

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

РОП'ЯК ЛЮБОМИР ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 621.92:621.793

ДИСЕРТАЦІЯ  
НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ  
ТА СКЛАДАННЯ ВИРОБІВ, ЗМЦНЮВАНИХ МІКРОДУГОВИМ  
ОКСИДУВАННЯМ АЛЮМІНІЄВОГО ШАРУ

05.02.08 – технологія машинобудування

Галузь знань  
13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Л.Я. Роп'як

Науковий консультант Шацький Іван Петрович, доктор фіз.-мат. наук, професор

*Ідентичність за змістом і іншими  
прикметами дисертації  
вчений секретар  
спеціалізованої вченої  
ради № 64.050.12  
24.06.2018 р. Ч.Зубів Зубов А.В.*



## АНОТАЦІЯ

*Роп'як Л. Я.* Науково-технологічні основи виготовлення деталей та складання виробів, зміцнюваних мікродуговим оксидуванням алюмінієвого шару. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування (13 – механічна інженерія). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу МОН України; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» МОН України; Івано-Франківськ, 2018.

У дисертаційній роботі визначено, науково обґрунтовано та розв'язано актуальну науково-технічну проблему в галузі технології машинобудування щодо розроблення теоретичних основ та технологічних засобів для підвищення ресурсу роботи нафтогазового обладнання шляхом мікродугового оксидування (МДО) поверхневого алюмінієвого шару деталей машин.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

– отримали подальший розвиток аналітичні оцінки міцності двошарових покриттів під довільно орієнтованим локальним навантаженням, які відрізняються від відомих підбором раціональної товщини оксидного покриття та алюмінієвої підкладки і урахуванням позитивного впливу технології армування субстрату на міцність вкритих деталей;

– вперше розроблено технологію армування алюмінієвої основи заготовки частинками оксиду алюмінію, яка забезпечує підвищення несучої здатності деталі з оксидним покриттям;

– розвинуто математичні моделі технологічних процесів відцентрового литва заготовок та напилення композиційних алюмінієвих покриттів, армованих частинками оксиду алюмінію, котрі відрізняються від відомих урахуванням зміни сил опору рухові армуючих частинок у розтопленому алюмінієвому сплаві або в металоповітряному потоці, що дозволило визначити раціональні технологічні режими отримання заготовок із заданим розподілом арматури;

– вперше розроблено технологію та її технічне забезпечення для мікродугового оксидування компактних алюмінієвих сплавів і алюмінієвих покриттів, нанесених на сталеву або алюмінієву основи електродуговим і плазмовим методами напилення, що дозволило встановити переваги електродугового над плазмовим методом за продуктивністю формування покриттів та собівартістю виготовлення деталей;

– вперше встановлено закономірності зміни геометричних розмірів алюмінієвих деталей та сталевих деталей із шаром напиленого алюмінію після мікродугового оксидування їх верхніх шарів, що дало можливість методично обґрунтовано визначати технологічні припуски на механічну обробку з урахуванням технологічної спадковості між поверхнями заготовок і деталей;

– вперше виявлено нерівномірний розподіл мікротвердості за товщиною оксидного покриття з максимумом біля межі з алюмінієвою основою та зону пониженої мікротвердості в основі із компактного алюмінієвого сплаву Д16Т, що дало можливість запропонувати технологічні заходи для її вирівнювання;

– вперше виявлено, що в оксидному шарі покриття, сформованому на компактному або напиленому алюмінії, виникають залишкові напруження стиску, що дає змогу технологічно регулювати їх рівень;

– удосконалено математичну модель оптимізації технологічних режимів різання під час алмазного шліфування оксидного шару покриття, яка відрізняється від відомих в частині забезпечення заданої шорсткості циліндричної поверхні за максимальної продуктивності механічної обробки та мінімальної собівартості операції;

– дістали подальший розвиток аналітичні підходи щодо розрахунку технологічних напружень у виробках, складених із оксидованих деталей, як от елементарна теорія клемового з'єднання з неповним охопленням вала, модель цангової гайки з підпружиненими пелюстками та оцінка напружень в робочому колесі відцентрового вентилятора, що дало змогу виявити технологічні особливості складання виробів для забезпечення потрібного запасу міцності.

**Практичне значення отриманих результатів.** На основі теоретичних та експериментальних досліджень, стендових випробовувань та дослідно-промислових перевірок розроблено і впроваджено технологічні процеси формування одношарових оксидних та двошарових алюміній – оксид алюмінію покриттів комбінованими методами. Такі покриття формують на компактних алюмінієвих армованих сплавах або на напилених композиційних алюмінієвих покриттях і їх доцільно застосовувати під час виготовлення нових або ремонту зношених деталей машин. Технологічні процеси зміцнення включають: віброелектроіскрове легування основи, електродугове напилення алюмінієвих покриттів із суцільних дротів та частинок порошку оксиду алюмінію, котрі вводять із живильника в металоповітряний потік, і подальше мікродугове оксидування, а також механічну обробку оксидного шару покриття. Розроблено новітні технології та обладнання для зміцнення деталей: установка для електродугового напилення композиційних алюмінієвих покриттів з подачею частинок оксиду порошку в металоповітряний потік із живильника з системою автоматизованого керування технологічними параметрами процесу; установки для формування мікродугових оксидних покриттів у спокійному та проточному електролітах, а також модернізовано установку для віброелектроіскрового легування; обладнання і методики для електрохімічних досліджень та корозійних випробовувань і випробовувань на зношування деталей із покриттями.

**У першому розділі** проведено аналіз умов роботи та причин виходу з ладу деталей нафтогазового обладнання, технологічних методів захисту від корозії та зношування, методів формування оксидних покриттів, механічної обробки покриттів, вибір припусків і складання виробів із алюмінієвих деталей.

Аналіз технологічних методів захисту сталевих деталей від сульфідного розтріскування показав перспективність застосування покриттів, які забезпечують раціональне поєднання властивостей матеріалу основи та покриття. Показано, що ефективний захист сталевих деталей від наводнення, корозії та зношування, забезпечують матеріали, котрі володіють протекторними

властивостями, особливо алюмінієві покриття. Двошарове покриття, де нижнім шаром є шар алюмінію (для сталі від наводнення), а верхній – із оксиду алюмінію (для забезпечення високої зносостійкості поверхні деталі) дає можливість використовувати різні технологічні методи його формування: напиленням шарів із різних матеріалів, формуванням із алюмінію його оксиду.

Проаналізовано умови складання виробів із алюмінієвих деталей. Встановлено, що традиційні методи стопоріння різьбових з'єднань для алюмінієвих деталей не є ефективними. У нормативній та технічній літературі відсутні відомості щодо вибору кутових параметрів для оболонкових елементів відцентрових вентиляторів, щодо конструювання клемових з'єднань, а також щодо виготовлення збірних заготовок із сталевих і алюмінієвих елементів.

**У другому розділі** запропоновано варіанти будови заготовок та покриттів із оксидним робочим шаром, сформованим МДО алюмінію. Задля розуміння впливу структури та механічних властивостей компонент двошарового покриття на величину граничних навантажень, спричинених, наприклад, дією лезового чи шліфувального інструменту під час фінішної механічної обробки деталі або взаємодією з абразивними частинками в контакті під час експлуатації, розроблено інженерну методику аналітичного розрахунку напруженого стану та міцності двошарових покриттів під довільно орієнтованим локальним навантаженням. Принциповим моментом у пропонованій схемі є використання критеріїв міцності до обох компонент кусково-однорідного тіла.

На підставі розв'язку модельної задачі нестационарної теплопровідності встановлено, що за товщини непрооксидованого шару алюмінію від 39,7 мкм до 49,2 мкм буде спостерігатися взаємна дифузія між алюмінієм і сталеву основою, а отже – суттєве підвищення міцності зчеплення покриття з основою.

Здійснено оцінку напружено-деформованого стану армованого шару на неоднорідній вглиб композиційній основі. Встановлено, що армуванням основи можна досягти від 10 % до 15% -ого підвищення стійкості вкритої оксидним шаром деталі щодо дії локального навантаження.

Запропоновано та опрацьовано технічну модель істотно неоднорідного циліндричного стержня для дослідження напружено-деформованого стану зміцненої ділянки штока бурового насоса двобічної дії. Розглянуто звичне експлуатаційне навантаження штока та позаштатна ситуація, спричинена спрацюванням деталей пари тертя “крейцкопф – напрямні станини”. За розподілом еквівалентних напружень здійснено оцінку несучої здатності штока.

**У третьому розділі** розроблено технологію зміцнення та обладнання для МДО, вибрано матеріали та методики досліджень експлуатаційних властивостей деталей із покриттями.

Для зміцнення робочих поверхонь деталей машин композиційними покриттями відповідно до запропонованих варіантів їх будови розроблено технологічні схеми отримання комбінованими методами покриттів із робочим оксидним шаром, сформованим МДО в електроліті.

Для дослідження будови, фізико-механічних, електрохімічних та експлуатаційних властивостей оксидних покриттів використали стандартні та розроблені методики. Удосконалено методики визначення тріщиностійкості введенням операцій кольорової дефектоскопії для визначення довжини тріщин, а також нанесенням вихідних осесиметричних тріщин на циліндричних зразках під час східчастого навантаження. Міцність зчеплення покриттів із основою визначали штифтовим методом. Удосконалено методику визначення залишкових напружень у покриттях за рахунок виключення похибки, обумовленої спотворенням напруженого стану зразка, пов'язаного з розчиненням матеріалу в порах, у періоди релаксації напружень після видалення чергового поверхневого шару покриття.

Обґрунтовано вибір сталей, алюмінієвих сплавів, методів отримання заготовок із алюмінію, сталі з напилення шару алюмінію та методик дослідження впливу параметрів технологічного процесу на експлуатаційні властивості зміцнених деталей. Розроблено установку для оплавлення покриттів і конструкції інструментів для фрикційного зміцнення покриттів.

Розроблено установку для нанесення МДО-покриттів у проточному електроліті, конструкції електрохімічних комірок та технологічний процес

МДО в проточному електроліті втулок циліндрових і штоків поршня, які забезпечують рівномірне нанесення покриття з малою шорсткістю поверхні, високою мікротвердістю і зносостійкістю.

Розроблено обладнання для випробовувань на зношування та для корозійних випробовувань деталей з покриттями.

Розроблено методику планування експериментів для оптимізації технологічних параметрів процесу МДО в проточному електроліті (ортогональний центральний композиційний експеримент) та для отримання математичних моделей для шорсткості, сил різання і питомої витрати алмазів під час шліфування МДО-покриттів (повнофакторний експеримент).

**У четвертому розділі** розроблено методику розрахунку основних технологічних параметрів процесу відцентрового армування з двома взаємно перпендикулярними осями обертання, які забезпечують транспортування частинок оксиду у потрібну область вилівка заготовки деталі. За малих швидкостей обертання виявлено виразне несиметричне формування армованої зони унаслідок відхилення пучка траєкторій частинок від осі, із збільшенням частот обертання відносно обох осей зміщення армованої зони стає незначним.

Для досліджуваних матеріалів (алюміній, оксид алюмінію, оксид титану, оксид цирконію, карбід вольфраму) визначено оптимальні початкові умови введення їх у неоднорідний потік для забезпечення потрапляння цих частинок у центр області напилення.

**У п'ятому розділі** наведено результати експериментальних досліджень впливу технологічних параметрів процесу МДО на показники точності та якості поверхонь деталей.

Побудовано математичну модель процесу, на основі якої встановлено, що оптимальні значення технологічних параметрів процесу оксидування для отримання максимальної мікротвердості, мінімального зношування практично збігаються, а для мінімальної шорсткості та конусоподібності не збігаються як з оптимальними технологічними параметрами для мікротвердості та зношування, так і між собою;

Розроблено математичну модель впливу глибини різання, швидкості обертання деталі та поздовжньої подачі стола верстата при круглому алмазному шліфуванні оксидного покриття, нанесеного в проточному електроліті на сталеву основу, на шорсткість, сили різання та питому витрату алмазів.

Визначено, що опір статичній водневій втомі та зносостійкість сталевих деталей можна підвищити нанесенням алюмінієвого покриття, оксидованого мікродуговим способом. В умовах сірководнево-вмісних середовищ деталі нафтогазопромислового обладнання з алюмінієвого сплаву Д16Т, оксидованого мікродуговим способом, і сталеві штоки з оксидованим алюмінієвим покриттям мають довговічність у 2-3 рази більшу, ніж сталеві штоки без покриття.

**У шостому розділі** проведено моделювання різних варіантів складання вузлів із деталей, зміцнених МДО.

Для потреб регулювання кута атаки лопатей у осьових вентиляторах наддуву газоперекачувальних агрегатів застосовано роз'ємне клемове з'єднання з неповним охопленням вала. На підставі апріорних припущень про розподіл контактних напружень встановлено аналітичні залежності граничних моментів та сил зрушування у клемовому з'єднанні від кутів охоплення вала, від сили затягування болта та від трибологічних властивостей поверхонь деталей.

Розроблено варіант теорії різьбового з'єднання, обладнаного цанговою гайкою з підпружиненими пелюстками. На підставі розв'язку модельної контактної задачі про взаємодію циклічно-симетричної системи пелюсток з внутрішнім болтом та зовнішньою (встановленою з натягом та працюючою на згин) пружиною запропоновано аналітичну оцінку величини максимального фрикційного моменту, який протидіє самовідгвинчуванню гайки.

У рамках класичної теорії пластин та оболонок розроблено математичну модель складеного вузла «задній диск – ступиця – конічна кришка» для робочого колеса відцентрового вентилятора. Враховано похибки формоутворення конічної оболонки і визначено еквівалентні складальні напруження в деталях робочого колеса, залежні від величини зазору чи натягу. Встановлено нерівності для величини зазорів, за яких складальні напруження в



деталях разом з напруженнями від експлуатаційного навантаження не перевищують допустимого значення із заданим коефіцієнтом запасу міцності.

Для підвищення якості сполучення великогабаритних сталевих і/або чавунних деталей запропоновано наносити покриття, які змінюють структуру поверхонь, що контактують, – тонкий алюмінієвий шар, прооксидований по смугах завширшки від 4 мм до 6 мм з таким же кроком.

Проведено імітаційне моделювання варіантів складання плунжера насоса (хвостовик – вуглецева сталь, робоча частина – алюмінієвий сплав, зі зміцненою МДО поверхнею). Варіант згвинченого моментом з'єднання із клеєм є найбільш прийнятним з посеред досліджуваних.

**У сьомому розділі** розроблено методику розрахунку припусків на механічну обробку деталей з МДО-покриттями, проведено оптимізацію режимів різання під час круглого алмазного шліфування, наведено результати стендових випробовувань та відомості про впровадження результатів досліджень, розроблено технологію утилізації відпрацьованих електролітів.

