

Висновки. Критичні точки сталі для залізничних коліс з 0,68 % С; 0,77 % Cr; 0,22 % Ni; 0,69 % Mo; 0,087 % V при нагріванні: АС1 = 750 °С, АС3 = 790 °С. Утворення перліту повністю пригнічується в досліджуваній сталі при швидкості охолодження більше 2,5 °С/с. Критична швидкість охолодження для дослідної сталі становить 3,5 °С/с.

Отримані в роботі результати послужать базою для розробки оптимальних режимів термічної обробки залізничних коліс з експериментальної сталі, а також дозволять обґрунтовано визначати області її ефективного використання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ларин Т. В. Исследование механизма износа, усталостного выкрашивания, образования выщербин и наволакивания на поверхности катания цельнокатаных колес / Т. В. Ларин. // В кн. : Повышение надежности и долговечности деталей подвижного состава и пути : Тр. ВНИИЖТ. – М., 1977. – С. 51–68.
2. Исследование причин образования дефектов на поверхности катания высокопрочных колес в процессе эксплуатации / А. И. Бабаченко, А. А. Кононенко, Ж. А. Дементьева, П. Л. Литвиненко, А. В. Кныш // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 5. – С. 35–38.
3. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм " 305-Ц Міністерство транспорту України, Державна адміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця 2001 р.
4. Контактно-усталостные повреждения колес грузовых вагонов / [ред. С. М. Захаров]. – М. : Интекст, 2004. – 160 с.
5. Эдель К. О. Механика разрушения цельнокатаных колес / К. О. Эдель, М. Шапер // Железные дороги мира. – 1994. – № 2. – С. 22–28.
6. Энтин Р. И. Превращения аустенита в стали / Р. И. Энтин. – Москва : Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1960. – 252 с.

УДК 621.793.7

ГЛУШКОВА Д. Б, ст.н.с., д.т.н.
КАЛІНІН О. В., докторант
ВОРОНКОВ О. І., доц., д.т.н.
НІКІТЧЕНКО І. М, доц., к.т.н.
КОСТИНА Л. Л. доц., к.т.н.
БАГРОВ В. А., доц., к.т.н.
ДЕМЧЕНКО С. В., ас.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпро, Україна

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ОСАДЖУВАННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО НАНОКРИСТАЛІЧНОГО ПОКРИТТЯ Ti-Mo-N НА НАНОТВЕРДІСТЬ І ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ

Вступ. Значне місце у виробництві деталей різного призначення займає виготовлення поршневих кілець, основною причиною виходу з ладу яких є зношування робочих поверхонь. Тому велика увага приділяється проблемам підвищення зносостійкості поверхонь поршневих кілець.

Створення в одному матеріалі комбінації високої твердості з високою пластичністю реально в гетерогенному сплаві.

Актуальною представляється проблема розробки методу підвищення зносостійкості поршневих кілець.

Аналіз публікацій. Як зазначено в роботі [1], зносостійкість металу визначається комбінацією структури й ряду властивостей, а саме високої твердості й пластичності при відсутності крихкості, стійкості механічних властивостей в умовах роботи на зношування, високої насиченості й рівномірності розподілу легуючих елементів.

У роботі [2] встановлено, що інтенсивність протікання релаксаційних процесів при терті суттєво впливає на зносостійкість.

Останнім часом для підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів широко застосовується обробка поверхні високоінтенсивними джерелами енергії, взаємодія яких з матеріалами приводить до проходження процесів, пов'язаних зі зміною структури.

Насамперед відбувається зміна параметрів кристалічних ґрат, формуються дислокаційні структури, утворюються ультрадисперсні фази.

Результатом таких процесів є виникнення в поверхневих шарах матеріалу залишкових внутрішніх напружень. Методам визначення й вивчення природи формування залишкових напружень у покриттях, які отримані при вакуумно-дуговому осадженні, присвячений ряд робіт [3, 4].

Мета роботи – дослідження багатошарового наноструктурного покриття, що наноситься на поверхню поршневих кілець для підвищення їх зносостійкості.

Матеріал і методика дослідження. Матеріалом, на який наносили багатошарове покриття вакуумно-дуговим методом, був сірий чавун, широко розповсюджений у різних галузях машинобудування.

