

ТАРЕЛЬНИК В.Б., ПИРОГОВ В.О.

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ВАЛІВ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ КОМБІНОВАНИМИ МЕТОДАМИ.

В статті проведений аналіз літературних джерел, який показав, що в останні роки появились нові технологічні методи зміцнення поверхневих шарів шийок валів відцентрових насосів. Вони основані на використанні екологічно безпечного методу електроіскрового легування (ЕІЛ) (цементация, нанесення комбінованих покриттів з дисульфідом молібдену (MoS_2), покриттів складу Al-C-B) і без проведення порівняльних випробувань на зносостійкість важко віддати перевагу тому, чи іншому методу.

Дослідженнями на машині тертя СМЦ-2 встановлено, що ваговий знос круглих зразків зі шліфованої сталі 40X, контактуючих в умовах змащення турбінним маслом Т-22 з бабітовими вкладишами підшипників ковзання (ПК) по схемі «диск-вкладыш», в 1,15 рази більший чим зі сталі 30X13 і, відповідно в 2,50 і 4,41 рази ніж сталі 40X після цементации методом ЕІЛ (ЦЕІЛ) + безабразивна ультразвукова фінішна обробка (БУФО) і ЕІЛ (Mo+S) + БУФО. В свою чергу лінійний знос круглих зразків шліфованої сталі 40X більший чим сталі 30X13 в 1,09 рази і, відповідно в 2,83 і 5,85 рази ніж сталі 40X після ЦЕІЛ + БУФО і ЕІЛ (Mo+S) + БУФО. При цьому був визначений найменший коефіцієнт тертя 0,025 і 0,030, який належить покриттям з MoS_2 , сформованим, відповідно на зразках зі сталі 30X13 і 40X і обробленим БУФО.

Аналіз характеру зміни лінійного зносу круглих зразків зі сталі 40X і 30X13, як зміцнених, так і не зміцнених, показав, що у всіх зразків спочатку відбувається більш інтенсивне зношування, яке після 2-х годин стирання сповільнюється, стає більш стабільним і в першому наближенні нагадує експоненціальну залежність. Найкращою зносостійкістю володіють зразки зміцнені в послідовності ЕІЛ (Mo+S) + БУФО, знос яких після 8 год іспитів складає 0,9 і 1,1 мкм, відповідно зі сталі 30X13 і 40X.

Ваговий і лінійний знос зразків зі сталі 40X без зміцнення більший в порівнянні з незміцненими зразками зі сталі 30X13, які випробувались у парі з контртелом з твердого сплаву ВК8 в умовах рясного змащення індустріальним мастилом І40А, відповідно на 21,7 і 14,2 %; в порівнянні з зразками зі сталі 40X з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ складу (Al-C-B) з наступною БУФО, відповідно на 77,8 і 84,7 %; і зі сталі 30X13 з аналогічною обробкою ЕІЛ (Al-C-B) + БУФО, відповідно на 98,0 і 71,8 %.

Ключові слова: відцентровий насос, шийки валів, підшипник ковзання, електроіскрове легування, безабразивна ультразвукова фінішна обробка, знос, машина тертя.

TARELNYK V.B., PIROGOV V.O.

INCREASING THE DURABILITY OF CENTRIFUGAL PUMP SHAFTS BY COMBINED METHODS.

The article analyzes the literature, which showed that in recent years there have been new technological methods of strengthening the surface layers of the centrifugal pumps shafts necks. They are based on the use of environmentally friendly method of electrospark alloying (ESA) (cementation, application of combined coatings with molybdenum disulfide (MoS_2), coatings of Al-C-B) and without comparative tests for wear resistance is difficult to prefer one method or another. Studies on the friction machine СМЦ-2 found that the weight wear of round specimens of polished steel 40X, in contact with lubrication of turbine oil Т-22 with babbitt inserts of the sliding bearing according to the scheme "disk-insert", 1.15 times greater than steel 30X13 and, respectively, 2.50 and 4.41 times than 40X steel after cementation by ESA (CESA) + non-abrasive ultrasonic finishing (NAUF) and ESA (Mo + S) + NAUF. In turn, the linear wear of polished steel 40X round samples is greater than steel 30X13 1.09 times and, respectively, 2.83 and 5.85 times than steel 40X after CESA + NAUF and ESA (Mo + S) + NAUF. The lowest coefficient of friction was recognized as 0.025 and 0.030, which belongs to the coating of MoS_2 , formed, respectively, on samples of steel 30X13 and 40X and treated with NAUF.

Analysis of the linear wear change nature of steel 40X and 30X13 round samples, both hardened and not hardened, showed that all samples first have more intense wear, which after 2 hours of abrasion slows down, becomes more stable and at first glance resembles exponential dependence. Samples reinforced in the sequence ESA (Mo + S) + NAUF have the best wear resistance, the wear of which after 8 h of tests is 0.9 and 1.1 μm , respectively, of steel 30X13 and 40X.

Weight and linear wear of 40X steel specimens without hardening is higher compared to non-reinforced 30X13 steel specimens tested in pair with BK8 counterbody under conditions of abundant lubrication with I40A industrial oil, by 21.7 and 14.2%, respectively; in comparison with samples of 40X steel with a coating applied by the method of ESA composition (Al-C-B) followed by NAUF, respectively, 77.8 and 84.7%; and 30X13 steel with similar treatment of ESA (Al-C-B) + NAUF, 98.0 and 71.8%, respectively.

Key words: centrifugal pump, shaft necks, plain bearing, electrospark alloying, non-abrasive ultrasonic finishing, wear, friction machine.

ТАРЕЛЬНИК В.Б., ПИРОГОВ В.А.

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАЛОВ ПРОЦЕНТРОВЫХ НАСОСОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

В статье проведен анализ литературных источников, показавший, что в последние годы появились новые технологические методы укрепления поверхностных слоев шеек валов центробежных насосов. Они основаны на использовании экологически безопасного метода электроискрового легирования (ЭИЛ) (цементация, нанесение комбинированных покрытий с дисульфидом молибдена (MoS_2), покрытий состава Al-C-B) и без проведения сравнительных испытаний на износостойкость трудно отдать предпочтение тому или иному методу.

Исследованиями на машине трения СМЦ-2 установлено, что весовой износ круглых образцов из шлифованной стали 40X, контактирующих в условиях смазки турбинным маслом Т-22 с баббитовыми вкладышами ПК по схеме «диск-вкладыш», в 1,15 раза больше чем из стали 30X и, соответственно, в 2,50 и 4,41 раза чем стали 40X после цементации методом ЭИЛ (ЦЭИЛ) + безабразивная ультразвуковая финишная обработка (БУФО) и ЭИЛ (Mo+S) + БУФО. В свою очередь линейный износ круглых образцов шлифованной стали 40X больше чем стали 30X13 в 1,09 раза и, соответственно в 2,83 и 5,85 раза чем стали 40X после ЦЭИЛ+БУФО и ЭИЛ(Mo+S)+БУФО. При этом был признан наименьший коэффициент трения 0,025 и 0,030, принадлежащий покрытиям из MoS_2 , сформированным, соответственно, на образцах из стали 30X13 и 40X и обработанным БУФО.