Для електрохімічних оксидних покриттів встановлено оптимальну глибину залягання оброблених поверхонь з мінімальною шорсткістю.

Розроблено математичну модель процесу зовнішнього круглого алмазного шліфування деталі з оксидним покриттям, нанесеним в проточному електроліті, яка включає обмеження за шорсткістю поверхні, за потужністю, за швидкістю обертання деталі, за поздовжньою подачею стола верстата, за точністю обробки та за собівартістю операції шліфування.

Запропоновані до застосування силікатно-лужні електроліти та продукти їх електролізу не містять у своєму складі речовин 1-ого та 2-ого класів небезпеки. Для очищення і нейтралізації електролітів розроблено гідроциклон, який дозволяє створити замкнутий цикл очищення за рахунок прямоточності та інтенсифікації процесу відновлення відпрацьованого електроліту.

**Ключові слова:** технологічний процес, мікродугове оксидування, електродугове напилення, покриття, шорсткість поверхні, точність обробки, складання.

### Список публікацій здобувача

1. Роп'як Л. Я. Применение поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов и покрытий для повышения коррозионно-механической стойкости деталей нефтегазопромыслового оборудования / Л. С. Саакиян, А. П. Ефремов, Л. Я. Ропяк, А. В. Эпельфельд. – М.: ВНИИОЭНГ, 1986. – Вып. 6(58). – 61 с. Обзорная информация: серия «Борьба с коррозией и защита окружающей среды».

2. Роп'як Л. Я. К методике микроэлектрохимических исследований / Л. С. Саакиян, А. П. Ефремов, Л. Я. Ропяк, А. В. Горбатский // Физико-химическая механика материалов. – 1987. – № 3. – С. 40-43.

Ropyak L. Ya A method of microelectrochemical investigations / L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, L. Ya. Ropyak, A.V. Gorbatskii // Soviet Materials Science. – 1987. – Vol. 23. – Issue 3. – P. 267-269 (**Scopus**).

3. Роп'як Л. Я. Влияние нагружения на микроэлектрохимическую гетерогенность стали / Л. С. Саакиян, А. П. Ефремов, Л. Я. Ропяк // Защита металлов. – 1989. – Т. 25. – № 2. – С. 233–237 (**Scopus**).

4. Роп'як Л. Я. Аналіз токсичності електролітів для отримання композиційних електрохімічних оксидних покриттів / Л. Я. Роп'як, Л. Я. Побережний, І. О. Шуляр // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2000. – Вип. 37. – Т. 5. – С. 134–140.

5. Роп'як Л. Я. Оптимізація технологічних процесів виготовлення плунжерів бурового насоса // Л. Я. Роп'як, І. О. Шуляр, Б. О. Борушак // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2001. – Вип. 17. – С. 206–211.

6. Роп'як Л. Я. Мікроелектрохімічна неоднорідність зварних з'єднань трубопроводів при різних видах термічної обробки / Л. Я. Роп'як, Ю. Д. Петрина, О. О. Онищук, Д. Ю. Петрина, М. Б. Налісний // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – Вип. 3. – Т. 8. – С. 131–133.

7. Роп'як Л. Я. Локальні напруження у покритті неоднорідної основи / І. П. Шацький, Л. Я. Роп'як // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ – 2004. – Вип. 28. – С. 277–282.

8. Роп'як Л. Я. Про згин пластинки на неоднорідній вінклерівській основі [Текст] / Л. Я. Роп'як, І. О. Шуляр, І. П. Шацький // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2007. – Т. 12. – № 3. – С. 22–26.

9. Роп'як Л. Я. Дослідження напруженого стану комбінованого зубка: твердий сплав – сталь / Л. Я. Роп'як, І. Г. Барило, Л. Д. Пітулей, І. Б. Копей // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 3. – С. 131–133.

10. Роп'як Л. Я. Дослідження впливу форми зубка на міцність його з'єднання з корпусом шарошки / С. Д. Вуйцік, С. С. Вуйцік, Д. С. Вуйцік, І. О. Шуляр, Л. Д. Пітулей, Л. Я. Роп'як // Нафтогазова енергетика: всеукраїнський науково-технічний журнал. – 2010. – № 2 (13). – С. 9–11.

11. Роп'як Л. Я. Моделювання руху частинок порошку при напиленні покриттів електродуговим методом / В. В. Кустов, М. В. Маковійчук, Л. Я. Роп'як // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 41. – С. 188–197.

12. Роп'як Л. Я. Аналітичне дослідження електричного опору мікроелектродів кінчної форми / М. В. Маковійчук, В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як // Методи та прилади контролю якості. – 2011. – № 26. – С. 103–108.

13. Роп'як Л. Я. Дослідження процесу зміцнення поверхонь деталей машин обробкою іскровими розрядами / Л. Григорчук, В. Кустов, М. Осипчук, Л. Роп'як // Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. – 2011. – Т. 16. – № 3. – С. 116–122.

14. Роп'як Л. Я. Вплив зносу деталей пари крейцкопф – напрямні поршневого насоса двосторонньої дії на його кінематичні та силові параметри / В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як, А. Ю. Годлевський // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2011. – № 3 (29). – С. 64–70.

15. Роп'як Л. Я. Електрохімічні дослідження захисної дії та роботоздатності гальванічних покриттів / В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – № 2 (39). – С. 71–75.

16. Роп'як Л. Я. Аналіз позаштатного напружено-деформованого стану штока поршневого насоса двосторонньої дії, спричиненого зносом пари тертя «крейцкопф –

напрявні» / А. С. Величкович, В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – Вип. 2 (44). – С. 36–50.

17. Роп'як Л. Я. Дослідження напружено-деформованого стану вкритої хромовим покривом ділянки штока поршневого насоса двосторонньої дії в умовах позаштатного навантаження / В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як, А. С. Величкович // Методи та прилади контролю якості. – 2013. – № 2 (31). – С. 118–125.

18. Роп'як Л. Я. Оцінка міцності вкритої шаруватим покриттям ділянки штока бурового насоса з урахуванням позаштатних напружень / А. С. Величкович, Л. Я. Роп'як // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2013. – № 772. – С. 182–191.

19. Роп'як Л. Дослідження руху твердих частинок у рідкому сплаві при відцентровому армуванні з двома взаємно перпендикулярними осями обертання ливарної форми / І. Шуляр, М. Маковійчук, Л. Роп'як // Наукові нотатки. – 2013. – № 40. – С. 321–330.

20. Роп'як Л. Я. Раціональний підбір натягу у з'єднанні зубця з шарошкою / І. П. Шацький, І. О. Шуляр, В. А. Корнута, Л. Я. Роп'як // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Вип. 1, 2 (45). – С. 279–285.

21. Роп'як Л. Я. Оптимізація комбінованого твердосплавного інструмента для бурення горних порід / І. О. Шуляр, В. В. Врюкало, Л. Я. Роп'як, Д. Ф. Лялюк // Наукоемкие технологии в машиностроении. – М.: Машиностроение. – 2013. – № 10 (28). – С. 27–33.

22. Роп'як Л. Я. Розрахунки з'єднань із натягом у шарошках, оснащених композиційними зубцями зі сталевим хвостовиком / І. О. Шуляр, І. П. Шацький, В. А. Корнута, Л. Я. Роп'як // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2013. – № 1 (34). – С. 126–133.

23. Роп'як Л. Я. Дослідження руху та нагрівання частинок порошку в процесі напилення композиційних покриттів електродуговим методом / В. В. Кустов,

М. В. Маковійчук, Л. Я. Роп'як. // Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки». – Луцьк: ЛНТУ, 2014. – Вип. 44. – С. 154–163.

24. Роп'як Л. Я. Вплив ейлерових сил на точність механічної обробки отворів при свердлінні / Л. Я. Роп'як, К. Г. Левчук, К. І. Цідило // Високі технології в машинобудуванні. – 2014. – № 1. – С. 139–147.

25. Роп'як Л. Я. Аналіз точності токарної обробки зовнішньої циліндричної поверхні втулок / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1 (90). – Ч. 1. – С. 86–93.

26. Роп'як Л. Я. Оптимізація режимів різання при шліфуванні деталей з хромовим покриттям / Л. Я. Роп'як, В. В. Остапович // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2015. – Вип. 37. – С. 113–121.

27. Роп'як Л. Я. Теоретичне дослідження зміни кута підйому гвинтової лінії конічних різьб / Л. Я. Роп'як, М. В. Маковійчук, О. В. Рогаль // Різання і інструмент в технологічних системах. – 2015. – Вип. 85. – С. 252–262.

28. Роп'як Л. Я. Оцінка міцності двошарового покриття під локальним навантаженням / Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький, М. В. Маковійчук // Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки». – Луцьк: ЛНТУ, – 2015. – № 50. – С. 148–152.

29. Ropyak L.Ya. Elementary calculation of clip connection with incomplete swep of shaft / I. P. Shatsky, L.Ya. Ropyak // Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. – 2015. – Issue 2. – P. 51-56.

30. Роп'як Л. Я. Повышение качества соединения крупногабаритных составных изделий / В. Т. Лебедь, Н. В. Тарельник, О. Н. Лашкарев, Л. Я. Роп'як // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 4 (1113). – С. 181 – 184.

31. Роп'як Л. Я. Технологічні аспекти армування тіл обертання гранулами легких карбідів у процесі електрошлакового відцентрового лиття / О. Р. Онисько,

О. М. Богаченко, Л. Я. Роп'як // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2015. – Вип. 10. – С. 128-139.

32. Роп'як Л. Я. Кінетика просочування  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  марганцевим мельхіором у процесі отримання керметів // Т. А. Шіхаб, Я. А. Криль, Ю. І. Парайко, П. М. Присяжнюк, Л. Я. Роп'як, В. В. Тирлич / Фізика і хімія твердого тіла. – Івано-Франківськ. – 2015. – Т. 16. – № 2. – С. 408–412.

33. Роп'як Л. Я. Оптимізація міцності двошарового покриття для локального навантаження / І. П. Шацький, Л. Я. Роп'як, М. В. Маковійчук // Проблеми прочності. – 2016. – № 5. – С. 163–168.

Ropyak, L. Ya. Strength optimization of a two-layer coating for the particular local loading conditions / I. P. Shats'kyi, L. Ya. Ropyak, M. V. Makoviichuk // Strength of Materials. – 2016. – Vol. 48. – Issue 5. – P. 726–730 (**Scopus**).

34. Ropyak, L. Ya. Determination of the optimal allowances for machining of parts with coatings / V. V. Kustov, L. Ya. Ropyak, N. V. Makoviychuk, V. V Ostapovich. // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – №. 1. – P. 164-171.

35. Роп'як Л. Я. Дослідження впливу режимів алмазного шліфування на шорсткість хромового покриття методом математичного планування експерименту / Л. Я. Роп'як, В. В. Остапович // Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки». – Луцьк: ЛНТУ, 2016. – Вип. 53. – С. 131–139.

36. Роп'як Л. Я. Вплив технологічних параметрів процесу відцентрового армування на показники якості деталей / Л. Я. Роп'як, І. О. Шуляр, О. М. Богаченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 1/5 (79). – С. 53–62 (**Scopus**).

37. Роп'як Л. Я. Оптимізація технологічних параметрів процесу хромування для забезпечення показників якості деталей поршневих насосів / Л. Я. Роп'як, В. В. Остапович // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 2/5 (80). – С. 50–62 (**Scopus**).

38. Ropyak L. Improving the aluminum drill pipes stability by optimizing the shape of protector thickening / O. Vlasiy, V. Mazurenko, L. Ropyak, A. Rogal // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – №. 1/7(85). – P. 25–31 (**Scopus**).

39.Роп'як Л. Я. Вплив товщини оксидного шару на опір кераміко-алюмінієвого покриття інденуванню / Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький, М. В. Маковійчук // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2017. – Т. 39. – № 4. – С. 517-524 (**Scopus**).

40.Роп'як Л. Я. Дослідження напруженого стану литої заготовки лопатевого долота / Т. О. Пригоровська, Л. Я. Роп'як, І. С. Когут, В. Г. Панчук, Л. О. Борушак, І. О. Шуляр // *Вісник ЖДТУ*. – 2017. – Т. 2. – № 2 (80). – С. 135-141.

41.Ropyak L. Analytical estimations of strength of two layer coating loaded along a line / I. Shatskyi, M. Makoviichuk, L. Ropyak // *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. – 2017. – Vol. 17. – № 2. – P. 109-114.

42.Роп'як Л. Я. Складальні напруження в робочому колесі відцентрового вентилятора / Л. Я. Роп'як // *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПИ», 2017. – №. 26 (1248). – С. 86–93.

43.Ropyak L. Estimation of ultimate loads for clip connection with partial sweep of shaft / L. Ropyak, I. Shatskyi, A. Velychkovych // *International Scientific Journal «Machines. Technologies. Materials»*. – Sofia, Bulgaria. – 2017. – Year XI, Issue 2. – P. 39–42.

44.Компютерна програма «Розрахунок чисел зубів змінних зубчастих коліс гітар» («UnitMainZub») / В. Я. Роп'як, Л. Я. Роп'як, М. М. Белей // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 38088; дата реєстрації 22.04.2011.

45.Компютерна програма «Програма підбору чисел зубів змінних зубчастих коліс гітар» («Gitara\_Zmin\_Zub\_Kolis\_001\_KIS») / В. Я. Роп'як, І. С. Когут, Л. Я. Роп'як, В. В. Кустов // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 39064; дата реєстрації 07.07.2011.

46.А. с. № 1272187, СССР, МКИ G 01 N 17/00. Устройство для коррозионно-эрозионных испытаний материалов / Л. С. Саакян, А. П. Ефремов, А. В. Эпельфельд, Л. Я. Ропяк (СССР). – № 38524541/25-28; заявл. 07.02.85; опубл. 23.11.86, Бюл № 43. – 4 с.

47.А. с. № 1296862, СССР, МКИ G 01 L 1/00. Устройство для определения остаточных напряжений / А. П. Ефремов, Л. С. Саакян, Ю. И. Бабей, Л. Я. Ропяк,

А. В. Эпельфельд (СССР). – № 3933008/24-10; заявл. 19.07.85; опубл. 15.03.87, Бюл № 10. – 4 с.

48.А. с. № 1296920, СССР, МКИ G 01 N 27/26. Устройство для микроэлектрохимических коррозионных исследований материалов / Л. С. Саакиян, А. П. Ефремов, Ю. И. Бабей, И. Г. Мельников, Л. Я. Ропяк (СССР). – № 4324161/25-28; заявл. 02.11.87; опубл. 23.07.89, Бюл № 27. – 3 с.