Як відомо, сірий чавун має гарні ливарні й антифрикційні властивості, не чутливий до дефектів поверхні, добре гасить вібрації.

Хімічний склад сірого чавуну наведений у табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сірого чавуну

Вміст елементів, %						
C	Si	Mn	Ni	S	P	Fe
3,49	2,49	0,56	0,08	0,06	0,11	решта

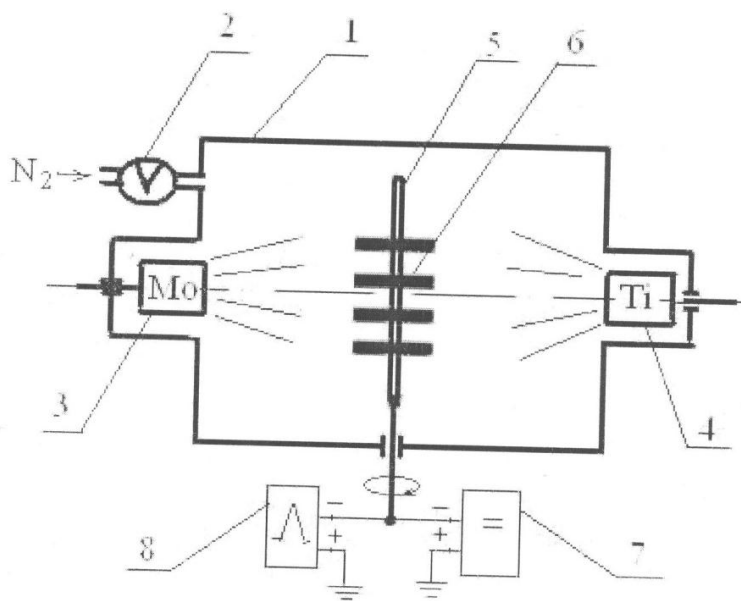
Проведені в останні роки дослідження свідчать, що властивості багатокомпонентних й багатошарових покриттів мають вищі властивості, ніж одношарові покриття [5].

Багатошарові двофазні наноструктурні покриття TiN-MoN осаджували у вакуумно-дуговій установці «Булат-6».

На рис. 1 показана схема установки для одержання багатошарових покриттів.

Вакуумна камера 1 обладнана системою автоматичної підтримки тиску азоту 2 і двома випарниками, один з яких 3 містить у якості матеріалу, що випаровується, молібден марки МЧВП, а інший 4 – титан марки VT1-0. На поворотному пристрої камери встановлений підкладкоутримувач 5 у вигляді трубки, на якій розміщені ролики 6. Установка має джерело постійної напруги 7, а також генератор імпульсної напруги 8 з регульованою амплітудою імпульсів.

Процедура охолодження багатошарових двофазних покриттів включала наступні операції. Вакуумну камеру відкачували до тиску $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Потім на поворотний пристрій з підкладкоутримувачем подавали негативний потенціал 1,3 кВ, включали поворотний пристрій 5 на безперервне обертання й по черзі імпульсно включали випарники 3 і 4, таким чином роблячи очищення поверхні роликів 6. Загальний час очищення становив 10 хв.



- 1 – вакуумна камера; 2 – система автоматичної підтримки тиску азоту;
 3 – випарник молібдену; 4 – випарник титану; 5 – підкладкоутримувач; 6 – підкладка;
 7 – джерело постійної напруги; 8 – генератор імпульсної напруги

Рисунок 1 – Схема установки для нанесення багатошарових покриттів

Далі включали одночасно обидва випарника й осаджували Ti-Mo, після цього подавали в камеру азот і осаджували нітрид молібдену, а з протилежної сторони – нітрид титану на ролики, що безупинно оберталися. Варіювали такі параметри, як струм дуги, напруга постійна на підкладці U_{nn} , напруга імпульсна на підкладці U_{ni} , тиск азоту, кількість шарів напилювання, час напилювання становив 2 години.

Наноіндентування проводили пірамідною Берковича при навантаженні 0,5 Н з автоматичними навантаженням та розвантаженням.

Металографічні дослідження проводили на електронному мікроскопі, вивчення структурного стану покриттів – на растровому мікроскопі.