Анализ характера изменения линейного износа круглых образцов из стали 40X и 30X13, как упрочненных, так и не упрочненных, показал, что у всех образцов сначала происходит более интенсивный износ, который после 2-х часов стирання замедляется, становится более стабильным и в первом приближении напоминает экспоненциальную зависимость. Наилучшей износостойкостью обладают образцы, укрепленные в последовательности ЭИЛ (Mo+S) + БУФО, износ которых после 8 ч экзаменов составляет 0,9 и 1,1 мкм, соответственно из стали 30X13 и 40X.

Весовой и линейный износ образцов из стали 40X без укрепления больше по сравнению с неукрепленными образцами из стали 30X13, которые испытывались в паре с контртелом из твердого сплава ВК8 в условиях обильного смазки индустриальной смазкой І40А, соответственно на 21,7 и 14,2%; по сравнению с образцами из стали 40X с покрытием, нанесенным методом ЭИЛ состава (Al-C-B) с последующей БУФО, соответственно на 77,8 и 84,7 %; и из стали 30X13 с аналогичной обработкой ЭИЛ (Al-C-B) + БУФО соответственно

Ключевые слова: центробежный насос, шейки валов, подшипник скольжения, электроискровое легирование, безабразивная ультразвуковая финишная обработка, износ, машина трения.

Вступ. Постановка проблеми. Сучасний розвиток техніки супроводжується підвищенням режимів роботи машин та механізмів, які нерідко працюють при високих швидкостях, навантаженнях та температурах, а також за умов корозійного, абразивного та інших видів впливу робочих середовищ.

Розвиток техніки досі йде в основному шляхом, зумовленим винаходом колеса. Особливої досконалості досягли цьому шляху роторні машини і механізми, діапазон параметрів яких вражає уяву [1].

Частота обертання роторів ультрацентрифуг, мікротурбін, турбодетандер досягає мільйона в хвилину [2]; потужність турбонасосних агрегатів двигунів ракет-носіїв за мінімальних габаритів перевищують сотню мегават [3]; маси роторів парових та гідравлічних турбін потужністю 500-1200 МВт вимірюються сотнями тон.

Поверхня шипа ротора має велику окружну швидкість відносно вкладиша підшипника, і для зниження до допустимих меж втрат потужності на тертя зазор між ними повинен бути заповнений стійкою плівкою рідкої або газової мастила. Мастильний шар повинен не тільки знижувати тертя, але й сприймати великі статичні та динамічні навантаження, ефективно демпфувати коливання шипа. Завдання створення опорних вузлів, що володіють необхідною несучою та демпфуючою здатністю, довговічністю та надійністю надзвичайно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основними елементами валів роторів відцентрових насосів, які підлягають різним видам зносу і впливу оточуючого середовища є шийки під підшипники ковзання (ПК), а також посадочні шийки (ПШ) під підшипники котіння, робочі колеса, шківни, захисні втулки, напівмуфти і таке інше.

Розробка та впровадження ефективних технологій поверхневого зміцнення обумовлена, з одного боку, необхідністю економії дорогих легуючих елементів, а з іншого – посиленням умов експлуатації деталей. Одним із способів вирішення цього завдання є застосування технологій, що використовують для обробки матеріалу концентровані потоки енергії (КПЕ): плазмове напилення [4] та плазмове обробка [5], лазерна обробка [6, 7]. У нерівноважних умовах нагріву та охолодження при обробці КПЕ відбувається формування принципово іншої, ніж при традиційних методах термічного та механічного впливу, структури поверхневого шару.

До сучасних методів поверхневої обробки металевих поверхонь КПЕ належить електроіскрове легування (ЕІЛ), що дозволяє отримувати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними та трибологічними властивостями на нанорівні [8].

Порівняно з традиційними технологіями поверхневого зміцнення метод ЕІЛ має переваги: локальність, високий ступінь адгезії, виникнення невеликого теплового фону і, як наслідок, відсутність викривлень та деформацій, простий та гнучкий технологічний процес, екологічна безпека та ін. [9].

Шийки валів ПК повинні мати зносостійку робочу поверхню і в'язку серцевину. Таку властивість поверхневого шару отримують методом ХТО – цементацією [10-12]. В останні роки велику популярність у технологів, що займаються зміцненням поверхневих шарів деталей з метою захисту від зношування набув метод цементації, який виконують електроіскровим легуванням графітовим електроодом-інструментом ($\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$) [10-12].

Нами в [13-15] досліджувався процес $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$ сталевих поверхонь, який має низку переваг у порівнянні з традиційним, здійснюваним методом ХТО. Основними перевагами $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$ є: досягнення 100% суцільності зміцнення поверхні; підвищення твердості поверхневого шару деталі за рахунок дифузійно-загартованих процесів; можливість локальної обробки (легування можна здійснювати в строго зазначених місцях, не захищаючи при цьому решту поверхні деталі) та ін. При $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$ використовується енергія розряду 0,036 – 6,8 Дж та продуктивність 0,5-3,0 $\text{см}^2/\text{хв}$.

Під час ЕІЛ графітовим електроодом зміцнення поверхні деталі відбувається за рахунок дифузійно-гартівних процесів, які полягають в локальному насиченні її вуглецем при досить високій температурі (до 10 000°C) з наступним швидким охолодженням до кімнатної температури. ЕІЛ графітовим електроодом можна виділити в окремих напрямках, що дозволяє формувати на деталях машин поверхневі шари підвищеної зносостійкості без зміни вихідного розміру деталі.

При цементації сталевих деталей методом ЕІЛ товщина зміцненого шару залежить від енергії розряду і часу легування (продуктивності процесу). Зі збільшенням енергії розряду і часу легування товщина зміцненого шару збільшується. Але при цьому зростає шорсткість поверхні. Так, при $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$ середньовуглецевої легованої сталі 40Х ($R_a=0,5$ мкм) з продуктивністю 0,2 $\text{см}^2/\text{хв}$. при енергії розряду $W_p = 6,8$ Дж товщина шару підвищеної твердості становить понад 1,15 мм. Шорсткість поверхні при цьому відповідає $R_a = 11,7-14,0$ мкм [16].

Відомий спосіб [17], який використовують для зниження шорсткості поверхні деталей машин і, отже, для розширення галузі їх застосування. Даний спосіб полягає в тому, що $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$ проводять поетапно, знижуючи на кожному етапі енергію розряду. При цьому використовують енергію розряду $W_p = 0,1-6,8$ Дж і продуктивність 0,04-2,0 $\text{см}^2/\text{хв}$. Незважаючи на наведені вище позитивні якості, даний спосіб має ряд недоліків: зниження, в результаті відпалу, властивостей мікротвердості і товщини зміцненого поверхневого шару при поетапному впливі на нього електричного розряду при $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$; значна тривалість процесу при поетапному $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$, що застосовується для зниження шорсткості.

Запропонований нами новий спосіб [18] може бути використаний для $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$ сталевих валів відцентрових насосів. В основу способу було поставлено задачу підвищення параметрів якості поверхневих шарів сталевих деталей, сформованих методом $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$: зниження їх шорсткості, підвищення товщини, мікротвердості і суцільності. Поставлену задачу вирішують тим, що у новому способі цементацію проводять у три етапи:

- на першому етапі виконують $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$ поверхні сталеві деталі з енергією розряду і продуктивністю в залежності від заданих показників товщини зміцненого шару, шорсткості його поверхні і суцільності;
- на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі, ретельно втираючи, наносять порошок графіту;
- на третьому етапі проводять $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$ сформованої на другому етапі поверхні, причому $\text{Ц}_{\text{ЕІЛ}}$ на третьому етапі виконують з тією ж енергією розряду і продуктивністю, що і на першому етапі.

