

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

**Романюк Світлана Павлівна**



УДК 621.9.029:621.793-022.532

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ  
ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ  
ЗМІЦНЕННІ НАНОПОКРИТТЯМИ ІНСТРУМЕНТА

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант** Лауреат Державної премії України,  
доктор технічних наук, професор,  
**Скобло Тамара Семенівна,**  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
професор кафедри технологічних систем  
ремонтного виробництва

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Волчук Володимир Миколайович,**  
Придніпровська державна академія будівництва та  
архітектури, завідувач кафедри  
матеріалознавства та обробки матеріалів;

доктор технічних наук, професор  
**Роїк Тетяна Анатоліївна,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», в.о. завідувача кафедри технології  
поліграфічного виробництва;

доктор технічних наук, професор,  
**Дмитрик Віталій Володимирович,**  
Національний технічний університет “Харківський  
політехнічний інститут”, професор кафедри зварювання

Захист відбудеться «17» червня 2021 року о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 при Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

Автореферат розісланий « 14 » травня 2021 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є.І. Калінін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Довговічність і якість роботи обладнання переробної харчової промисловості пов'язані з експлуатаційною стійкістю різального інструмента. Відмови у роботі деталей обладнання призводять до значних витрат, пов'язаних з придбанням запасних частин, простоїв та зниження якості переробної продукції. Одна з причин передчасного руйнування деталей обладнання та їх недостатньої стабільності при експлуатації пов'язана з механічним зносом і пошкоджуваністю робочого шару. Значний вплив має і деградація структури, точкова і міжкристалітна корозія, руйнування, викликані напруженим станом. Рішення даної проблеми можливо реалізувати за допомогою одного з найбільш перспективних напрямів при зміцненні та відновленні поверхонь деталей із застосуванням нанотехнологій. Їх використання вимагає складного, багатофакторного підходу, який базується на глибоких знаннях і комплексних дослідженнях, що можуть забезпечити споживчі властивості виробів в експлуатації. У кожному конкретному випадку необхідно розробляти технологічні параметри зміцнення з урахуванням відмінностей структури та властивостей вихідного металу і покриттів, а також геометричної форми інструмента, впливу напружень, враховувати інтенсивність розвитку деградації металу. У зв'язку з цим, вивчення структури та властивостей нанопокриттів, що складаються з оксидів і нітридів перехідних металів, для досягнення ефективних характеристик деталей у виробництві має значний науковий внесок. Оптимізувавши параметри нанесення зміцнюючого шару та зменшуючи дефектність будови металу покриттів можливо впливати на стійкість інструмента. Тому робота, яка спрямована на підвищення експлуатаційної стійкості різального інструмента у харчовій промисловості із формуванням на його робочій поверхні зміцнюючих зносостійких і модифікованих шарів з розробкою комплексного підходу до контролю якості та прогнозування структуроутворення й властивостей, їх змін, може бути віднесена до важливих та актуальних.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертаційної роботи виконані відповідно до держбюджетної тематики ХНТУСГ імені Петра Василенка, договорів про співпрацю з підприємствами та згідно діючих програм: «Розробка і використання нових технологічних прийомів зміцнення наноструктурними покриттями в машинобудуванні» (ДР 0120U102792) у період 2020-2023 р.р.; «Нові технологічні процеси відновлення деталей наплавленням з використанням модифікування вторинною сировиною» (ДР 0120U002209) у період 2020-2024 р.р.; «Теоретичне та експериментальне обґрунтування нових технологій виробництва та відновлення деталей з використанням зміцнення

модифікуванням» (ДР 0116U005802) у період 2015-2017 р.р.; «Отримання і застосування детонаційної шихти для підвищення експлуатаційної стійкості деталей» (ДР 0117U004157) у період 2014-2017 р.р.

У вищеназваних роботах здобувачка безпосередньо виконувала та використовувала одержані результати у публікаціях, патентах і дисертаційній роботі.

**Мета досліджень:** експериментальне, теоретичне та технологічне обґрунтування параметрів комплексної технології зміцнення і відновлення двох типів різальних інструментів, що працюють в умовах циклічних навантажень, зносу й корозійного впливу.

**Завдання досліджень:**

- на основі детального аналізу літературних джерел та експериментального досвіду наукової школи університету в умовах підприємства виконати розробки, спрямовані на підвищення властивостей та ефективних параметрів технологічного процесу зміцнення тонкостінного різального інструмента наноструктурними покриттями;
- дослідити вплив значної за розміром крапельної фази на структуру нітридних покриттів, осаджених іонно – плазмовим методом, та запропонувати шляхи зниження їх частки при нанесенні зміцнюючих шарів на поверхню інструмента;
- теоретично та експериментально дослідити дефекти будови та неоднорідність структури покриттів, що формується, а також оцінити їх вплив на зносостійкість зміцненого поверхневого шару тонкостінного різального інструмента;
- обґрунтувати параметри іонно - плазмового способу осадження багат шарових наноструктурних покриттів на основі цирконію для зміцнення пакувального інструмента, що працює у спряженні, та провести комплексне дослідження їх фізико-механічних, структурно-фазових і споживчих характеристик;
- теоретично оцінити якісні та кількісні закономірності формування фаз, що виникають на поверхні тертя, зміцненій багат шаровим покриттям пакувального інструмента;
- розробити параметри комплексного технологічного процесу відновлення пакувального інструмента з високовуглецевої легованої сталі наплавленням, компенсуючого знос покриття, і наступним його зміцненням та визначити основні особливості формування структури робочого шару;
- теоретично та експериментально розробити комплексний підхід для оцінювання анізотропії структури і властивостей досліджуваного інструмента на різних етапах його життєвого циклу та обґрунтувати можливість використання для цього неруйнівного контролю якості;

- провести експериментальні випробування та промислове впровадження зміцнених і відновлених різальних інструментів й оцінити ефективність запропонованих технологій.

**Об'єкт дослідження:** процес зміцнення та відновлення різальних інструментів у харчовій промисловості.

**Предмет дослідження:** експериментальні, теоретичні та технологічні основи формування структури і властивостей при зміцненні нанопокриттями різального інструмента для підвищення його експлуатаційної стійкості.

**Методи дослідження.** У роботі запропоновано новий комплексний підхід до експериментальних, теоретичних та промислових досліджень з використанням сучасних й нових методів і розробок для детального вивчення структуроутворення та оцінки якості інструмента. Вони спрямовані на пошук ефективних параметрів і технологічних процесів нанесення покриттів та вибору матеріалу для зміцнення з урахуванням умов схильності до пошкодження і руйнування при експлуатації двох типів різальних інструментів: тонкостінного дискового зі сталі 65Г – для подрібнення горіхів та ножів зі сталі X12 – для розрізання металізованої плівки при загортанні цукерок. При необхідності відновлення зношеної поверхні інструмента зі сталі X12 розроблено підхід з використанням наплавлення із компенсацією зношеного шару та його модифікуванням вторинною сировиною з алмазною фракцією. Для оцінки механічних властивостей металу інструмента і зміцнюючих покриттів на мікро- та нанорівні використовували сучасне обладнання. Для виявлення ступеня дефектності інструмента з оцінкою напруженого стану застосовували запатентований підхід з використанням магнітного методу неруйнівного контролю. За допомогою методів мікрорентгеноспектрального, рентгенофлуоресцентного та рентгеноструктурного фазового аналізу експериментально досліджували структуроутворення, визначали зміни елементного та фазового складу металу різального інструмента, зміцнюючих наноструктурних покриттів і модифікуючої вторинної сировини від утилізації боеприпасів, а також значну увагу приділяли наявності дефектів будови й формуванню підвищеного розміру крапельної складової.

Для проведення теоретичних досліджень використовували металографічні зображення структури, отримані на оптичному та електронному мікроскопах, з описом змін, згідно сучасної комп'ютерної програми Thixomet Pro, чисельний метод розв'язування задач з вирішенням диференціальних рівнянь і нові розроблені підходи математичного опису ступеня неоднорідності поверхневого робочого шару інструмента. Комп'ютерним моделюванням визначали процеси зміни структуроутворення, що відбуваються у робочому шарі захисних покриттів в умовах тертя та зношування. Для оптимізації структурного стану покриттів проводили

кореляційно – регресійний аналіз з визначенням впливу змін на зносостійкість.

Ефективність розробленого нового комплексного підходу підтверджували експериментальним шляхом в реальних умовах харчової промисловості.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

*Вперше:*

– запропоновано комплексний підхід контролю якості різального інструмента у вихідному стані, після його зміцнення та експлуатації, що дозволило виявляти зміни структуроутворення, рівень виникаючих напружень та деградацію металу за анізотропією властивостей;

– для підвищення якості робочої поверхні та зниження втомної пошкоджуваності при тривалій експлуатації тонкостінного різального інструмента запропоновано циклічне нанесення нітридного наноструктурного шару іонно - плазмовим методом з використанням ВЧ розряду, що запобігає його перегріву;

– проаналізовано характер деградації структури інструмента при експлуатації зі сталі X12 та виявлено особливості руйнування робочого шару за рахунок карбідної фази. Встановлено, що під дією деформації відбувається фрагментація дрібних карбідів, їх упорядкування та інтенсифікуються дифузійні процеси, що призводить до зниження концентрації вуглецю і хрому в спецкарбідах. Деградація дрібних карбідів, розташованих під кутом  $45^\circ$ , які відповідають навантаженню тиском, призводить до формування тріщин та руйнування робочої поверхні;

– запропоновано використання багат шарового наноструктурного покриття  $ZrN/ZrO_2$ , в якому шари з нітриду цирконію забезпечують необхідну зносостійкість, а керамічні – сприяють захисту від корозії. Ефективність цього процесу забезпечує невелика частка крапель розміром до 8-10 мкм в шарах  $ZrN$ , границі яких викришуються, а кисень з підшару  $ZrO_2$  дифундує та заповнює порожнини і при експлуатації поновлює зношені вторинні захисні плівки;

– теоретичними дослідженнями оцінено локальну структурну неоднорідність робочої поверхні в експлуатації, що дозволило виявити певні ділянки, в яких відбуваються процеси дифузії, виникають локальні деформації, формуються дефекти будови (краплі, порожнини, мікротріщини), відбувається розмежування зон напруження й розрядження структури і зміни концентрації компонентів та їх границі є осередками зародження пошкоджуваності;

– для прогнозування особливостей структуроутворення, яке відбувається на зміцненій покриттям поверхні в умовах тертя, на основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено новий підхід з виявленням

поєднань нестабільних фазових складових, що зазнають найбільших змін в процесі експлуатації й визначають їх зв'язок зі зносостійкістю.