Величину залишкових напружень у приповерхневих шарах визначали на установці ДРОН-2 методом багаторазових похилих зйомок у випромінюванні мідного анода із графітовим монохроматором.

Випробування на зносостійкість були виконані на машині СМЦ-2.

Результати дослідження та їх обговорення. Проведені вимірювання нанотвердості дали можливість одержати інформацію про характер розподілу нанотвердості в тонких поверхневих шарах покриття Ti-Mo-N.

На рис. 2 наведений графік розподілу нанотвердості на глибині 220 нм, з якого випливає, що максимальні значення нанотвердості мають місце у самій поверхні; по мірі видалення від поверхні нанотвердість зменшується, і мінімальне значення має на глибині 40 нм, а потім декілька зростає. Навантаження при цьому досягає максимального значення на глибині 200 нм (рис. 3).

Модуля Юнга також має максимальне значення на глибині 10 нм (рис. 4).

Отримані залежності свідчать про те, що нанотвердість і приведений модуль Юнга максимальні в поверхневих шарах. Ця закономірність збігається з результатами, викладеними в роботах [6, 7].

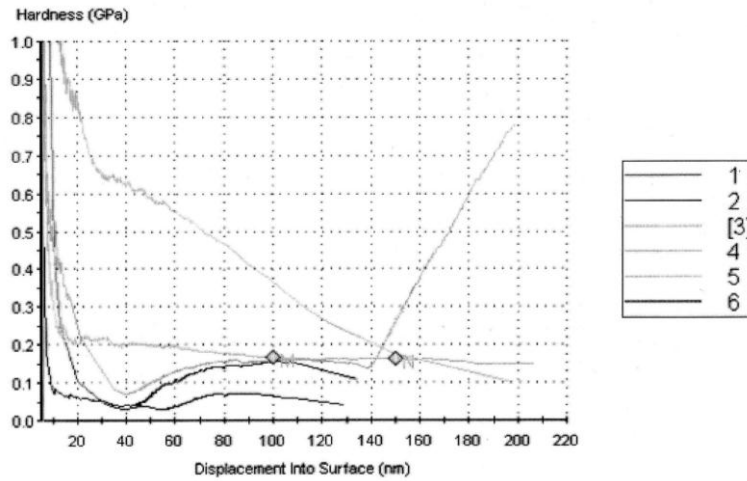


Рисунок 2 – Графік розподілу нанотвердості

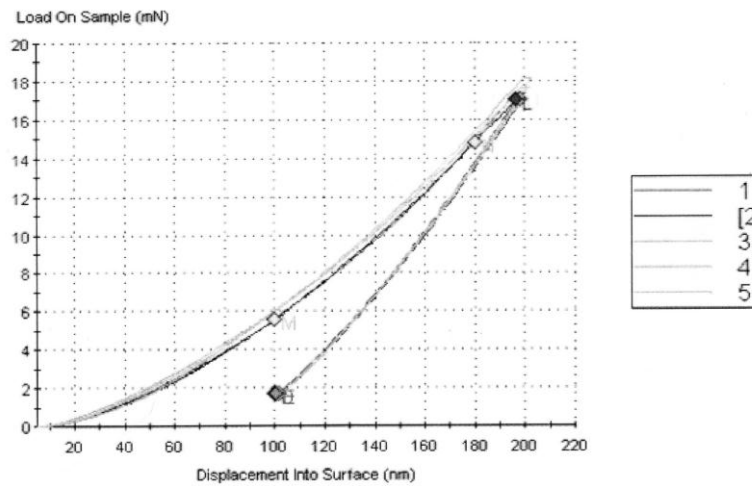


Рисунок 3 – Графік розподілу навантаження

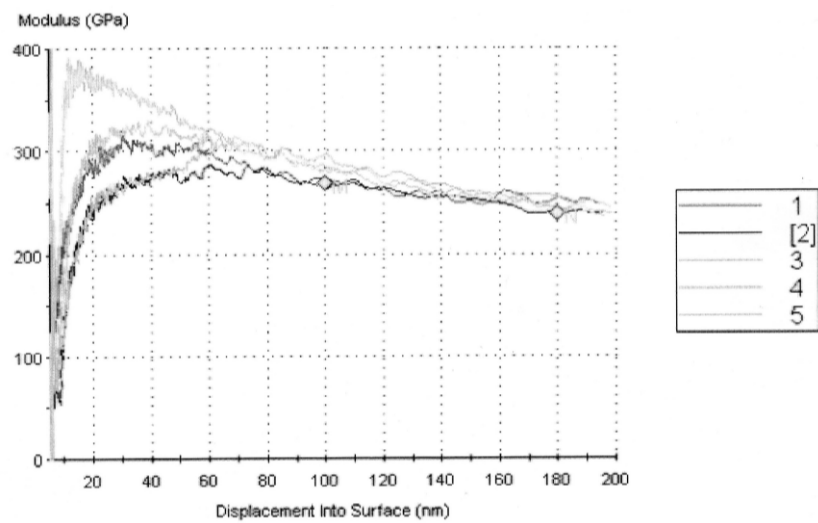


Рисунок 4 – Графік розподілу модуля Юнга

Аналіз напружено-деформованого стану показав, що найбільш висока величина стискання відповідає глибині ~ 10 нм. Такий результат отриманий у випадку нанесення TiN-MoN покриття при струму дуги $I_d = 100\text{--}170$ А, напрузі постійної на підкладці $U_{nn} = 40$ В, напрузі імпульсної на підкладці $U_{ni} = 2000$ В, тиску азоту $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., 2700 шарів безперервного обертання. Деформація стискання на такій глибині становить 2,2 %.