Порошок графіту наносять у вигляді суспензії, що включає 80 % порошку графіту і 20 % вазеліну. Цементацию на третьому етапі виконують, не чекаючи висихання суспензії з енергією розряду $W_p = 0,9 - 4,6$ Дж і продуктивністю $1,0-2,0$ см²/хв.

Слід відмітити, що на другому етапі западини між виступами шорсткості заповнюються порошком графіту, внаслідок чого вже на третьому етапі процес Ц_{ЕЛЛ} протікає не тільки по виступах шорсткості, а й по поверхні з нанесеного на другому етапі порошку графіту. В наслідок цього, суцільність легованої поверхні збільшується до 100 %, а також зростає глибина дифузії вуглецю.

Таким чином, в результаті використання запропонованого способу, підвищуються параметри якості поверхневих шарів сталевих деталей, сформованих методом Ц_{ЕЛЛ}: знижується їх шорсткість, зростає товщина, мікротвердість і суцільність.

В табл. 1 показані параметри якості поверхні зразків сталі 40Х і 30Х13 після Ц_{ЕЛЛ} традиційним і пропонованим способами.

Порівняльний аналіз параметрів якості поверхневого шару після традиційної і пропонованої технології Ц_{ЕЛЛ} показав, що після обробки поверхні за пропонованою технологією зменшується шорсткість поверхні. Так, після традиційної Ц_{ЕЛЛ} при $W_p=4,6$ Дж шорсткість поверхні складає $Ra=8,3-9,0$ мкм, а після пропонованої – $Ra=3,2-4,8$ мкм. При цьому збільшується суцільність легованого шару до 100%, до 80 мкм збільшується глибина дифузійної зони вуглецю, а також мікротвердість «білого» шару і його товщина, до 10796 МПа і до 230 мкм, відповідно.

Таким чином, в результаті проведених досліджень удосконалена можливість застосування методу ЕЛ при цементации сталевих поверхонь деталей у тому числі і підшипникових шийок (цапф) валів роторів відцентрових насосів, замість екологічно небезпечного способу хіміко-термічної обробки.

Таблиця 1 – Зведена таблиця параметрів якості поверхні зразків сталі 40Х і 30Х13 після Ц_{ЕЛЛ}

Енергія розряду, W_p , Дж	Товщина «білого» шару, мкм	Мікротвердість «білого» шару, МПа	Суцільність «білого» шару, %	Шорсткість поверхні, Ra , мкм
Сталь 40Х				
Ц _{ЕЛЛ} традиційним способом				
0,9	25-40	5576-4243	50-60	0,9-1,1
2,6	40-70	8675-6538	70-80	5,4-6,3
4,6	55-80	8468-6976	70-80	8,5-9,2
Ц _{ЕЛЛ} пропонованим способом				
0,9	60-80	11351-7303	100	0,9-1,0
2,6	90-110	11787-6962		2,6-3,8
4,6	130-240	118239-7659		3,5-4,7
Сталь 30Х13				
Ц _{ЕЛЛ} традиційним способом				
0,9	25-40	5730-4563	50-70	0,9-1,1
2,6	35-70	8978-6897	70-80	5,3-6,7
4,6	60-80	86-73-7925	80-90	8,2-9,7
Ц _{ЕЛЛ} пропонованим способом				
0,9	70-90	9940-7546	100	0,9-1,1
2,6	100-120	10767-6887		2,7-3,5
4,6	150-240	10991-7989		3,-4,5

Зменшення тертя і зносу металевих поверхонь в місцях взаємодії основних вузлів машин і механізмів є актуальною проблемою сучасної науки і техніки. Відомо що для припрацювання підшипникових шийок валів, що працюють з бабітовими вкладишами, використовують дисульфід молібдену [19].

Змащувальні властивості дисульфиду молібдену забезпечуються його кристалічною структурою: зв'язки Ван-дер-Ваальса між шарами сірки дозволяють останнім вільно рухатися, в результаті чого тертя зменшується. З іншого боку, іонні зв'язки між Мо і S надають шарам високої міцності, тому вони здатні протистояти продавлюванню з боку мікровиступів поверхонь, що труться. У змащувальному шарі товщиною 2,5 мкм міститься 4000 шарів (S-Мо-S). Шари сірки, що утворюють поверхню кристала дисульфиду молібдену, забезпечують сильну адгезію до поверхні металу [20, 21].

Відомі технології сульфоціанування електроосаджених Fe-Мо покриттів [22]. Авторами експериментально встановлена найбільш раціональне сульфоціанувальне середовище – пастоподібне покриття деталей, що складається з жовтої кров'яної солі 35-40%, сірчаного колчедану 15-20%, шамоту 5-8% і сажі 25-30% зі сполучною речовиною - крохмальним клейстером. Процес сульфоціанування здійснюється при температурі 550-600°C, що дозволяє отримати зносостійке покриття з поверхневою карбонітридною зоною, насиченою сульфідами заліза і дисульфідом молібдену. Однак така технологія є екологічно небезпечною.

Незважаючи на те, що в результаті ХТО значно підвищується якість поверхневих шарів деталей машин, метод має ряд недоліків. Відбувається об'ємний нагрів деталі, що призводить до зміни її структури і початкових геометричних параметрів (деформування, викривлення); громіздке і дороге технологічне обладнання; довга тривалість процесу; великі енерговитрати; висока собівартість; екологічна та техногенна небезпека та ін.

В основу пропонований нами способу [23] поставлено задачу створення екологічно безпечної технології формування методом ЕІЛ на поверхні сталевих деталей покриття, яке має в своєму складі дисульфід молібдену. Використання такої технології підвищило б зносостійкість деталей машин і знизило коефіцієнт тертя контактуючих поверхонь.

Поставлена задача вирішується тим, що на поверхні сталевих деталей методом ЕІЛ безпосередньо перед легуванням наносять консистентну речовину, що містить сірку, а потім, не чекаючи її висихання, здійснюють легування електродом-інструментом з молібдену при енергії розряду $W_p=0,13-3,4$ Дж і продуктивності $0,8-2,5$ см²/хв. В результаті отримують покриття, яке містить дисульфід молібдену, мікротвердістю 5147-10731 МПа, товщиною 20-70 мкм і суцільністю 65-95%, тим самим підвищуючи зносостійкість деталей машин, знижуючи коефіцієнт тертя. Спосіб є екологічно безпечний.

Посадочні шийки валів і напресовані на них деталі робочі колеса, підшипники котіння, шківні і т. ін. утворюють з'єднання з натягом у якому зовнішня циліндрична поверхня валу контактує із внутрішньої циліндричною поверхнею деталі.

Слід зазначити, що при обертанні валу ротора, під дією циклічних робочих навантажень у спряженні «ПШ-напресована деталь» виникають періодичні зсуви контактуючих поверхонь деталей. Присутність між поверхнями спряження контактного тиску і наявність амплітуди їхнього відносного зсуву обумовлюють вплив фретинг процесу (Ф-П). При роботі деталей в агресивних середовищах, інтенсивність зношування зростає. В такому разі знос поверхонь відбувається в умовах фретинг-корозії (Ф-К). Результатом дії Ф-К, може бути ослаблення посадки, збільшення вібрації, порушення з'єднання і аварії [24].