*Удосконалено:*

– на основі комплексних теоретичних досліджень металографічних зображень за допомогою сучасної комп'ютерної програми Thixomet Pro, а також спеціально розробленого і вдосконаленого оптико-математичного методу виявлено зміни фазового складу й деградації структури за мінливістю характеристик кольорів, пов'язаних з процесами, які виникають в період експлуатації. Встановлено, що під дією виникаючих напружень руйнуються менш стабільні структурні складові та зменшується кількість загальної частки карбідної фази, яка відрізняється концентрацією в ній основних компонентів.

*Отримало подальший розвиток:*

– для очищення робочих поверхонь тонкостінного різального інструмента перед нанесенням зміцнюючого покриття та збереження його планшетності при використанні запропоновано параметри технології циклічної обробки ВЧ розрядом.

**Практичне значення отриманих результатів.** На основі досліджень та моделювання структуроутворення запропоновано параметри технології зміцнення тонкостінного різального інструмента покриттям TiN для подрібнення горіхів, що дозволяє збільшити його експлуатаційну стійкість до 210 разів у порівнянні з дисковими ножами зі сталі 65Г діючого виробництва. Для оцінки якості покриттів розроблено та використано методи неруйнівного контролю інструментів, що забезпечують своєчасне виявлення напружень та початок деградації металу. Це дозволяє запобігти використанню таких ножів при експлуатації та уникнути руйнувань інструментів, що працюють в єдиному блоці.

Одночасно виконано розробки з підвищення рівня властивостей та експлуатаційної стійкості пакувального інструмента зі сталі X12, що працює в умовах зношення та корозійного впливу у спряженні, для зміцнення та відновлення якого обґрунтовано ефективність використання багаточарового наноструктурного покриття ZrN/ZrO<sub>2</sub>. Впровадження такої технології у виробництво сприяло більш стабільній роботі інструмента при експлуатації (до 14 разів), який використовується для розрізання металізованої плівки при пакуванні цукерок.

Розробки захищені 12 патентами України та використовуються на харчовому підприємстві ПАТ «Кондитерська фабрика «Харків'янка».

Економічний ефект від впровадження запропонованих розробок, який базувався на фактично досягнутому підвищенні стійкості різальних інструментів в експлуатації, досягає 151899,2 грн. Очікуваний економічний ефект при використанні розробленої технології зміцнення в масштабах трьох

великих українських підприємств з аналогічним обладнанням складе 455697,6 грн.

Результати виконаних в дисертаційній роботі досліджень використовуються також і в учбовому процесі у лекційних курсах з дисциплін «Нанотехнології та методологія наукових досліджень» й «Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів» для бакалаврів та магістрів, які навчаються за освітньою програмою «Обладнання переробних і харчових виробництв; інженерія переробних і харчових виробництв», а також для студентів, які отримують спеціальність «Харчові технології».

**Особистий внесок здобувача.** Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист, одержано самостійно та викладено у роботах [1-63]. У наукових дослідженнях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачу належать: обґрунтування параметрів технології зміцнення наноструктурними покриттями, які забезпечують підвищення якості робочої поверхні [1,2,26,27,37,39,44]; дослідження структуроутворення та виявлення деградації інструмента зі сталі Х12 [10,41]; розробка ефективної композиції для зміцнення інструмента, який працює в умовах тертя, зношування і корозійної пошкоджуваності [15,21,35]; дослідження структури та елементного складу нанопокриттів [12,51,55,58,60-62]; розробка комплексного підходу до виявлення неоднорідності структуроутворення та прогнозування її впливу на властивості робочого поверхневого шару [4,8,25,42]; оцінка механічних властивостей інструмента і покриттів та обробка експериментальних даних [9,11,23,46,48,59]; розробка та використання методик визначення анізотропії властивостей і контролю якості інструмента [7,28,31]; оцінка хімічного складу вторинної детонаційної шихти від утилізації боєприпасів з подальшим вибором її ефективного використання [3,5,6,18,24,29,30,32-34,50,56,63]; проведення промислової апробації. У колективній монографії [37] приймала участь у підготовці матеріалів до розділу 3 «Технології наплавлення, нанесення покриттів та обробки поверхонь».

**Апробація результатів досліджень.** Основні положення і результати дисертаційної роботи розглядалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на 23 міжнародних науково-технічних та практичних конференціях у період 2016-2021р.р. Основні з них: Міжнародна наукова сесія «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (Харків, ХНТУСГ, березень 2016-2019р.р.); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва» (Харків: ХНТУСГ, 11 - 12 травня 2017р.р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Нові рішення в науці про метали та в технологіях їх обробки» (м. Харків, ХНАДУ, 26-27 вересня 2017р.); IX International Conference of young scientists «Welding and Related Technologies» (Kyiv, Ukraine, 23-26 May 2017); II



Міжнародна науково-практична конференція «Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях». (Суми, 22 - 26 травня 2017р.); International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (ICPPCF-2018) (Kharkiv, Ukraine, 10-13 September, 2018); Міжнародна науково-технічна конференція «Нові і нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні» (м. Одеса, ОНПУ, 26—29 вересня 2018р.); 10th Interdisciplinary Conference «Nature - Human – Culture» (Krakow. Poland. Uniwersytet Pedagogiczny, 13-16 червня 2019р.); 11th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED'11) (Batumi, 16-19 July 2019); 7th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2019) (Lviv, Ukraine, 27-30 August, 2019,); Міжнародна науково-практична конференція «Сучасне матеріалознавство: ідеї, рішення, результати» (м. Харків, ХНАДУ, 26-27 вересня 2019р.); XVII міжнародна науково-технічна конференція «Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання», (м.Харків, Україна, 7–11 жовтня 2019 р); Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів» (Харків, ХНАДУ, 24 - 25 вересня 2020 р).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 63 наукових працях, в тому числі: 19 статей у спеціалізованих наукових виданнях України та 11 статей у закордонних виданнях (з них 15 включено до міжнародних наукометричних баз SCOPUS [2,7,9-12,15,21-25,58,60,61] та Web of Science); 21 - в інших виданнях закордонних та України (з яких 1 колективна монографія); отримано 12 патентів України.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи викладено на 392 сторінках, у тому числі 7 додатків на 47 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 303 сторінки, 118 рисунків і 92 таблиці. Список використаних джерел нараховує 377 найменувань на 42 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та завдання досліджень, наведено основні отримані автором результати, визначено їх новизну і практичну значимість. Показано зв'язок роботи з науковими темами і особистий внесок здобувачки. Наведено дані про публікації та апробацію результатів роботи.

У першому розділі «Аналіз сучасних та перспективних напрямів зміцнення і відновлення поверхонь деталей із застосуванням нанотехнологій» представлено детальний аналіз сучасних літературних джерел та патентів, який показав, що одним з найбільш перспективних методів отримання зміцнюючих, захисних покриттів є спосіб фізичного осадження з парової фази PVD, який дозволяє наносити покриття на тонкостінний різальний інструмент, не викликаючи його перегріву. Така технологія відноситься до екологічних і ресурсозберігаючих. В залежності від параметрів зміцнення утворюються нанопокриття з різними кристалічними ґратками, фазами та властивостями. Значний внесок у створення захисних нанопокриттів, отриманих іонно-плазмовим методом, дослідження їх структури і властивостей, в залежності від параметрів технології одержання, належить таким видатним вченим як Cavaleiro A., Hosson J.Th., Pierson H.O., Mahan J.E., Pauleau Y., Barna P.V., Lukaszewicz K., Zhang S., Bunshah R.F., Abbott S., Береснев В.М., Погребняк А.Д., Головін Ю.И., Глушкова Д.Б., Андреев А.А., Соболев О.В., Гусев А.И., Аксьонов И.И., Азаренков Н.А., Табаков В.П., Верещака А.С., Саблев Л.П., Григорьев С. Н., Білоус В.А., Купрін А.С. та ін.

Нітриди, карбіди та оксиди перехідних металів IV групи найбільш підходять в якості зміцнюючих покриттів, тому що мають високу твердість, міцність та зносостійкість. Дешевим та ефективним є покриття TiN. Використання такого покриття для зміцнення тонкостінних виробів потребує одержання додаткової інформації, яка пов'язана з вибором технології та параметрами його одержання, матеріалом основної деталі. Для покриття TiN, в залежності від співвідношення кількості азоту, можливо формування різних стехіометричних та нестехіометричних фаз, найпоширенішою з яких є TiN, що має кристалічну ґратку ГЦК, а також тетрагональну  $\epsilon$ -Ti<sub>2</sub>N та деякі інші - орторомбічну Ti<sub>3</sub>N<sub>2</sub>, кубічну TiN<sub>2</sub>, моноклінну Ti<sub>4</sub>N<sub>3</sub> і Ti<sub>6</sub>N<sub>5</sub>.