Отримані дані узгоджуються із графіком нанотвердості, наведеним на рис. 2, з якого видно, що максимальне значення нанотвердості має місце на глибині порядку 10 нм.

Важливим фактором у формуванні залишкових напружень у покритті є текстура, яка спостерігалася при вивченні структури на електронному мікроскопі (рис. 5). Причиною залишкових напружень є вплив іонного бомбардування.

Дослідження структурного стану покриттів показало, що при товщині шару близько 2 нм не виявляються міжфазні границі й тому на дифракційних спектрах проявляється спектр, характерний для однофазного стану; й матеріал зміцнюється незначно. З появою другої фази твердість збільшується. При цьому з результатів вивчення покриттів на растровому мікроскопі слідує, що ґратки на поверхні покриття виражені рельєфно, що можна пояснити процесами їх розпилення іонами молібдену й титану під час осадження.

При вивченні шарів товщиною порядку 10 нм спостерігається формування двофазного структурного стану. Великий питомий обсяг займають міжфазні границі, що супроводжується збільшенням стискаючих напружень. Це повинно приводити до підвищення твердості. Вивчення мікрофрактограм багат шарового покриття показало, що отримані зколи мають досить правильну форму, характерну для руйнування металу під дією напружень стискання.

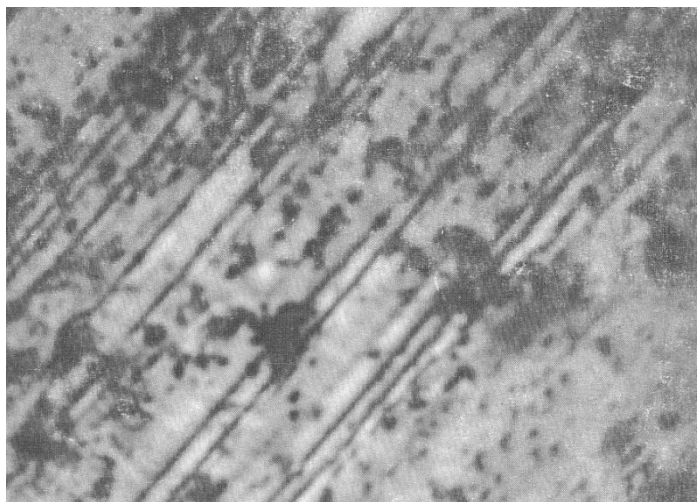
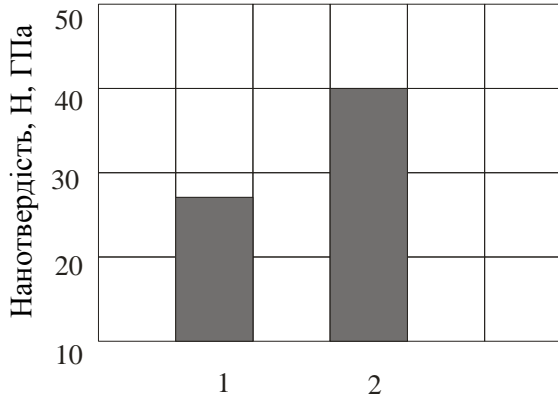


