

УДК 621.787:620.178.162

*І.В. ГУРЕЙ*, д-р техн. наук, Львів, Україна, Жешув, Польща

*В.І. ГУРЕЙ*, канд. техн. наук,

*П.Р. ДМИТЕРКО*, Львів, Україна

### **ВПЛИВ НАНОКРИСТАЛІЧНОГО ЗМІЦНЕНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СІРОГО ЧАВУНУ ПРИ ТЕРТІ З ГРАНИЧНИМ МАЩЕННЯМ**

Показано, що фрикційне зміцнення суттєво підвищує зносостійкість пари чавун - чавун СЧ 20 при терті ковзанням з граничним мащенням. Так, при терті з граничним мащенням пари чавун - чавун СЧ 20 після фрикційного зміцнення інструментом з переривчастою робочою поверхнею величина зношування кілець зменшилася майже у 8 разів, а вкладок - у 6,5 разів у порівнянні з незміцненою парою тертя. При цьому зміцнювали лише одну деталь. Незміцнена пара тертя працездатна лише при питомому навантаженні до 2 МПа, зміцнена пара нормально працює і при 6 МПа.

Показано, что фрикционное упрочнение существенно повышает износостойкость пары чугуна - чугуна СЧ 20 при трении скольжения с граничной смазкой. Так, при трении с граничной смазкой пары чугуна - чугуна СЧ 20 после фрикционного упрочнения инструментом с прерывистой рабочей поверхностью величина изнашивания колец уменьшилась почти в 8,0 раз, а вкладышей - в 6,4 раза по сравнению с неупрочненной парой трения. При этом упрочняли только одну деталь. Неупрочненная пара трения работоспособна только при удельной нагрузке до 2 МПа, упрочненная пара нормально работает и при 6 МПа.

It is shown, that the friction hardening essentially increases durability of grey cast iron SCh 20 under the friction with boundary lubrication. Thus, under friction with boundary lubrication of grey cast iron and grey cast iron SCh 20 couple the rings wear decrease in 8.0 times and the shells in 6.4 times after friction hardening by tool with intermittent work surface in comparison with non-hardening one. Only one part of the couple was hardened. Non-hardening couple of friction is workable for unit load 2 MPa, hardening couple work normally for 6 MPa.

Забезпечення довговічності деталей, яка значною мірою визначається якісним станом поверхневого шару, є актуальною задачею

сучасного машинобудування. При виготовленні деталей машин необхідно забезпечити оптимальні показники стереометрії поверхні та якості поверхневого шару, зокрема шорсткість, хвилястість, макро- і мікроструктуру матеріалу, твердість, величину і знак залишкових макронапружень тощо. Великий інтерес представляють нові технології обробки металевих поверхонь, які полягають у створенні нанокристалічної структури у поверхневих шарах. Створення такої структури шляхом керованої зміни розмірів зерен у нанометричному діапазоні (менше 100 нм) є потужним засобом конструювання нових функціональних матеріалів з унікальними властивостями і експлуатаційними характеристиками. Дослідження нанокристалічних матеріалів показали, що багато їх властивостей (вища границя міцності та текучості, більший опір зношуванню та втомному руйнуванню і інші) суттєво відрізняються від властивостей відповідних великокристалічних матеріалів, що обумовлено їх специфічною мікроструктурою. Створення масивних нанокристалічних матеріалів пов'язане зі значними технологічними труднощами [1, 2, 3, 4].

Новим перспективним напрямком отримання матеріалів з високою міцністю є формування метастабільних структур при високих швидкостях нагрівання й охолодження, що реалізуються при зміцненні методами з використанням висококонцентрованих джерел енергії. Характерною особливістю цих методів є дія з великими швидкостями високих питомих енергій на відносно малі об'єми металу і наступне їх швидке охолодження. До таких методів відноситься лазерна, електронно-променева, іонно-променева, іонно-плазмова, фрикційна та інші обробки [1, 2, 4, 5]. Структурно-фазові зміни, що проходять у процесі цих обробок суттєво залежить від хімічного складу і вихідної термообробки сталі. У загальному випадку вони характеризуються формуванням двох якісно різних структурних зон - зони вторинного гартування або так званого слаботравимого білого (нанокристалічного) шару і зони підвищеної травимості або зони термічного впливу зі структурою високошвидкісного відпуску.