49.А. с. № 1485670, СССР, МПК С 23 С 28/00. Способ защиты стали от сульфидного растрескивания / А. П. Ефремов, Г. А. Марков, Л. Я. Ропяк, Л. С. Саакиян, А. В. Эпельфельд (СССР). – № 3933267/22-63; заявл. 24.07.85; опубл. 23.06.87, Бюл № 7. – 3 с.

50.А. с. № 1489221, СССР, МПК С 25 D 11/02. Способ микродугового анодирования алюминиевых сплавов и покрытий / А. П. Ефремов, Л. С. Саакиян, А. В. Эпельфельд, Н. Л. Болотов, А. И. Капустник, Л. Я. Ропяк (СССР). – № 4268269/31-02; заявл. 25.06.87; опубл. 17.07.88, Бюл № 17. – 3 с.

51.А. с. № 1495681, СССР, МКИ G 01 N 3/56. Установка для испытания материалов при изнашивании струей рабочей среды / М. И. Бурда, В. Я. Белоусов, И. М. Богатчук, Л. Я. Ропяк (СССР). – № 3882569/23-25; заявл. 08.04.85; опубл. 15.03.87, Бюл № 10. – 3 с.

52.А. с. № 1504292, СССР, МКИ С 25 D 11/02. Устройство для микродугового оксидирования вентильных металлов и их сплавов / А. П. Ефремов, Л. С. Саакиян, А. И. Капустник, А. В. Эпельфельд, Л. Я. Ропяк, И. Г. Мельников (СССР). – № 4296518/31-02; заявл. 17.08.87; опубл. 30.08.89, Бюл № 32. – 6 с.

53.А. с. № 1516206, СССР, МКИ В 21 Н 3/04, С 25 D 11/02. Инструмент для упрочнения профилей / В. Я. Белоусов, И. Ю. Гладий, З. Д. Василечко, И. М. Стоцкий, Л. Я. Ропяк, Я. В. Билусяк, М. Н. Микитюк (СССР). – № 4379539/31-27; заявл. 13.11.87; опубл. 23.10.89, Бюл № 39. – 3 с.

54.А. с. № 1541035, СССР, МКИ В 24 В 39/00. Ролик для упрочняющей обработки деталей / В. Я. Белоусов, И. Ю. Гладий, З. Д. Василечко, И. М. Стоцкий, Л. Я. Ропяк, М. Н. Микитюк, М. Д. Юсыпив (СССР). – № 4369277/31-27; заявл. 09.12.87; опубл. 07.02.90, Бюл № 5. – 3 с.



55.А. с. № 1549598, СССР, МКИ В 04 С 5/20. Гидроциклон / В. Т. Яворский, Л. И. Челядин, С. В. Волковецкий, И. М. Стоцкий, И. Ю. Гладий, Л. Я. Ропяк (СССР). – № 4381126/31-26; заявл. 13.11.87; опубл. 15.03.90, Бюл № 10. – 4 с.

56.А. с. № 1569201 СССР, МКИ В 24 В 39/00. Устройство для упрочнения длинномерных цилиндрических деталей [Текст] / И. Ю. Гладий, И. М. Стоцкий, Ю. Д. Петрина, Л. Я. Ропяк, Ю. С. Пыриг, И. О. Загайдук, Я. В. Витвицкий (СССР). - № 4478821/31-27; заявл. 02.09.88; опубл. 07.06.90, Бюл. № 21. – 4 с.

57.А. с. № 1624060, СССР, МКИ С 01 D 11/06. Устройство для микродугового оксидирования вентильных металлов и их сплавов / А. П. Ефремов, И. К. Залялетдинов, А. И. Капустник, И. Б. Куракин, Ю. Б. Пазухин, Л. Я. Ропяк, Б. В. Харитонов, А. В. Эпельфельд (СССР). – № 4661086/02; заявл. 10.03.89; опубл. 30.01.91, Бюл № 4. – 5 с.

58.А. с. № 1670564, СССР, МКИ G 01 N 27/416. Способ определения эффективности ингибиторов коррозии для сероводородосодержащих / Л. С. Саакян, А. П. Ефремов, А. В. Эпельфельд, Л. Я. Ропяк, А. И. Капустник, А. В. Жовнирчук (СССР). – № 4381126/31-26; заявл. 13.11.87; опубл. 15.03.90, Бюл № 10. – 4 с.

59. А. с. № 1722671, СССР, МКИ В 21 Н 3/04. Способ упрочнения конических резьб / Б. А. Чернов, Б. Ю. Оглобьяк, И. С. Бабюк, В. М. Гринив, Л. Я. Ропяк, Я. Б. Чернов (СССР). – № 4757014/27; заявл. 30.08.90; опубл. 30.03.92, Бюл № 12. – 5 с.

60.А. с. № 1750764, СССР, МКИ В 21 В 39/00. Способ упрочнения конической резьбы / Б. А. Чернов, Б. Ю. Оглобьяк, И. С. Бабюк, В. М. Гринив, Я. Б. Чернов, Л. Я. Ропяк (СССР). – № 4884894/27; заявл. 26.11.90; опубл. 30.07.92, Бюл № 28. – 2 с.

61.А. с. № 1767044, СССР, МКИ С 01 D 11/06. Электролит для микродугового анодирования алюминия и его сплавов / Л. С. Саакян, А. П. Ефремов, А. В. Эпельфельд, Л. Я. Ропяк, Н. М. Католикова, А. И. Капустник, И. М. Колесников (СССР). – № 4841930/02; заявл. 21.06.90; опубл. 07.10.92, Бюл № 37. – 2 с.

62. Декларацийний пат. 39303А Україна, МПК G 01 N 27/30. Мікроелектрод для електрохімічних вимірювань / Л. Я. Роп'як, Д. Ю. Петрина, І. О. Шуляр, В. В. Кустов, В. М. Гусак; заявник і патентовласник ІФДТУНГ. – № 2000010334; заявл. 20.01.00; опубл. 15.06.01, Бюл. № 5. – 3 с.

63. Деклараційний пат. 40784А Україна, МПК (2006) С23С4/04. Установка для напилення композиційних покриттів електродуговим методом / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як; власник ІФДТУНГ. – № 200010333; заявл. 20.01.2000; опублік. 15.12.2001, Бюл. № 7. – 3 с.

64. Пат. 40784 Україна, МПК С 23 С 4/04, 26/02, 28/00. Установка для напилення композиційних покриттів електродуговим методом / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як; заявник і патентовласник ІФДТУНГ. – № 2000010333; заявл. 20.01.00; опубл. 15.12.03, Бюл. № 12. – 3 с.

65. Пат. 79345 Україна, МПК (2006) С 25 D 11/18. Спосіб нанесення захисного оксидного покриття на алюміній та його сплави, розчин для термічної обробки та колоїдна суспензія для ущільнення покриття / Л. Я. Роп'як, О. С. Малишевська, В. М. Білінський заявник і патентовласник ІФНТУНГ. – № а 200506816; заявл. 11.07.2005; опубл. 11.06.2007, Бюл. № 8. – 4 с.

66. Пат. 85519 Україна, МПК (2006) G 01 N 3/20. Спосіб нанесення осесиметричних вихідних втомних тріщин на циліндричних зразках / Д. Ю. Петрина, Л. Я. Роп'як; власник ІФНТУНГ. – № а 200705249; заявл. 14.05.2007; опубл. 26.01.2009, Бюл. № 2. – 6 с.

67. Пат. на корисну модель 43750 Україна, МПК (2009) E 21 B 17/00. Спосіб зміцнення насосних штанг для свердловинних насосів / І. І. Стеліга, Л. Я. Роп'як, В. М. Білінський; заявник і патентовласник ІФНТУНГ. – № u 200903944; заявл. 21.04.2009; опублік. 25.08.2009, Бюл. № 16. – 3 с.

68. Пат. на корисну модель 67165 Україна, МПК (2012) B 05 D 3/14. Спосіб підготовки поверхні деталей перед газотермічним напиленням покриттів / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як, А. К. Смаглюк; заявник і патентовласники – винахідники. – № u201107081; заявл. 06.06.11; опубл. 10.02.12, Бюл. № 3. – 3 с.

69. Пат. на корисну модель 72831 Україна, МПК (2006) G 01 N 3/20. Спосіб визначення тріщиностійкості твердих сплавів, керамічних матеріалів та покриттів / Л. Я. Роп'як, О. В. Рогаль, О. М. Яковин, І. Г. Барило; заявники і патентовласники – винахідники. – № u 201202856; заявл. 12.03.2012; опублік. 27.08.2012, Бюл. № 16. – 5 с.

70. Пат. на корисну модель 68266 Україна, МПК (2012) E 21 B 10/00. Спосіб кріплення зубків у шарошках бурових доліт / І. О. Шуляр, А. К. Смаглюк, С. Д. Вуйцік, Д. С. Вуйцік, С. С. Вуйцік, Л. Я. Роп'як; заявники і патентовласники – винахідники. – u201108805; заявл. 13.07.11; опубл. 26.03.12, Бюл. № 6. – 5 с.

71. Пат. на корисну модель 72832 Україна, МПК (2006) B 24 B 39/04. Інструмент для фрикційно-зміцнюючої обробки деталей / В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як; заявники і патентовласники – винахідники. – № u 201202858; заявл. 12.03.2012; опублік. 27.08.2012, Бюл. № 16. – 6 с.

72. Пат. 103529 Україна, МПК (2013) E 21 B 17/00. Спосіб зміцнення бурильних труб із алюмінієвих сплавів / Л. Я. Роп'як, О. В. Рогаль; заявник і патентовласник ІФНТУНГ. – № а 201114404; заявл. 05.12.2011; опублік. 25.10.2013, Бюл. № 20. – 6 с.

73. Пат. 106512 Україна, МПК (2014) C23 C 22/02. Спосіб формування зносостійких шарів на деталях із алюмінієвих сплавів / М. Й. Бурда, Л. Я. Роп'як, О. В. Рогаль, Ю. М. Бурда; заявник і патентовласник ІФНТУНГ. – № а 201208799; заявл. 17.07.2012; опублік. 10.09.2014. Бюл. № 17. – 4 с.

74. Пат. 108341 Україна, МПК (2015) F 16 J 1/00. Циліндро-поршневий вузол насоса / Г. В. Григорчук, Л. І. Григорчук, Л. Я. Роп'як, М. Й. Бурда; заявники і патентовласник – винахідники. – № а 201408647; заявл. 30.07.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. – 6 с.

75. Пат. 109077 Україна, МПК (2006) B 23 B 27/06. Різець для нарізання зовнішньої трикутної циліндричної різьби / О. Р. Онисько, Л. Я. Роп'як, В. Г. Панчук; заявники і патентовласники – винахідники. – № а 201403278; заявл. 31.03.14; опубл. 10.07.15, Бюл. № 13. – 7 с.

76. Пат. 114372 Україна, МПК (2017) C 25 D 19/00. Пристрій для локального формування покриттів із електроліту на довгомірних деталях / Л. Я. Роп'як, М. Й. Бурда, О. В. Рогаль, Ю. Й. Стрілецький; заявник і патентовласник ІФНТУНГ. – № а 201600557; заявл. 25.01.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10. – 5 с.

77. Пат. 116066 Україна, МПК (2006) E 21 B 17/00. Бурильна труба із легкого сплаву / Л. Я. Роп'як, О. О. Власій, В. В. Мазуренко, О. В. Рогаль, М. Й. Бурда;

заявник і патентовласник ІФНТУНГ. – № а 201612570; заявл. 09.12.2016; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2. – 3 с.

78. Пат. 116950 Україна, МПК (2018) В 21 Н 3/04. Інструмент для фрикційного зміцнення конічних замкових різьб / О. В. Рогаль, М. Й. Бурда Л. Я. Роп'як, І. П. Тарас; заявник і патентовласник ІФНТУНГ. – № а 201613592; заявл. 29.12.2016; опубл. 25.05.2018, Бюл. 10. – 9 с.

79. Пат. 117625 Україна, МПК (2006) G 01N 3/56. Спосіб випробовування матеріалів на зношування при терті по абразивному прошарку / М. Й. Бурда, Л. Я. Роп'як, Й. М. Бурда, О. В. Рогаль, В. В. Перепічка, В. С. Витвицький; заявник і патентовласник ІФНТУНГ. – № а 201700398; заявл. 16.01.2017; опубл. 27.08.2018, Бюл № 16. – 7 с.

80. Роп'як Л. Я. Электрохимические композиционные оксидные покрытия / Л. Я. Роп'як, А. И. Капустник, Ю. Д. Петрина, И. Ю. Гладий. – К.: Час, 1990. – 2 с.

81. Роп'як Л. Я. Способ обработки металлических поверхностей / Б. А. Чернов, И. В. Голубчак, Л. Я. Роп'як // В сб. тез. докл. научно-технической конференции “Применение композиционных материалов в народном хозяйстве”, 10-11 сентября 1992, Солигорск. – Солигорск, 1992. – С. 103.

82. Роп'як Л. Я. Технологія відновлення зношених деталей машин / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як, О. І. Яворська // Тези доповідей міжнародної наук.-практ. конф. «Наукові дослідження – теорія та експеримент «2005»», 16-20 травня 2005, Полтава. – Полтава, 2005. – Т. 9. – С. 29-30.

83. Роп'як Л. Я. Вплив неоднорідності основи на міцність оксидного покриття / Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький // Анотації міжнародної науково-технічної конференції “Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці” «ІФНТУНГ– 40», 16-20 квітня 2007 р, Івано-Франківськ. – Івано-Франківськ, 2007. – С. 284.

84. Роп'як Л. Я. Моделювання різьбового з'єднання з цанговою гайкою / Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький // Тези доповіді 8-го Міжнародного симпозіуму Українських інженерів-механіків у Львові, 23-25 травня 2007 р, Львів. – Львів, 2007. – С. 90.

85. Роп'як Л. Пристрій для автоматизації процесу напилення покриттів / В. Кустов, Л. Роп'як, А. Смаглюк // Матеріали міжн. наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», 19-21 травня 2010 р, Тернопіль. – Тернопіль: ТНТУ, 2010. – С. 174 – 175.

86. Роп'як Л. Математичне моделювання процесів нагрівання і руху частинок порошку при електродуговому напиленні композиційних покриттів / В. Кустов, Л. Роп'як // Тези доповідей V Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Комп'ютерні технології: наука і освіта», 30 вересня - 3 жовтня 2010 р, Микуличин. – Київ: Університет «Україна», 2010. – С. 128.

87. Роп'як Л. Я. Відцентрове армування озброєння бурових інструментів / І. О. Шуляр, В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як // Матеріали II міжнародної наук.-практ. конф., «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 23-25 травня 2012 р, Чернігів. – Чернігів, 2012. – С. 29.

