

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛУНОЧНИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО ТЕРТЯ

**Марчук В.Є., к.т.н., доц. Радько О.В., к.т.н.**

*Національний авіаційний університет*

**Ляшенко Б.А., д.т.н, проф.**

*Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України*

**Градиський Ю.О., к.т.н, доц.**

*Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка*

*Досліджена зносостійкість луночних покриттів в умовах граничного тертя. Встановлено, що зносостійкість конструкційної сталі 30ХГСА з луночними покриттями у 1,9-3,1 рази вище, ніж зносостійкість цієї ж сталі без покриття. Зміцнення поверхні луночного покриття іонним азотуванням додатково збільшує зносостійкість майже у два рази. Досліджено структуру і фазовий склад луночних покриттів та мікротвердість поверхневих шарів*

**Постановка проблеми.** В сучасному машинобудуванні задача покращення експлуатаційних властивостей матеріалів, що працюють в умовах тертя та зношування, значною мірою пов'язана з розробкою нових технологічних рішень щодо поверхневого зміцнення деталей. Найбільш гостро ця проблема стоїть в тих галузях, де в багатьох випадках традиційні матеріали і технології вичерпали свої можливості щодо покращення трибо технічних властивостей.

Одним з перспективних рішень, які можуть вирішити проблеми надійності і довговічності вузлів і механізмів в екстремальних умовах експлуатації, а також створити необхідні умови змащування при граничному терті є застосування дискретних поверхонь у вигляді луночних покриттів.

**Аналіз останніх досліджень.** Механізм зношування трибовузлів в умовах граничного тертя складний. Забезпечення надійності роботи вузлів в таких умовах полягає, в першу чергу, в удосконаленні механізму змащування поверхонь. При граничному терті навантаження сприймається не тільки мастильним шаром, але і окремими металевими виступами в місцях руйнування плівки. Швидкість відновлення мастильної граничної плівки залежить від механізму подачі мастила на поверхню тертя, обумовленого дифузією, змащуваністю поверхні і розтіканням рідкого мастила. Велике значення в цих процесах відіграє мікротопографія поверхні тертя і особливо її шорсткість. Від шорсткості залежить тривалість процесу формування і руйнування плівки, що може призвести до «плівкового голодування». Поняття «плівкове голодування» визначає процес граничного тертя, коли інтенсивність відновлення мастильної

плівки в місцях її розриву є нижчою за інтенсивність руйнування. Плівка в місцях розриву не встигає відновлюватися, і на поверхнях контактуючих тіл створюються ювенільні ділянки. Механізм «плівкового голодування» залежить від мікрозаглибин на поверхні тертя, які повинні рухатися одна за одною [1].

Механізм граничного тертя поверхонь з мікрозаглибинами залежить від багатьох факторів, є саморегулюючим і сьогодні найменш дослідженим. Процеси тертя та зношування на поверхнях з мікрозаглибинами протікають на фактичній площині контакту між мікрозаглибинами. Головна роль мікрозаглибин на поверхні полягає в подачі мастила в зону контакту з метою відновлення змащування після його видалення. Крім того, мікрозаглибини виконують функції мікрокапканів для абразивних часток як в умовах тертя з мастильним матеріалом, так і без нього. Таке явище, як гідродинамічний ефект, який відбувається в процесі тертя та зношування поверхонь (в західній літературі його ще називають ефектом мікрогідродинамічних опор мікрозаглибин), практично мало досліджений.

Мікрозаглибини мають різні геометричні форми (лунки, канавки) та топографію. Вони можуть формуватися природно у вигляді нерівностей на поверхні тертя (сформована шорсткість після припрацювання) або штучно (із застосуванням різних технологічних методів). Найбільший інтерес представляють луночні покриття, які формуються шляхом механічного (віброударного) створення мікрозаглибин (лунок) з заданою текстурою [2, 3]. Вплив форми, розмірів, профілю, розташування мікрозаглибин на триботехнічні характеристики в умовах граничного тертя вивчено недостатньо. Це пояснюється тим, що в промисловості існуючі способи обробки не можуть забезпечити можливість варіювання формою і розташуванням мікрозаглибин.