Збирання з'єднань з натягом може здійснюватися різними способами: запресовуванням валу в отвір, нагріванням деталі, яка має отвір, або охолодженням валу та ін. При цьому контактні поверхні деталей піддаються пружному і пластичному деформуванню, а ступінь деформації визначається твердістю їх поверхневого шару, причому, чим менше вихідна твердість поверхневого шару, тим більше його пластичність, інтенсивність деформації та резерви до її підвищення.

Оскільки при спільній дії контактного тиску (від посадки) і прогину (від радіальних робочих зусиль) розподіл сумарних тисків визначається величиною коефіцієнта тертя між контактними поверхнями деталей з'єднання, то для підвищення якості сполучення деталей великогабаритних збірних виробів доцільно збільшення коефіцієнта тертя шляхом нанесення покриття. При посадці, наприклад, бандажа на вісь великогабаритного прокатного валка його великогабаритних складових коефіцієнт тертя на посадкових поверхнях приймається рівним 0,14. Відомо, що при згинанні пресового з'єднання формуються ділянки проковзування, що сприяє виникненню і прояву Ф-К, що знижує, наприклад, міцність від втоми складових прокатних валків і сприяє зсуву бандажа [25].

Як правило, більшість відомих способів підвищення якості пресових з'єднань (збільшення несучої здатності, підвищення герметичності з'єднання і міцності валів, зниження Ф-К), полягають у введенні між сполученими поверхнями певних «прошарків», що мають в контактні властивості, які істотно відрізняються від вихідних, що забезпечує перенесення ковзання в проміжне середовище. Це може бути або покриття, нанесене на одну або обидві контактуючі поверхні [26, 27] або зміцнений, або знеміцнений поверхневий шар [28] і ін.

В [29] запропонований ряд способів збільшення надійності і герметичності з'єднань з натягом шляхом нанесення методом ЕІЛ спеціальних покриттів.

Нами розроблений новий спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей пар тертя [30], який належить до електроіскрового легування, і може застосовуватися для обробки сталевих деталей, поверхні яких у процесі роботи підлягають зношуванню. Спосіб включає нанесення на поверхню деталі, що підлягає зміцненню, консистентної речовини, яка приготована з включенням алюмінієвої пудри у кількості не більше 56 % по масі і бору у вигляді порошку аморфного бору у кількості, приблизно, 5 % по масі, а ЕІЛ графітовим електродом зазначеної поверхні проводять при енергії розряду $0,13-4,9$ Дж і продуктивності $1,0-2,0$ см²/хв.

Мікроструктурний аналіз Al-C-B покриттів на сталі 40 показав, що поверхневий шар складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ. При $W_p=0,13$ і $0,55$ Дж шари складаються з 3-х ділянок – верхній «білий» зміцнений шар, дифузійна зона і основний метал – сталь 40. При цьому, величина «білого» шару для цих режимів становить 15-20 мкм. Збільшення W_p до 4,9 Дж призводить до зміни кількості ділянок та їх структури: верхній шар (до 60 мкм), прошарок (до 20 мкм), дифузійна зона і основний метал. Діюметричні дослідження показали, що з посиленням енергетичного впливу при ЕІЛ збільшується мікротвердість як верхнього зміцненого шару, так і дифузійної зони: при $W_p = 0,13$ Дж - $H_c = 6487$ МПа, а при $W_p = 4,9$ Дж - 12350 МПа (табл. 2).

Таблиця 2 – Якісні параметри Al-C-B покриттів, отриманих методом ЕІЛ на сталі 40

Енергія розряду, Дж	Шорсткість, мкм			Зміцнений шар: H _c – мікротвердість; h – товщина; S – суцільність		
	Ra	Rz	Rmax	H _c , МПа	h, мкм	S, %
0,13	1,2	2,9	7,4	6487	15	55
0,55	2,9	4,5	17,3	10351	20	75
4,9	9,3	19,5	48,2	12350	60	95

Слід відмітити, що з метою зниження шорсткості поверхні після ЦЕІЛ застосовують, як правило, методи поверхнево-пластичного деформування (ППД), серед яких на особливу увагу заслуговує метод безабразивної

ультразвукової фінішної обробки (БУФО) [31]. Крім цього обробка шийок валів після ЕІЛ методами ППД підвищує межу втомну міцності.

Технологія зміцнення та відновлення деталей типу валів заснована на суміщенні технологій ЕІЛ і ППД, які доповнюють один одного. ЕІЛ забезпечує нанесення на зміцнювані ділянки валу покриття з зносостійких матеріалів, а ППД, у свою чергу, забезпечує необхідні вимоги, що пред'являються до мікрогеометрії поверхонь, що формуються, а також підвищує втомну міцність, а в окремих випадках і мікротвердість формованих поверхонь.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що існує багато способів зміцнення поверхневих шарів шийок валів відцентрових насосів і важко віддати перевагу тому, чи іншому методу.

Метою роботи є підвищення довговічності валів роторів відцентрових насосів шляхом проведення порівняльних іспитів на знос.

Методика досліджень

У ПК при нормальній роботі використовують рідке або консистентне мастило, яке надійно оберігає поверхні тертя від утворення металевих зв'язків. При пуску двигуна сполучення «вал – підшипник» працює в умовах напівсухого тертя, при якому виникає металевий контакт, який викликає підвищений знос поверхонь, що труться, і подальше їх заїдання.

З метою пошуку можливості застосування електроіскрових покриттів для підвищення зносостійкості шийок валів роторів насосів та компресорів під ПК, що працюють, як правило, у парі з бабітовими підшипниками, проводилися випробування круглих зразків \varnothing 50 мм і товщиною 10 мм із сталі 40X і 30X13 термооброблених, відповідно на твердість 180-190 і 235-270 НВ. Покриття зразків піддавалися наступної ППД методом БУФО. Зносостійкість покриттів визначалася машиною тертя СМЦ-2 за схемою диск - колодка. Як матеріал контртіла використовувався бабіт Б-83.

Для кожного з матеріалів (сталь 40X і сталь 30X13) виготовляли по 3 серії зразків:

- перша – без зміцнення;
- друга – зміцнена шляхом використання нового способу ЦЕІЛ;
- третя – з покриттям MoS₂.

Для кожної серії виготовляли по три зразка.

Покриття зразків піддавалися наступної ППД методом БУФО.

Зносостійкість покриттів визначалася машиною тертя СМЦ-2 за схемою диск - колодка. Як матеріал контртіла використовувався бабіт Б-83. Змашування поверхонь тертя проводилося в умовах, коли нижня частина круглого зразка знаходилася у ванночці з турбінним маслом Т-22. Швидкість ковзання становила 0,78 м/с, питомий тиск – 5,0 МПа, навантаження на колодку – 1000 Н, тривалість випробувань – 8 год, що відповідало шляху тертя 22,5 км. Перед випробуваннями контртіло з бабіту розточували на токарному верстаті у спеціальному пристосуванні до збігу поверхні тертя з допуском на діаметр, що відповідає посадці ковзання. Шорсткість поверхні контртіла становила Ra = 1,6 мкм.