В харчовій промисловості також можливо використання цирконієвих покриттів. Азотна система цирконію може складатися з  $\sigma$ -ZrN<sub>x</sub>, де  $x \leq 1$  або Zr<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ( $x > 1$ ) з орторомбічною й кубічною ґратками. При взаємодії цирконію з киснем утворюються метастабільні оксидні фази Zr<sub>6</sub>O, Zr<sub>3</sub>O, Zr<sub>2</sub>O, Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO, серед яких найстабільніша ZrO<sub>2</sub>, що демонструє активну поліморфну поведінку та має моноклінну, тетрагональну і кубічну модифікації. Склад типу фаз покриттів в значній мірі залежить від параметрів процесу їх нанесення, включаючи метод осадження, напруги зміщення на підкладці, тиску азоту в камері, струму дуги, температури росту. На фізико - механічні властивості покриттів впливають розмір зерен, залишкові напруження, стехіометрія зміцнюючих фаз, орієнтація кристалів, щільність дефектів, наявність підвищеного розміру крапельної фракції, неоднорідність розподілу хімічних елементів та фазових складових, а також товщина захисного шару.

Поліпшити властивості захисних нітрідних шарів можливо за рахунок створення композиційних або багат шарових наноструктурних покриттів. Нанесення багат шарових покриттів з чергуванням більш м'якого та твердого шару сприяє релаксації напружень, підвищує зносостійкість та перешкоджає формуванню недоликів, пов'язаних з особливостями структуроутворення іонно-плазмових покриттів. Додатково на властивості та термін експлуатації істотно впливають якість вихідного стану поверхневого шару інструмента. Для мінімізації з'явлення додаткових структурних дефектів необхідно забезпечити відсутність нерівностей, тріщин та пороутворення на поверхні, яку зміцнюють. У зв'язку з тим, що виявлено неоднорідний вплив різних технологій на формування структуроутворення зміцнюючих покриттів, важливим є проведення комплексних теоретичних та експериментальних досліджень з розробкою ефективних параметрів технології зміцнення інструментів, які дозволять підвищити рівень функціональних властивостей робочої поверхні й мінімізувати неоднорідність покриття, знизити частку крапельної складової і рівень напружень.

У другому розділі «Матеріали, методики та методологія проведення досліджень» запропоновано нові підходи та методики комплексних теоретичних, експериментальних і технологічних досліджень для виконання поставленої мети. На основі сформованих мети і завдань досліджень розроблено методологію їх проведення, яка представлена діаграмою Ісікави (рис.1).

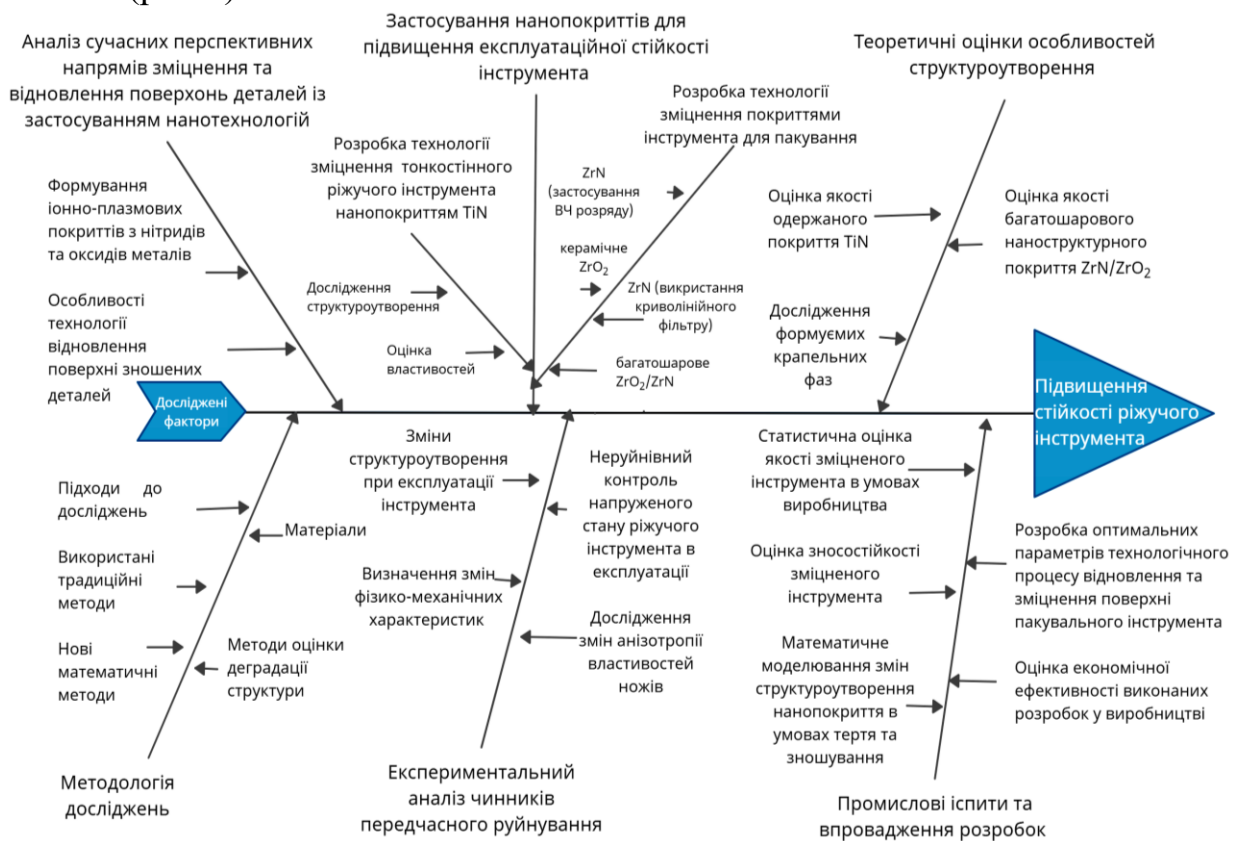


Рисунок 1 - Напрями досліджень, які використано в дисертаційній роботі

Проведено дослідження пакувального інструмента для розрізання металізованої плівки, який встановлено на машині моделі MC1DT-T для загортання цукерок, компанії MC Automations виробництва Італія (рис.2), хімічний склад якого відповідає інструментальній високолегованій сталі X12. Продовжено вдосконалення технології зміцнення тонкостінних дискових ножів зі сталі 65Г, що було розпочато у кандидатській дисертації, для подальшого збільшення їх експлуатаційної стійкості.

На основі проведеного аналізу існуючих сучасних досліджень та з урахуванням геометричних параметрів і властивостей металу інструментів розроблено параметри технології нанесення покриттів іонно – плазмовими методами для підвищення їх властивостей.

Для запобігання перегріву тонкостінних дискових ножів запропоновано циклічний режим очищення їх поверхні та осадження зміцнюючого шару вакуумно-дуговим методом, що дозволило збільшити товщину нанесеного наноструктурного покриття до 3мкм. Для зменшення кількості значних за розміром крапель на зміцненій поверхні в процесі осадження покриттів іонно-плазмовим методом використовували ВЧ – розряд та криволінійний фільтр з частковою сепарацією мікрокрапельної складової потоку.

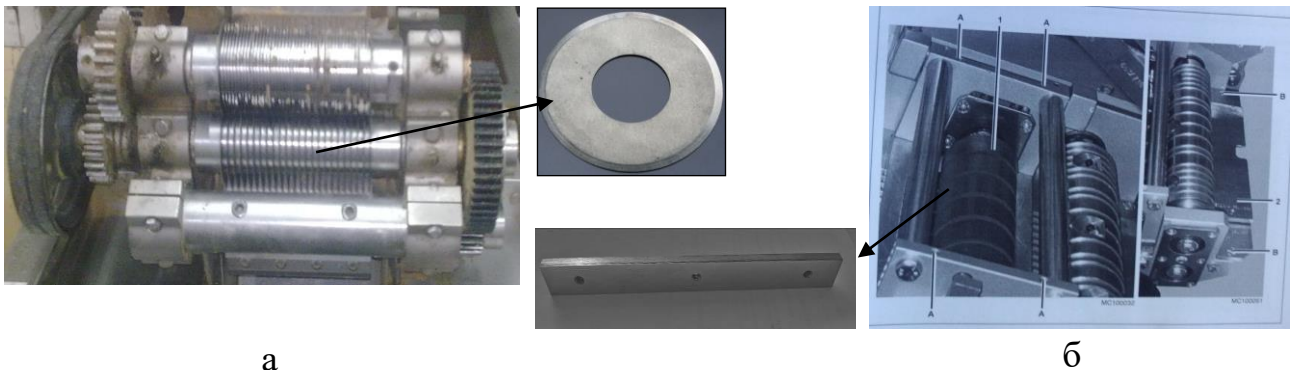


Рисунок 2 – Різальний пристрій обладнання CD-A (а) та MC1DT-T (б)

Для подовження терміну служби різального інструмента, який, крім зносу, має і корозійну пошкоджувальність, запропоновано використання багатшарового покриття з нітриду та оксиду цирконію для забезпечення формування вторинних захисних структур. Для отримання такої композиції досліджено параметри технології нанесення наноструктурного покриття та додатково розглянуто особливості осадження окремо для кожного за складом шару.

При значному зношенні робочої поверхні інструмента з високовуглецевої (2,2% C) легованої хромом (12,12% Cr) сталі перед зміцненням запропоновано відновлення зношеного шару наплавленням електродуговим методом при силі постійного струму 135 А зворотної полярності. В дослідженнях використано електроди з різним вмістом вуглецю

та хрому для визначення їх найбільшої ефективності. Для покращення якості покриття та зменшення температури рідкої ванни при відновленні використовували модифікуючу домішку з вторинної сировини від утилізації боєприпасів. За допомогою рентгенофлуоресцентного портативного аналізатора, хімічного та мікрорентгеноспектрального аналізів оцінено хімічний склад немагнітної частки фракції модифікуючої шихти, яку додавали у рідку ванну обмазкою електроду.

