

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ НАНЕСЕННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО НАНОКРИСТАЛІЧНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ

Глушкова Д.Б., Костіна Л.Л., Степанюк А.І.,
ХНАДУ

***Анотація.** Головною причиною руйнування поршневих кілець є зношування робочої поверхні. В роботі проведено дослідження багатошарового наноструктурного покриття, нанесеного на поверхню поршневих кілець, для підвищення їх зносостійкості. Покриття наносили вакуумно-дуговим методом на сірий чавун. Встановлено, що в поверхневому шарі утворюються стискаючі напруження, а твердість у приповерхневому шарі підвищується, що приводить до значного підвищення зносостійкості.*

***Ключові слова:** покриття, нанотвердість, зносостійкість, поршневі кільця.*

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 є реальним в гетерогенному сплаві.

Актуальною видається 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 і пластичності за 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 решіток, 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 у процесі вакуумно-дугового осадження, присвячений ряд робіт [3, 4].

Мета і постановка завдання

Метою роботи є підвищення зносостійкості поршневих кілець із сірого чавуну нанесенням вакуумно-дугового нанокристалічного покриття. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання: дослідження структури і властивостей багатошарового наноструктурного покриття, його лінійного зносу.

Вибір параметрів нанесення вакуумно-дугового нанокристалічного покриття на поршневі кільця із сірого чавуну

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

Як відомо, сірий чавун має добрі ливарні й антифрикційні властивості, є нечутливим до дефектів поверхні, добре гасить вібрації.

Хімічний склад сірого чавуну наведений у табл. 1.

Проведені в останні роки дослідження свідчать, що властивості багатокомпонентних і багатошарових покриттів вищі, ніж одношарових покриттів [5].

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

На рис. 1 показано схему установки для одержання багат шарових покриттів.

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

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 ВТ1-0. 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.

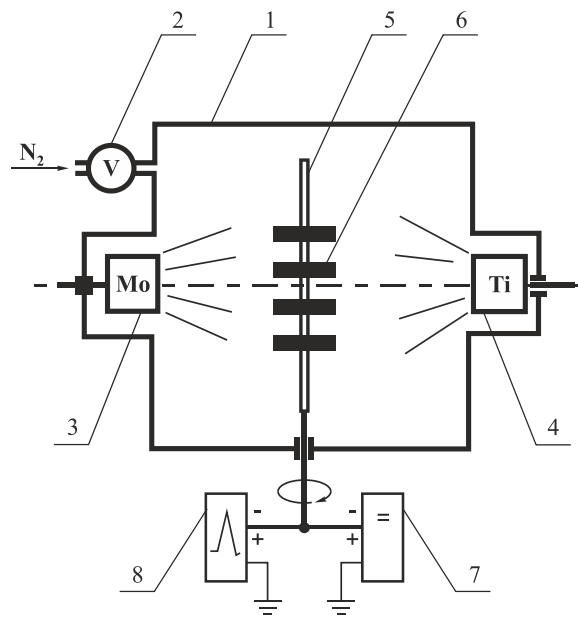


Рис. 1. Схема установки для нанесення багат шарових покриттів: 1 – вакуумна камера; 2 – система автоматичної підтримки тиску азоту; 3 – випарник молібдену; 4 – випарник титану; 5 – підкладкоутримувач; 6 – підкладка; 7 – джерело постійної напруги; 8 – генератор імпульсної напруги

Процедура охолодження багат шарових 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 хвилин.

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

Наноіндентування проводили пірамідною Берковича за навантаження 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.

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

На рис. 2 наведено графік розподілу нанотвердості на глибині 200 нм, з якого випливає, що нанотвердість зростає у незначній мірі.

