразмерного инструмента состоит в том, что процесс должен сопровождаться температурами, не вызывающими коробления и, в то же время, влиять на свойства поверхности в нужном нам направлении. Этот вопрос недостаточно исследован, поэтому изучение целесообразности применения низкотемпературной имплантации для упрочнения поверхности мелкоразмерного является актуальным.

3. Оптимальные параметры имплантации и методики исследований модифицированной поверхности

В качестве материала применялись сравнительно недорогие и одни из наиболее распространенных в машиностроении стали: углеродистая ВСтЗсп и конструкционная легированная 40Х, а в качестве легирующего элемента – титан и хром. Реакционным газом служил азот, $p_r = 3,32 \times 10^{-2}$ Па – рабочее давление в камере. Оптимальные параметры имплантации на стальные подложки при использовании различных мишеней приведены в табл. 1, где D - доза имплантируемых ионов; $U_p, I_p, U_m, I_m, U_{подкл}, I_{подкл}$ – напряжение и сила тока на разряде, мишени, подложке.

Таблица 1

Оптимальные параметры имплантации ионов на стальные подложки

Параметры имплантации	Мишень	
	Ti	Cr
$U_p, В$	400	430
$I_p, А$	0,5	0,35
$U_m, кВ$	2,0	1,2
$I_m, мА$	50	60
$U_{подкл}, кВ$	25	25
$I_{подкл}, мА$	35	35
$D, см^{-2}$	$2,0 \times 10^{16} - 8,03 \times 10^{17}$	$6,69 \times 10^{16} - 6,02 \times 10^{17}$

Элементный состав поверхностного слоя локально определяли с помощью оже-спектрометра JAMP-

10S фирмы «JEOL» (Япония), фазовый состав исследовали на рентгеновских установке ДРОН-4-13 в FeK_{α} -излучении. Изменения структуры и толщины модифицированного покрытия исследовали с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-106и фирмы «Selmi» и металлографического микроскопа МИМ-8, для этого подготавливали микрошлифы, проводили механическую (шлифование, полирование) и химическую обработку (травление раствором 4 % HNO_3 в этиловом спирте) поверхности микрошлифов. Измерение микротвердости покрытия и качественную оценку адгезионно-когезионной связи проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузках на индентор 15, 25 и 35 г. Ширина царапин измерялась объект-микрометром ОМО с ценой деления 0,01 мм. Износостойкость покрытий исследовали с помощью машины трения АЕ-5. При этом поверхностное трение стальных образцов по плоской стороне латунного диска проводилось с непрерывной подачей смазки: водной эмульсии растительного масла и мыла, которая используется в процессе волочения проволоки [13]. Взвешивание проводили на аналитических весах ВЛР-200г. Все исследования проводились согласно общепринятым методикам.

4. Результаты эксперимента и их обсуждение

4. 1. Оже-электронно-спектроскопические исследования

Был проведен полуколичественный и качественный анализ всех химических элементов исследуемых образцов. Пики на спектрограммах наглядно свидетельствуют о наличии в приповерхностном слое железа, элементов мишени, азота, углерода и кислорода. Данные пики наблюдались на поверхности до и после двух травлений образца ионной пушкой на глубину до 300 Å, что подтверждает образование модифицированного покрытия в процессе имплантации стальной поверхности ионами.

На рис. 1 показан спектр оже-электронов в дифференцированном виде, который получен от поверхности образца из углеродистой стали ВСтЗсп после 120 мин имплантации ионов азота и титана.

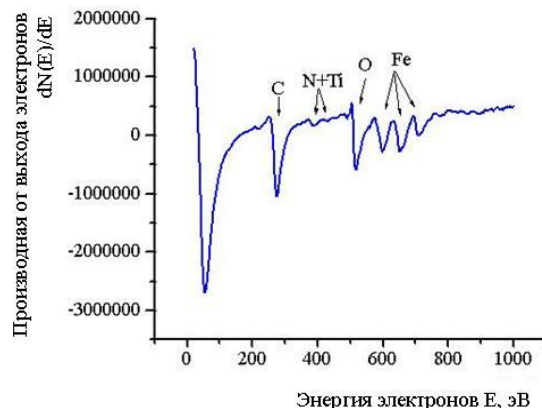


Рис. 1. Картина зависимости производной от выхода электронов $dN(E)/dE$ от энергии электронов (E, эВ) после 120 мин имплантации поверхности стали ВСтЗсп ионами титана (Ti) и азота (N)

4. 2. Рентгенографические исследования

Образование нитридных и карбонитридных фаз титана и хрома, ответственных за повышение механических свойств, на поверхности сталей подтверждается при дифрактометрических исследованиях образцов. Дифрактограмма покрытия, полученного при 60 мин имплантации ионов азота и титана, приведена на рис. 2.