Застосування дискретних поверхонь в різних галузях промисловості також стримується відсутністю необхідних даних щодо триботехнічних властивостей дискретних поверхонь. В опублікованих роботах більшість залежностей між триботехнічними властивостями поверхонь і параметрами мікрорельєфу носять нелінійний характер і ділянки оптимуму мають різні значення. Це потребує проведення ретельних досліджень з використанням методів багатфакторного планування випробувань.

**Мета.** Вивчення процесів зношування луночних покриттів в умовах граничного тертя та дослідження оптимального розташування дискретних ділянок на триботехнічні властивості трибосполучення.

**Методика експериментальних досліджень.** Дослідження триботехнічних характеристик дискретних поверхонь проводили відповідно до стандарту [4], який встановлює метод дослідження матеріалів при терті з обмеженою подачею мастильного матеріалу. В якості матеріалу зразка використовувалась сталь 45 загартована, контрзразка – сталь 30ХГСА загартована. Лунки формували на робочій поверхні контрзразка за допомогою спеціального пристосування [2]. Луночне покриття додатково піддавалось зміцненню методом імпульсного газотермоциклічного іонного азотування (ГТЦІА) [3, 5].

Для випробувань дискретних поверхонь в умовах граничного тертя використовувалася машина тертя М-22М. Контакт пари тертя відбувався за схемою “диск–колодка”. В якості мастильного середовища застосовували індустриальне мастило И-20 відповідно до ГОСТ 20799–75. Для забезпечення режиму граничного тертя застосовували мастильний пристрій відповідно до рекомендацій ГОСТ 26614–85.

Фазовий склад азотованих шарів визначали за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-4-13С з фокусуванням по Брегу – Brentano у Fe-характеристичному випромінюванні. Дифракційні максимуми реєструвались в дискретному режимі з кроком  $0,1^\circ$ , час експозиції в точці – 2 с.

Фотографування зображень структур проводилося за допомогою металографічного мікроскопу Neophot та скануючого електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЕММА-101А при напрузі прискорення 30 кВ. Визначення хімічного складу проведено за допомогою систем енерго-дисперсійного аналізу (EDS) та хвильового рентгенівського мікроаналізу (WDS).

Мікротвердість вимірювалася за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М, кут між протилежними гранями алмазної пірамідки –  $136^\circ$ , навантаження – 0,98 Н, час витримування під навантаженням – 20 с, крок вимірювання по товщині зразка – 30...40 мкм. Визначали середнє значення мікротвердості за результатами п’яти вимірювань.

**Результати досліджень.** Дослідження триботехнічних характеристик дискретних поверхонь показали, що найбільшою зносостійкістю володіють зразки з луночними покриттями (30ХГСА+Л) як без, так і додатково зміцнених методом імпульсного ГТЦ ІА (30ХГСА+Л+А, рис. 1). Вони перевищують за зносостійкістю зразки з сталі 45 у 3,1–5,3 рази, сталі 30ХГСА (30ХГСА зак.) 1,9–3,25 рази, сталі 30ХГСА, поверхневий шар якої зміцнений методом імпульсного ГТЦ ІА (30ХГСА+А) у 1,3–2,3 рази.