88. Роп'як Л. Я. Моделювання руху твердих частинок у рідкому сплаві при відцентровому армуванні деталей / І. О. Шуляр, М. В. Маковійчук, Л. Я. Роп'як // Машиностроение и техносфера XXI века: XIX междунар. науч.-техн. конф., 17-22 сентября 2012 г, Севастополь. – Донецьк, 2012. – Т. 3. – С. 83.

89. Роп'як Л. Я. Аналіз несучої здатності трикомпонентних з'єднань композиційних зубців з шарошкою долота / І. О. Шуляр, І. П. Шацький, В. А. Корнута, Л. Я. Роп'як // Міжнар. наук.-техн. конф. «Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі», 3-6 жовтня 2012 р, Івано-Франківськ. – Івано-Франківськ, 2012. – С. 22-23.

90. Роп'як Л. Я. Оцінка міцності реставрованої ділянки штока бурового насоса з урахуванням позаштатного напружено-деформованого стану / А. С. Величкович, Л. Я. Роп'як // Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика 2013», 7-11 жовтня 2013 р, Івано-Франківськ. – Івано-Франківськ, 2013. – С. 106-108.

91. Роп'як Л. Я. Застосування двошарових покриттів для зміцнення деталей нафтогазового обладнання / Л. Я. Роп'як // Збірник наукових праць II-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології машинобудування», 10-15 лютого 2014 р, Львів. – Львів: НУ «Львівська Політехніка», 2014. – С. 52.

92. Роп'як Л. Я. Плазмово-електролітичне оксидування ливарних алюмінієвих сплавів / Л. Я. Роп'як // Матеріали 14-й Міжнародної науково-технічної конф., «Інженерія поверхності і реновація изделий», 02-06 червня 2014 г, Свалява. – Київ, 2014. – С. 119-121.

93. Роп'як Л. Я. Елементарний розрахунок клемових з'єднань з неповним охопленням вала / І. П. Шацький, Л. Я. Роп'як // Матеріали II Міжнародної конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки», 16-20 березня 2015 р, Київ-Одеса. – Одеса: ТЭС, 2015. – С. 92-93.

94. Роп'як Л. Я. Визначення припусків на механічну обробку деталей з композиційними покриттями / В. Кустов, Л. Роп'як, М. Маковійчук, К. Цідило // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», 19-21 травня 2015 р, Тернопіль, – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – С. 103-104.

95. Роп'як Л. Я. Теоретичне дослідження зміни кута підйому гвинтової лінії кінцевих різьб / Л. Я. Роп'як, М. В. Маковійчук О. В. Рогаль // Матеріали XXIII міжнародного науково-технічного семінару «Високі технології: тенденції розвитку», 7-12 вересня 2015 р, Одеса. – Харків: Вид-во «Курсор», НТУ «ХП», 2015. – С. 137-138.

96. Роп'як Л. Я. Шляхи підвищення ефективності технологічного процесу плазмово-електролітичного оксидування алюмінію та якості покриттів / Л. Я. Роп'як: Збірник наукових праць V-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», 8-12 лютого 2016 р, Львів. – Львів: НУ «Львівська Політехніка», 2016. – С. 122-126.

97. Роп'як Л. Я. Шляхи підвищення експлуатаційних характеристик алюмінієвих бурильних труб / Л. Я. Роп'як, М. Й. Бурда, О. В. Рогаль // Тези доповідей XIX-ї наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 18-19 травня 2016 р, Тернопіль. – Тернопіль: ТНТУ, 2016. – С. 69.

98. Роп'як Л. Я. Технологічне забезпечення точності та якості виготовлення і відновлення змінних деталей поршневіх насосів двосторонньої дії / В. В. Остапович,

Л. Я. Роп'як // Матеріали XIV-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», 31 травня-3 червня 2016 р, Краматорськ. – Краматорськ: ДДМА, 2016. – С. 69.

99. Роп'як Л. Я. Установка для локального формування оксидних покриттів на алюмінієвих бурильних трубах / Л. Я. Роп'як, О. В. Рогаль, М. Й. Бурда // II Всеукраїнська науково-практична конференція «Приладобудування та метрологія: Сучасні проблеми, тенденції розвитку», 6-7 жовтня 2016 р, Луцьк. – Луцьк: ЛНТУ, 2016. – С. 77-78.

100. Роп'як Л. Дослідження впливу гіроскопічного ефекту на точність обробки отворів при свердлінні / Л. Роп'як, К. Цідило, І. Цідило // Матеріали другої Всеукраїнської наукової конференції «Прикладні задачі математики», 13-15 жовтня 2016 р, Івано-Франківськ. – Івано-Франківськ, 2016. – С. 81-82.

101. Роп'як Л. Я. Моделювання руху твердих частинок у рідкому алюмінієвому сплаві при відцентровому армуванні виливок з двома осями обертання ливарної форми / Л. Я. Роп'як, М. С. Воробйов, М. В. Маковійчук // Фізичні та комп'ютерні технології. Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції, 7-9 грудня 2016 р, Харків. – Харків: ЛІРА, 2016. – С. 463-465.

102. Роп'як Л. Я. Особливості застосування шаруватого покриття для реставрації штока бурового насоса / Л. Я. Роп'як, А. С. Величкович [Текст] // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» – 2017: матеріали науково-технічної конференції, 30 - 31 травня 2017 р, Київ. – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – С. 141-142.

103. Роп'як Л. Я. Розробка двошарового покриття для захисту сталі від сульфідного розтріскування та зносу / Л. Я. Роп'як // Матеріали VI науково-технічної конференції “Прогресивні технології в машинобудуванні”, 6-10 лютого 2017 р, Львів-Звенів. – Львів: НУ «Львівська Політехніка», 2017. – С. 111-112.

104. Роп'як Л. Я. Дослідження геометричних параметрів конічних нарізей / О.В. Рогаль, І. П. Тарас, Л. Я. Роп'як // Materials of XIII international research and practice conference «Proceedings of academic science – 2017», August 30 - September 7. – Sheffield: Science and Education Ltd. Sheffield, 2017. – Vol. 4. – № 9. – P. 30-33.

105. Роп'як Л. Я. Розробка технології нанесення покриття на сталеві замки алюмінієвих бурильних труб / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як, О. В. Рогаль // Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 7. Попереднє рішення реалізації цілей проекту «ММАТЕНГ»» – 2017: матеріали науково-технічної конференції, 30 листопада - 2 грудня 2017 р, Київ. – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – С. 117-118.

106. Роп'як Л. Я. Дослідження температурного поля в двошаровому покритті алюміній – оксид алюмінію / Л. Я. Роп'як // Матеріали VII науково-технічної конференції “Прогресивні технології в машинобудуванні”, 5-9 лютого 2018 р, Львів-Звенів. – Львів: НУ «Львівська Політехніка», 2018. – С. 138.



## ABSTRACT

*Ropyak L. Ya.*

Scientific and technological bases of part manufacturing and product assembling, strengthened by micro-arc oxidation of an aluminum layer. - Qualifying scientific work. Published as a manuscript.

The dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences on the specialty 05.02.08 - technology of mechanical engineering (13 - mechanical engineering). - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas of the Ministry of Education and Science of Ukraine; National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine; Ivano-Frankivsk, 2018.

The mechanical engineering technology scientific and technical problem, in particular development of theoretical bases and technological means for oil and gas equipment operation resource increasing by machine part aluminum surface layer micro-arc oxidation (MAO), is determined, scientifically substantiated and solved.

### **Scientific novelty of the obtained results:**

–further development of two-layer coating strength analytical assessments with arbitrarily oriented local loading, which differ from the known selection of rational thickness of the oxide coating and aluminum substrate, and taking into account the positive effect of the technology of reinforcing the substrate on the strength of the covered parts;

–for the first time the technology of reinforcing the aluminum base of the workpiece with particles of aluminum oxide was developed, which provides an increase in the bearing capacity of the part with an oxide coating;

–further development of technological process mathematical models of centrifugal casting and spraying of composite aluminum coatings reinforced with aluminum oxide particles are developed, which differ from the known models by changes in propagation forces of the reinforcing particles in the melted aluminum

alloy or in the metal-air flow, which made it possible to determine the rational technological regimes for obtaining blanks with the given distribution of fittings;

–for the first time, technology and its technical support for micro-arc oxidation of compact aluminum alloys and aluminum coatings applied on steel or aluminum bases by electric arc and plasma spraying methods have been developed, which made it possible to establish the advantages of electric arc over the plasma method for the production of coatings and the cost of manufacturing parts;

–for the first time the regularities of changing the geometric dimensions of aluminum parts and steel parts with a layer of sprayed aluminum after the electric arc oxidation of their upper layers have been established, which gave the opportunity to methodically determine the technological admissions for machining, taking into account the technological inheritance between the surfaces of the blanks and parts;

–the uneven distribution of microhardness at the thickness of the oxide coating with the maximum near the border with the aluminum base and the reduced microhardness zone in the basis of a compact aluminum alloy Д16Т were discovered for the first time, which made it possible to propose technological measures for its alignment;

– it was first discovered that in the oxide layer of a coating formed on compact or sprayed aluminum there are residual stresses of compression, which makes it possible to technologically regulate their level;

–Optimization mathematical model of technological cutting modes during diamond polishing of the oxide coating layer is improved, which differs from the known parts of the provided roughness of the cylindrical surface for the maximum machining performance and the minimum cost of the operation;

–further development of analytical approaches to the calculation of technological stresses in products made up of oxidized parts, such as the elementary theory of clamping connections with incomplete shaft seizure, a model of a collar nut with springless petals, and an assessment of the stresses in the impeller of the centrifugal fan, which made it possible to detect technological features of assembly of products for maintenance of the necessary stock of strength.

**Practical value of the results.** Technological processes for the formation of single-layer oxide and two-layer aluminum-alumina coatings by combined methods have been developed and implemented on the basis of theoretical and experimental studies. Such coatings are formed on compact aluminum reinforced alloys or on spray composite aluminum coatings and it is expedient to use them when manufacturing new or repairing worn parts of machines. Technological processes of strengthening include: vibroelectricspark doping of the base, electric arc spraying of aluminum coatings from solid wires and particles of aluminum oxide powder, which are introduced from the feeder into the metal-air flow, and subsequent micro-arc oxidation, as well as mechanical treatment of the oxide coating layer. The newest technologies and equipment for strengthening of details are developed: the device for electric arc spraying of composite aluminum coatings with the introduction of powder of oxide particles into the metal-air flow from the feeder with the system of automated control of technological parameters of the process; Installations for the formation of micro-arc oxide coatings in calm and flow electrolytes, as well as an installation for vibroelectricspark doping; equipment and techniques for electrochemical investigations and corrosion tests and tests for wearing of parts with coatings.

**In the first section** an analysis of working conditions and causes of failure of the components of oil and gas equipment, technological methods of protection against corrosion and wear, methods of formation of oxide coatings, machining of coatings, selection of allowances and assembly of products from aluminum parts has been carried out.

The analysis of technological methods for protecting steel parts from sulfide cracking has shown the prospect of the application of coatings that provide a rational combination of properties of the material and coating. It has been shown that effective protection of steel parts from flood, corrosion and wear is provided by materials that have tread properties, especially aluminum coatings. Two-layer coating, where the bottom layer is a layer of aluminum (for steel from flooding), and the upper one - from aluminum oxide (to ensure high wear resistance of the surface of

the part) makes it possible to use various technological methods of its formation: the spraying of layers of different materials, the formation of aluminum oxide.

The conditions of assembly of products from aluminum parts are analyzed. It is established that traditional methods of stopping threaded joints for aluminum parts are not effective. In the normative and technical literature there is no information on the choice of angular parameters for the shell elements of centrifugal fans, the construction of terminal joints, as well as for the manufacture of prefabricated pieces of steel and aluminum elements.

**In the second section**, variants of the structure of workpieces and coatings with an oxide working layer, formed by MAO aluminum are offered. In order to understand the influence of the structure and mechanical properties of the components of the two-layer coating on the magnitude of the limiting loads caused, for example, by the action of the blade or grinding tool during the finishing machining of the part or the interaction with the abrasive particles in contact during operation, an engineering methodology for analyzing the stress state and strength two-layer coatings under arbitrarily oriented local loading. The principal point in the proposed scheme is the use of strength criteria for both components of a piecewise homogeneous body.

On the basis of the solution of the model problem of non-stationary heat conductivity, it was established that the thickness of the not oxidized aluminum layer from 39.7  $\mu\text{m}$  to 49.2  $\mu\text{m}$  would result in a mutual diffusion between aluminum and steel base, and consequently, a significant increase in the bond strength of the coating with the base.

An evaluation of the stress-strain state of the reinforced layer on the inhomogeneous depth of the compositional basis is made. It was established that the reinforcement of the base can be achieved from 10% to 15% increase in the stability of the oxide-coated part of the action regarding the local load.

The technical model of essentially non-uniform cylindrical rod for the study of the stress-strain state of the strengthened area of the billet pump's bilayer action is proposed and worked out. The usual operating load of the stock and the emergency

situation caused by the operation of the details of the friction pair "kreytskopf - frame guides" are considered. In the distribution of equivalent stresses, an assessment of the bearing capacity of the stock was made.

**In the third section,** the technology of hardening and equipment for MAO was developed, materials and methods of investigating the operational properties of coating components were selected.

In order to strengthen the working surfaces of machine parts with composite coatings in accordance with the proposed variants of their structure, technological schemes for the production of combined coating methods with the working oxide layer formed by the MAO in the electrolyte have been developed.

To study the structure, physic and mechanical, electrochemical and operational properties of oxide coatings, standard and developed techniques were used. The methods for determining the friction resistance by introducing color flaw detecting operations for determining the length of cracks, as well as applying the initial axially-symmetric cracks on cylindrical samples during step load, have been improved. The coating adhesion strength with the base was determined by the pin method. The method for determining the residual stresses in coatings is improved by eliminating the error due to the distortion of the stress state of the sample associated with the dissolution of the material in pores during stress relaxation periods after the removal of the next surface coating layer.

The choice of steels, aluminum alloys, methods of obtaining billets from aluminum, steel for spraying aluminum layer and methods of studying the influence of the parameters of the technological process on the operational properties of reinforced parts is substantiated. The device for melting of coatings and design of tools for friction strengthening of coatings has been developed.

The device for the application of MAO-coatings in the flow electrolyte, the design of the electrochemical cells and the process of MAO in the flow electrolyte of cylinder bushings and piston rods have been developed, which provide even coating with a low roughness of the surface, high microhardness and wear resistance.

Equipment for testing of wear and corrosion testing of parts with coatings has been developed.