Аналіз механічних властивостей та структуроутворення поверхневого шару інструментів проводили на макро- і мікрорівнях, які досліджували на всіх етапах життєвого циклу інструмента. Механічні характеристики захисних наноструктурних покриттів (нанотвердість, модуль пружності, пружне відновлення, індекс пластичності, ефективний модуль пружності, коефіцієнт опору пластичній деформації, межа плинності та модуль зсуву) визначали на нанорівні, використовуючи прилад «Nanoindenter G200» і метод CSM з автоматичним безперервним записом діаграми інденування.

Для дослідження якості металу та виявлення структурної неоднорідності різних зон різального інструмента використано комплексний підхід із застосуванням неруйнівного магнітного методу контролю, металографічного, мікрорентгеноспектрального та рентгенофлуоресцентного аналізів, оптичної та електронної мікроскопії. За отриманими значеннями коерцитивної сили, вимірної цифровим напівавтоматичним приладом КРМ-Ц з певним розташуванням перетворювача мінімального розміру, оцінювали анізотропію структури, пов'язану з технологією виробництва та дефектами будови (порожнинами і мікротріщинами), деградаційними явищами й рівнем виникаючих напружень.

Для дослідження процесів, які складно виявити за допомогою тільки експериментальних методів, розроблено новий комплексний методологічний підхід, який базувався на раніше запропонованому оптико - математичному описі структуроутворення, із застосуванням сучасної комп'ютерної програми Thixomet Pro. Теоретичні дослідження металографічних зображень, отриманих з оптичного та електронного мікроскопів, були спрямовані на виявлення особливостей структуроутворення у вихідному стані (зміни фазового складу, дифузії компонентів, деградації структури металу різальних інструментів) та процесів, які відбуваються у поверхневому шарі зміцнюючих нанопокриттів після їх нанесення і експлуатації, а також при аналізі ділянок локальної неоднорідності, в яких формуються дефекти будови (краплі, пороутворення), відбувається розмежування зон напруження - стиснення й розрідження структури, що можуть бути осередками зародження пошкоджуваності.

У **третьому розділі** «Дослідження деградаційних процесів в різальних інструментах» розглянуто напрями підвищення якості і стабільної зносостійкості тонкостінного різального інструмента для подрібнення горіхів

та – пакувального, що працюють в умовах харчового виробництва. Щоб вирішити цю проблему необхідно встановити основні чинники, які призводять до пошкоджуваності їх при експлуатації в умовах використання на відповідному підприємстві.

В раніше виконаних дослідженнях детально аналізувалися показники якості та стійкості тонкостінного інструмента і показано, що в ряді випадків в них виявляється пошкоджуваність і формування нестабільного структурного стану при експлуатації. До них, насамперед, слід віднести матеріали деталі та наноструктурне покриття, параметри його нанесення, а також складності і підвищені витрати при зміцненні. Тому при подальших випробуваннях та розробках нових технологій зміцнення базувалися на одержаному досвіді і використовували лише матеріал з більш стабільними показниками, які і аналізували.

Для своєчасного виявлення ступеня дефектності тонкостінного інструмента та рівня виникаючих напружень використано магнітний метод контролю в різних його зонах, згідно з показниками коерцитивної сили (новий підхід захищено патентом України).

Оцінку структурної неоднорідності металу інструмента визначали за коефіцієнтом анізотропії  $K$  (1):

$$K = \frac{P_{\text{поп}}}{P_{\text{позд}}} \quad (1)$$

де  $P_{\text{поп}}$  - поперечний вимір,  $P_{\text{позд}}$  - поздовжній вимір.

При наявності в структурі дефектів цей показник в локальних зонах збільшується до 42,0%, що сприяє перегріву при зміцненні та зниженню властивостей інструмента. Підвищення у 1,8 рази (внаслідок залишкових напружень) виявлено у 8% ножів з усієї досліджуваної партії – 50 шт. Комплексними дослідженнями розроблено нормовані показники контролю, які без зміцнення не повинні перевищувати 10,0%. Це дозволило запобігти використанню ножів з наявністю в структурі великої кількості дефектів (порожнин) або підвищеного рівня залишкових напружень.

Що стосується різального інструмента для розрізання металізованої плівки при загортанні цукерок, то його розглядали вперше і базова інформація була відсутньою, тому дослідження стосувалися як змін основного металу, так і підбору покриттів для забезпечення його експлуатаційних властивостей. Дослідження деградаційних процесів при експлуатації пакувального інструмента зі сталі X12 і його руйнування проводили порівняльно на макро-, мікро- та нанорівнях з детальним вивченням структурних змін і фізико - механічних властивостей металу за двома зонами ножа: на робочій поверхні та центральній його частині.

Циклічні навантаження при експлуатації супроводжуються втомним характером руйнування та корозійною пошкоджуваністю робочої поверхні. Теоретично, згідно з металографічними зображеннями, за допомогою комп'ютерної програми Thixomet Pro та спеціально розробленого і вдосконаленого оптико-математичного методу виявляли зміни фазового складу та деградацію структури за мінливістю колірних характеристик карбідної фази, пов'язаних з процесами, які виникають в період експлуатації. Використовуючи сучасний чисельний метод розв'язування задач з вирішенням диференціальних рівнянь та обчисленням частинних похідних, на оцифрованих зображеннях структури у вигляді прямокутної сітки пікселів, на якій задано значення функції  $C(x,y)$  (в даному випадку це кольори  $c_{ij}$ ) теоретично досліджено зміни щільності структури (2) та дифузію хімічних компонентів (3).

$$D(x, y) = \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} \quad (2)$$

$$L(x, y) = \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (3)$$

де  $D(x,y)$  – дивергенція;  $L(x,y)$  – лапласіан.

Функція координат пікселя металографічного зображення  $C(x,y)$  (з координатами  $x$  і  $y$ ), в скінченно-різницевому представленні матиме вигляд матриці  $C_{i,j}$ :

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} c_{i-1,j-1} & c_{i-1,j} & c_{i-1,j+1} \\ c_{i,j-1} & c_{i,j} & c_{i,j+1} \\ c_{i+1,j-1} & c_{i+1,j} & c_{i+1,j+1} \end{pmatrix},$$

де в якості координат використано піксель зображення (відносно центрального елемента  $c_{ij}$ :  $i$  - номер рядка,  $j$  - номер стовпця);  $c_{ij}$  - колір.

Скінченно-різницевий аналог (2) і (3) має наступний вигляд (4),(5):

$$L = |c_2 + c_4 + c_6 + c_8 - 4c_1| \quad (4)$$

$$D = |c_2 + c_4 - 2c_1| \quad (5)$$

Пікселі з зазначеними кольорами розташовані згідно з рис.3.

$$\begin{array}{ccccc} c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{11} & c_3 & c_4 & c_5 & c_{17} \\ c_{10} & c_2 & c_1 & c_6 & c_{18} \\ c_{25} & c_9 & c_8 & c_7 & c_{19} \\ c_{24} & c_{23} & c_{22} & c_{21} & c_{20} \end{array}$$

Рисунок 3 – Схема розташування точок (пікселів) та їх нумерація навколо середньої



На робочій поверхні під дією напружень розпадаються менш стабільні структурні складові та частка карбідної фази зменшується в 1,77 разів (з 14,4% до 8,15%), яка також відрізняється концентрацією основних компонентів (рис.4). Сформована неоднорідність фаз по перетину робочого шару пакувального інструмента істотно знижує його експлуатаційні властивості. У центральній частині карбіди містять до 44,11% хрому, а його концентрація зменшується біля краю робочої поверхні і досягає лише 26,98 – 27,64%. Така локальна карбідна неоднорідність відрізняється і підвищенням вмісту вуглецю у 1,58 раз. При експлуатації відбувається фрагментація дрібних карбідів, а також їх упорядкування в ланцюжки та по межах зерен.

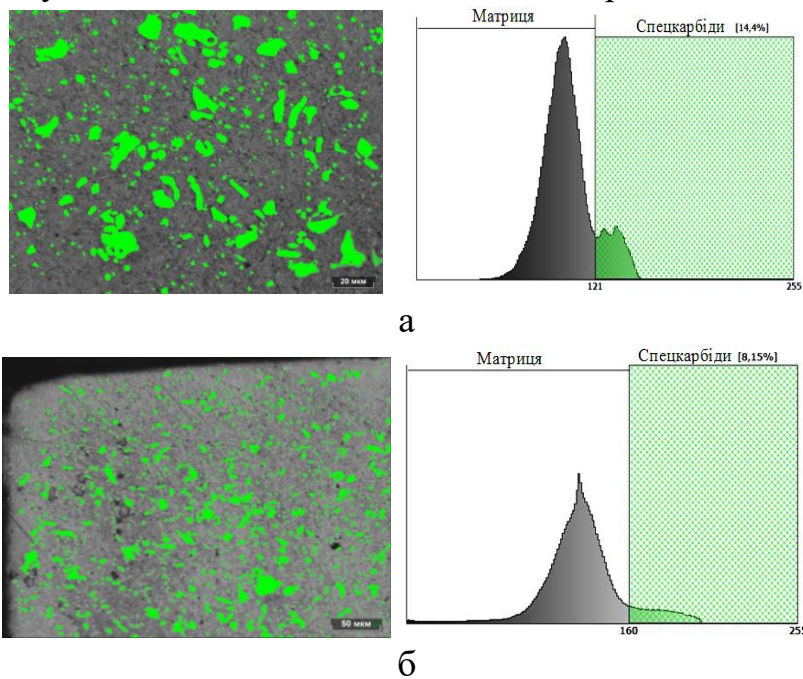


Рисунок 4 – Зображення спецкарбідів та відповідна гістограма структурних складових металу в середній зоні (а) та на краю робочої поверхні (б) інструмента

Встановлено, що при експлуатації максимальна дифузія хімічних компонентів та структурні зміни характерні для зображення з пошкоджуваністю у вигляді мікротріщин, які формуються біля краю робочої поверхні.