Під час фрикційного зміцнення висококонцентрований потік енергії утворюється за рахунок високошвидкісного тертя зміцнювального інструменту-диску по оброблюваній деталі. При цьому у поверхневих

шарах металу проходить швидкісний нагрів до температур вище точки фазових перетворень ( $A_{c3}$ ), одночасне швидкісне зсувне деформування та наступне швидкісне охолодження. Для збільшення зсувного деформування поверхневого шару у зоні контакту інструмент-деталь на робочій поверхні інструменту були нарізані поперечні пази. Ширину пазу вибирали з умови повного розвантаження зони контакту інструмент-деталь. Під час входження у контакт чергової гладкої частини інструменту проходить додаткове ударне навантаження зони контакту. Зона контакту циклічно нагрівається і охолоджується та на неї, крім зсувного деформування, додатково діють ударні навантаження. Усе це сприяє формуванню зміцненого шару та подрібнення його структури. У поверхневому шарі деталі утворюється специфічний структурно-напружений стан металу – білий (нанокристалічного) шар, який представляє собою дрібноголковий мартенсит, карбіди високої дисперсності і залишковий аустеніт.

Метою роботи були дослідження впливу якості зміцненого шару на зносостійкість при терті ковзанням з граничним мащенням пари чавун СЧ 20 – чавун СЧ 20.

Дослідження зносостійкості при терті ковзанням з граничним мащенням проводили на установці УМТ-1 за схемою «кільце - кільце». Питоме навантаження змінювали в межах від 0,2 МПа до 1 МПа, швидкості ковзання від 0,5 м/с до 1,8 м/с, час випробувань пари тертя на одному етапі складав  $t = 110$  год. У зону тертя подавали оливу «Індустріальне-30А» по 15–20 крапель у хвилину.

Нерухомий зразок був з'єднаний з диференціальним давачем силосимірювача. Сигнал з нього записувався потенціометром типу КСП-4, що фіксував момент тертя за яким визначали коефіцієнт тертя. На цих зразках також кріпили термометричні перетворювачі з термоелектродами діаметром 0,2 мм, сигнали подавалися на триканальний потенціометр типу КСП-4, який фіксував інтегральну температуру на глибині 0,3–0,5 мм від поверхні тертя.

Перед початком випробувань усі пари тертя припрацьовували до стабілізації моменту тертя і прилягання спряжених поверхонь, яке оцінювали по наявності слідів тертя на площі не менше 90% робочої поверхні тертя кожного зразка.

За критерій величини зношування приймали втрату маси зразків після 20 год. тертя, яку визначали зважуванням на аналітичній вазі марки ВЛА-200Г-М з точністю  $\pm 0,2$  мг.

Фрикційне зміцнення (ФЗ) робочих поверхонь кілець проводили на модернізованому верстаті фірми *KNUTH* моделі *HFS 3063 VS*. Для збільшення інтенсивності зсувного деформування поверхневого шару металу в зоні контакту інструмент-деталь, на робочій поверхні інструмента нарізані поперечні пази (ПП), використовували також інструмент з гладкою робочою частиною (ГП).

Зразки досліджуваних пар тертя виготовляли з сірого чавуну СЧ 20 після штучного старіння. Зміцнювали робочі поверхні тільки рухомих зразків-кілець, нерухомі зразки були тільки шліфовані. При зміцненні обох тіл пари тертя ефект підвищення зносостійкості нівелюється. Для порівняння використовували незміцнену пару тертя.