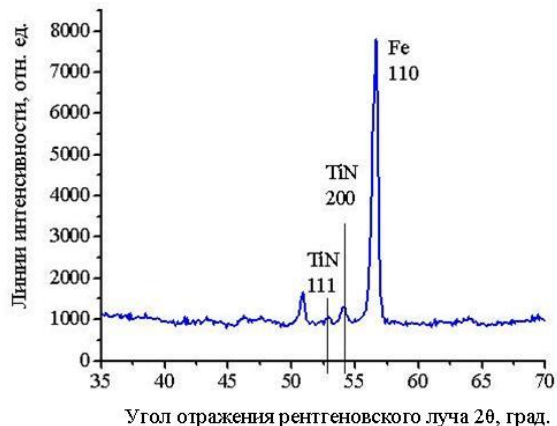


Рис. 2. Картина зависимости линий интенсивности (в отн. единицах) от угла отражения рентгеновского луча (2θ , град.), полученная в FeK_{α} -излучении покрытия на подложке ВСт3сп после 60 мин имплантации ионов титана (Ti) и азота (N)

4. 3. Оптические исследования

Визуально видно, что ионная имплантация изменяет поверхностный слой материала. Как в случае мишени титана, так и при бомбардировке сталей ионами N и Cr происходит фрагментация зерен покрытия, а модифицированная поверхностная структура становится мелкозернистой. Особенно это видно после имплантации более пластичной углеродистой стали ВСт3сп (рис. 3).

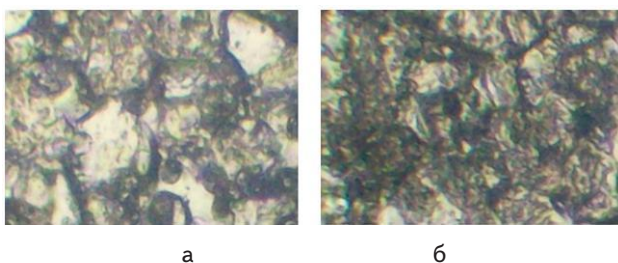


Рис. 3. Структура стали ВСт3сп: а — 20 мин; б — 80 мин имплантации ионов хрома и азота, $\times 1320$

4. 4. Измерение толщины модифицированного слоя

Материал подложки, как и материал мишени, влияет на интенсивность роста слоя. Добавка хрома (1,1 %) искажает кристаллическую решетку стали 40Х, что дает возможность ионам хрома проходить глубже в металл (рис. 5). Поэтому здесь толщина слоя больше в сравнении с углеродистой сталью. При этом достигается максимальная толщина покрытия – 0,89 мкм (рис. 6).

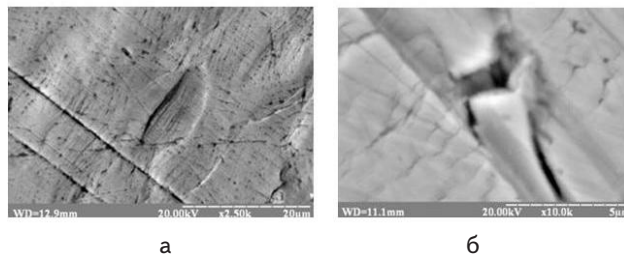


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение поверхности стали ВСт3сп: а — до имплантации в режиме вторичных электронов; б — после 60 мин имплантации ионов титана и азота в режиме отраженных электронов

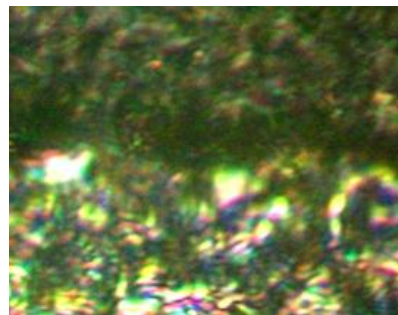


Рис. 5. Оптический снимок поперечного среза модифицированного покрытия на подложке стали ВСт3сп после 80 мин имплантации ионов хрома и азота, $\times 1950$