Якість інструмента експериментально і теоретично досліджено за рівнем фізико-механічних властивостей та структуроутворення. Для кожної структурної складової окремо оцінювали властивості на нанорівні з визначенням їх мінливості. Методом наноіндентування виявлено, що властивості спецкарбідів (нанотвердість, модуль пружності, межа плинності  $\sigma_T$ , модуль зсуву  $G$  та коефіцієнт опору пластичній деформації  $H^3/E^{*2}$ ) суттєво перевищують показники структури матриці. Карбідна складова має в 2,2 рази вище рівень нанотвердості, відносно основного металу матриці (середнє значення - 20,33 ГПа). Модуль пружності спецкарбідів у вихідному стані



дорівнює 275,87 ГПа з розкидом показників, який не перевищує 1,6%. Максимальний коефіцієнт стійкості до пластичної деформації є характерним для карбідної складової та досягає 0,101, що майже в 9 разів вище, ніж у основного металу.

Для своєчасного контролю структурного стану різального інструмента на всіх етапах його життєвого циклу також запропоновано визначення анізотропії властивостей та структуроутворення на макро- і мікрорівні з оцінкою їх змін в процесі експлуатації. Порівняльним аналізом твердості на стаціонарному приладі мікро-Віккерс UIT HVmicro-1 та ультразвуковому портативному - UIT ТКМ-459М встановлено, що при однаковому навантаженні одержано стабільні результати з розкидом показань 4,35% - 4,7%. Неоднорідність структури, одержана при математичному моделюванні на зображеннях, як з оптичного, так і електронного мікроскопів, має близькі значення до експериментальних результатів анізотропії при вимірюваннях мікротвердості за формулою (1). В процесі експлуатації на краю робочої поверхні середнє значення при математичному моделюванні досягає 9,44 % та не перевищує 10,73 % при оцінках інших властивостей. При цьому, металографічно виявляються зони з локальною пошкоджуваністю та підвищеною неоднорідністю, пов'язаною з наявністю пороутворення і тріщинами, що впливають на зміни експлуатаційної стійкості різального інструмента. В зонах, які відповідають ступеню деградації металу, локальна анізотропія властивостей підвищена до 38,49%. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що для стабільної роботи інструмента зі сталі X12 середнє значення локальних показників анізотропії властивостей та їх зміни повинні знаходитися в інтервалі від 10 до 30%.

Також, контроль якості пакувального інструмента здійснювали неруйнівним магнітним методом, згідно коерцитивної сили. Встановлено, що для забезпечення високого рівня експлуатаційних показників коерцитивна сила повинна дорівнювати 56,0 Нс з допустимим відхиленням не більше ніж 7-10%. При формуванні тріщин спостерігається підвищення коерцитивної сили на 20%, а значне її зниження менше за показники у вихідному стані, відповідає досягненню періоду передруйнування і свідчить про деградаційні зміни в робочому шарі та недоцільність подальшої експлуатації інструмента.

У **четвертому розділі** «Застосування нанопокриттів для підвищення експлуатаційної стійкості інструмента у харчовому виробництві» розглядається вплив зміцнення на властивості і структуроутворення різальних інструментів у кондитерському виробництві.

Для забезпечення необхідної якості та експлуатаційної стабільності тонкостінного інструмента досліджували можливість використання наноструктурного покриття TiN, яке забезпечує підвищену твердість,

зносостійкість, але має високу температуру плавлення. Порівняльно розглянуто особливості структуроутворення при двох технологічних процесах його зміцнення: конденсація покриття TiN іонним бомбардуванням (КІБ) та із застосуванням ВЧ - розряду. В покритті, нанесеному методом КІБ, було виявлено наявність крапельної складової з істотною неоднорідністю в розподілі компонентів. За рахунок формування порожнин та на границях крапель суттєво знижена концентрація титану з 70,79 - 74,58% до 41,93 - 54,54% та одночасно в дефектах присутні зайві компоненти Al, Si, S, Ca, а кількість вуглецю досягає 18,17%. Крім того, нанесення такого покриття методом КІБ (рис.5) призводить до перегріву тонкостінного інструмента (що підтверджено кольорами мінливості на зворотній поверхні ножа), втрати планшетності та неможливості їх подальшої експлуатації.

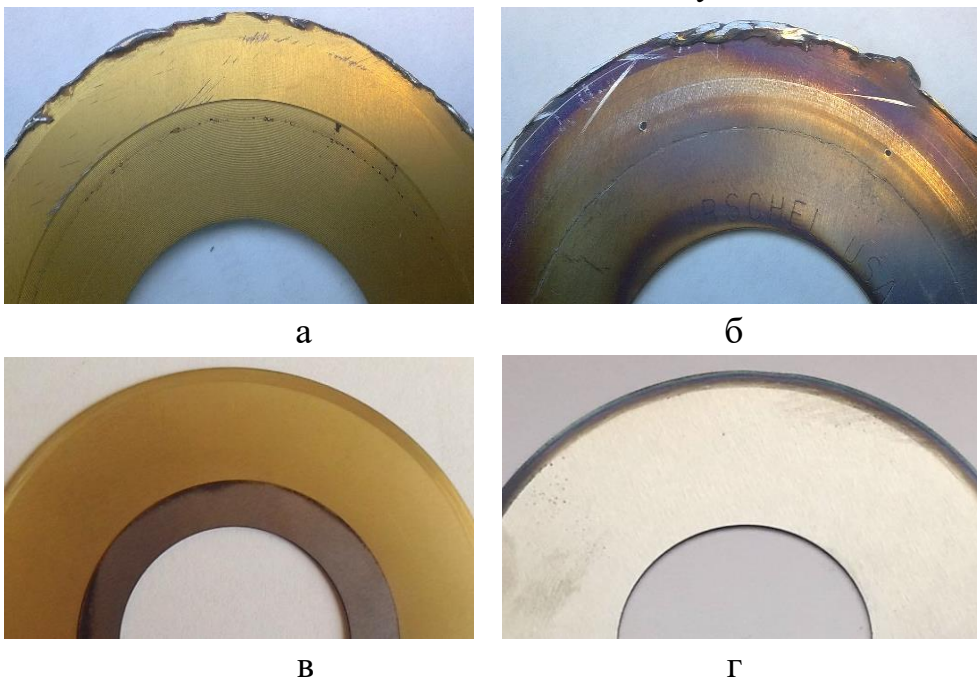


Рисунок 5 – Дискові ножі з покриттям TiN, нанесеним методом КІБ (а) та з ВЧ -розрядом (в), і зворотня, не зміцнена сторона ножів (б, г) відповідно

Для досягнення стабільного стану структури та підвищеного терміну експлуатації використовували циклічне очищення (три цикли по 5хв кожний в середовищі аргону при тиску  $P = 1 \cdot 10^{-1} - 9 \cdot 10^{-2}$  Па і негативному зсуві на підложці  $U_{зсув} = -500$  В) та нанесення (три цикли осадження по 5 хв з паузами - 3 хв) багат шарового покриття TiN загальною товщиною 3,0 мкм з використанням ВЧ- розряду (захищено 2 патентами України). Це дозволило запобігати перегріву, а також сприяло формуванню шару з мінімальною кількістю великих крапель. Нанесення підшару чистого Ti забезпечило необхідну адгезію покриття з основним металом інструмента.

Порівняльним аналізом одержаних механічних характеристик поверхневого шару інструмента, зміцненого TiN із застосуванням ВЧ –

розряду, встановлено, що пружне відновлення (рис.6) покриття складає 38,2%, яке в 2,7 рази перевищує даний показник для інструмента зі сталі 65Г.

Середнє значення нанотвердості робочої поверхні, зміцненої покриттям TiN, досягає 25,67 ГПа (рис.7,а) та в 6,56 рази вище в порівнянні з вихідним металом інструмента.

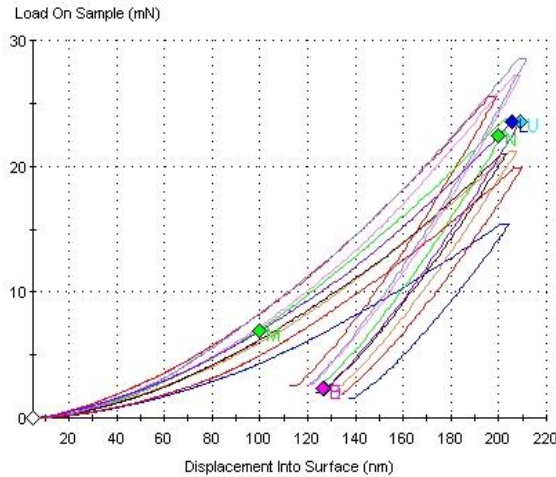


Рисунок 6 – Діаграма впровадження індентора при наноіндентуванні для інструмента зі сталі 65Г з нанопокриттям TiN

За результатами випробувань встановлено, що середнє значення модуля пружності для ножа з покриттям TiN досягає 389,28 ГПа (рис.7,б). Опір пластичній деформації робочого шару інструмента збільшився в 99 разів.