Далі зразки встановлювалися на машину тертя та припрацьовували протягом 1 год з питомим навантаженням 2,0 МПа. Приробіток вважався закінченим, якщо частка приробленої поверхні становила не менше 95% від номінальної. Після приробітку зразки піддавалися вимірюванням, встановлювалися на машину, навантажувалися, і проводився експеримент при постійній швидкості ковзання та питомому навантаженні.

Для виміру лінійного зносу на робочу поверхню круглого зразка на твердомірі Віккерса наносилися чотири поглиблення в діаметрально протилежних сторонах. Зразки для визначення інтегрального зносу всієї поверхні перед випробуванням зважували на аналітичних вагах ВЛА-200 з точністю до 0,0001г.

Лінійний знос визначався методом штучних баз по різниці глибин відбитків, виміряних до та після проведення експерименту, а інтегральний (ваговий) знос - як різницю ваги зразка до та після проведення випробувань.

Крім того, в процесі роботи вимірювали момент тертя, контролювалася швидкість ковзання та навантаження у зоні тертя.

З метою вибору найбільш раціональної технології формування поверхневого шару, для посадкових шийок валів що протистоїть високим питомим навантаженням, дослідженню на зносостійкість піддавалися круглі зразки \varnothing 50 і товщиною 10 мм зі сталі 40X і 30X13, термооброблені, відповідно на твердість 180-190 і 235-250 НВ. Для дослідів виготовляли дві серії зразків для кожного з матеріалів (сталь 40X і сталь 30X13):

- перша серія – зразки без зміцнення;
- друга серія – на зразки методом ЕІЛ наносили покриття складу (Al-C-B) з наступною БУФО.

Випробування проводили на машині тертя СМЦ-2 за схемою «кільце - плоский зразок», який служив контртілом. В якості контртіла використовували прямокутний зразок з твердого сплаву ВК8 з шорсткістю робочої поверхні Ra = 1,6 мкм. Після кожного іспиту зразок з твердого сплаву ВК8 перешліфовували.

Випробування проводили в умовах, коли нижня частина круглого зразка знаходилася у ванночці з індустріальним мастилом І40А. Швидкість ковзання становила 0,78 м/с, питомий тиск – 10 МПа, навантаження на контртіло складало – 100 Н, тривалість випробувань – 8 год, шлях тертя – 22,5 км.

Вимір лінійного і інтегрального зносу виконували за методикою представленою вище.

Результати досліджень

За отриманими даними побудовано графіки зміни коефіцієнта тертя залежно від виду зміцнення та часу випробувань (табл. 3 і рис. 1). Результати вимірювання зношування зразків як лінійного (Δh), так і інтегрального (Δm) занесені в табл. 4.

Таблиця 3 – Результати зміни коефіцієнта тертя сталі 40X і 30X13 залежно від виду зміцнення та часу випробувань

Матеріал зразка	Вид зміцнення	Коефіцієнт тертя $f_{тр}$							
		Час іспитів t , год							
		1	2	3	4	5	6	7	8
40X	Без зміцнення	0,176	0,179	0,165	0,150	0,148	0,143	0,137	0,118
30X13	Без зміцнення	0,165	0,170	0,149	0,134	0,112	0,127	0,125	0,127
40X	Ц _{ЕЛЛ} + БУФО	0,131	0,134	0,123	0,108	0,101	0,112	0,110	0,108
30X13	Ц _{ЕЛЛ} + БУФО	0,114	0,125	0,114	0,116	0,106	0,109	0,105	0,101
40X	ЕЛЛ (Мо+S)+БУФО	0,036	0,045	0,042	0,036	0,033	0,034	0,031	0,030
30X13	ЕЛЛ (Мо+S)+БУФО	0,032	0,038	0,035	0,030	0,038	0,029	0,026	0,025

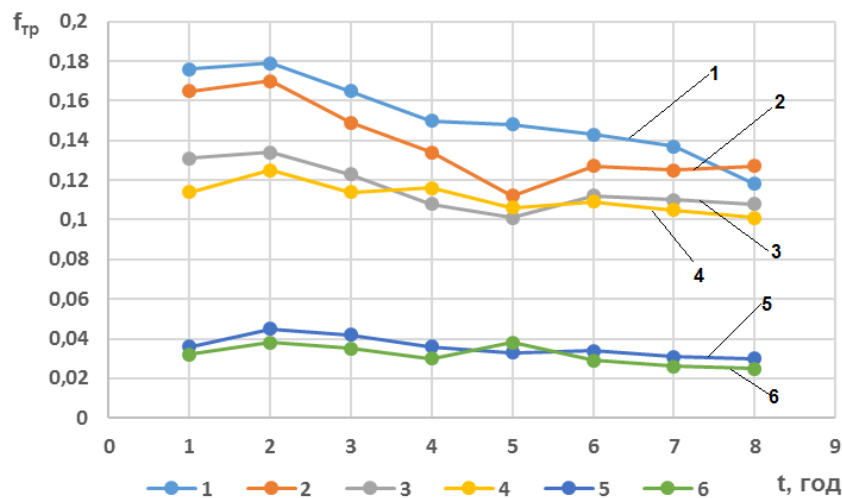


Рис. 1 - Зміна коефіцієнту тертя сталі 40X і 30X13 по бабіту в залежності від виду зміцнення та часу взаємодії: 1- шліфувана сталь 40X; 2- шліфувана сталь 30X13; 3 - Сталь 40X з Ц_{ЕЛЛ} + БУФО; 4 - Сталь 30X13 з Ц_{ЕЛЛ} + БУФО; 5 - Сталь 40X (з покриттям МоS₂) + БУФО; 6 - Сталь 30X13 (з покриттям МоS₂) + БУФО.

Аналіз рис. 1 показав, що найменший коефіцієнт тертя 0,025 і 0,030 належить покриттям з МоS₂, сформованим, відповідно на зразках зі сталі 30X13 і 40X і обробленим БУФО.

Таблиця 4 – Знос зміцненої сталі 40X і 30X13 в парі з бабітом Б-83

Зміцнення	Знос	
	Ваговий $\times 10^3$, кг	Лінійний, мкм
Сталь 40X (без зміцнення)	0,075	6,519
Сталь 30X13 (без зміцнення)	0,068	6,033
Сталь 40X з Ц _{ЕЛЛ} + БУФО	0,031	2,321
Сталь 30X13 з Ц _{ЕЛЛ} + БУФО	0,023	2,202
Сталь 40X (з покриттям МоS ₂) + БУФО	0,019	1,115
Сталь 30X13 (з покриттям МоS ₂) + БУФО	0,012	0,885

В результаті аналізу табл. 4 встановлено, що ваговий знос круглих зразків з шліфованої сталі 40X більший чим шліфованої сталі 30X13 в 1,15 рази і відповідно в 2,50 і 4,41 рази ніж сталі 40X після Ц_{ЕЛЛ} + БУФО і ЕЛЛ (Мо+S) + БУФО. В свою чергу лінійний знос круглих зразків шліфованої сталі 40X більший чим шліфованої сталі 30X13 в 1,09 рази і відповідно в 2,83 і 5,85 рази ніж сталі 40X після Ц_{ЕЛЛ} → БУФО і ЕЛЛ (Мо+S) → БУФО.