Досліди показали, що фрикційне зміцнення інструментом як з гладкою так і з переривчастою (нарізаними поперечними пазами) робочою поверхнею значно підвищує зносостійкість пари тертя чавун-чавун СЧ 20. Так, при терті чавунних кілець зміцнених інструментом як з гладкою робочою частиною, що працювали у парі з незміцненими (нерухомими) зразками при питомому навантаженні 2 МПа, величина зношування їх зменшилася майже у 5 разів, а нерухомими – у 4 рази. Після зміцнення інструментом з переривчастою робочою частиною величина зношування рухомих зразків зменшилася майже у 8 разів, а нерухомих – у 6,5 разів у порівнянні з незміцненою парою тертя (рис. 1).

Збільшення питомого навантаження приводить до підвищення інтенсивності зношування. Найбільше інтенсивності зношування зростає при збільшенні питомого навантаження до 0,75 МПа. Подальше зростання питомого навантаження до 2 МПа приводить до часткового зменшення інтенсивності зношування. При цих умовах тертя, в основному, проходить окислювальний процес зношування. При збільшенні питомих навантажень більше 2 МПа переважаючим видом зношування для незміцненої шліфованої пари є схоплювання. При терті незміцненої пари з питомим навантаженням 4,5 МПа через 4-5 год. відбувається різке зростання

температури, руйнування мастильної плівки, приводить інтенсивне схоплювання, з'являються подряпини та починається патологічне

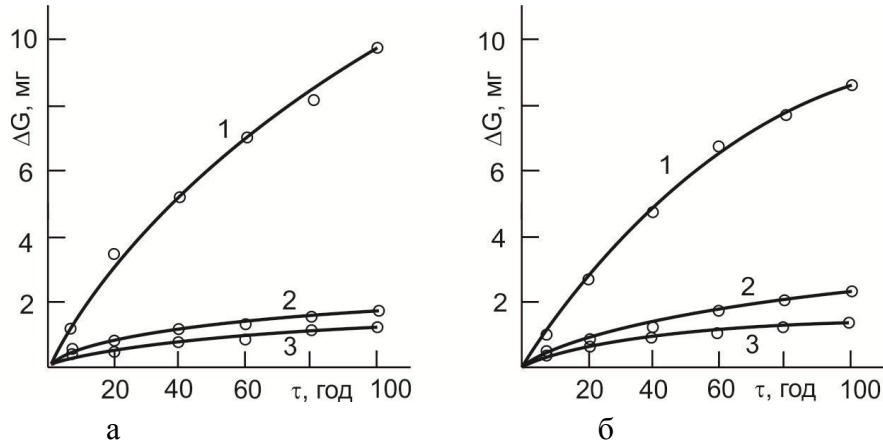


Рисунок 1 – Кінетика зношування пари чавун СЧ 20 – чавун СЧ 20 (а – рухомий зразок, б – нерухомий зразок) ( $P = 2,0$  МПа;  $V = 0,9$  м/с):  
1 – ЕШ; 2 – ФЗ, ГП; 3 – ФЗ, ПП

зношування. Пара тертя стає непрацездатною (рис. 2). Збільшення питомого навантаження у 6 разів від 0,75 МПа до 4,5 МПа привело до збільшення інтенсивності зношування зміцнених кілець тільки у 1,8 – 2,3 разів, а незміцнених, які працювали з ними у парі – у 2,6 – 3,3 рази.