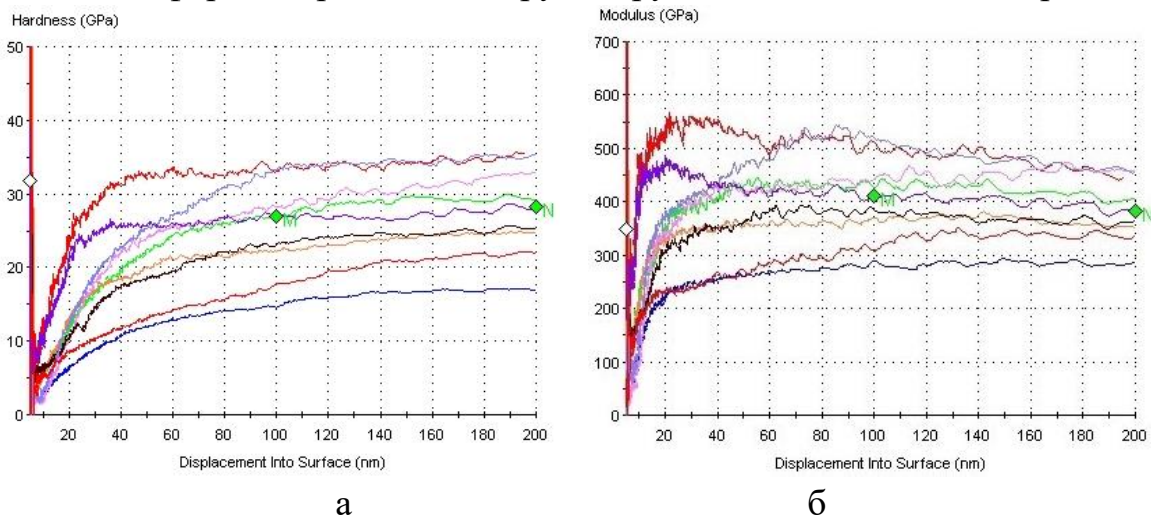


Рисунок 7 – Залежність нанотвердості (а) і модуля пружності (б) покриття TiN від глибини індентування

Для підвищення експлуатаційної стійкості і стабілізації структури пакувального інструмента зі сталі типу X12, який працює в умовах тертя, зношування та корозійного впливу, запропоновано використання композиції  $ZrO_2/ZrN$  (захищено патентом України). Дослідження ефективних параметрів технології зміцнення покриттями здійснювали також за двома методами:

іонно-плазмовим з використанням ВЧ – розряду та з частковою сепарацією мікрокраплинної складової потоку за допомогою криволінійного фільтра. Структурування аналізували в кожному шарі окремо, а потім розглядали їх композицію  $ZrO_2/ZrN$ .

Запропоновано параметри технології нанесення  $ZrN$  (вакуумно-дуговим методом із застосуванням ВЧ – розряду) забезпечують отримання покриття стехіометричного складу з кристалічною структурою типу  $NaCl$  та параметром ґратки  $a = 0,4577$  нм. Даний режим осадження сприяє формуванню покриття з середнім розміром зерен 20 нм, які мають переважну орієнтацію (111), перпендикулярно до площини зростання. На зміцненій поверхні отримали невелику кількість мікродефектів, ідентифікованих як краплі з матеріалу катоду, максимальний розмір яких не перевищує 4 мкм та шорсткість поверхні не більше 0,744 мкм.

Проведено аналіз мікроструктури і фазового складу покриття  $ZrN$ , отриманого вакуумно-дуговим методом з частковою сепарацією плазмового потоку від мікрочастинок за допомогою криволінійного магнітного фільтра. В результаті досліджень встановлено, що даний метод дозволяє отримати наноструктуроване покриття з кубічною ґраткою ( $a = 4.60$  Å) та знизити на 25% розмір зерен, який не перевищує 15 нм. Спостерігається стовпчасте зростання покриття, характерне для нітридів перехідних металів. Виявлено невелику кількість крапель з максимальним їх розміром до 4 мкм, в яких на 9,6 % підвищений вміст чистого цирконію по відношенню до всього покриття. Шорсткість поверхні складає 1,343 мкм.

Нанесення покриття  $ZrO_2$  вакуумно-дуговим методом з використанням криволінійного фільтра забезпечило формування захисного шару стехіометричного складу, моноклінної модифікації з параметрами ґратки  $a = 5,312$ ;  $b = 5,212$ ;  $c = 5,147$ . При конденсації очищеної від макрочасток плазми отримали покриття  $ZrO_2$ , яке має дрібне зерно і розмір кристалітів становить 17 нм. Покриття  $ZrO_2$  забезпечує мінімальну шорсткість поверхні в порівнянні з нітридними шарами та не перевищує 0,564 мкм.

Після виконаних попередніх досліджень аналізували багатошарову композицію  $ZrO_2/ZrN$ . Оцінювали розподіл компонентів та їх дифузію в зоні на границях шарів. Для того, щоб компенсувати різницю на  $243^\circ C$  в подібних температурах, частка фази  $ZrN$  не повинна бути менше 12% ніж  $ZrO_2$ . Це дозволить не допустити руйнування і викришування більш твердої нітридної структурної складової. Ефективною є товщина кожного шару в композиції, яка складала  $ZrO_2 \sim 4$  мкм, а  $ZrN \sim 1,5$  мкм.

Локальним рентгеноспектральним аналізом встановлено, що хром на границі покриття – основний метал дифундує стрибкоподібно, а залізо - більш інтенсивно і рівномірно на відстань 1,0-3,0 мкм від поверхні у кількості 1,46-3,83% та 5,08-16,37% відповідно. В шарах  $ZrO_2$  ліквідація азоту не перевищує

2,63%. Коливання за вмістом кисню і цирконію від середніх показників не перевищують 5,9-11%. Інакше виглядає неоднорідність розподілу компонентів в шарах ZrN, де концентрація кисню досягає 9,4-16,69%. Вміст цирконію в шарі ZrN на 5,86% вище ніж в - ZrO<sub>2</sub>.

Виконаними дослідженнями механічних властивостей нанопокриттів встановлено, що при зменшенні середнього розміру зерен з 20 до 15 нм у шарі покриття ZrN, осадженого з використанням ВЧ розряду та із застосуванням криволінійного фільтра, відбувається зміна параметру ґратки від  $a = 0,4577$  нм до 0,416нм, та це сприяло підвищенню максимального рівня нанотвердості до 33,279 ГПа (рис.8), що в 3,5 рази вище, ніж у металу матриці інструмента.

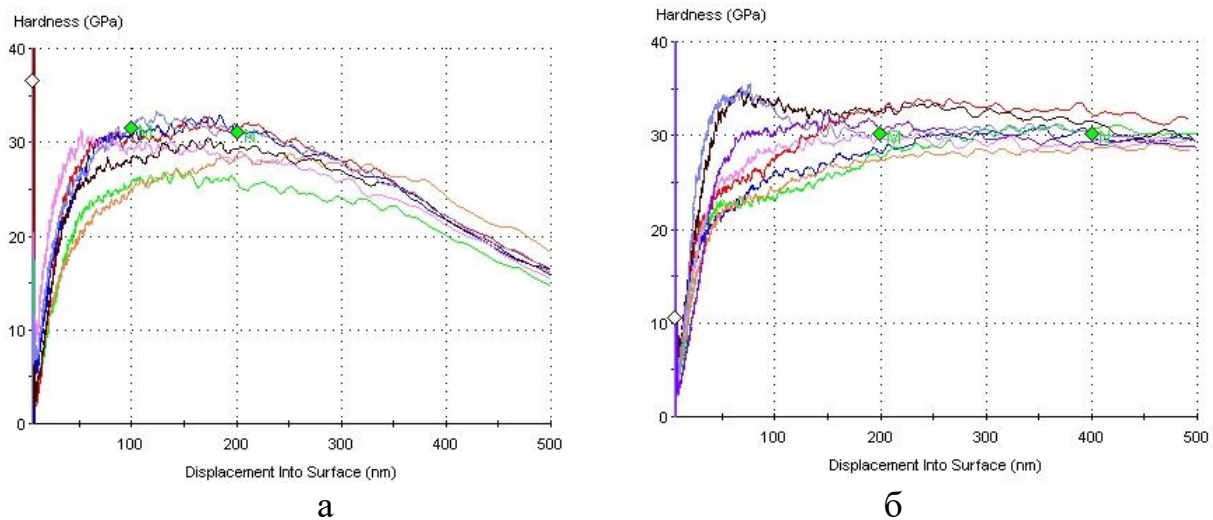


Рисунок 8 – Нанотвердість інструмента, зміцненого нанопокриттям ZrN з використанням ВЧ розряду (а) та криволінійного фільтра (б)

Мінімальне значення нанотвердості виявлено у керамічному покритті ZrO<sub>2</sub> (рис.9,а), що не перевищує 13,79 ГПа. Середнє значення аналізованого показника для багат шарового покриття ZrO<sub>2</sub>/ZrN досягає 26,87 ГПа (рис.9,б).

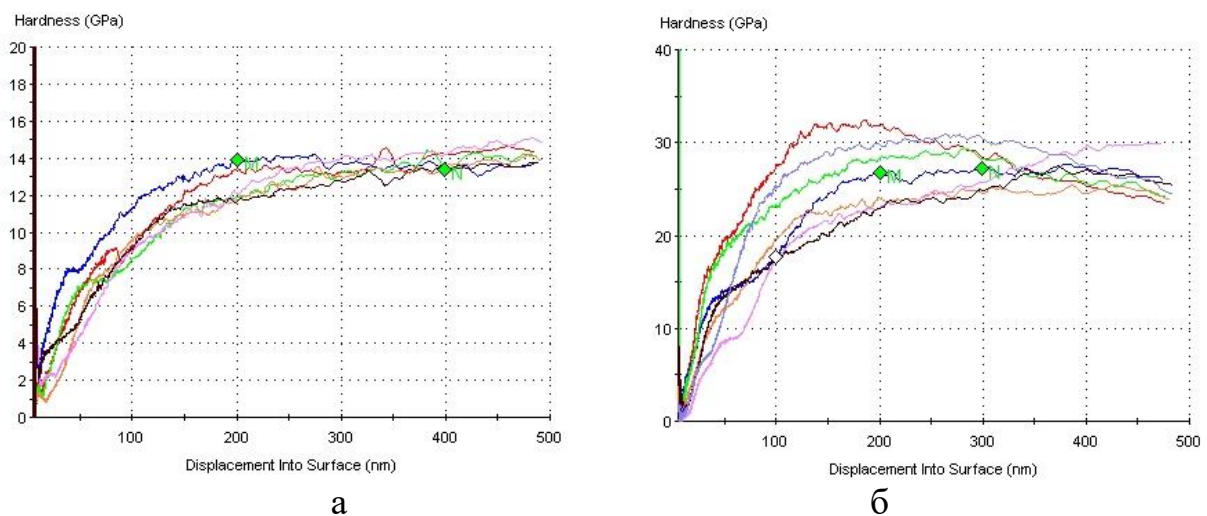


Рисунок 9 – Нанотвердість керамічного ZrO<sub>2</sub> (а) і багат шарового ZrO<sub>2</sub>/ZrN (б) нанопокриттів



Максимальне значення модуля пружності виявлене у багатошаровому нанопокритті ZrO<sub>2</sub>/ZrN і дорівнює 439,17 ГПа з розкидом отриманих даних до 30,70 % за рахунок наявності крапельної складової. Підвищений рівень властивостей зміцнюючих покриттів (табл.1) дозволив стабілізувати робочий поверхневий шар та знизити схильність до розвитку дифузійних процесів в металі різального інструмента.