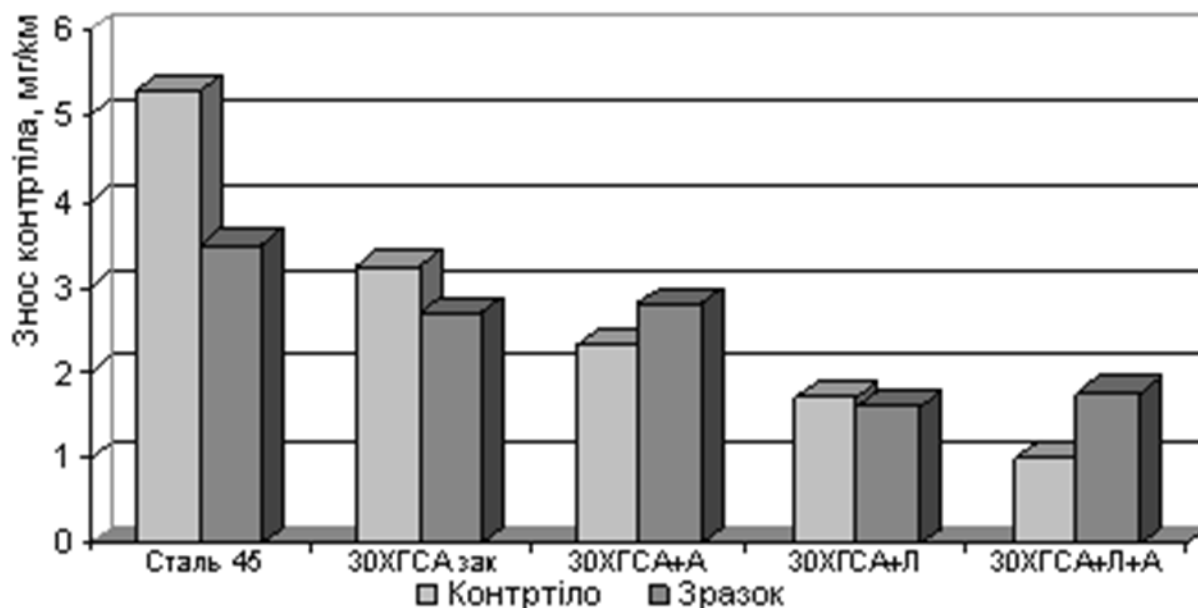


Рис. 1 – Величина зношування контртіла і зразка в умовах граничного тертя (шлях – 2000 м, швидкість ковзання 0,625 м/с, питоме навантаження 10,0 МПа, середовище – індустриальне масло И-20А)

Пошаровий рентгенофазовий аналіз азотованого шару (рис. 2) зміцнених ГТЦ ІА зразків показав наявність в ньому (в більшості випадків) двох зон: нітридної зони та дифузійного підшару – зони внутрішнього азотування.

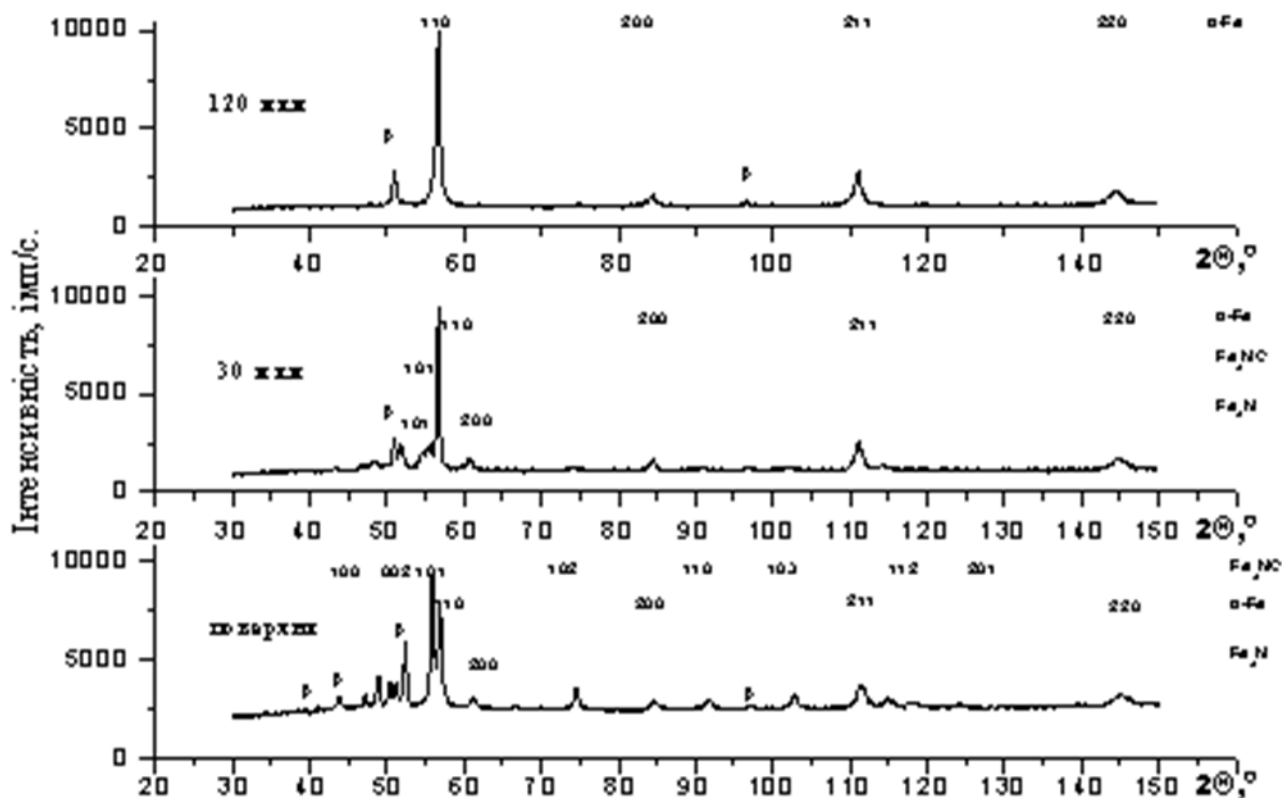
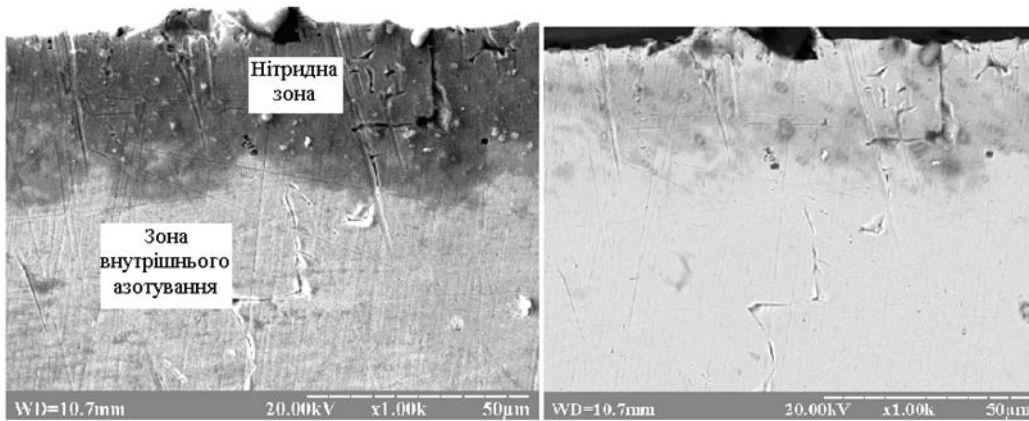