Рисунок 5 – Електронна світлина структури поверхневого шару $\times 10000$

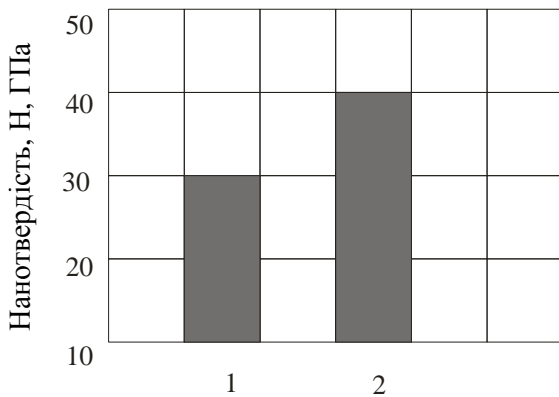
Дослідження шарів товщиною порядку 20 нм показало більш розмиту міжфазну границю, що веде до зменшення питомого внеску границь.

На рис. 6-10 представлені гістограми нанотвердості при вакуумно-дуговому осадженні багат шарових наноструктурних TiN-MoN покриттів, отриманих при різних параметрах, що дозволяють встановити вплив кількості шарів безперервного обертання, тиску азоту, напруги імпульсної на підкладці на величину нанотвердості.



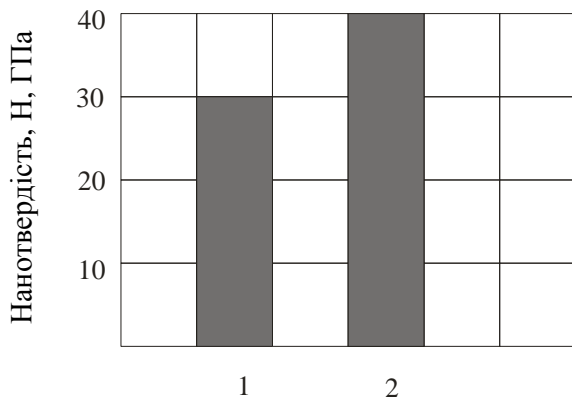
1 – безперервне обертання 1800 шарів;
2 – 2700 шарів безперервного обертання

Рисунок 6 – Гістограми нанотвердості при вакуумно-дуговому осадженні багатшарових наноструктурних $TiN-Mo_2N$ покриттів при струмі дузі $I_d = 100-170$ А, напрузі постійної на підкладці $U_{nn} = 40$ В, напрузі імпульсної на підкладці $U_{ni} = 2000$ В, тиску азоту $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Час напилювання 2 год



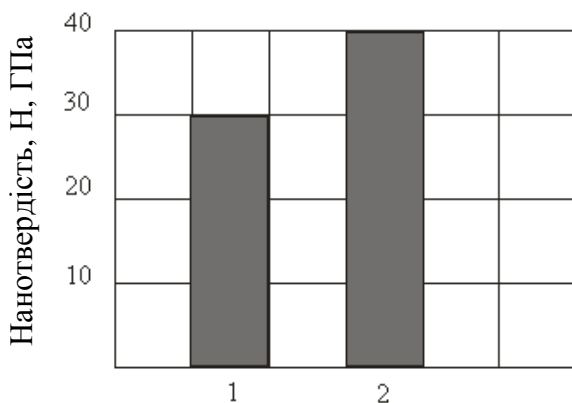
1 – тиску азоту $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.;
2 – тиску азоту $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.