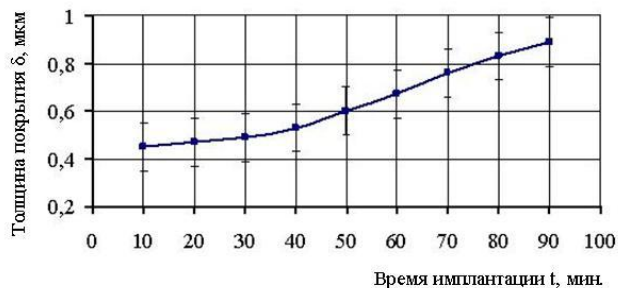


Рис. 6. График зависимости толщины модифицированного покрытия (δ , мкм) на подложке стали 40Х от времени имплантации (t, мин) ионов хрома и азота

4. 5. Измерение микротвердости

Микротвердость слоя, образованного при модификации поверхности сталей, повышается с течением времени имплантации. Благодаря однородности фазового состава на легированных сталях наблюдается более равномерная зависимость. Здесь повышение твердости наблюдается уже после 30 мин имплантации, в то время как углеродистой стали для этого требуется более длительная имплантация - 80 мин (рис. 7). Максимальное повышение твердости (в 2,5 раза) получили при имплантации стали 40Х с использованием мишени хрома, который придает стали твердость [14].

4. 6. Измерение адгезионно-когезионной связи

После имплантации сталей с использованием мишени хрома величина адгезионно-когезионной связи

меньше (в 1,1 – 1,6 раз), чем с использованием мишени титана, так как хром имеет свойство снижать пластичность. Максимальная величина адгезионно-когезионной связи с покрытием получена у стали 40X – 4,85 ГПа. Анализ склерометрических исследований по определению пластичности материалов в тонких слоях показал, что на всех образцах покрытие полностью не отделяется от подложки (рис. 8). А это значит, что в нашем случае достигается необходимое соотношение твердости и пластичности, благодаря которому повышается срок службы стального инструмента [15].

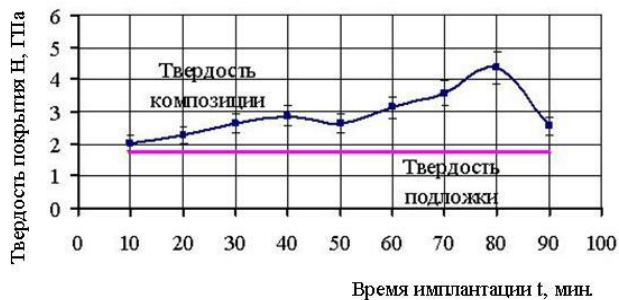


Рис. 7. График зависимости твердости модифицированного покрытия (Н, ГПа) стали ВСтЗсп от времени имплантации (t, мин) ионов хрома и азота

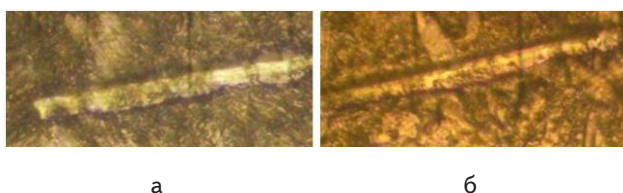


Рис. 8. Результаты склерометрических исследований покрытий на стали 40X при нагрузке на индентор 15 г и времени имплантации ионов титана и азота: а – 30 мин; б – 50 мин, x 800

4. 7. Исследование износостойкости

На стадии приработки величина износа для поверхностей с покрытиями уменьшается в сравнении с поверхностью без покрытия (для стали ВСтЗсп: TiN: в 1,3-1,9 раза; CrN: в 1,8-2,1 раза; для стали 40X: TiN: в 1,2-2,0 раза; CrN: в 1,6-2,5 раза) и наблюдается снижение скорости изнашивания с увеличением времени имплантации (рис. 9). Полученные результаты свидетельствуют о том, что на величину и скорость изнашивания стальных образцов влияет не только продолжительность обработки, но и тип имплантируемых ионов - более эффективным является покрытие CrN.