Рис. 2 – Дифрактограми зразка, зміцненого ГТЦ ІА (90%N<sub>2</sub> + 5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub> + 5%Ar; T = 500°C; P = 125 Па; t = 3 год.) з шарів різної глибини (поверхня, глибини 30 та 120 мкм)

Основою складовою нітридної зони є  $\epsilon$  – фаза (гексагональний карбонітрид Fe<sub>2.3</sub>(NC)), яка розташована безпосередньо на поверхні (рис. 3). Далі, в глибину нітридної зони, розташована  $\gamma'$  - фаза (гранецентрований нітрид Fe<sub>4</sub>N), яка має чисто нітридний характер через погану розчинність в цій фазі вуглецю. Зона внутрішнього азотування складається з  $\alpha$  - твердого розчину (об'ємноцентрований азотистий ферит), який спостерігається аж до виходу на матрицю. Глибина нітридної зони складає 5...12 мкм, загальна глибина дифузійного шару – 150...300 мкм (залежно від режиму обробки). Перехід від азотованого шару до шарів, що пролягають нижче, плавний, що є однією з основних вимог до азотованого шару.

Така структура підтверджується отриманим розподілом вуглецю та азоту в приповерхневих шарах зміцнених ГТЦ ІА зразків (рис. 4). З графіку видно, що концентрація вуглецю на поверхні складає близько 2 % ат. і зменшується до мінімальних значень на глибині порядку 10...12 мкм, що пояснює утворення в нітридній зоні карбонітридної  $\epsilon$  – фази за рахунок інтенсивної дифузії вуглецю від основи до поверхні. Концентрація ж азоту на глибині 10 мкм сягає значення 8 %, що відповідає  $\epsilon$  – фазі, далі вона зменшується до значень відповідно  $\gamma'$  - фази та  $\alpha$  - твердого розчину.