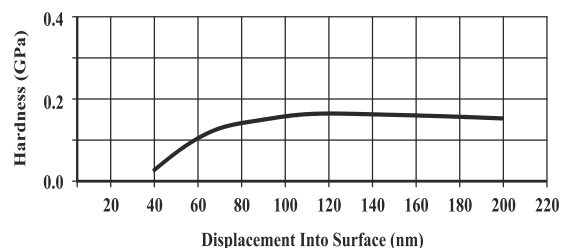


Рис. 2. Графік розподілу нанотвердості

Навантаження при цьому досягає максимального значення на глибині 200 нм (рис. 3).

Модуль Юнга має значення 250 ГПа.

Отримані залежності свідчать про те, що нанотвердість є максимальною в поверхневих шарах. Ця закономірність збігається з результатами, викладеними в роботах [6, 7].

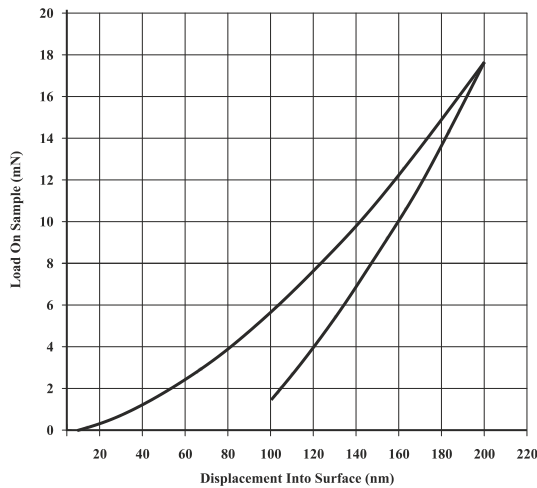


Рис. 3. Графік розподілу навантаження

Аналіз напружено-деформованого стану показав, що найбільш висока величина стискання відповідає глибині порядку 10 нм. Такий результат отриманий у випадку нанесення TiN-MoN покриття при струмі дуги $I_d = 100\text{--}170$ А, напрузі постійній на підкладці $U_{\text{пн}} = 40$ В, напрузі імпульсної на підкладці $U_{\text{пн}} = 2000$ 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.

Важливим фактором у формуванні залишкових напружень у покритті є текстура, яка спостерігалася при вивченні структури на електронному мікроскопі (рис. 4). Причиною залишкових напружень є вплив іонного бомбардування.

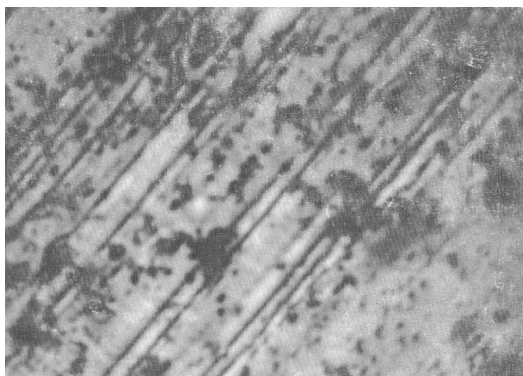


Рис. 4. Електронна світлина структури поверхнього шару, $\times 10000$

Дослідження структурного стану покриттів показало, що за товщини шару близько 2 нм не виявляються міжфазні границі й то-

му на дифракційних спектрах проявляється спектр, характерний для однофазного стану; й матеріал зміцнюється у незначній мірі. З появою другої фази твердість збільшується. При цьому з результатів вивчення покриттів на растровому мікроскопі випливає, що комірки на поверхні покриття виражені рельєфно, що можна пояснити процесами їх розпилення іонами молібдену й титану під час осадження. Під час вивчення шарів товщиною порядку 10 нм спостерігається формування двофазного структурного стану. Великий питомий обсяг займають міжфазні границі, що супроводжується збільшенням стискальних напружень. Це повинно приводити до підвищення твердості. Вивчення мікрофрактограм багатошарового покриття показало, що отримані сколи мають досить правильну форму, характерну для руйнування металу під дією напружень стискання. Дослідження шарів товщиною порядку 20 нм показало більш розмиту міжфазну границю, що веде до зменшення питомого внеску границь.