Доминирующим фактором в нашей работе остается повышение износостойкости инструмента, поэтому, анализируя приведенные результаты исследований, можно сделать вывод о том, что покрытие CrN на подложках конструкционной легированной стали является наиболее эффективным для решения данного вопроса.

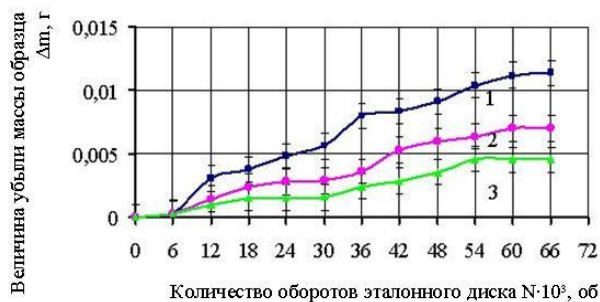


Рис. 9. График зависимости величины убыли массы (Δm, г) образца стали 40X от количества оборотов эталонного диска (N, об): 1 – образец без покрытия; 2 – 40 мин; 3 – 80 мин имплантации ионов хрома и азота

5. Апробация результатов исследований

Проводились на предприятии по производству струн и аксессуаров для музыкальных инструментов (ФЛП «Сердечный Сергей Иванович», г. Рубежное) технологические испытания стальных фильер, изготовленных из исследованных сталей, до (рис. 10) и после (рис. 11) ионно-плазменной обработки при протяжке латунной проволоки. Имплантация с использованием мишеней титана и хрома позволила нам увеличить эксплуатационную стойкость фильер из стали ВСтЗсп с покрытием: TiN – в 3 раза, CrN – в 6 раз; стали 40X с покрытием: TiN – в 3 раза, CrN – в 5 раз.

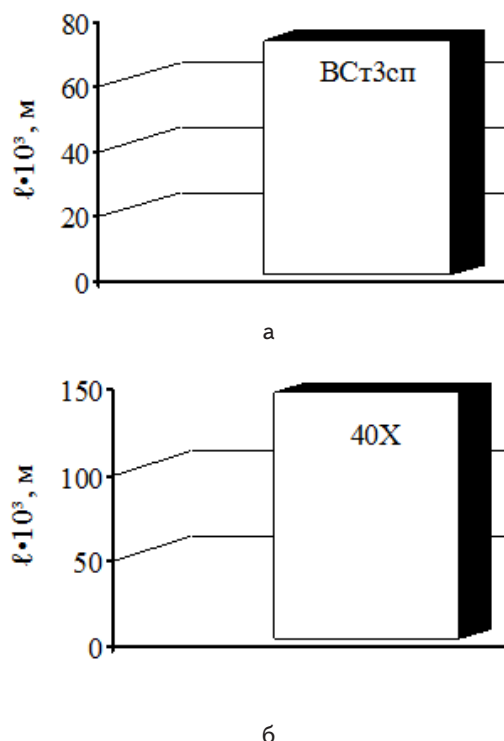


Рис. 10. Гистограмма эксплуатационной стойкости фильер без покрытия при времени эксплуатации: а – 0,5 месяца; б – 1 месяц; l - длина протягиваемой проволоки, м

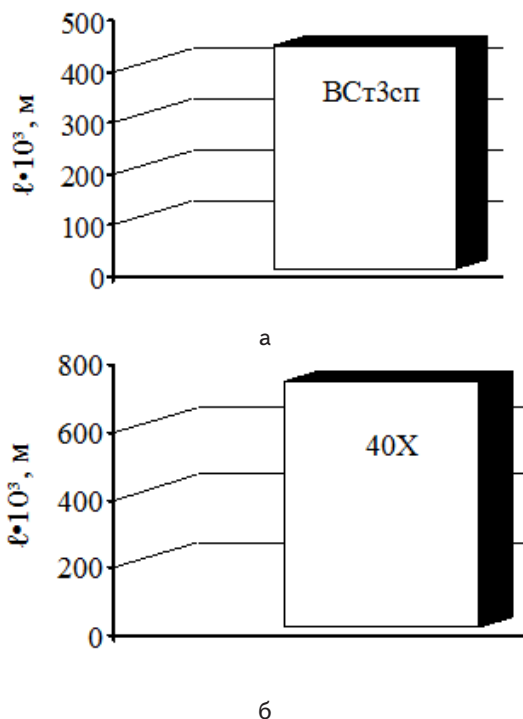


Рис. 11. Гистограмма эксплуатационной стойкости фильер с покрытием CrN при времени эксплуатации: а – 3 месяца; б – 5 месяцев; l – длина протягиваемой проволоки, м