Таблиця 1 - Фізико-механічні властивості різального інструмента зі сталі X12, зміцненого нанопокриттями

Покриття		E GPa	H/E	E*	H <sup>3</sup> /E* <sup>2</sup>	G, GPa	σ <sub>T</sub> , GPa
ZrN (з ВЧ розрядом)		320,81	0,092	342,197	0,217	200,506	9,798
ZrN (з криволінійним фільтром)		377,949	0,080	403,146	0,173	236,218	10,125
ZrO <sub>2</sub>		206,29	0,06	220,05	0,047	128,9	4,40
ZrO <sub>2</sub> /ZrN		336,009	0,081	358,410	0,161	210,006	8,958
Сталь X12	Матриця	246,383	0,037	262,809	0,011	153,989	3,063
	Спецкарбіди	275,882	0,074	294,274	0,097	172,43	6,78

У п'ятому розділі «Теоретичні та експериментальні оцінки особливостей структуроутворення покриттів» запропоновано новий підхід в дослідженнях структуроутворення зміцнюючих наноструктурних покриттів за електронномікроскопічними зображеннями в залежності від параметрів та технологій обробки. Такий підхід використано для виявлення мінливості структуроутворення, анізотропії та локальної неоднорідності всередині шарів нітридних та оксидних фаз, з подальшим дослідженням кореляційних співвідношень між отриманими складовими та аналізом впливу кожного показника на експлуатаційну стійкість.

Досліджено ступінь неоднорідності покриттів на металографічних зображеннях з урахуванням дисперсності структури у вертикальному (6) і горизонтальному (7) напрямках (відповідно рис.3):

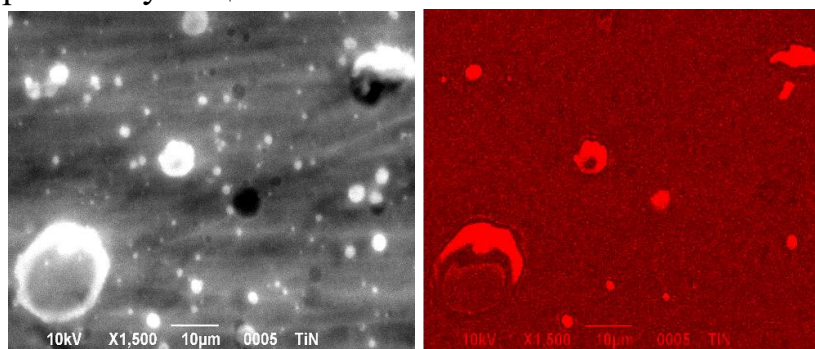
$$H_1 = \frac{(c_3c_4 + c_2c_1 + c_9c_8 + c_4c_5 + c_1c_6 + c_8c_7)^2}{(c_3^2 + c_2^2 + c_9^2 + c_4^2 + c_1^2 + c_8^2)(c_4^2 + c_1^2 + c_8^2 + c_5^2 + c_6^2 + c_7^2)}, \quad (6)$$

$$H_2 = \frac{(c_3c_2 + c_4c_1 + c_5c_6 + c_2c_9 + c_1c_8 + c_6c_7)^2}{(c_3^2 + c_4^2 + c_5^2 + c_2^2 + c_1^2 + c_6^2)(c_2^2 + c_1^2 + c_6^2 + c_9^2 + c_8^2 + c_7^2)}. \quad (7)$$

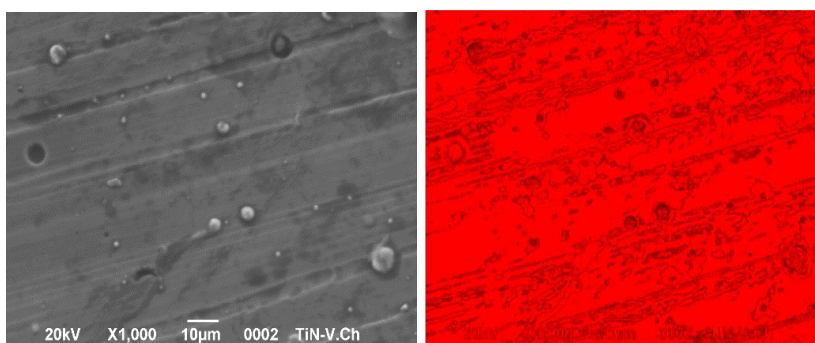
Виконаним порівняльним аналізом ступеня неоднорідності покриття TiN при зміцненні тонкостінного інструмента (на заданих комірках 3×3, 4×4, 5×5 пікселів і по всьому фото) виявлено суттєву неоднорідність розподілу компонентів в покритті, нанесеному методом КІБ. Аналіз локальних зон дозволив виявити як мінімальну неоднорідність, так і дефекти структури. Теоретично отримана неоднорідність зображена кольорами від чорного до

червоного (рис.10). Червоний колір - мінімальний ступінь неоднорідності, чорний - максимальний.

Застосування ВЧ-розряду сприяє зменшенню неоднорідності покриття на 68,2%. Встановлено, що використання ВЧ - розряду в більшій мірі перешкоджає дифузії компонентів з основного металу та знижує її в 5 разів порівняно з вихідним станом. Така запропонована технологія зменшує структурну неоднорідність покриття на 76,4% відносно методу КІБ і знижує швидкість деградації структури робочого шару, забезпечує більшу стабільність при експлуатації.



а



б

Рисунок 10 – Зображення зміцненої TiN поверхні з використанням КІБ (а) і ВЧ - розрядом (б) з теоретично отриманим ступенем неоднорідності відповідно

Дослідженнями особливостей структуроутворення і ступеня неоднорідності розподілу компонентів у багат шаровому наноструктурному покритті  $ZrN/ZrO_2$  з використанням нових методик, комплексного теоретичного та експериментального підходу встановлено, що при його нанесенні іонно-плазмовим методом із застосуванням фільтра, крапельна фаза частково зберігається розміром 8-10 мкм (до 2,0%) та 4,0 - 6,0 мкм (до 4,0%). Виявлено, що крапельна фаза формується, в більшості випадків, у смугах покриття  $ZrN$  та вона має вигляд колоподібних і розплющених включень, які частково порушують прямолінійну границю розділу з  $ZrO_2$ , збільшуючи дифузію компонентів. Така крапельна фаза найчастіше складається з  $Zr$  та має оболонку, насичену азотом та киснем. Оцінено неоднорідність по границях

шарів, в їх середині, а також в підшарі Zr, який наносили попередньо на основний метал. Показано, що шар ZrN при використаних параметрах нанесення покриття містить 2,65-3,13% O<sub>2</sub>, а ZrO<sub>2</sub> до 2,31-2,66% N. При цьому, ступінь неоднорідності цих шарів досить близька. Найбільша неоднорідність характерна для підшару Zr, де вона досягає 54,2%. Спостережуване пов'язано з дифузією O<sub>2</sub> і N з покриття та Fe, Cr - з основного металу. Виявлено також неоднорідність поблизу відмінних за складом шарів покриттів компонентами O<sub>2</sub> і N, а в ряді випадків, і структуризацію окремих зон у них всередині. Отримана інформація свідчить про досить міцний зв'язок між шарами та з основним металом.

Показники неоднорідності нанопокриттів додатково оцінювали за анізотропією розподілу компонентів та використовували спеціально розроблену нову програму з урахуванням мінливості структуроутворення на металографічних зображеннях:

$$H_3 = \frac{\prod_{i=1}^n p_i}{\sum p_i^n} \quad (8),$$

де  $p_i$  – показник мінливості (ймовірність збігу кольорів),  $i$  – номер пікселя зображення структури,  $n$  – число точок (пікселів).

Теоретичну оцінку показників неоднорідності у багат шаровому наноструктурному покритті ZrN/ZrO<sub>2</sub> виконували для 16 умовних кольорів зображення за часткою різних кількостей точок (пікселів) - 2, 6, 10, 15, 20, 25, 30 (рис.11) та 35.