Слід відмітити, що найменший ваговий і лінійний знос круглих зразків у сталі 30X13 після нанесення покриття складу (Мо+S) і БУФО, який складає, відповідно $0,013 \cdot 10^{-3}$ кг і 0,90 мкм.

На рис. 2 показаний характер зміни лінійного зносу круглих зразків зі сталі 40X і 30X13, як не зміцнених, так і зміцнених в послідовності: Ц_{ЕЛЛ} + БУФО і ЕЛЛ (Мо+S) + БУФО, відповідно: 1-6.

У всіх зразків спочатку відбувається більш інтенсивне зношування, яке після 2-х годин стирання сповільнюється і стає більш стабільним і в першому наближенні нагадує експоненціальну залежність.

Найкращою зносостійкістю володіють зразки зміцнені в послідовності ЕЛЛ (Мо+S) + БУФО, знос яких після 8 год іспитів складає 0,9 і 1,1 мкм, відповідно зі сталі 30X13 і 40X.

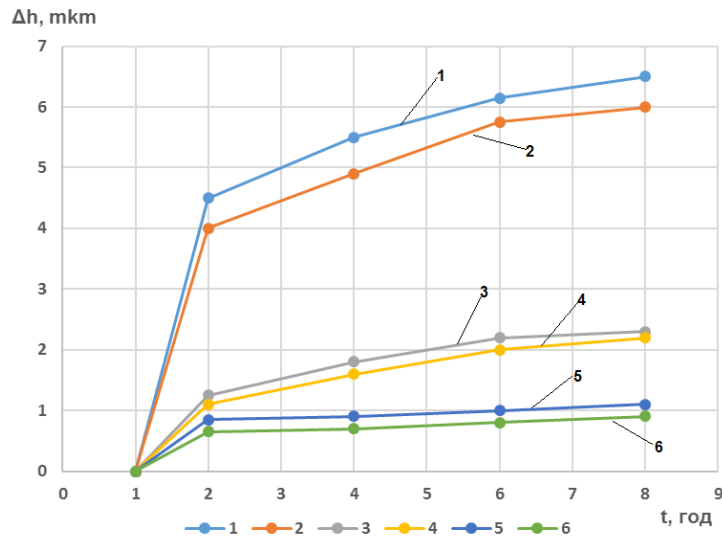


Рис. 2 - Характер зносу круглих зразків зі сталі 40X і 30X13: не зміцнених, відповідно 1 і 2, зміцнених в послідовності: ЦЕЛ + БУФО, відповідно 3 і 4 і ЕЛ (Мо+S) + БУФО, відповідно 5 і 6, що працюють в парі з бабітом Б-83 (середовище - мастило турбінна Т-22).

З метою вибору найбільш раціональної технології формування поверхневого шару, для посадкових шийок валів що протистоїть високим питомим навантаженням, дослідженню на зносостійкість піддавалися зразки зі сталі 40X і 30X13, термооброблені, відповідно на твердість 167-207 і 235-250 НВ, зміцнені комбінованою технологією: нанесення покриття складу (Al-C-B) методом ЕЛ з наступною БУФО.

Результати випробувань зведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Результати зносу зміцнених і незміцнених круглих зразків зі сталі 40X і 30X13, випробуваних у парі з твердим сплавом ВК8 в умовах рясного змащення індустріальним мастилом І40А

Матеріал	Вид зміцнення	Знос	
		ваговий $\times 10^3$, кг	лінійний, мкм
40X	Без зміцнення	0,313	6,117
30X13	Без зміцнення	0,257	5,354
40X	ЕЛ (Al-C-B) + БУФО	0,176	3,312
30X13	ЕЛ (Al-C-B) + БУФО	0,105	1,645

Аналіз табл. 5 показав, що ваговий і лінійний знос зразків зі сталі 40X без зміцнення більший в порівнянні з незміцненими зразками зі сталі 30X13, які випробувались у парі з контргілом з твердого сплаву ВК8 в умовах рясного змащення індустріальним мастилом І40А, відповідно на 21,7 і 14,2 %; в порівнянні з зразками зі сталі 40X з покриттям, нанесеним методом ЕЛ складу (Al-C-B) з наступною БУФО, відповідно на 77,8 і 84,7; і відповідно зі сталі 30X13 з аналогічною обробкою (ЕЛ (Al-C-B) + БУФО), відповідно на 98,0 і 71,8 %.

Висновки:

1. Аналіз літературних джерел показав, що в останні роки появились нові технологічні методи зміцнення поверхневих шарів шийок валів відцентрових насосів, які використовуються за допомогою екологічно безпечного методу ЕЛ (цементация, нанесення комбінованих покриттів з MoS_2 , покриттів складу Al-C-B і без проведення порівняльних випробувань на зносостійкість важко віддати перевагу тому, чи іншому методу.
2. Дослідженнями на машині тертя СМЦ-2 встановлено, що ваговий знос круглих зразків зі шліфованої сталі 40X, контактуючих в умовах змащення турбінним маслом Т-22 з бабітовими вкладишами ПК по схемі «диск-вкладиш», в 1,15 рази більший чим зі сталі 30X13 і, відповідно в 2,50 і 4,41 рази ніж сталі 40X після ЦЕЛ + БУФО і ЕЛ (Мо+S) + БУФО. В свою чергу лінійний знос круглих зразків шліфованої сталі 40X більший чим сталі 30X13 в 1,09 рази і, відповідно в 2,83 і 5,85 рази ніж сталі 40X після ЦЕЛ + БУФО і ЕЛ (Мо+S) + БУФО.
3. Найменший коефіцієнт тертя 0,025 і 0,030 належить покриттям з MoS_2 , сформованим, відповідно на зразках зі сталі 30X13 і 40X і обробленим БУФО.
4. Аналіз характеру зміни лінійного зносу круглих зразків зі сталі 40X і 30X13, як зміцнених, так і не зміцнених, показав, що у всіх зразків спочатку відбувається більш інтенсивне зношування, яке після 2-х годин стирання сповільнюється, стає більш стабільним і в першому наближенні нагадує експоненціальну залежність. Найкращою зносостійкістю володіють зразки зміцнені в послідовності ЕЛ (Мо+S) + БУФО, знос яких після 8 год іспитів складає 0,9 і 1,1 мкм, відповідно зі сталі 30X13 і 40X.
5. Ваговий і лінійний знос зразків зі сталі 40X без зміцнення більший в порівнянні з незміцненими зразками зі сталі 30X13, які випробувались у парі з контргілом з твердого сплаву ВК8 в умовах рясного змащення індустріальним мастилом І40А, відповідно на 21,7 і 14,2 %; в порівнянні з зразками зі сталі 40X з покриттям, нанесеним методом

ЕІЛ складу (АІ-С-В) з наступною БУФО, відповідно на 77,8 і 84,7 %; і зі сталі 30Х13 з аналогічною обробкою ЕІЛ (АІ-С-В) + БУФО, відповідно на 98,0 і 71,8 %.