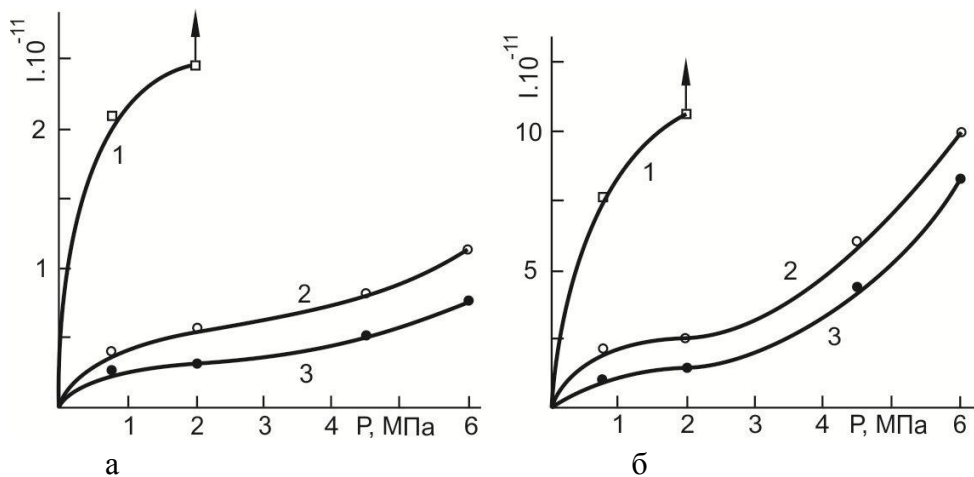


Рисунок 2 – Вплив питомого навантаження на зношування пари СЧ 20 – чавун СЧ 20 (а – рухомий зразок, б – нерухомий зразок) ( $V = 0,9$  м/с): 1 – ЕШ; 2 – ФЗ, ГП; 3 – ФЗ, ПП

Як показали досліді, білий шар значно впливає на температуру, яка виникає в зоні тертя (рис. 3). У початковий період тертя температура різко зростає і досягає максимального значення. Збільшення температури в зоні тертя сприяє утворенню на поверхні тертя деталей якісних вторинних структур. Утворені вторинні структури збільшують площу контакту і понижують фактичне питоме навантаження, що приводить до поступового зниження температури до встановленого значення.

Збільшення питомого навантаження приводить до інтенсивного росту температури в зоні тертя (рис. 4а). Значно менше підвищення температури зі збільшенням питомого навантаження спостерігається на зміцнених зразках. Так, при терті зразків у діапазоні навантаження від 0,75 до 4,5 МПа відбувається нормальний окислювальний процес тертя. Збільшення питомого навантаження вище 4,5 МПа приводить до різкого підвищення температури.