На рис. 5–8 подано гістограми, побудовані за результатами вимірювання нанотвердості при вакуумно-дуговому осадженні багатошарових наноструктурних TiN-MoN покриттів, отриманих за різних параметрів, що дозволяють встановити вплив кількості шарів безперервного обертання, тиску азоту, напруги імпульсної на підкладці на величину нанотвердості.

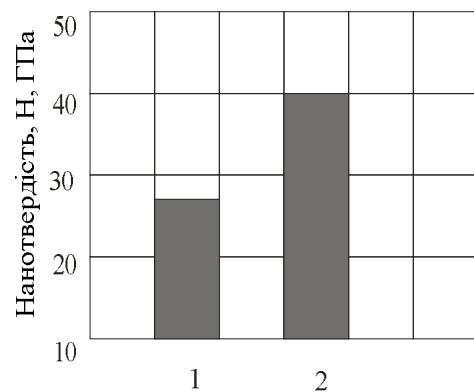


Рис. 5. Гістограми нанотвердості при вакуумно-дуговому осадженні багатошарових наноструктурних TiN-MoN покриттів при струмі дуги $I_d = 100\text{--}170$ А, напрузі постійній на підкладці $U_{\text{пн}} = 40$ В, напрузі імпульсній на підкладці $U_{\text{пн}} = 2000$ В, тиску азоту $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.: 1 – безперервне обертання 1800 шарів; 2 – 2700 шарів безперервного обертання. Час напилування – 2 години

Досліджували кількість шарів 1800 та 2700; струм дуги змінювали від 100 до 170 А; тиск азоту задавали $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.; напругу імпульсну на підкладці – до 2000 В.

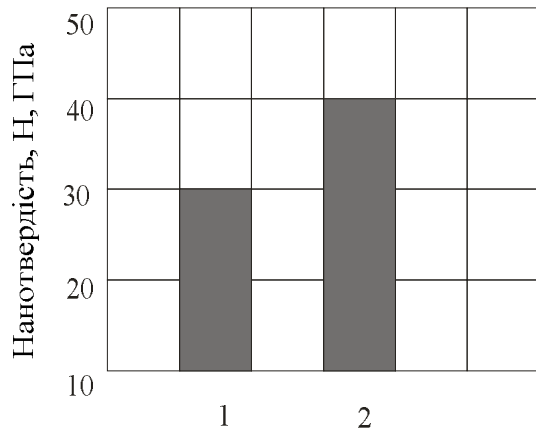


Рис. 6. Гістограми нанотвердості при вакуумно-дуговому осадженні багат шарових наноструктурних TiN-MoN покриттів при струмі дуги $I_d = 100-160$ А, напрузі постійній на підкладці $U_{ми} = 230$ В, $U_{ми}$ – без імпульсів, 1800 шарів безперервного обертання. Час напилювання – 2 години, 1 – тиску азоту $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; 2 – тиску азоту $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст

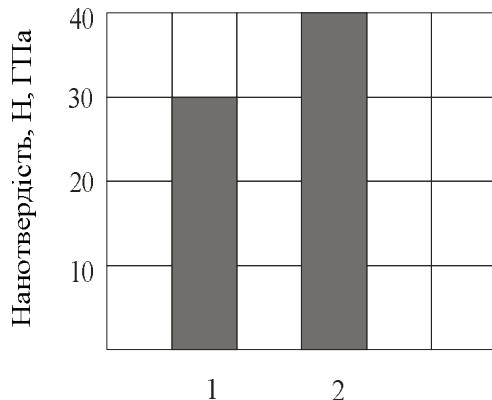


Рис. 7. Гістограми нанотвердості при вакуумно-дуговому осадженні багат шарових наноструктурних TiN-MoN покриттів при струмі дуги $I_d = 105-100$ А, напрузі постійній на підкладці $U_{ми} = 230$ В, $U_{ми}$ – без імпульсів, безперервному обертанні 1800 шарів. Час напилювання – 2 години, 1 – тиску азоту $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; 2 – тиску азоту $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст

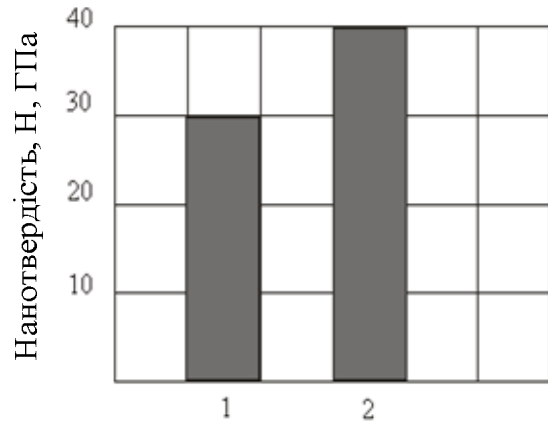


Рис. 8. Гістограми нанотвердості при вакуумно-дуговому осадженні багат шарових наноструктурних TiN-MoN покриттів при струмі дуги $I_d = 100-170$ А, напрузі постійній на підкладці $U_{ми} = 40$ В; тиску азоту $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Час напилювання – 2 години, 1 – без імпульсів; 2 – напруга імпульсна на підкладці $U_{ми} = 2000$ В

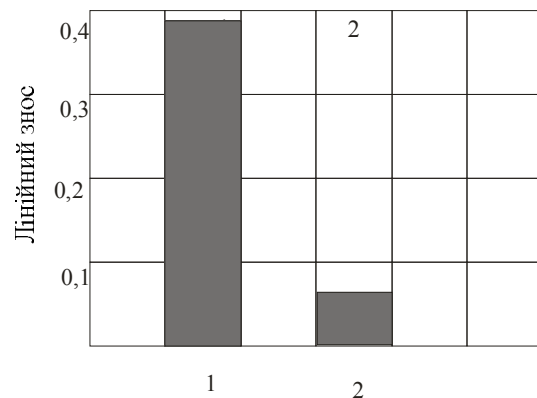


Рис. 9. Гістограми лінійного зношування за 5 годин за навантаження 1000 кг/см^2 : 1 – сірий чавун без покриття; 2 – чавун після осадження багат шарових TiN-MoN покриттів

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

Висновки

1. Нанесення багат шарових TiN-MoN покриттів на сірий чавун створює на поверхні стискальні напруження.
2. Максимальні значення нанотвердості у процесі 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 майже на 40 %.

5. За збільшення вакууму за незмінності всіх інших параметрів нанесення покриття нанотвердість зростає на 25 %.

6. Вакуумно-дугове осадження, проведене при імпульсній напрузі на підкладці $U_{\text{ни}}$, рівній 2000 В, забезпечує підвищення нанотвердості на 30 %, у порівнянні з безімпульсним, за всіх інших однакових умов 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 «Буллат» / 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 НИЦ ХФТИ. – Х., 2005. – 238 с.
7. Suzuki M. Tribological performance of a sputtered Mo₂ & 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.
4. Kovalenko, A.D. (1995). Thermoelasticity. Kyiv: Higher school, 216.
5. Padalka, V.G., Gutnik, G.N., Andreev, A.A. and others of NAS of Ukraine (1961). Experience of exploitation and increasing the efficiency of the use of the plants "Bulat". National Scientific Center of "Kharkov Physic-Mechanical Institute", Moscow: CSII-atominform, 56.
6. Andreev, A.A., Sablev, L.P., Shulaev, V.M., Grigoriev, S.N. (2005). Vacuum-arc device and coating. Library of NSC Kharkov Physic-Mechanical Institute. 238.
7. Suzuki, M. (2001). Tribological performance of a sputtered Mo₂ & film in air N₂, O₂, H₂O environments at pressures from 10⁻⁵ Pa to 10⁵ Pa. Journal of society of Tribologists and Lubrication Engineers, 57. 1. 23–29.