а

б

Рис. 3 – Мікроструктури поперечного розрізу зразків після імпульсного ГТЦ ІА:

а - загальний вигляд; б - контрастний знімок

Відомо, що за опір зношуванню відповідають в першу чергу будова та якість нітридного шару, в той час, як опір механічним навантаженням (статичним, згину, знакозмінним, ударним тощо) визначається структурою зони внутрішнього азотування. Саме наявність в нітридній зоні значної кількості  $\epsilon$ -фази пояснює підвищення зносостійкості зміцнених зразків, адже добре відомим є позитивний вплив високої твердості карбонітриду  $Fe_{2-3}(NC)$  на зносостійкість.

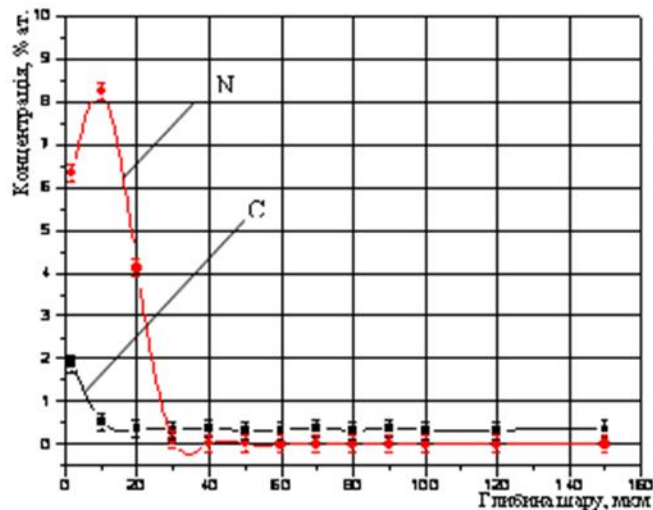


Рис. 4 – Концентраційний розподіл вуглецю та азоту в приповерхневих шарах зразка, зміцненого ГТЦ ІА ( $90\%N_2 + 5\%C_3H_8 + 5\%Ar$ ;  $T = 500^\circ C$ ;  $P = 125$  Па;  $t = 3$  год.)

Насичення дискретного покриття азотом призводить до зростання мікротвердості поверхневих шарів. Дослідження мікротвердості зміцнених поверхневих шарів виявили зростання її значень до 10750 МПа на поверхні (залежно від режимів обробки) та поступове зменшення до 3600 МПа (мікротвердості матриці) (рис. 5) на границі переходу дифузійного шару у вихідну матрицю матеріалу (на глибині близько 200 мкм). Для легованих сталей, представником яких є 30ХГСА, таке підвищення мікротвердості можна

пояснити утворенням твердих нітридів нітридоутворюючими елементами в процесі азотування.

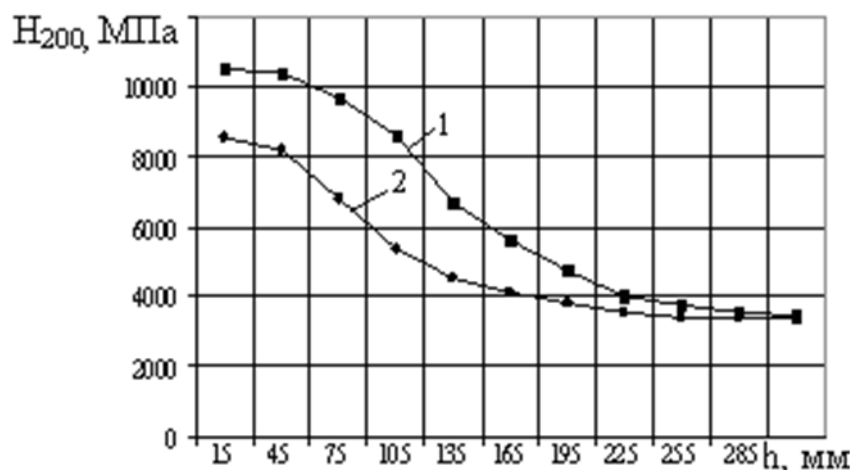


Рис. 5 – Зміна мікротвердості дискретної поверхні по товщині азотованого шару: 1 – ТО + ГТЦ ІА (80%N<sub>2</sub> + 5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub> + 5%Ar; Т = 600°С; Р = 175 Па; t = 2,5 год.); 2 – ГТЦ ІА (80%N<sub>2</sub> + 5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub> + 5%Ar; Т = 600°С; Р = 175 Па; t = 2,5 год.)