The method of planning of experiments for optimization of technological parameters of the process of MAO in a flow electrolyte (orthogonal central composition experiment) and for obtaining mathematical models for roughness, cutting forces and specific consumption of diamonds during grinding MAO-coatings (full-factor experiment) has been developed.

**In the fourth section**, a method for calculating the basic technological parameters of the centrifugal reinforcement process with two mutually perpendicular axes of rotation, which provide the transport of oxide particles to the desired area of casting of the workpiece, is developed. At low speeds of rotation, a distinct asymmetric formation of the reinforced zone was revealed due to the deviation of the beam trajectory of the particles from the axis, with the increase of the rotational frequencies relative to both axes of displacement of the reinforced zone becomes insignificant.

For the investigated materials (aluminum, aluminum oxide, titanium oxide, zirconium oxide, tungsten carbide) the optimal initial conditions for their introduction into a non-uniform flow are determined to ensure that these particles enter the center of the spray region.

**In the fifth section** are presented the results of experimental studies on the influence of technological parameters of the MAO process on the accuracy and quality indicators of parts surfaces.

A mathematical model of the process was constructed on the basis of which it was established that the optimal values of the technological parameters of the oxidation process for obtaining the maximum microhardness, minimum wear practically coincide, and for the minimum roughness and conicity do not coincide with both the optimal technological parameters for microhardness and wear, and among themselves;

The mathematical model of the influence of the cutting depth, the speed of the part and the longitudinal feeding of the machine table during round diamond grinding

of the oxide coating deposited in the flow electrolyte on the steel base, on the roughness, the cutting force and the specific consumption of diamonds have been developed.

It has been determined that resistance to static hydrogen fatigue and wear resistance of steel parts can be increased by applying an aluminum coating, oxidized by the micro-arc method. In the conditions of hydrogen sulfide-containing media, the details of the oil and gas equipment from the aluminum alloy D16T, oxidized by the micro-arc method, and steel oxide-aluminum oxide stents have a durability 2-3 times higher than that of steel coated steel.

**In the sixth section**, simulations of different variants of assembling nodes from parts reinforced by MAO were carried out. In order to provide adjusting, blade attack angle of axial fans and the boosting of gas pumping units have been used with a split terminal connection with incomplete shaft capture.

Based on the a priori assumptions about the distribution of contact stresses, analytical dependences of the limiting moments and forces of displacement in the clamping connection from the angles of the shaft capture, on the tightening force of the bolt and on the tribological properties of the parts surfaces are established.

The variant of the theory of a threaded joint, equipped with a dental nut with spring-loaded petals, was developed. On the basis of the solution of the model contact problem on the interaction of the cyclic symmetric system of petals with an internal bolt and an external (installed with tension and working to the bend) spring, an analytical estimation of the magnitude of the maximum frictional moment, which counteracts the self-recapping of the nut, is proposed.

In the framework of the classical theory of plates and shells, a mathematical model of a composite node "rear disk - hub - conical hood" for a centrifugal fan impeller has been developed. The errors of the formation of the conic shell are taken into account and the equivalent assembly stresses in the details of the impeller are determined, depending on the size of the gap or tension. The inequalities for the size of gaps are established, in which the assembly stresses in details, together with the

stresses from the operating load, do not exceed the allowable value with the given coefficient of strength.

To improve the quality of the connection of large-sized steel and / or cast iron components, it is proposed to apply coatings that change the structure of the contacting surfaces, a thin aluminum layer, oxidized in strips in widths from 4 mm to 6 mm in the same step.

The simulation modeling of the pump plunger assembly (shaft - carbon steel, the working part - aluminum alloy, with the reinforced MDO surface) is carried out. The variant of the screwed connection moment with glue is most acceptable from the middle of the study.

**In the seventh section**, a method for calculating allowances for machining parts with MAO coatings has been developed, optimization of cutting modes during round diamond grinding has been carried out, results of bench tests and data on the implementation of research results have been introduced, and technology for utilization of spent electrolytes has been developed.

For electrochemical oxide coatings, an optimal depth of the surface of treated surfaces with a minimum roughness has been established.

The mathematical model of the process of the external round diamond grinding of the oxide coating process applied in the flow electrolyte, which includes restrictions on the roughness of the surface, on the power, on the speed of the part, along the longitudinal feed of the table of the machine, on the accuracy of the processing and at the cost of the grinding operation, was developed.

The proposed silicate alkaline electrolytes and their electrolysis products do not contain substances of the 1st and 2nd danger classes. A hydrocyclone was developed for purification and neutralization of electrolytes, which allows creating a closed cycle of purification due to straightforwardness and intensification of the process of recovery of the spent electrolyte.

**Key words:** technological process, micro-arc oxidation, electric arc spraying, coating, surface roughness, precision of machining, assembly.



### Spysok publikatsiy zdobuvacha

1. Saakyyan L. S. Prymenenye poverkhnevoho ushchil'nennya alyuminiyevykh splaviv i pokryttiv dlya pidvyshchennya koroziyno-mekhanichnoyi stiykosti detaley naftohazopromyslovoho obladnannya [Tekst] / L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, L. YA. Ropyak, A. V. Épel'fel'd. – M. : VNYYOÉNH, 1986. – Vyp. 6 (58). – 61 s. Obzornaya ynformatsyya: seryya «Borot'ba z korinnyam ta zakhystom navkolyshn'oho seredovyshcha».

2. Saakyyan L. S. K metodyke mikroelektrokhimichnykh doslidzhen' [Tekst] / L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, L. YA. Ropyak, A. V. Horbatskyy // Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv. – 1987. – № 3. – S. 40–43.

Saakiyan L. S. A method of microelectrochemical investigations / L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, L. Ya. Ropyak, A.V. Gorbatskii // Soviet Materials Science. – 1987. – Vol. 23. – Issue 3. – P. 267-269 (**Scopus**)

3. Saakyyan L. S. Vlyyanye nahruzhennya na mikroelektrokhimichnu heterohennist' staly [Tekst] / L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, L. YA. Ropyak // Zakhyst metaliv. – 1989. – T. 25. – № 2. – S. 233–237 (**Scopus**).

4. Rop'yak L. YA Analiz toksychnosti elektrolitiv dlya oderzhannya kompozytsiynykh elektrokhimichnykh oksydneykh pokryttiv [Tekst] / L. YA. Rop'yak, L. YA. Poberezhnyy, I. O. Shulyar // Rozvidka ta rozrobka naftovykh ta hazovykh rodovyshch. – 2000. – Vyp. 37. – T. 5. – S. 134–140.

5. Rop'yak L. YA. Optyimizatsiya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya plunzheriv burovoho nasosa // L. YA. Rop'yak, I. O. Shulyar, B. O. Borushchak // Prohresyvni tekhnolohiyi ta systemy mashynobuduvannya: mizhnar. zb. nauk. prats'. – Donets'k: DonNTU, 2001. – Vyp. 17. – S. 206–211.

6. Rop'yak L. YA. Mikroelektrokhimichna neodnoridnist' zvaryval'nykh z'yednan' truboprovodiv pry riznykh vydakh termichnoyi obrobky / L. YA. Rop'yak, YU. D. Petryna, O. O. Onyshchuk, D. YU. Petryna, M. B. Nalisnyy // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch. – 2003. – Vyp. 3. – T. 8. – S. 131–133.

7. Shats'kyy I. P. Lokal'ni napruzhennya v pokrytti neodnoridnoyi osnovy / I. P. Shats'kyy, L. YA. Rop'yak // Prohresyvni tekhnolohiyi ta systemy

mashynobuduvannya: internar. zb. nauk. prats'. – Donets'k: DonNTU – 2004. – Vyp. 28. – S. 277–282.

8. Rop'yak L. YA. Pro z·hin plastyn na neodnorodniy vinklerivs'kiy osnovi [Tekst] / L. YA. Rop'yak, I. O. Shulyar, I. P. Shats'kyy // Visnyk Ternopil's'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. – 2007. – T. 12. – № 3. – S. 22–26.

9. Rop'yak L. YA. Doslidzhennya napruzhenoho stanu kombinovanoho zuba: tverdi splav – stal' / L. YA. Rop'yak, I. H. Barylo, L. D. Pituley, I. B. Kopey // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch. – 2009. – № 3. – S. 131–133.

10. Vuytsik S. D. Doslidzhennya vplyvu formy zubka na mitsnist' yoho z'yednannya z korpusom sharoshky / S. D. Vuytsik, S. S. Vuytsik, D. S. Vuytsik, I. O. Shulyar, L. D. Pytuley, L. YA. Rop'yak // Naftohazova enerhetyka: vseukrayins'kyy naukovo-tekhnichnyy zhurnal. – 2010. – № 2 (13). – S. 9–11.

11. Kustov V. V. Modelyuvannya rukhu chastynok poroshku pry napylenni pokryttiv elektroduhovym metodom [Tekst] / V. V. Kustov, M. V. Makoviychuk, L. YA. Rop'yak // Prohresyvni tekhnolohiyi ta systemy mashynobuduvannya: internar. zb. nauk. prats'. – Donets'k: DonNTU, 2011. – Vyp. 41. – S. 188–197.

12. Makoviychuk M. V. Analitychne doslidzhennya elektrychnoyi opory mikroelektrodiv konnichnoyi formy [Tekst] / M. V. Makoviychuk, V. V. Ostapovych, L. YA. Rop'yak // Metody ta prylady kontrolyu yakosti. – 2011. – № 26. – S. 103–108.

13. Hryhorchuk L. Doslidzhennya protsesu posylennya poverkhni detaley mashyn obrobkoyu iskrovymy rozryadamy [Tekst] / L. Hryhorchuk, V. Kustov, M. Osypchuk, L. Rop'yak // Visnyk Ternopil's'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu im. I. Pulyuya. – 2011. – T. 16. – № 3. – S. 116–122.

14. Ostapovych V. V. Vplyv znosu detaley pary kreyskopf – napryamni porshnevoho nasosu dvostoronn'oyi diyi na yoho kinematychni ta sylovi parametry [Tekst] / V. V. Ostapovych, L. YA. Rop'yak, A. YU. Hodlevs'kyy // Naukovyy visnyk Ivano-Frankivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu nafty ta hazu. – 2011. – № 3 (29). – S. 64–70.

15. Ostapovych V. V. Elektrokhimichni doslidzhennya zakhysnoyi diyi ta robozdatnosti hal'vanichnykh pokryttiv / V. V. Ostapovych, L. YA. Rop'yak [Tekst] // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch. – 2011. – № 2 (39). – S. 71–75.

16. Velychkovych A. S. Analiz pozashtatnoho napruzhenno-deformovanoho stanu shtoka porshnevoho nasosu dvostoronn'oyi diyi, sprychynenoho znosom pary tertya "kreyskopf – napryamni" [Tekst] / A. S. Velychkovych, V. V. Ostapovych, L. YA. Rop'yak // Prohresyvni tekhnolohiyi ta systemy mashynobuduvannya: internar. zb. nauk. prats'. – Donets'k: DonNTU, 2012. – Vyp. 2 (44). – S. 36–50.

17. Ostapovych V. V. Doslidzhennya napruzhenno-deformovanoho stanu vkryty khromovym pokryttyam dilyanku shtoka porshnevoho nasosu dvostoronn'oyi diyi v umovakh pozashtatnoho navantazhennya [Tekst] / V. V. Ostapovych, L. YA. Rop'yak, A. S. Velychkovych // Metody ta prylady kontrolyu yakosti. – 2013. – № 2 (31). – S. 118–125.

18. Velychkovych A. S. Otsinka mitsnosti vkrytiy sharuvatym pokryttyam dilyanok shtoku burovoho nasosa z urakhuvannyam pozashtatnykh napruzhen' / A. S. Velychkovych, L. YA. Rop'yak // Visnyk Natsional'noho universytetu "L'vivs'ka politekhnika". Optymizatsiya vyrobnychykh protsesiv ta tekhnichnyy kontrol' u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni. – 2013. – № 772. – S. 182–191.

19. Shulyar I. Doslidzhennya rukhu tverdykh chastynok u ridkomu splavi pry tsenttsentnomu armuvanni z dvoma vzayemno perpendykulyarnymy osyamy obertannya lyvarnoyi formy [Tekst] / I. Shulyar, M. Makoviychuk, L. Rop'yak // Naukovi zapysky. – 2013. – № 40. – S. 321–330.

20. Shats'kyi I. P. Ratsional'nyy pidbir natyahu u z'yednannya zubtsya z sharoshkoyu [Tekst] / I. P. Shats'kyi, I. O. Shulyar, V. A. Kornuta, L. YA. Rop'yak // Prohresyvni tekhnolohiyi ta systemy mashynobuduvannya: internar. zb. nauk. prats'. – Donets'k: DonNTU, 2013. – Vyp. 1, 2 (45). – S. 279–285.

21. Shulyar I. O. Optymizatsiya kombinovanoho tverdosplavnoho instrumenta dlya burinnya hirs'kykh porid / I. O. Shulyar, V. V. Vryukalo, L. YA. Ropyak, D. F.

Lyalyuk [Tekst] // Naukovo-tekhnichni nauky v mashynobuduvanni. – M.: Mashynobuduvannya. – 2013. – № 10 (28). – S. 27–33.

22. Shulyar I. O. Rozrakhunky z'yednan' z natyhom u sharoshkakh, osnashcheni kompozytsiynomy zubtsyamy zi stalevym khvostovykom / I. O. Shulyar, I. P. Shats'kyi, V. A. Kornuta, L. YA. Rop'yak [Tekst] // Naukovyy visnyk IFNTUNH. – 2013 rr. – № 1 (34). – S. 126–133.

23. Kustov V. V. Doslidzhennya rukhu ta nahrivannya chastynok poroshku u protsesi nanesennya kompozytsiynykh pokryttiv elektroduhovym metodom [Tekst] / V. V. Kustov, M. V. Makoviychuk, L. YA. Rop'yak. // Mizhvuzivs'kyi zbirnyk naukovykh prats' «Naukovi zapysky». – Luts'k: LNTU, 2014. – Vyp. 44. – S. 154–163.

24. Rop'yak L. YA. Vplyv eylerovykh syl na tochnist' mekhanichnoyi obrobky otvoriv pry sverdlinni [Tekst] / L. YA. Rop'yak, K. H. Levchuk, K. I. Tsydylo // Vysoki tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – 2014 rr. – № 1. – S. 139–147.

25. Kustov V. V. Analiz tochnosti tokarnoyi obrobky zovnishn'oyi tsylindrychnoyi poverkhni vtulok [Tekst] / V. V. Kustov, L. YA. Rop'yak // Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohrads'koho. – Kremenchuk: KrNU, 2015r. – Vyp. 1 (90). – CH. 1. – S. 86–93.