6. Выводы

После ионно-плазменной обработки с использованием мишени хрома легированная сталь 40Х обладает оптимальными для повышения износостойкости физико-механическими свойствами, что дает возможность рекомендовать к применению вместо используемых для протяжки проволоки латунных фильер со вставкой из технического алмаза фильеры из более дешевого материала, обладающие хорошими эксплуатационными свойствами.

Представленные результаты исследований могут найти применение для упрочнения различного мелкоразмерного инструмента, деталей и узлов производственного оборудования.

Литература

1. Ионная имплантация в полупроводники и другие материалы [Текст] : сб. статей / [науч. ред. Куранский Е. и др.]. – М.: Мир, 1980. – 332 с.
2. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками [Текст] / [под ред. Поута Дж. М., Фоти Г., Джекобсона Д. К. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.

3. Влияние высоких доз ионов N^+ , $N^+ + Ni^+$, $Mo^+ + W^+$ на физико-механические свойства TiNi [Текст] / А. Д. Погребняк, С. Н. Братушка, Л. В. Маликов [и др.] // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, № 5. – С. 65 – 72.
4. Ионная имплантация и лучевые технологии [Текст] / [под ред. Дж. С. Вильямса, Дж. М. Поута]. – К.: Наукова думка, 1988. – 360 с.
5. Белоус, В. А. О влиянии облучения ионами Ag^+ на коррозионную стойкость металлов и сплавов [Текст] / В. А. Белоус, Г. И. Носов, Н. А. Азаренков // ФИП ФИП PSE. – 2010. – Т. 8, № 2. – С. 161–168. – Vol. 8, № 2. – P. 161–168.
6. Сергеева, М. Х. Наноструктурная модификация поверхности [Текст] / М. Х. Сергеева, В. А. Кохановский // Вестник ДГТУ. – 2008. – Т. 8, № 2. – С. 192–195.
7. D'Heurle, F. M. Note on the origin of intrinsic stresses in films deposited via evaporation and sputtering [Текст] / F. M. D'Heurle, J. M. Harper // Thin Solid films. – 1989. – Т. 171, № 1. – С. 81–92.
8. Galvanetto, E. XRD and XPS study on reactive plasma sprayed titanium – titanium nitride coating [Текст] / E. Galvanetto, F. P. Galliano, F. Borgioli [et al.] // Thin Solid Films. – 2001. – Т. 384, № 2. – С. 223–229.
9. Ellwanger, R. C. The deposition and film properties of reactively sputtered titanium nitride [Текст] / R. C. Ellwanger, J. M. Towner // Thin Solid films. – 1988. – Т. 161. – С. 289–304.
10. Grant, W. A. The modification of surface layers by ion implantation [Текст] / W. A. Grant, J. S. Williams // Sci. Prog. Oxf. – 1976. – Т. 63, № 249. – С. 27–64.
11. Conrads, H. Plasma generation and plasma sources [Текст] / H. Conrads, M. Schmidt // Plasma Sources Sci. Technol. – 2000. – № 9. – С. 441–454.
12. Kanaya, K. Consistent theory of sputtering of solid targets by ion bombardment using power potential Low [Текст] / Kanaya K., Hojou K., Koga K. [et al.]. / J. Appl. Phys. – 1973. – Т. 12, № 9. – С. 1297–1306.
13. Красильников Л. А. Волочилицык проволоки [Текст] / Л. А. Красильников, С. А. Красильников. – М.: Металлургия, 1977. – 240 с.
14. Тополянский, П. А. Твердость тонкопленочного покрытия, наносимого методом финишного плазменного упрочнения [Текст] / П. А. Тополянский, С. А. Ермаков, Н. А. Соснин // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: 7-я междунар. практич. конф.-выставка, 12-15 апр. 2005 г. : тезисы докл. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 274–298.
15. Физика износостойкости поверхности металлов [Текст] : сб. науч. трудов / [науч. ред. Владимиров В. И. и др.] – Л.: ФТИ, 1988. – 230 с.