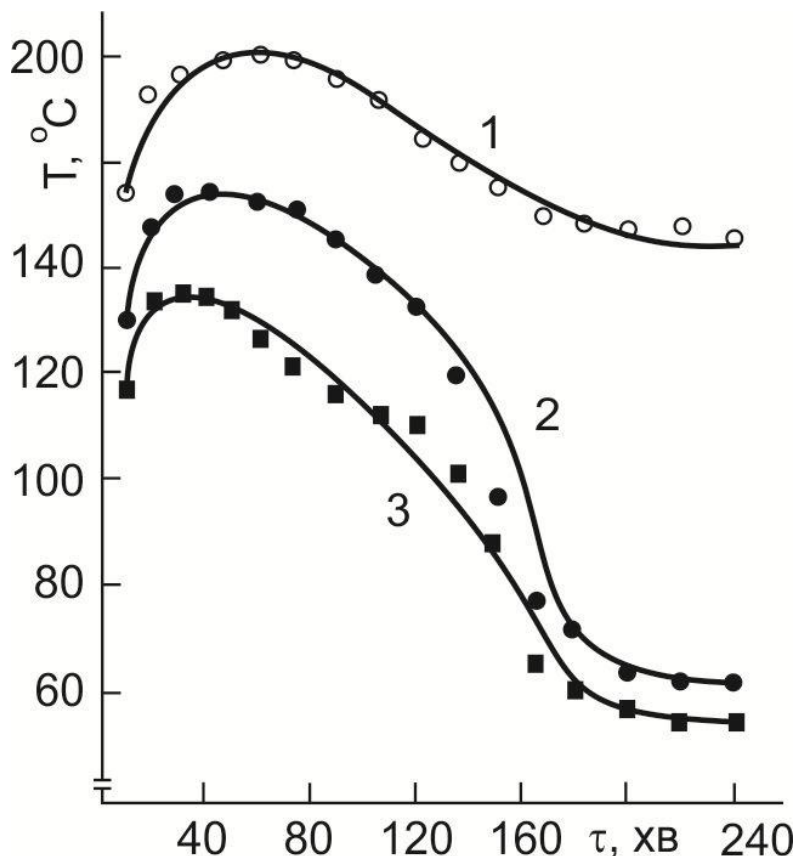
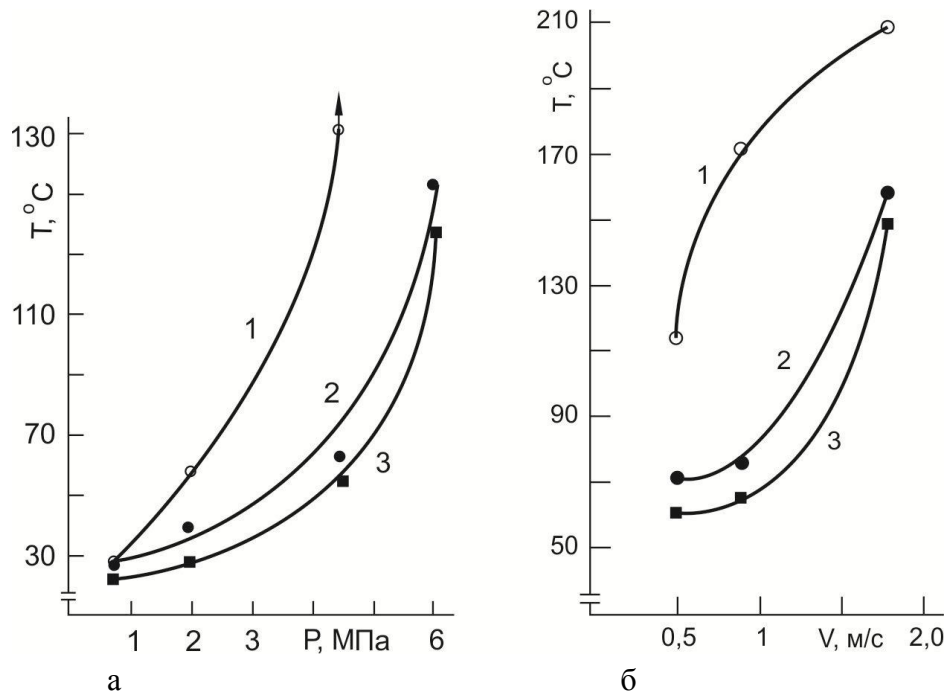


Рисунок 3 – Кінетика температури в зоні контакту пари чавун СЧ 20 - чавун СЧ 20 ( $P = 4,5$  МПа;  $V = 0,9$  м/с): 1 – ЕШ; 2 – ФЗ, ГП; 3 – ФЗ, ПП

Рисунок 4 – Вплив питомого навантаження ( $V = 0,9 \text{ МПа}$ )

(а) і швидкості ковзання ( $P = 4,5 \text{ МПа}$ ) (б) на температуру в зоні контакту пари чавун СЧ 20 – чавун СЧ 20: 1 – ЕШ; 2 – ФЗ, ГП; 3 – ФЗ, ПП

Збільшення швидкості ковзання також приводить до підвищення температури в зоні тертя. Збільшення швидкості від 0,5 до 0,9 м/с не значно підвищує температуру в зоні контакту. Зі збільшенням швидкості ковзання вище 0,9 м/с температура в зоні тертя різко зростає. Це свідчить про інтенсивну зміну фазового і структурного стану металу в зоні тертя. Мінімальна температура в зоні тертя при всіх досліджуваних швидкостях ковзання зареєстрована на зразках після фрикційного зміцнення інструментом з перервною робочою частиною, максимальна – на незміцнених, шліфованих.