Список литературы:

1. Энергоэффективные, альтернативные и энергосберегающие технологии: монография / В.А. Марцинковский, В.Б. Тарельник, Б. Антошевский и др.; Под ред. проф. В.А. Марцинковского и проф. В.Б. Тарельника.- г. Сумы: Издательство «МакДен»: рус. яз., 2016.- 317 с.: сил.
2. Лучин Г.А., Пешти Ю.В., Снопов А.И. Газовые опоры турбомашин. - М.: Машиностроение, 1989. - 240 с
3. Боровский В.И. Энергетические параметры и характеристики высокооборотных лопастных насосов.- М.: Машиностроение, 1989.- 183 с.
4. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V. I. Kuzmin, A. A. Mikhail'chenko, O. B. Kovalev [et al.] // J. of Thermal Spray Technology. – 2012. – V. 21. – No. 1. – P. 159–168.
5. Morand, G., Chevallier, P., Bonilla-Gameros, L., Turgeon, S., Cloutier, M., Da Silva Pires, M., Sarkissian, A., Tatoulian, M., Houssiau, L., Mantovani, D. On the adhesion of diamond-like carbon coatings deposited by low-pressure plasma on 316L stainless steel (2021) Surface and Interface Analysis, 53 (7), pp. 658-671. <https://doi.org/10.1002/sia.6953>
6. B. Antoszewski and V. Tarel'nyk, "Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals", Applied Mechanics and Materials, Vol. 630, pp. 301-307, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.301>
7. Pliszka, I., Radek, N. Corrosion Resistance of WC-Cu Coatings Produced by Electrospark Deposition (2017) Procedia Engineering, 192, pp. 707-712. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.122>
8. Mashkov, Y.K., Korotaev, D.N., Baibaratskaya, M.Y. et al. Nanostructured coatings synthesized by electro-spark machining. Tech. Phys. 60, 1489–1493 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1063784215100217>
9. Tarel'nyk, V.B., Gaponova, O.P., Loboda, V.B., Konoplyanchenko, E.V., Martsinkovskii, V.S., Semirnenko, Yu.I., Tarel'nyk, N.V., Mikulina, M.A., Sarzhanov B.A. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. Surf. Engin. Appl. Electrochem. 57, 173–184 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
10. F.A. P. Fernandes, S.C. Heck, R.G. Pereira, A. Lombardi-Neto, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 40(2): 175 (2010).
11. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang, Engineering, Scientific Research Publishing, 9(3): 942 (2011).
12. S. Ben Slima, Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing, 9(3): 640 (2012).
13. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, O. P. Gaponova, Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 54: 147 (2018).
14. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarel'nyk, O. O. Vasilenko, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 41, No. 1: 47 (2019). <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047>
15. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, V. S. Martsinkovskii, Chem Petrol Eng 53: 540 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>
16. Патент України на винахід № 82948, 23с 8/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, А.В. Белоус / Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10.
17. Патент України на винахід № 101715, МПК 23Н 9/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням / В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братуцак / опубл. 25.01.2013, бюл. № 8.
18. Патент України на корисну модель №142822, МПК (2020.01) С23С 8/00, С23С 28/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроіскровим легуванням / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, О.П. Гапонова, О.М. Мисливченко, В.О. Пирогов, А.Д. Лазаренко / опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12.
19. Є.К. Солових, В.В. Акулін, А.Є. Солових, С.Є. Катиринич. Підвищення функціональних властивостей гальванічних полімерометалевих покриттів на основі міді при проточному нарощуванні зношених поверхонь /Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2015, вип. 28. С. 24-29.
20. Ицук Ю.Л. Состав, структура и свойства пластичных смазок. - К.: Наукова думка, 1996. - 513 с.,
21. Композиции на основе полидиэтилсилоксана и модифицированных кремнеземов: улучшение смазочных характеристик / Л.И. Борисенко, С.А. Радзиевская, Д.А. Щербаков, Н.В. Борисенко, В.М. Богатырев, И.И. Войтко // Поверхность. - 2015. - Вып. 7(22). - С. 137-146.
22. Гнездилова Ю.П. Упрочнение сульфидицированием электроосажденных железо-молибденовых покрытий для восстановления деталей машин [Текст] / Ю.П. Гнездилова, В.В. Серебровский - Курск: Изд-во КГСХА. - 2008. - 143 с.
23. Патент України на корисну модель №144932, МПК (2020.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00. Спосіб формування покриття на поверхні сталеві деталі методом електроіскрового легування / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, О.П. Гапонова, О.М. Мисливченко, В.О. Пирогов, А.Д. Лазаренко; опубл. 10.11.2020, Бюл. № 21.
24. Martsynkovskyy V., Tarel'nyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Dumanchuk M. (2020) Technology Support for Protecting Contacting Surfaces of Half-Coupling—Shaft Press Joints Against Fretting Wear. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_22
25. Лебедь В.Т., Кулаченко А.А. Оптимизация технологии нанесения покрытий в соединениях крупногабаритных составных валков для повышения несущей способности. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. Краматорськ – Київ, 2008. Вип. №23. С. 240–247.
26. Куценко А.В., Башкарев А.Я. Управление фрикционными свойствами полимидных покрытий в соединениях с натягом. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. №1(238) , 2016.-С. 155-162.
27. Асланян И. Р., Криони Н. К., Шустер Л. Ш. Трибологические характеристики электролитических покрытий в различных условиях трения. Уфа: УГАТУ, 2013 Т. 17, № 8 (61). С. 24–28.
28. Селиванов К.С., Галиакбаров Р.Ф. Повышение фреттинг-стойкости деталей машин комплексной вакуумной плазменной обработкой. Авиационно-космическая техника и технология. Уфимский государственный авиационный технический университет. Уфа. 2011, №7 (84).- С.29-32.
29. Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Белоус А.В., Павлов А.Г. Проблемы и перспективы повышения качества неподвижных соединений. Машинобудування. 2012. № 9. С. 218-232.
30. Патент України на корисну модель № 148495, МПК (2021.01) В23Н 1/00, В23Н 7/00. Спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей пар тертя / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский, О.П. Гапонова, О.М. Мисливченко, Є.В. Конопляченко, Н.В. Тарельник, О.А. Саржанов, В.О. Пирогов, А.Д. Лазаренко, А.Д. Поливаний, М.А. Зенкін, Т.П. Волошко / опубл. 11.08.2021, Бюл.№ 32.
31. Нежибецкий Г.Н., Шкурко А.И. Втулки концевых уплотнений ротора. Современные энергоэффективные технологии реализации инженерных задач динамического оборудования: монография. 2017. С. 191-193.

Bibliography (transliterated):

1. Jenergojefektivnye, al'ternativnye i jenergosberegajushhie tehnologii: monografija / V.A. Marcinkovskij, V.B. Tarel'nik, B. Antoshevskij i dr.; Pod red. prof. V.A. Marcinkovskogo i prof. V.B. Tarel'nika.- g. Sumy: Izdatel'stvo «MakDen»: rus. jaz., 2016.- 317 s.: sil.
2. Luchin G.A., Peshiti Ju.V., Snopov A.I. Gazovye opory turbomashin. - M.: Mashinostroenie, 1989. - 240 s
3. Borovskij V.I. Jenergeticheskie parametry i harakteristiki vysokooborotnyh lopastnyh nasosov.- M.: Mashinostroenie, 1989.- 183 s.
4. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V. I. Kuzmin, A. A. Mikhail'chenko, O. B. Kovalev [et al.] // J. of Thermal Spray Technology. – 2012. – V. 21. – No. 1. – P. 159–168.