26. Rop'yak L. YA. Optymizatsiya rezhymiv rizannya pry podrizuvanni detaley iz khromovym pokryttyam [Tekst] / L. YA. Rop'yak, V. V. Ostapovych // Nadiynist' instrumentu ta optymizatsiya tekhnolohichnykh system: zb. nauk. prats'. – Kramators'k, 2015. – Vyp. 37. – S. 113–121.

27. Rop'yak L. YA. Teoretychne doslidzhennya zminy kuty pidnimannya hvyntovoyi liniyi konichnykh riz'b [Tekst] / L. YA. Rop'yak, M. V. Makoviychuk, O. V. Rohal' // Rizannya ta instrument u tekhnolohichnykh systemakh. – 2015 rr. – Vyp. 85. – S. 252–262.

28. Rop'yak L. YA. Otsinka mitsnosti dvosharovoho pokryttya pid lokal'ne navantazhennya [Tekst] / L. YA. Rop'yak, I. P. Shats'kyi, M. V. Makoviychuk // Mizhvuzivs'kyi zbirnyk naukovykh prats' «Naukovi zapysky». – Luts'k: LNTU, – 2015. – № 50. – S. 148–152.

29. Shats'kyi I.P., Rop'yak L.YA. Elementarnyy rozrakhunok zatyskacha z'yednannya z nepovnym prokhodom vala [Tekst] / I.P. Shats'kyi, L.YA. Rop'yak // Odes'kyi politekhnichnyy universytet. Pratsi. – 2015 rr. – vypusk 2. – S. 51–56.

30. Lebed' V. T. Pidvyshchennya yakosti z'yednannya velykohabarytnykh skladovykh vyrobiv [Tekst] / V. T. Lebed', N. V. Tarel'nyk, O. N. Lashkarev, L. YA. Rop'yak // Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU "KHPY". – 2015 rr. – № 4 (1113). – S. 181 – 184.

31. Onys'ko O. R. Tekhnolohichni aspekty armuvannya obertannya hranulamy lehkykh karbidiv u protsesi elektroshlakovoho tsentsentnoho lyttya [Tekst] / O. R. Onys'ko, O. M. Bohachenko, L. YA. Rop'yak // Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – 2015 rr. – Vyp. 10. – S. 128–139.

32. Shikhab T. A. Kinetyka prosochuvannya  $Cr_3C_2$  marhantsevym mel'khirom u protsesi oderzhannya kermetiv // T. A. Shikhab, YA. A. Kryl, YU. I. Parayko, P. M. Prysyzhnyuk, L. YA. Rop'yak, V. V. Tyrlych / Fizyka i khimiya tverdoho tila. – Ivano-Frankivs'k. – 2015 rr. – T. 16. – № 2. – S. 408–412.

33. Shats'kyi I. P. Optymizatsiya mitsnosti dvosharovoho pokryttya dlya lokal'noho navantazhennya [Tekst] / I. P. Shats'kyi, L. YA. Rop'yak, M. V. Makoviychuk // Problemy prochnosti. – 2016. – № 5. – S. 163–168.

Shats'kyi I. P. Strength optimization of a two-layer coating for the particular local loading conditions / I. P. Shats'kyi, L. Ya. Ropyak, M. V. Makoviichuk // Strength of Materials. – 2016. – Vol. 48. – Issue 5. – P. 726–730 (**Scopus**).

34. Kustov V. V. Vyznachennya optymal'nykh nadbavok dlya mekhanichnoyi obrobky detaley z pokryttyam [Tekst] / V.V. Kustov, L.YA. Rop'yak, N. V. Makovyychuk, V. V. Ostapovych. // Metalurhiyna ta hirnychodobuvna promyslovis't'. – 2016. – №. 1. – S. 164–171.

35. Rop'yak L. YA. Doslidzhennya vplyvu rezhymiv almaznoho shlifuvannya na shorstkist' khromovoho pokryttya metodom matematychnoho planuvannya eksperymentu [Tekst] / L. YA. Rop'yak, V. V. Ostapovych // Mizhvuzivs'kyi zbirnyk

naukovykh prats' «Naukovi zapysky». – Luts'k: LNTU, 2016. – Vyp. 53. – S. 131–139.

36. Rop'yak L. YA. Vplyv tekhnolohichnykh parametriv protsesu vidtsentrovoho armuvannya na pokaznyky yakosti detaley [Tekst] / L. YA. Rop'yak, I. O. Shulyar, O. M. Bohachenko // Vostochno-Evropeyskyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy. – 2016 r. – № 1/5 (79). – S. 53–62 (Scopus).

37. Rop'yak L. YA. Optyimizatsiya tekhnolohichnykh parametriv protsesu khromuvannya dlya zabezpechennya pokaznykiv yakosti detaley porshnevnykh nasosiv [Tekst] / L. YA. Rop'yak, V. V. Ostapovych // Vostochno-Evropeyskyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy. – 2016. – № 2/5 (80). – S. 50–62 (Scopus).

38. Vlasiy O. Udoskonalennya stabil'nosti alyuminiyevykh sverdlyl'nykh trub shlyakhom optyimizatsiyi formy potovshchennya obolonky [Tekst] / O. Vlasiy, V. Mazurenko, L. Rop'yak, A. Rohal' // Skhidnoyevropeys'kyy zhurnal korporatyvnykh tekhnolohiy. – 2017. – №. 1/7 (85). – S. 25–31 (Scopus).

39. Rop'yak L. YA. Vplyv tovshchyny oksydnoho sharu na opir keramiko-alyuminiyevoho pokryttya indentuvannyu [Tekst] / L. YA. Rop'yak, I. P. Shats'kyy M. V. Makoviychuk // Metallofizyka ta novitni tekhnolohiyi. – 2017. – T. 39. – № 4. – S. 517–524 (Scopus).

40. Pryhorovs'ka T. O. Doslidzhennya napruzhenoho stanu lytoyi zahotovky lopatevoho dolata [Tekst] / T. O. Pryhorivs'ka, L. YA. Rop'yak, I. S. Kohut, V. H. Panchuk, L. O. Borushchak, I. O. Shulyar // Visnyk ZHDTU. – 2017. – T. 2. – № 2 (80). – S. 135–141.

41. Shats'kyy I. Analitychni otsinky mitsnosti dvosharovoho pokryttya, shcho zavantazhuyet'sya uzdovzh liniyi [Tekst] / I. Shats'kyy, M. Makoviychuk, L. Rop'yak // Operatsiyi VSHB – Tekhnichnyy universytet m. Ostrava, seriya budivel'nykh robit. – 2017. – Tom. 17. – № 2. – S. 109–114.

42. Rop'yak L. YA. Skladal'ni napruzheniya v robochomu kolezi vidtsentrovoho ventilyatora / L. YA. Rop'yak // Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – 2017. – №. 26 (1248). – S. 86–93.

43. Ropyk L. Otsinka kintsevykh navantazhen' dlya z'yednannya klipiv z chastkovym rozmyvannyam valu / L. Rop'yak, I. Shats'kyi, A. Velychkovych // Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal «Mashyny. Tekhnolohiyi. Materialy ». – Sofiya, Bolhariya. – 2017. – Rik XI, vypusk 2. – S. 39–42.

44. Kompyuterna prohrama «Rozrakhunok chysel zubiv zminnykh zubchastykh kolis hitar» («UnitMainZub») / V. YA. Rop'yak, L. YA. Rop'yak, M. M. Beleyi // Svidotstvo pro reyestratsiyu avtors'koho prava na tvir № 38088; data reyestratsiyi 22.04.2011.

45. Kompyuterna prohrama «Prohrama pidboru chysel zubiv zminnykh zubchastykh kolis hitar» («Gitara\_Zmin\_Zub\_Kolis\_001\_KIS») / V. YA. Rop'yak, I. S. Kohut, L. YA. Rop'yak, V. V. Kustov // Svidotstvo pro reyestratsiyu avtors'koho prava na tvir № 39064; data reyestratsiyi 07.07.2011.

46. 47. A. s. № 1296862, SSSR, MKI G 01 L 1/00. Ustrojstvo dlya opredeleniya ostatochnih napryazhenij / A. P. Efremov, L. S. Saakiyan, YU. I. Babej, L. YA. Ropyak, A. V. EHpel'fel'd (SSSR). – № 3933008/24-10; zayavl. 19.07.85; opubl. 15.03.87, Byul № 10. – 4 s.

48. A. s. № 1296920, SSSR, MKI G 01 N 27/26. Ustrojstvo dlya mikroehlektrohimi cheskikh korrozionnykh issledovanij materialov / L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, YU. I. Babej, I. G. Mel'nikov, L. YA. Ropyak (SSSR). – № 4324161/25-28; zayavl. 02.11.87; opubl. 23.07.89, Byul № 27. – 3 s.

49. A. s. № 1485670, SSSR, MPK S 23 S 28/00. Sposob zashchity stali ot sul'fidnogo rastreskivaniya / A. P. Efremov, G. A. Markov, L. YA. Ropyak, L. S. Saakiyan, A. V. EHpel'fel'd (SSSR). – № 3933267/22–63; zayavl. 24.07.85; opubl. 23.06.87, Byul № 7. – 3 s.

50. A. s. № 1489221, SSSR, MPK S 25 D 11/02. Sposob mikrodugovogo anodirovaniya alyuminievykh splavov i pokrytij / A. P. Efremov, L. S. Saakiyan, A. V. EHpel'fel'd, N. L. Bolotov, A. I. Kapusnik, L. YA. Ropyak (SSSR). – № 4268269/31–02; zayavl. 25.06.87; opubl. 17.07.88, Byul № 17. – 3 s.

51. A. s. № 1495681, SSSR, MKI G 01 N 3/56. Ustanovka dlya ispytaniya materialov pri iznashivanii struej rabochej sredy / M. I. Burda, V. YA. Belousov, I.

M. Bogatchuk, L. YA. Ropyak (SSSR). – № 3882569/23-25; zayavl. 08.04.85; opubl. 15.03.87, Byul № 10. – 3 s.

52. A. s. № 1504292, SSSR, MKI C 25 D 11/02. Ustrojstvo dlya mikrodogovogo oksidirovaniya ventil'nyh metallov i ih splavov / A. P. Efremov, L. S. Saakiyan, A. I. Kapustnik, A. V. EHpel'fel'd, L. YA. Ropyak, I. G. Mel'nikov (SSSR). – № 4296518/31-02; zayavl. 17.08.87; opubl 30.08.89, Byul № 32. – 6 s.

53. A. s. № 1516206, SSSR, MKI V 21 N 3/04, S 25 D 11/02. Instrument dlya uprochneniya profilej / V. YA. Belousov, I. YU. Gladij, Z. D. Vasilechko, I. M. Stockij, L. YA. Ropyak, YA. V. Bilusyak, M. N. Mikityuk (SSSR). – № 4379539/31-27; zayavl. 13.11.87; opubl 23.10.89, Byul № 39. – 3 s.

54. A. s. № 1541035, SSSR, MKI V 24 V 39/00. Rolik dlya uprochnyayushchej obrabotki detalej / V. YA. Belousov, I. YU. Gladij, Z. D. Vasilechko, I. M. Stockij, L. YA. Ropyak, M. N. Mikityuk, M. D. YUssypiv (SSSR). – № 4369277/31-27; zayavl. 09.12.87; opubl. 07.02.90, Byul № 5. – 3 s.

55. A. s. № 1549598, SSSR, MKI V 04 S 5/20. Hidrociklon / V. T. YAvorskij, L. I. CHelyadin, S. V Volkoveckij, I. M. Stockij, I. YU. Gladij, L. YA. Ropyak (SSSR). – № 4381126/31-26; zayavl. 13.11.87; opubl. 15.03.90, Byul № 10. – 4 s.

56. A. s. № 1569201 SSSR, MKI V 24 V 39/00. Ustrojstvo dlya uprochneniya dlennomernyh cilindricheskih detalej [Tekst] / I. YU. Gladij, I. M. Stockij, YU. D. Petrina, L. YA. Ropyak, YU. S. Pyrig, I. O. Zagajduk, YA. V. Vitvickij (SSSR). - № 4478821/31-27; zayavl. 02.09.88; opubl. 07.06.90, Byul. № 21. – 4 s.

57. A. s. № 1624060, SSSR, MKI S 01 D 11/06. Ustrojstvo dlya mikrodogovogo oksidirovaniya ventil'nyh metallov i ih splavov / A. P. Efremov, I. K. Zalyaletdinov, A. I. Kapustnik, I. B. Kurakin, YU. B. Pazuhin, L. YA. Ropyak, B. V. Haritonov, A. V. EHpel'fel'd (SSSR). – № 4661086/02; zayavl. 10.03.89; opubl. 30.01.91, Byul № 4. – 5 s.

58. A. s. № 1670564, SSSR, MKI G 01 N 27/416. Sposob opredeleniya ehffektivnosti ingibitorov korrozii dlya serovodorodosoderzhashchih / L. S. Saakiyan,



A. P. Efremov, , A. V. EHpel'fel'd, L. YA. Ropyak, A. I. Kapustnik, A. V. ZHovnirchuk (SSSR). – № 4381126/31-26; zayavl. 13.11.87; opubl. 15.03.90, Byul № 10. – 4 s.

59. A. s. № 1722671, SSSR, MKI V 21 N 3/04. Sposob uprochneniya konicheskikh rez'b / B. A. CHernov, B. YU. Oglobyak, I. S. Babyuk, V. M. Griniv, L. YA. Ropyak, YA. B. CHernov (SSSR). – № 4757014/27; zayavl. 30.08.90; opubl. 30.03.92, Byul № 12. – 5 s.

60. A. s. № 1750764, SSSR, MKI V 21 V 39/00. Sposob uprochneniya konicheskoy rez'by / B. A. CHernov, B. YU. Oglobyak, I. S. Babyuk, V. M. Griniv, YA. B. CHernov, L. YA. Ropyak (SSSR). – № 4884894/27; zayavl. 26.11.90; opubl. 30.07.92, Byul № 28. – 2 s.

61. A. s. № 1767044, SSSR, MKI S 01 D 11/06. EHlektrolit dlya mikrodogovogo anodirovaniya alyuminiya i ego splavov / L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, A. V. EHpel'fel'd, L. YA. Ropyak, N. M. Katolikova, A. I. Kapustnik, I. M. Kolesnikov (SSSR). – № 4841930/02; zayavl. 21.06.90; opubl. 07.10.92, Byul № 37. – 2 s.

62. Deklaratsiinyi pat. 39303A Ukraina, MPK G 01 N 27/30. Mikroelektrod dlia elektrokhimichnykh vymiriuvan / L. Ya. Ropiak, D. Yu. Petryna, I. O. Shuliar, V. V. Kustov, V. M. Husak; zaiavnyk i patentovlasnyk IFDTUNH. – № 2000010334; zaiavl. 20.01.00; opubl. 15.06.01, Biul. № 5. – 3 s.