Висока твердість азотованих шарів у покриттів без лунок (30ХГСА+А) і з лунками (30ХГСА+Л+А) призводить до підвищеного зношування зразків порівняно з іншими трибосполученнями (див. рис. 1). Це обумовлено високою твердістю поверхневого шару азотованих шарів в порівнянні зі сталлю 45.

#### **Висновки.**

1. Аналіз триботехнічних характеристик дискретних покриттів показав, що найбільшою зносостійкістю володіють луночні покриття додатково зміцнені іонним азотуванням, які перевищують за зносостійкістю зразки зі сталі 45 у 3,1–5,3 рази, сталі 30ХГСА (30ХГСА зак.) 1,9–3,25 рази, сталі 30ХГСА, поверхневий шар якої зміцнений методом імпульсного ГТЦ ІА (30ХГСА+А) у 1,3–2,3 рази.

2. Насичення луночного покриття азотом призводить до зростання мікротвердості поверхневих шарів до 10750 МПа на поверхні (залежно від режимів обробки) та поступове зменшення до 3600 МПа на границі переходу дифузійного шару у вихідну матрицю матеріалу. Підвищення мікротвердості обумовлено утворенням твердих нітридів нітридоутворюючими елементами в процесі азотування.

3. Іонне азотування має важливу перевагу перед типовим процесом в характері розподілу мікротвердості по товщині шару. При насиченні в азотованій плазмі не відбувається зниження твердості безпосередньо під нітридною зоною, характерного для звичайного насичення в аміаку, тобто спостерігається плавніше зниження твердості по товщині дифузійної зони.

#### **Список використаних джерел**

1. Гитис Н.В. О роли микрогеометрии в развитии атермического заедания при граничной смазке / Гитис Н.В. // Машиноведение. – 1982. – №1. – С. 86–91.

2. Пат. 13762 Україна, МПК (06) F01L 1/20, F01L 1/46. Пристрій для утворення на плоскій поверхні тертя рельєфу заглибин, що утримують мастильні матеріали / Марчук В.Є., Шульга І.Ф., Шульга О.І., Плюснін О.Є.; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № u200509981; заявл. 24.10.2005; опубл. 17.04.2006. Бюл. № 4.
3. Пат. 44643 Україна, F01L 1/20 C23C 8/02. Спосіб отримання рельєфних зносостійких азотованих шарів сталевих деталей / Марчук В.Є., Шульга І.Ф., Ляшенко Б.А., Цибаньов Г.В., Рутковський А.В., Калініченко В.В.; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – № u200904236 ; заявл. 29.04.2009; опубл. 12.10.2009. Бюл. № 19.
4. Матеріали антифрикційні порошкові. Метод определения триботехнических характеристик: ГОСТ 26614-85. - М.: Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.
5. Пат. 10014 Україна, МПК (2006) C23C 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / Ляшенко Б.А., Рутковський А.В., Мірненко В.І, Радько О.В.; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. — № 19782; заявл. 19.09.06; опубл. 15.12.06. Бюл. № 12.

#### **Аннотація**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛУНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ**

Марчук В.Е., Радько О.В., Ляшенко Б.А., Градыский Ю.А.

*Исследована износостойкость луночных покрытий в условиях граничного трения. Установлено, что износостойкость конструкционной стали 30ХГСА с луночными покрытиями в 1,9–3,1 раза выше, чем износостойкость этой же стали без покрытия. Упрочнение поверхности луночного покрытия ионным азотированием дополнительно увеличивает износостойкость почти в два раза. Исследовано структуру и фазовый состав луночных покрытий и микротвердость поверхностных слоев*

#### **Abstract**

### **INVESTIGATION OF WEAR RESISTANCE COATINGS HOLE IN BOUNDARY FRICTION**

V. Marchuk, O. Radko, B. Lyashenko, Y. Gradyskiy

*Investigated the wear resistance of coatings hole courses in boundary friction. Established that the wear resistance of structural steel 30HGSA hole course covers in 1,9-3,1 times higher than the endurance of the same uncoated steel. Surface hardening by ion nitriding hole cover further increases the wear resistance is almost doubled. The structure and phase composition of coatings hole courses, and microhardness of surface layers*