Рисунок 7 – Гістограми нанотвердості при вакуумно-дуговому осадженні багатшарових наноструктурних $TiN-MoN$ покриттів при струмі дуги $I_d = 100-160$ А, напрузі постійної на підкладці $U_{nn} = 230$ В, U_{ni} – без імпульсів, 1800 шарів безперервного обертання. Час напилювання 2 год



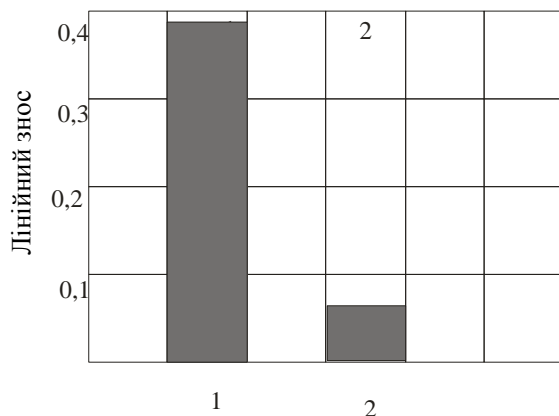
1 – тиску азоту $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.;
2 – тиску азоту $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

Рисунок 8 – Гістограми нанотвердості при вакуумно-дуговому осадженні багатшарових наноструктурних $TiN-MoN$ покриттів при струмі дуги $I_d = 105-100$ А, напрузі постійної на підкладці $U_{nn} = 230$ В, U_{ni} – без імпульсів, безперервному обертанні 1800 шарів. Час напилювання 2 год



1 – без імпульсів; 2 – напруга імпульсна на підкладці $U_{ni} = 2000$ В

Рисунок 9 – Гістограми нанотвердості при вакуумно-дуговому осадженні багатшарових наноструктурних $TiN-MoN$ покриттів при струмі дузі $I_d = 100-170$ А, напрузі постійної на підкладці $U_{nn} = 40$ В; тиску азоту $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Час напилювання 2 год



1 – сірий чавун без покриття; 2 – чавун після осадження багат шарових TiN-MoN покриттів

Рисунок 10 – Гістограми лінійного зношування за 5 годин при навантаженні 1000 кг/см²

Нанесення двошарового покриття на сірий чавун і супровідні його процеси привели до істотного підвищення зносостійкості.

Висновки.

1. Нанесення багат шарових TiN-MoN покриттів на сірий чавун створює на поверхні стискаючі напруження.
2. Максимальні значення нанотвердості й модуля Юнга при нанесенні Ti-Mo-N покриття спостерігаються в самій поверхні.
3. Лінійне зношування чавуну, на який нанесене Ti-Mo-N покриття, зменшується у 8 разів.
4. В однакових умовах нанесення покриття при безперервному обертанні зі збільшенням кількості шарів з 1800 до 2700 нанотвердість зростає на ~ 40 %.
5. При збільшенні вакууму при незмінності всіх інших параметрів нанесення покриття нанотвердість зростає на ~ 25 %.
6. Вакуумно-дугове осадження, проведене при напрузі імпульсній на підкладці $U_{ни}$, рівному 2000 В, забезпечує підвищення нанотвердості на 30 % у порівнянні з безімпульсним при всіх інших однакових умовах проведення експерименту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мацевитый Ю. М. На пути устойчивого развития научных исследований / Ю. М. Мацевитый // Проблемы машиностроения. – 2002. – Т. 5. – № 2. – С. 5–18.
2. Гринкевич К. Э. Некоторые положения структурно-динамической концепции трибосистемы и их практическая реализация / К. Э. Гринкевич // Трение и износ. – 2003. – № 3. – С. 344–350.
3. Биргер А. И. Остаточные напряжения / А. И. Биргер. – М. : Машгиз, 1993. – 232 с.
4. Коваленко А. Д. Термоупругость / А. Д. Коваленко. – К. : Вища школа, 1995. – 216 с.
5. Падалка В. Г. Опыт эксплуатации и повышения эффективности использования установок «Булат» / В. Г. Падалка, Г. Н. Гутник, А. А. Андреев и др. Предп. НАН Украины. Нац. научн. центр «Харьк. физ.-мех. ин-т», 1961. – М. : ЦНИИ-атоминформ, 1986. – 56 с.
6. Андреев А. А. Вакуумно-дуговое устройство и покрытие / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев // Библиотека ННЦ ХФТИ. – Х., 2005. – с. 238.
7. Suzuki M. Tribological performance of a sputtered Mo₂ S film in air N₂, O₂, H₂O environments at pressures from 10⁻⁵ Pa to 10⁵ Pa / M. Suzuki // Journal of society of Tribologists and Lubrication Engineers, 2001. – V. 57. – № 1. – P. 23–29.