63. Deklaratsiinyi pat. 40784A Ukraina, MPK (2006) C23S4/04. Ustanovka dlia napyleniia kompozytsiinykh pokryttiv elektroduhovym metodom / V. V. Kustov, L. Ya. Ropiak; vlasnyk IFDTUNH. – № 200010333; zaiavl. 20.01.2000; opublik. 15.12.2001, Biul. № 7. – 3 s.

64. Pat. 40784 Ukraina, MPK S 23 S 4/04, 26/02, 28/00. Ustanovka dlia napyleniia kompozytsiinykh pokryttiv elektroduhovym metodom / V. V. Kustov, L. Ya. Ropiak; zaiavnyk i patentovlasnyk IFDTUNH. – № 2000010333; zaiavl. 20.01.00; opubl. 15.12.03, Biul. № 12. – 3 s.

65. Pat. 79345 Ukraina, MPK (2006) C 25 D 11/18. Sposib nanesenniia zakhysnoho oksydnoho pokryttia na aliuminii ta yoho splavy, rozchyn dlia

termichnoi obrobky ta koloidna suspenziia dlia ushchilnennia pokryttia / L. Ya. Ropiak, O. S. Malyshevska, V. M. Bilinskyi zaiavnyk i patentovlasnyk IFNTUNH. – № a 200506816; zaiavl. 11.07.2005; opubl. 11.06.2007, Biul. № 8. – 4 s.

66. Pat. 85519 Ukraina, MPK (2006) G 01 N 3/20. Sposib nanesennia osesymetrychnykh vykhidnykh vtomnykh trishchyn na tsylindrychnykh zrazkakh / D. Yu. Petryna, L. Ya. Ropiak; vlasnyk IFNTUNH. – № a 200705249; zaiavl. 14.05.2007; opubl. 26.01.2009, Biul № 2. – 6 s.

67. Pat. na korysnu model 43750 Ukraina, MPK (2009) E 21 V 17/00. Sposib zmitsnennia nasosnykh shtanh dlia sverdlovynnykh nasosiv / I. I. Steliha, L. Ya. Ropiak, V. M. Bilinskyi; zaiavnyk i patentovlasnyk IFNTUNH. – № u 200903944; zaiavl. 21.04.2009; opublik. 25.08.2009, Biul. № 16. – 3 s.

68. Pat. na korysnu model 67165 Ukraina, MPK (2012) B 05 D 3/14. Sposib pidhotovky poverkhni detalei pered hazotermichnym napyleniam pokryttiv / V. V. Kustov, L. Ya Ropiak, A. K Smahliuk; zaiavnyk i patentovlasnyky – vynakhidnyky. – № u201107081; zaiavl. 06.06.11; opubl. 10.02.12, Biul. № 3. – 3 s.

69. Pat. na korysnu model 72831 Ukraina, MPK (2006) G 01 N 3/20. Sposib vyznachennia trishchynostiikosti tverdykh splaviv, keramichnykh materialiv ta pokryttiv / L. Ya. Ropiak, O. V. Rohal, O. M. Yakovyn, I. H. Barylo; zaiavnyky i patentovlasnyky – vynakhidnyky. – № u 201202856; zaiavl. 12.03.2012; opublik. 27.08.2012, Biul. № 16. – 5 s.

70. Pat. na korysnu model 68266 Ukraina, MPK (2012) E 21 V 10/00. Sposib kriplennia zubkiv u sharoshkakh burovykh dolit / I. O. Shuliar, A. K. Smahliuk, S. D. Vuitsik, D. S. Vuitsik, S. S. Vuitsik, L. Ya. Ropiak; zaiavnyky i patentovlasnyky – vynakhidnyky. – u201108805; zaiavl. 13.07.11; opubl. 26.03.12, Biul. № 6. – 5 s.

71. Pat. na korysnu model 72832 Ukraina, MPK (2006) V 24 V 39/04. Instrument dlia fryktsiino-zmitsniuiuchoi obrobky detalei / V. V. Ostapovych, L. Ya. Ropiak; zaiavnyky i patentovlasnyky – vynakhidnyky. – № u 201202858; zaiavl. 12.03.2012; opublik. 27.08.2012, Biul. № 16. – 6 s.

72. Pat. 103529 Ukraina, MPK (2013) E 21 V 17/00. Sposib zmitsnennia burylnykh trub iz aliuminiievykh splaviv / L. Ya. Ropiak, O. V. Rohal; zaiavnyk i patentovlasnyk IFNTUNH. – № a 201114404; zaiavl. 05.12.2011; opublik. 25.10.2013, Biul. № 20. – 6 s.

73. Pat. 106512 Ukraina, MPK (2014) S23 S 22/02. Sposib formuvannia znosostiikykh shariv na detaliakh iz aliuminiievykh splaviv / M. Y. Burda, L. Ya. Ropiak, O. V. Rohal, Yu. M. Burda; zaiavnyk i patentovlasnyk IFNTUNH. – № a 201208799; zaiavl. 17.07.2012; opublik. 10.09.2014. Biul. № 17. – 4 s.

74. Pat. 108341 Ukraina, MPK (2015) F 16 J 1/00. Tsylyndro-porshnevyi vuzol nasosa / H. V. Hryhorchuk, L. I. Hryhorchuk, L. Ya. Ropiak, M. Y. Burda; zaiavnyky i patentovlasnyk – vynakhidnyky. – № a 201408647; zaiavl. 30.07.2014; opubl. 10.04.2015, Biul № 7. – 6 s.

75. Pat. 109077 Ukraina, MPK (2006) V 23 V 27/06. Rizets dlia narizannia zovnishnoi trykutnoi tsylindrychnoi rizby / O. R. Onysko, L. Ya. Ropiak, V. H. Panchuk; zaiavnyky i patentovlasnyky – vynakhidnyky. – № a 201403278; zaiavl. 31.03.14; opubl. 10.07.15, Biul. № 13. – 7 s.

76. Pat. 114372 Ukraina, MPK (2017) S 25 D 19/00. Prystrii dlia lokalnoho formuvannia pokryttiv iz elektrolitu na dovhomirnykh detaliakh / L. Ya. Ropiak, M. Y. Burda, O. V. Rohal, Yu. Y. Striletskyi; zaiavnyk i patentovlasnyk IFNTUNH. – № a 201600557; zaiavl. 25.01.2016; opubl. 25.05.2017, Biul. № 10. – 5 s.

77. Pat. 116066 Ukraina, MPK (2006) E 21 V 17/00. Burylna truba iz lehkoho splavu / L. Ya. Ropiak, O. O. Vlasii, V. V. Mazurenko, O. V. Rohal, M. Y. Burda; zaiavnyk i patentovlasnyk IFNTUNH. – № a 201612570; zaiavl. 09.12.2016; opubl. 25.01.2018, Biul. № 2. – 3 s.

78. Pat. 116950 Ukraina, MPK (2018) B 21 H 3/04. Instrument dlia fryktsiinoho zmitsnennia konichnykh zamkovykh rizb / O. V. Rohal, M. Y. Burda L. Ya. Ropiak, I. P. Taras; zaiavnyk i patentovlasnyk IFNTUNH. – № a 201613592; zaiavl. 29.12.2016; opubl. 25.05.2018, Biul. 10. – 9 s.

79. Pat. 117625 Ukraina, MPK (2006) G 01N 3/56. Sposib vyprovovuvannia materialiv na znoshuvannia pry terti po abrazyvnomu prosharku / M. Y. Burda, L.

Ya. Ropiak, Y. M. Burda, O. V. Rohal, V. V. Perepichka, V. S. Vytvytskyi; zaiavnyk i patentovlasnyk IFNTUNH. – № а 201700398; zaiavl. 16.01.2017; opubl. 27.08.2018, Biul № 16. – 7 s.

80. Ropyak L. YA. Élektrokhymycheskye kompozytsyonnye oksydnye pokrytyya [Tekst, na rus. i anhl. yazyky] / L. YA. Ropyak, A. I. Kapustnyk, YU. D. Petryna, I. YU. Hladyy. – K. : Chas, 1990. – 2 s.

81. Chernov B. A. Sposib obroblennya metalevykh poverkhnostey [Tekst] / B. A. Chernov, I. V. Holubchak, L. YA. Ropyak // V sb. tez. dokl. Naukovo-tekhnichna konferentsiya "Vykorystannya kompozytsiynykh materialiv u narodnomu hospodarstvi", 10–11 veresnya 1992 roku, Solihors'k. – Solyhorsk, 1992. – S. 103

82. Kustov V. V. Tekhnolohiya vidnovlennya znoshenykh detaley mashyn [Tekst] / V. V. Kustov, L. YA. Rop'yak, O. I. Yavors'ka // Tezy dopovidey mizhnarodnoyi nauky. –Prakt. konf «Naukovi doslidzhennya – teoriya ta eksperyment 2005» », 16–20 travnya 2005 r., Poltava. – Poltava, 2005. – T. 9. – S. 29–30.

83. Rop'yak L. YA. Vplyv neodnoridnosti osnovy mitsnosti oksydnoho pokryttya [Tekst] / L. YA. Rop'yak, I. P. Shats'kyi // Anotatsiyi mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi "Resursozberihayuchi tekhnolohiyi v naftohazoviy enerhetytsi" "IFNTUNH–40", 16–20 kvitnya 2007 r, Ivano-Frankivs'k. – Ivano-Frankivs'k, 2007. – S. 284.

84. Rop'yak L. YA. Modelyuvannya riz'bovoho z'yednannya z tsanhovoyu haykoyu [Tekst] / L. YA. Rop'yak, I. P. Shats'kyi // Tezy dopovidi 8-ho Mizhnarodnoho sympoziumu Ukrayins'kykh inzheneriv-mekhanikiv u L'vovi, 23–25 travnya 2007 r, L'viv. – L'viv, 2007. – S. 90

85. Kustov V. Prystriy dlya avtomatyzatsiyi protsesu napylennya pokryttiv [Tekst] / V. Kustov, L. Rop'yak, A. Smahlyuk // Materialy intern. nauk.-tekhnin. konf «Fundamental'ni ta prykladni problemy suchasnykh tekhnolohiy», 19–21 travnya 2010 r., Ternopil'. – Ternopil': TNTU, 2010. – S. 174 – 175.

86. Kustov V. Matematychno modelyuvannya protsesiv nahrivannya ta rukhu chastynok poroshku pry elektroduhovomu napylyuvanni kompozytsiynykh pokryttiv

[Tekst] / V. Kustov, L. Rop'yak // Tezy dopovidey V Vseukrayins'koyi nauky. -Prakt. konf., 30 veresnya – 3 zhovtnya 2010 r., Mykulychyn. – Kyyiv: Universytet «Ukrayina», 2010. – S. 128

87. Shulyar I. O. Vidtsentrove armuvannya ozbroynnya burovykh instrumentiv [Tekst] / I. O. Shulyar, V. V. Kustov, L. YA. Rop'yak // Materialy II mizhnarodnoyi nauky. -Prak. konf., «Kompleksne zabezpechennya yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system», 23–25 travnya 2012 r., Chernihiv. – Chernihiv, 2012. – S. 29

88. Shulyar I. O. Modelyuvannya rukhu tverdykh chastynok u ridkomu splavi pry tsentsentnomu armuvanni detaley [Tekst] / I. O. Shulyar, M. V. Makoviychuk, L. YA. Rop'yak // Mashynobuduvannya i tekhnosfera KHKHI stolittya: KHIKH internar. nauch.tekh. konf., 17–22 sentyabrya 2012 h, Sevastopol'. – Donets'k, 2012. – T. 3. – S. 83

89. Shulyar I. O. Analiz nesuchoyi zdatnosti trykomponentnykh z'yednan' kompozytsiynykh zubtsiv iz sharoshkoyu dolota [Tekst] / I. O. Shulyar, I. P. Shats'kyy, V. A. Kornuta, L. YA. Rop'yak // Internar. nauk.-tekhin. konf «Innovatsiyni tekhnolohiyi burinnya vuzliv, vydobutku nafty ta hazu ta pidhotovky fakhivtsiv naftohazovoyi haluzi», 3–6 zhovtnya 2012 r., M. Ivano-Frankivs'k. – Ivano-Frankivs'k, 2012. – S. 22–23.

90. Velychkovych A. S. Otsinka mitsnosti restavrovanoyi dilyanky shtoku burovoho nasosa z urakhuvannyam pozashtatnoho napruzhenno-deformovanoho stanu [Tekst] / A. S. Velychkovych, L. YA. Rop'yak // Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiya «Naftohazova enerhetyka 2013», 7–11 zhovtnya 2013 r., Ivano-Frankivs'k. – Ivano-Frankivs'k, 2013. – S. 106–108.

91. Rop'yak L. YA. Zastosuvannya dvosharovykh pokryttiv dlya zmitsnennya detaley naftohazovoho oblagnannya [Tekst] / L. YA. Rop'yak // Zbirnyk naukovykh prats' II-yi Vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Prohresyvni tekhnolohiyi mashynobuduvannya», 10–15 lyutoho 2014 r., L'viv. – L'viv: NU "L'vivs'ka Politekhnik", 2014. – S. 52

92. Rop'yak L. YA. Plazmove-elektrolitychne oksyduvannya lyvarnya alyuminiyevykh splaviv [Tekst] / L. YA. Rop'yak // Materialy 14-yi Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi, «Inzheneriya poverkhni ta reheneratsiya vyrobiv», 02–06 chervnya 2014 r., Svalyava. – Kyiv, 2014. – S. 119–121.

93. Shats'kyi I. P. Elementarnyy rozrakhunok klemovykh z'yednan' z nepovnym obkhoplenniam vala [Tekst] / I. P. Shats'kyi, L. YA. Rop'yak // Materialy II Mizhnarodnoyi konferentsiyi «Aktual'nye problemy ynzhenernoy mekhanyky», 16–20 bereznya 2015 r., Kyiv–Odessa. – Odessa: TÉS, 2015. – S. 92–93.

94. Kustov V. Vyznachennya prypuskiv na mekhanichne obroblennya detaley iz kompozytsiynomy pokryttyamy [Tekst] / V. Kustov, L. Rop'yak, M. Makoviychuk, K. Tsidilo // Materialy mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Fundamental'ni ta prykladni problemy suchasnykh tekhnolohiy», 19–21 travnya 2015 r., Ternopil', – Ternopil': TNTU, 2015. – S. 103–104.