References

1. Matseviyiy, U.M. (2002) [On the way of steady development of scientific researches. Problems of engineering industry. 5. 2. 5-18.
2. Grinkevich, K.E. (2003). Some positions of structure – dynamic conception of tribosystem and their practical realization. Friction and wear. 3. 344-350.
3. Birger, A.I. (1993). Residual stresses. Moscow: State Publishing House of Engineering. 232.

Глушкова Діана Борисівна – д.т.н., завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства, тел.: +38 097-481-15-93, di-ana@khadi.kharkov.ua

Костіна Людмила Леонідівна – к.т.н., доцент, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел.: +38 066-150-89-72, kostina4991@gmail.com

Степанюк Андрій Іванович – асистент, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел.: +38 097-525-85-13, Diox-id26@meta.ua

THE CHOICE OF PRECIPITATION PARAMETERS OF VACUUM-ARC NANOCRYSTALLINE COATING FOR INCREASING WEAR RESISTANCE OF PISTON RINGS

Hlushkova D., Kostina L., Stepanyuk A., KhNAHU

Abstract. The production of piston rings the main failure of which is wearing of working surfaces takes a considerable place during various parts producing. The wear resistance of metal is determined by combination of a structure, high hardness and plasticity, stability of mechanical properties, the high saturation and the uniform distribution of alloying elements. It has been investigated the influence of multi-layered vacuum-arc nanostructure coating on wear resistance of piston rings. The material on the multi-layered coating was applied by means of vacuum-arc method was the grey cast-iron. Multi-layered two-phase nanostructural coatings TiN-MoN were precipitated in the vacuum-arc plant «Bulat-6».

Nanoindentation was conducted by means of a pyramid of Berkovich at loading 0,5 H with loading and unloading executed automatically. Metallography researches were conducted by means of electronic microscope, study of the structural state of

coverages was performed on a scanning microscope. The quantity of residual stresses in near-surface layers was determined on the diffraktometr rentgenovskiy DRON-2 by means of procedure of multiplied inclined shootings in radiation of copper anode with graphite monochromator. The tests for wear resistance were performed on the plant SMTs-2.

Research of the structural state of coatings showed that at the layer thickness about 2 nm there is no interface border and that's why a spectrum is revealed on diffractive spectrums that is typical for monophasic state and material is hardened not much. The absence of detectability of the interphase boundary indicates the epitaxial growth of thin layers. The hardness increases at occurrence of the second phase.

In case of studying the layers of thickness about 10 nm it is observed the forming of two-phase structural state. The interfaces occupy a large specific volume, that is accompanied by the increasing of compressive stresses. It must result in hardening. Coatings over 20nm thick are also biphasic and very hard. Increasing the compressive stresses and increasing the hardness in the near-surface layer leads to a significant increase in wear resistance. Linear wear of cast-iron sprayed with coating Ti-Mo-N decreases in 8 times.

Key words: vacuum-arc coating, nanohardness, nanostructural coatings, wear resistance, piston rings.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ

Глушкова Д.Б., Костина Л.Л., Степанюк А.И.,
ХНАДУ

Аннотация. Основной причиной выхода из строя поршневых колец является изнашивание рабочих поверхностей. В работе проведено исследование многослойного наноструктурного покрытия, нанесенного на поверхность поршневых колец для повышения их износостойкости. Покрытие наносили вакуумно-дуговым методом на серый чугун. Установлено, что в поверхностном слое создаются сжимающие напряжения, а твердость в приповерхностном слое повышается, что приводит к значительному повышению износостойкости.

Ключевые слова: покрытие, нанотвердость, износостойкость, поршневые кольца.