Фрикційне зміцнення зразків значно знижує коефіцієнт тертя на всьому діапазоні досліджуваних швидкостей тертя та питомих навантажень. На початку тертя величина коефіцієнта тертя різко зростає і досягає максимального значення, далі починає різко зменшуватися і доходить до деякого встановленого значення (рис. 5). За цей час на поверхні пари тертя створюються сприятливі вторинні структури, які підвищують зносостійкість пари тертя, відбувається структурна пристосовуваність металу в зоні тертя.

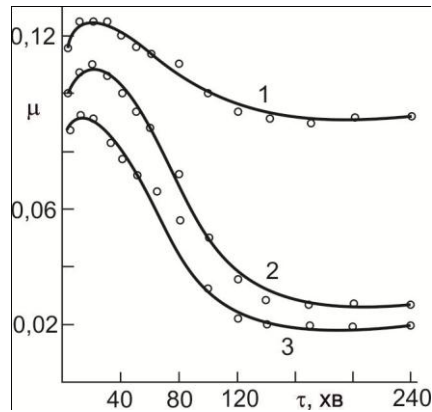


Рисунок 5 – Кінетика коефіцієнта тертя пари чавун СЧ 20 – чавун СЧ 20 ( $P = 4,5$  МПа;  $V = 0,9$  м/с): 1 – ЕШ; 2 – ФЗ, ГП; 3 – ФЗ, ПП

При терті незміцнених зразків коефіцієнт тертя збільшується з ростом питомого навантаження. Це свідчить про те, що зі збільшенням питомого навантаження стає інтенсивніший процес схоплювання, відбувається зривання мікронерівностей, утворюються дрібні тверді частинки, які потрапляючи в зону тертя, діють як абразиви і збільшують величину зношування пари тертя, а також і коефіцієнта тертя (рис. 6). При терті кілець після фрикційного зміцнення величина коефіцієнта тертя знижується. У даному випадку основним видом тертя є окислювальне. Поверхні тертя зразків гладкі і блискучі. Спостерігається намащування продуктів зношування на робочу поверхню вкладок, схоплювання не спостерігається.

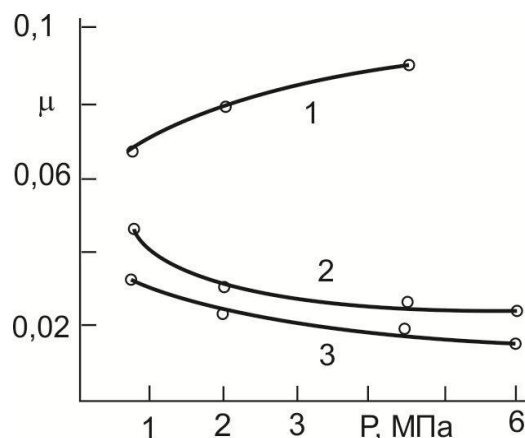


Рисунок 6 – Вплив питомого навантаження на коефіцієнт тертя пари чавун СЧ 20 – чавун СЧ 20 ( $V = 0,9$  м/с): 1 – ЕШ; 2 – ФЗ, ГП; 3 – ФЗ, ПП



Металографічні дослідження показали, після фрикційного зміцнення у поверхневих шарах зразків утворюється нанокристалічний зміцнений (білий) шар. Товщина білого шару після зміцнення інструментом з гладкою робочою частиною складала 90–110 мкм, а з переривчастою – 130–150 мкм. Мікротвердість його становила 6,5 ГПа та 8,6 ГПа відповідно при мікротвердості основного металу 2,0 ГПа. Розмір зерен зміцненого шару склав 40–80 нм після фрикційного зміцнення інструментом з гладкою робочою частиною і 20–50 нм – з переривчатою робочою поверхнею (з нарізаними поперечними пазами). Густина дислокацій у білому шарі становила  $(2,5–3,3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  проти  $(0,1–0,2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  основної структури. У залишковому аустеніті кількість вуглецю досягала 1,6–1,9 % проти 0,8 % – у основній структурі.