95. Rop'yak L. YA. Teoretychne doslidzhennya zminy kuty pidnimannya hvyntovoyi liniyi konichnykh riz'b [Tekst] / L. YA. Rop'yak, M. V. Makoviychuk O. V. Rohal' // Materialy XXIII mizhnarodnoho naukovo-tekhnichnoho seminaru «Vysoki tekhnolohiyi: tendentsiyi rozvytku», 7–12 veresnya 2015 r., Odesa. – Kharkiv: Vyd-vo «Kursor», NTU «KHPI», 2015. – S. 137–138.

96. Rop'yak L. YA. Shlyakhy pidvyshchennya efektyvnosti tekhnolohichnoho protsesu plazmovo-elektrolitychnoho oksyduvannya alyuminiyu ta yakosti pokryttiv [Tekst] / L. YA. Rop'yak: Zbirnyk naukovykh prats' V-y Vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Prohresyvni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni», 8–12 lyutoho 2016 r, L'viv. – L'viv: NU "L'vivs'ka Politekhnik", 2016. – S. 122–126.

97. Rop'yak L. YA. Shlyakhy pidvyshchennya ekspluatatsiynykh kharakterystyk alyuminiyevykh burovykh trub [Tekst] / L. YA. Rop'yak, M. Y. Burda, O. V. Rohal' // Tezy dopovidey XIX-yi naukovoyi konferentsiyi Ternopil's'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu im. Ivana Pulyuya, 18–19 travnya 2016 r., Ternopil'. – Ternopil': TNTU, 2016. – S. 69

98. Rop'yak L. YA. Tekhnolohichne zabezpechennya tochnosti ta yakosti vyhotovlennya ta vidnovlennya zminnykh detaley porshnevnykh nasosiv

dvostoronn'oyi diyi [Tekst] / V. V. Ostapovych, L. YA. Rop'yak // Materialy XIV-yi Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku», 31 travnya–3 chervnya 2016 r, Kramators'k. – Kramators'k: DDMA, 2016. – S. 69

99. Rop'yak L. YA. Ustanovka dlya lokal'noho formuvannya oksydneykh pokryttiv na alyuminiyevykh burovykh trubakh [Tekst] / L. YA. Rop'yak, O. V. Rohal', M. Y. Burda // II Vseukrayins'ka naukovo-praktychna konferentsiya «Pryladobuduvannya ta metrolohiya: Suchasni problemy, tendentsiyi rozvytku», 6–7 zhovtnya 2016 r., M. Luts'k. – Luts'k: LNTU, 2016. – S. 77–78.

100. Rop'yak L. YA. Doslidzhennya vplyvu hiroskopichnoho efektu na tochnist' obrobky otvoriv pry sverdlinni [Tekst] / L. Rop'yak, K. Tsidilo, I. Tsidilo // Materialy druhoyi Vseukrayins'koyi naukovoyi konferentsiyi «Prykladni zavdannya matematyky», 13–15 zhovtnya 2016 r., Ivano-Frankivs'k. – Ivano-Frankivs'k, 2016. – S. 81–82.

101. Rop'yak L. YA. Modelyuvannya rukhu tverdykh chastynok u ridkomu alyuminiyevomu splavi pry tsentsentnomu armuvanni vylyvom z dvoma osyamy obertannya lyvarnoyi formy / L. YA. Rop'yak, M. S. Vorobyov, M. V. Makiyuchuk // Fizychni ta komp'yuterni tekhnolohiyi. Materialy KHKHII Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi, 7–9 hrudnya 2016 r., Kharkiv. – Kharkiv: LIRA, 2016. – S. 463–465.

102. Rop'yak L. YA. Osoblyvosti zastosuvannya sharuvatoho pokryttya dlya restavratsiyi shtoku burovoho nasosa [Tekst] / L. YA. Rop'yak, A. S. Velychkovych [Tekst] // IKH Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiya «Novi materialy ta tekhnolohiyi v mashynobuduvanni» – 2017: materialy naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi, 30 – 31 travnya 2017 r., Kyyiv. – K. : NTUU "KPI", 2017. – S. 141–142.

103. Rop'yak L. YA. Rozrobka dvosharovoho pokryttya dlya zakhystu stali vid sul'fidnoho roztyrannya ta znosu [Tekst] / L. YA. Rop'yak // Materialy VI naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi "Prohresyvni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni", 6–10

lyutoho 2017 r., L'viv–Zveny. – L'viv: NU "L'vivs'ka Politekhnik", 2017. – S. 111–112.

104. Rohal' O. V. Doslidzhennya heometrychnykh parametriv konichnykh nariz [Tekst] / O. V. Rohal', I. P. Taras, L. YA. Rop'yak // Materialy XIII mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Materialy akademichnoyi nauky – 2017», 30 serpnya – 7 veresnya. – Sheffild: Nauka i osvita TOV Sheffild, 2017. – Tom. 4. – № 9. – R. 30–33.

105. Kustov V. V. Rozrobka tekhnolohiyi nanesennya pokryttiv na stalevi zamky alyuminiyevykh burovykh trub [Tekst] / V. V. Kustov, L. YA. Rop'yak, O. V. Rohal' [Tekst] // Mizhnarodna naukova konferentsiya «Materialy dlya roboty v ekstremal'nykh umovakh – 7. Poperednye rishennya realizatsiyi tsiley proektu« MMATÉNH »» – 2017: materialy naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi, 30 lystopada – 2 hrudnya 2017 r., Kyyiv. – K. : NTUU "KPI", 2017. – S. 117–118.

106. Rop'yak L. YA. Doslidzhennya temperaturnoho polya v dvosharovomu pokrytti alyuminiyu – oksyd alyuminiyu [Tekst] / L. YA. Rop'yak // Materialy VII naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi "Prohresyvni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni", 5–9 lyutoho 2018 r., L'viv–Zveny. – L'viv: NU "L'vivs'ka Politekhnik", 2018. – S. 138.



ЗМІСТ	Ст.
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА МОТИВАЦІЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	18
1.1 Аналіз умов роботи і причин виходу з ладу деталей бурового, нафтогазопромислового та газотранспортного обладнання	18
1.2 Металеві покриття для захисту сталі від наводнення	22
1.3 Методи оксидування алюмінієвих сплавів	25
1.3.1 Методи анодного оксидування алюмінієвих сплавів	25
1.3.2 Методи анодування в газовій плазмі	28
1.3.3 Метод плазмово-електролітичного анодування	29
1.3.4 Метод мікродугового оксидування алюмінієвих сплавів	29
1.4 Технології отримання алюмінієвих та сталевих заготовок деталей для подальшого формування оксидних покриттів	41
1.5 Технологічні процеси механічної обробки покриттів	44
1.6 Технологічні процеси складання виробів із алюмінієвих сплавів	48
Висновки до розділу 1	60
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ШАРУВАТИХ ПОКРИТТІВ, ІЗ РОБОЧИМ ОКСИДНИМ ШАРОМ, СФОРМОВАНИМ МІКРОДУГОВИМ ОКСИДУВАННЯМ АЛЮМІНІЮ	51
2.1 Розробка варіантів будови заготовок та покриттів із оксидним робочим шаром, сформованим мікродуговим оксидуванням	51
2.2 Оцінка міцності двошарового покриття під локальним навантаженням	55
2.2.1 Напружено-деформований стан двошарового покриття під довільно орієнтованим локальним навантаженням	55
2.2.2 Раціональне проектування двошарового покриття для локального навантаження	60
2.2.3. Вплив товщини оксидного шару на опір кераміко-алюмінієвого покриття індентуванню	64
2.2.4 Модель армування субстрату	67

2.3 Оцінка роботоздатності двошарового покриття алюміній – оксид алюмінію за згинання з крученням циліндричної деталі	75
Висновки до розділу 2	87
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МІКРОДУГОВОГО ОКСИДУВАННЯ, ВИБІР МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ	88
3.1 Розробка технологічної схеми отримання комбінованими методами покриттів із робочим оксидним шаром, сформованим мікродуговим оксидуванням	88
3.2 Вибір матеріалів і технологій формування заготовок	91
3.2.1 Досліджувані алюмінієві сплави і сталі	91
3.2.2 Обладнання для відцентрового армування алюмінієвих заготовок	92
3.2.3 Металорізальне обладнання, різальний інструмент і вимірювальні прилади	93
3.3 Розробка обладнання для поверхневого зміцнення деталей мікродуговим оксидуванням алюмінієвого шару в електроліті	94
3.3.1 Способи підготовки поверхні деталі перед напиленням покриттів	94
3.3.2 Обладнання і технології напилення композиційних покриттів із алюмінієвою матрицею на заготовки деталей	96
3.3.2.1 Розробка установки для напилення електродуговим методом композиційних покриттів із суцільних алюмінієвих дротів та оксидних порошків.	97
3.3.2.2 Установка для напилення плазмовим методом композиційних покриттів із порошків алюмінію та його оксиду на заготовки деталей	102
3.3.3 Розробка установки для оплавлення покриттів на заготовках	104
3.3.4. Розробка інструментів для фрикційно-зміцнюючої обробки деталей	106
3.3.5 Розробка установки для формування мікродугових оксидних покриттів на деталях у електроліті	106
3.4 Методики дослідження будови, фізико-механічних, електрохімічних та експлуатаційних властивостей оксидних покриттів	108

3.4.1	Методика визначення шорсткості та конусоподібності зразків з покриттями	108
3.4.2	Методика визначення мікротвердості	109
3.4.3	Удосконалення методик визначення тріщиностійкості	109
3.4.4	Методика визначення міцності зчеплення покриттів із основою	112
3.4.5	Удосконалення методики визначення залишкових напружень у покриттях	112
3.4.6	Методика дослідження структури та пористості покриттів	114
3.4.7	Удосконалення методики електрохімічних досліджень і визначення рівня допустимих напружень у зразках із покриттями	115
3.4.7.1	Методика електрохімічних досліджень покриттів	115
3.4.7.2	Методика визначення рівня допустимих напружень у зразках із покриттями	116
3.4.7.3	Методика випробовування зразків із покриттями на статичну водневу втому	120
3.4.7.4	Методика випробовування зразків із покриттями на циклічну втому	120
3.4.7.5	Методика випробовування зразків із покриттями на контактну втому	121
3.4.8	Методика випробовування зразків із покриттями на зношування	121
3.4.8.1	Розробка установки та методики випробовування покриттів на гідроабразивне зношування в потоці електроліту	121
3.4.8.2	Удосконалення установки для випробовування покриттів на газоабразивне зношування	123
3.4.8.3	Методика випробовування зразків із покриттями на зношування під час зворотно-поступального руху	124
3.4.8.4	Методика випробовування зразків із покриттями на зношування при обертовому русі	126
3.5	Планування експериментів для оптимізації технологічних процесів	127
	Висновки до розділу 3	128
	<b>РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ВІДЦЕНТРОВОГО АРМУВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОДУГОВОГО</b>	<b>130</b>

<b>НАПИЛЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ</b>	
4.1 Дослідження впливу технологічних параметрів відцентрового армування на розподіл частинок оксиду алюмінію в робочій зоні заготовки під час обертання ливарної форми навколо двох взаємно перпендикулярних осей	130
4.1.1 Постановка задачі та диференціальні рівняння руху	130
4.1.2 Результати досліджень	136
4.2 Дослідження процесу зміцнення поверхонь деталей машин обробкою іскровими розрядами	140
4.3 Вплив технологічних режимів електродугового напилення на рух та температуру частинок оксидів металів	144
4.3.1 Дослідження руху частинок оксиду алюмінію у в'язкому метало-повітряному потоці	146
4.3.2 Дослідження руху та нагрівання частинок оксидів металів у процесі напилення композиційних покриттів електродуговим методом	150
Висновки до розділу 4	158
<b>РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ МІКРОДУГОВОГО ОКСИДУВАННЯ НА ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ</b>	
5.1 Оптимізація технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті для забезпечення показників якості циліндричних деталей	160
5.1.1 Структура і фазовий склад оксидного шару сформованого мікродуговим оксидуванням	170
5.2 Дослідження впливу режимів точіння шару алюмінію та алмазного шліфування мікродугового оксидного покриття на шорсткість поверхні	174
5.2.1 Дослідження впливу режимів точіння шару алюмінію на шорсткість його поверхні	174
5.2.2 Дослідження впливу режимів алмазного шліфування на шорсткість поверхні мікродугового оксидного покриття	175
5.3 Вплив технологічних параметрів мікродугового оксидування на	181

показники якості та експлуатаційні властивості деталей	
5.3.1 Фізико-механічні властивості оксидного покриття, сформованого мікродуговим оксидуванням	185
5.4 Електрохімічні дослідження захисної дії та роботоздатності деталей з оксидними покриттями, сформованими мікродуговим оксидуванням	194
Висновки до розділу 5	202
<b>РОЗДІЛ 6 СКЛАДАННЯ ВУЗЛІВ ІЗ ДЕТАЛЕЙ, ЗМІЦНЕНИХ МІКРОДУГОВИМ ОКСИДУВАННЯМ</b>	<b>203</b>
6.1 Особливості складання коліс осьових вентиляторів з клемовими з'єднаннями із цанговою гайкою	203
6.1.1 Розрахунок клемових з'єднань з неповним охопленням вала	203
6.2 Особливості конструювання різьбового з'єднання з «цанговою» гайкою	212
6.3 Складальні напруження в робочому колесі відцентрового вентилятора	222
6.3.1 Розробка методики розрахунку складальних напружень у робочому колесі відцентрового вентилятора	224
6.3.2 Аналіз результатів дослідження складальних напружень у робочому колесі відцентрового вентилятора	233
6.4 Спосіб підвищення якості з'єднання складених виробів	233
6.5 Складання плунжерів насосів: сталевий хвостовик – робочий циліндр	234
Висновки до розділу 6	238
<b>РОЗДІЛ 7 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ</b>	<b>240</b>
7.1 Дослідження зміни геометричних розмірів заготовок під час формування мікродугових оксидних покриттів	241
7.2 Методика розрахунку припусків на механічну обробку деталей з мікродуговими оксидними покриттями	244
7.3 Оптимізація режимів різання під час алмазного шліфування	251

оксидного шару покриття	
7.4 Результати стендових випробовувань деталей зміцнених методом мікродугового оксидування	260
7.4.1 Випробовування на зношування захисних втулок валів відцентрових насосів	260
7.4.2 Випробовування на зношування штоків поршневих насосів двохсторонньої дії	261
7.5 Практичне застосування розробленої технології зміцнення деталей оксидними покриттями та складання виробів	262
7.6 Екологічні аспекти очищення, регенерації та утилізації відпрацьованого електроліту після оксидування деталей	266
Висновки до розділу 7	270
<b>ВИСНОВКИ</b>	272
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	276
<b>ДОДАТКИ</b>	311
Додаток А	312
Додаток Б	327
Додаток В	338
Додаток Д	352
Додаток Ж	363