5. Morand, G., Chevallier, P., Bonilla-Gameros, L., Turgeon, S., Cloutier, M., Da Silva Pires, M., Sarkissian, A., Tatoulian, M., Houssiau, L., Mantovani, D. On the adhesion of diamond-like carbon coatings deposited by low-pressure plasma on 316L stainless steel (2021) *Surface and Interface Analysis*, 53 (7), pp. 658-671. <https://doi.org/10.1002/sia.6953>
6. B. Antoszewski and V. Tarelnyk, "Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 630, pp. 301-307, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.301>
7. Pliszka, I., Radek, N. Corrosion Resistance of WC-Cu Coatings Produced by Electrospark Deposition (2017) *Procedia Engineering*, 192, pp. 707-712. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.122>
8. Mashkov, Y.K., Korotaev, D.N., Baibaratskaya, M.Y. et al. Nanostructured coatings synthesized by electro-spark machining. *Tech. Phys.* 60, 1489–1493 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1063784215100217>
9. Tarelnyk, V.B., Gaponova, O.P., Loboda, V.B., Konoplyanchenko, E.V., Martsinkovskii, V.S., Semirnenko, Yu.I., Tarelnyk, N.V., Mikulina, M.A., Sarzhanov B.A. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 57, 173–184 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
10. F.A. P. Fernandes, S.C. Heck, R.G. Pereira, A. Lombardi-Neto, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 40(2): 175 (2010).
11. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang, *Engineering, Scientific Research Publishing*, 9(3): 942 (2011).
12. S. Ben Slima, *Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing*, 9(3): 640 (2012).
13. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, O. P. Gaponova, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54: 147 (2018).
14. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 1: 47 (2019). <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047>
15. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, V. S. Martsinkovskii, *Chem Petrol Eng* 53: 540 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>
16. Patent Ukrainy na vynakhid № 82948, 23s 8/00. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroeroziynym lehuванняm / V.S.Martsynkovskiyi, V.B.Tarelnyk, A.V.Belous / Opubl. 25.03.2008, biul. № 10.
17. Patent Ukrainy na vynakhid № 101715, MPK 23N 9/00. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroeroziynym lehuванняm / V.S. Martsynkovskiyi, V.B. Tarelnyk, M.P. Bratushchak / opubl. 25.01.2013, biul. № 8.
18. Patent Ukrainy na korynsnu model №142822, MPK (2020.01) C23C 8/00, C23C 28/00. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroiskrovym lehuванняm / V.B. Tarelnyk, V.S. Martsynkovskiyi, O.P. Haponova, O.M. Myslyvchenko, V.O. Pyrohov, A. D. Lazarenko / opubl. 25.06.2020, Biul. № 12.
19. Ye.K. Solovykh, V.V. Akulin, A.Ie. Solovykh, S.Ie. Katyrynych. Pidvyshchennia funktsionalnykh vlastyivostei halvanichnykh polimerometalevykh pokryttiv na osnovi midi pry protochnomu naroshchuvanni znoshenykh poverkhon / *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatizatsiia*, 2015, vyp. 28. S. 24-29.
20. Ishhuk Ju.L. Sostav, struktura i svoystva plastichnykh smazok. - K.: Naukova dumka, 1996. - 513 c.,
21. Kompozicii na osnovе polidijetilsiloksana i modifitsirovannykh kremnezemov: uluchshenie smazochnykh harakteristik / L.I. Borisenko, S.A. Radzievskaia, D.A. Shherbakov, N.V. Borisenko, V.M. Bogatyrev, I.I. Vojtko // *Poverhnost'*. - 2015. - Vyp. 7(22). - S. 137-146.
22. Gnezdilova Ju.P. Uprochneniye sul'focianirovaniem jelektroosazhennykh zhelezo-molibdenovykh pokrytij dlja vosstanovleniya detalej mashin [Tekst] / Ju.P. Gnezdilova, V.V.Serebrovskij - Kursk: Izd-vo KGSMA. - 2008. - 143 s.
23. Patent Ukrainy na korynsnu model №144932, MPK (2020.01), B23H 1/00, B23H 9/00. Sposib formuvannia pokryttia na poverkhni stalevoi detali metodom elektroiskrovoho lehuвання / V.B. Tarelnyk, V.S. Martsynkovskiyi, O.P. Haponova, O.M. Myslyvchenko, V.O. Pyrohov, A.D. Lazarenko; opubl. 10.11.2020, Biul. № 21.
24. Martsynkovskyy V., Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Dumanchuk M. (2020) Technology Support for Protecting Contacting Surfaces of Half-Coupling—Shaft Press Joints Against Fretting Wear. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_22
25. Lebed' V.T., Kulachenko A.A. Optimizatsiia tehnologii naneseniya pokrytij v soedineniyah krupnogabaritnykh sostavnykh valkov dlja povysheniya nesushhej sposobnosti. *Nadiynist' instrumentu ta optimizatsiia tehnologichnih sistem* : zb. nauk. prac'. Kramators'k – Kiiv, 2008. Vip. №23. S. 240–247.
26. Kushhenko A.V., Bashkarev A.Ja. Upravlenie frikcionnymi svoystvami polimidnykh pokrytij v soedineniyah s natjagom. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. №1(238)'*, 2016.-S. 155-162.
27. Aslanjan I. R., Krioni N. K., Shuster L. Sh. Tribologicheskie harakteristiki jelektroliticheskikh pokrytij v razlichnykh uslovijah trenija. Ufa: UGATU, 2013 T. 17, № 8 (61). S. 24–28.
28. Selivanov K.S., Galiakbarov R.F. Povshenie fretting-stojkosti detalej mashin kompleksnoj vakuumnoj plazmennoj obrabotkoj. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehnicheskij universitet. Ufa. 2011, №7 (84).*- S.29-32.
29. Tarel'nik V.B., Marcinkovskij V.S., Belous A.V., Pavlov A.G. Problemy i perspektivy povysheniya kachestva nepodvizhnykh soedinenij. *Mashynobuduvannia. 2012. № 9. S. 218-232.*
30. Patent Ukrainy na korynsnu model № 148495, MPK (2021.01) B23H 1/00, B23H 7/00. Sposib zmitsnennia poverkhon stalevykh detalei par tertia / V.B. Tarelnyk, V.S. Martsynkovskiyi, O.P. Haponova, O.M. Myslyvchenko, Ye.V. Konoplianchenko, N.V. Tarelnyk, O.A. Sarzhanov, V.O. Pyrohov, A.D. Lazarenko, A.D. Polyvani, M.A. Zenkin, T.P. Voloshko opubl. 11.08.2021, Biul.№ 32.
31. Нежибецкий Г.Н., Шкурко А.И. Втулки концевых уплотнений ротора. *Современные энергоэффективные технологии реализации инженерных задач динамического оборудования: монография. 2017. С. 191-193.*

Поступила (received) 15.02.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Тарельник Вячеслав Борисович (Tarelnyk Viacheslav Borysovych) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технічного сервісу Сумського національного аграрного університету, м. Суми; тел.: +38(050) 307-25-72; e-mail: tarelnyk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2005-5861

Пірогов Віктор Олександрович (Pirogov Viktor Oleksandrovych) – аспірант кафедри технічного сервісу Сумського національного аграрного університету, м. Суми; тел.: +38(066) 529-53-60; e-mail: viktor80ua@gmail.com; ORCID: 0000-0002-6335-1276