При терті з граничним мащенням на поверхнях тертя утворюються вторинні структури, аналогічно як при терті без мащення. Вони складаються, в основному, з оксидів заліза і легуючих елементів, а також зі сполук активних елементів мастила з атомами металу. Елементи, які утворюють з матеріалом основи сполуки, можуть дифундувати як з навколишнього середовища, так і з об'єму металу.

Мастильні матеріали відіграють роль екрана, який зменшує поступлення кисню в зону тертя, так як вміст кисню у них значно менший, аніж у повітрі. При терті з відносно низьким рівнем структурно-термічної активації цього кисню є достатньо для протікання складних трибохімічних реакцій. Коли тертя проходить у важких умовах, рівень структурної активації сильно зростає. Вмісту кисню, який адсорбується на ювенільних поверхнях може бути недостатньо для утворення якісних вторинних структур [6]. Для протікання складних трибохімічних реакцій на поверхнях тертя витрачається також енергія, накопичена у вигляді енергії дислокацій. Підвищена густина дислокацій активує поверхню, збільшує швидкість дифузії і хімічних реакцій, а також прискорює утворення оксидних плівок.

На площадках контакту, де виникають значна пластична деформація і висока локальна температура, проходить руйнування мастильної плівки з настанням адгезії ювенільних поверхонь зі схоплюванням металу на мікроділянках. Завдяки рухливості молекул мастильного матеріалу на

поверхнях тертя адсорбція протікає з великою швидкістю, що дозволяє відновлювати суцільність граничної плівки.

На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що фрикційне зміцнення з використанням інструменту з переривчастою робочою поверхнею деталей з сірого чавуну суттєво підвищує працездатність пар тертя при зношуванні з граничним мащенням у широкому діапазоні швидкостей тертя та питомого навантаження.

**Список використаних джерел:** 1. Шевченко С.В., Стеценко Н.Н. Наноструктурные состояния в металлах сплавах и интерметаллических соединениях: методы получения, структура, свойства // Успехи физ. мет., 2004. – Т. 5. – с. 219-255. 2. Васильев М.А., Прокопенко Г.И., Филатова В.С. Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации (обзор) // Успехи физ. мет., 2004. – Т. 5. – с. 345-399. 3. Gleiter H. Nanostuctured materials: basic concepts and microstructure. / Acta mater. – 2000. – V. 48. – P. 1-29. 4. Алымов М.И., Зеленский В.А. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. – М.: МИФИ, 2004. – 52 с. 5. Поверхностное упрочнение металлов / Ю.И. Бабей, Б.И. Бутаков, В.Г. Сысоев – К.: Наукова думка, 1995. – 256 с. 6. Поверхностная прочность материалов при трении /Б.И.Костецкий, И.Г.Носовский, А.К.Караулов и др. - К.: Техніка, 1976. - 296 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shevchenko S.V., Stecenko N.N. Nanostrukturnye sostojanija v metallah splavah i intermetallicheskih soedinenijah: metody poluchenija, struktura, svojstva // Uspehi fiz. met., 2004. – Т. 5. – с. 219-255. 2. Vasil'ev M.A., Prokopenko G.I., Filatova V.S. Nanokristalizacija metallicheskih poverhnostej metodami intensivnoj plasticheskoj deformacii (obzor) // Uspehi fiz. met., 2004. – Т. 5. – с. 345-399. 3. Gleiter H. Nanostuctured materials: basic concepts and microstructure. / Acta mater. – 2000. – V. 48. – P. 1-29. 4. Alymov M.I., Zelenskij V.A. Metody poluchenija i fiziko-mehaničeskie svojstva ob#emnyh nanokristallicheskih materialov. – М.: MIFI, 2004. – 52 s. 5. Poverhnostnoe uprochnenie metallov / Ju.I. Babej, B.I. Butakov, V.G. Sysoev – К.: Naukova dumka, 1995. – 256 s. 6. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii /B.I.Kosteckij, I.G.Nosovskij, A.K.Karaulov i dr. - К.: Tehnika, 1976. - 296 s.