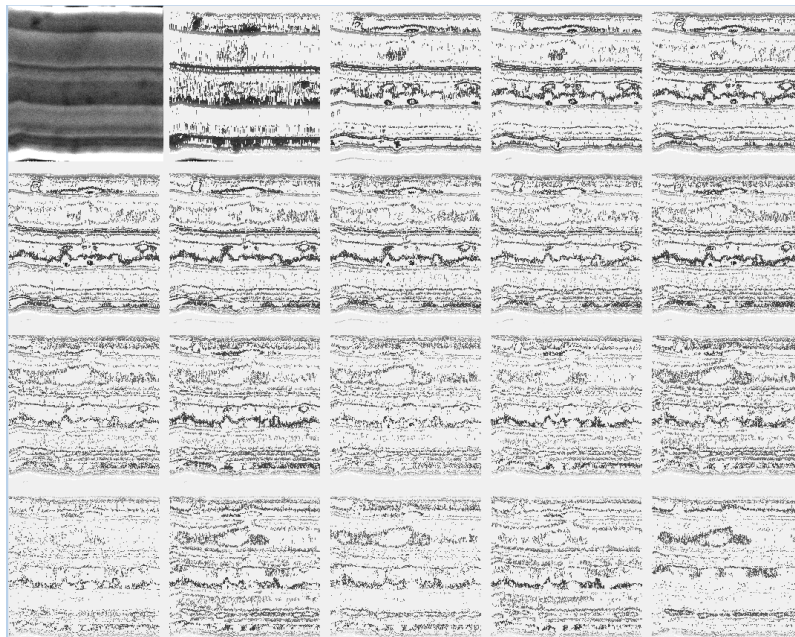


Рисунок 11 – Зображення багат шарового покриття з виявленням максимальної неоднорідності по 30 точках в горизонтальному напрямку



Фото в першому рядку зліва відповідає вихідному зображенню багат шарового покриття  $ZrN/ZrO_2$ . Наступні 19 фото відображають зони з розподілом неоднорідності, яка змінюється від 1 (максимального) до 19 – мінімального її значення. Опис стану смуг багат шарового покриття  $ZrN/ZrO_2$  показав, що, починаючи вже з 10 точок (пікселів) при вертикальному описі структуроутворення чітко проявляється дифузія компонентів від границь смуг  $ZrO_2$  до  $ZrN$  і вона досягає 17% (по відношенню до перетину шару  $ZrN$ ) та відбувається в кожену сторону. Одночасно при аналізі по 20 і 30 точках виявляється додатково і структуризація виділень, як в центрі шарів  $ZrO_2$ , так і по всьому перетину –  $ZrN$  (див.рис.11). Такий підхід дозволив чітко виявити стан структури і рівень неоднорідності як всередині, так і на границях кожного шару.

У шостому розділі «Промислові іспити та впровадження розробок» виконано промислову апробацію в реальних умовах виробництва ПАТ «Кондитерська фабрика «Харків'янка» та впроваджено результати теоретичних і експериментальних досліджень з оцінкою ефективності запропонованих технологій зміцнення тонкостінного різального і пакувального інструментів. Розробки дозволили виявити пошкодженість деталей в умовах виробництва, висвітлити різні структурні зміни, що впливають на стійкість при експлуатації інструментів, корегувати технологічні параметри процесу їх зміцнення та забезпечити стабільність використання.

Статистичними дослідженнями у виробництві тонкостінного різального інструмента зі сталі 65Г, зміцненого покриттям  $TiN$  з використанням ВЧ – розряду, було встановлено, що рівень напружень і наявність великої кількості дефектів істотно впливають на довговічність різального інструмента. Запропоновано спосіб неруйнівного контролю якості (захищено патентом України), що дозволяє оцінити рівень виникаючих напружень в тонкостінному різальному інструменті при нанесенні нанопокриттів, а також виявити зміну однорідності властивостей по всій поверхні дискового виробу. Отримані дані дозволили визначити доцільність їх подальшого використання в експлуатації, а також корегувати технологічні параметри зміцнення. Для зменшення надмірних напружень (>20%), що виникають з різних сторін (без - та зі зміцненням), рекомендовано використовувати природне старіння з витримкою після нанесення нанопокриття протягом не менше 25-30 діб. Експериментально встановлено, що стабільну їх стійкість, можна прогнозувати за коефіцієнтом анізотропії  $K = 1,0-1,1$ . При більших відхиленнях відбувається формування тріщини та руйнування зміцнених ножів (рис.12).

Для опису структуроутворення в зміцнюючому нанопокритті розроблено математичний метод з визначенням суми фаз, які зазнають суттєвих змін в

процесі експлуатації. Оцінку проведено згідно 16 умовних кольорів зображень, отриманих на оптичному та електронному мікроскопах.

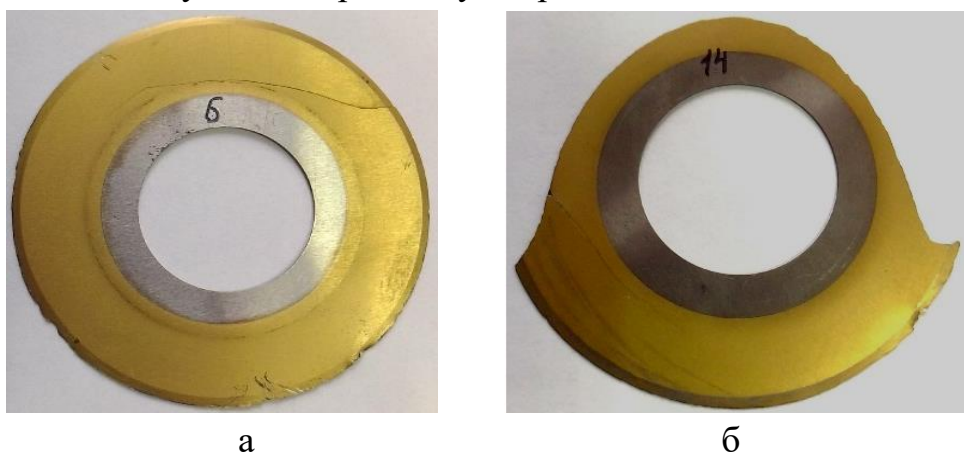


Рисунок 12 – Формування тріщини (а) та руйнування (б) зміцнених нанопокриттям TiN інструментів

Теоретичними дослідженнями характеру зношення зміцнюючого покриття TiN в процесі експлуатації виявлено перебудову структури, яка відповідає зменшенню кількості нестабільних фаз. Такий характер розподілу зберігається протягом від 20 до 59 робочих змін. Виявлено структуроутворення, яке пов'язане з пристосуванням покриття. Отримано гістограми розподілу сум кольорів (рис.13), які підтверджують припущення про те, що причиною руйнування таких інструментів з покриттям було не його зношення, а якість вихідного металу ножів та інших факторів впливу при експлуатації. Аналіз характеру розподілу сум кольорів при максимальному наробітку свідчить лише про часткове зношення зміцнюючого покриття.

За допомогою кореляційного – регресійного аналізів виявлено найбільш значні складові структури, які впливають на стійкість зміцненого інструмента в експлуатації. Встановлено, що зносостійкість в більшій мірі залежить від поєднання двох груп складових, що відповідають нестабільним нітридним фазам і зазнають найбільших змін. Максимальний внесок в зносостійкість зміцненого інструмента належить також однорідності структури покриття з коефіцієнтом кореляції, який досягає 0,94.

Комплексними дослідженнями структури тонкостінного інструмента з оцінкою механічних властивостей та якості металу виявлено основні чинники зміни його стійкості в широких межах від 10 до 210 змін експлуатації. Підвищення довговічності зміцненого інструмента в 210 разів можливо лише при використанні якісного холоднокатаного металопрокату для його виготовлення з мінімальною неоднорідністю поверхневого робочого шару та стабільними структурними складовими, що визначаються змінами, які формують зони стиснення і розтягання, а також наявністю незначної кількості крапельної фази на основі титану.

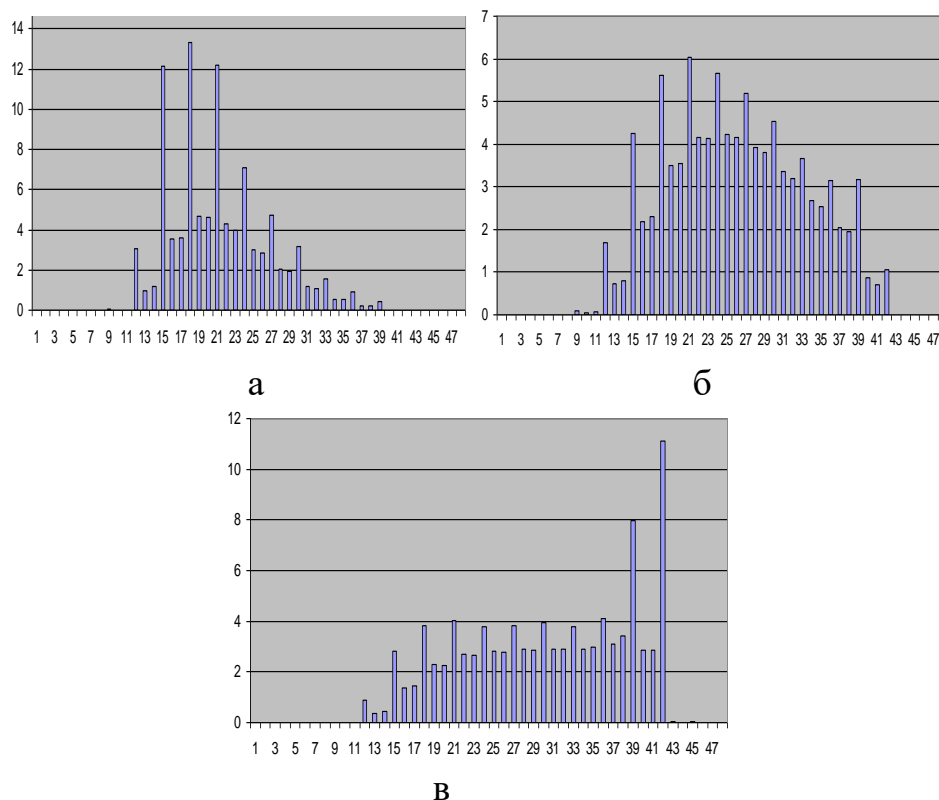


Рисунок 13 – Гістограми розподілу суми кольорів в покритті TiN після 10 (а), 20 (б) та 210 (в) змін експлуатації

Проведеними попередніми експериментальними та теоретичними дослідженнями встановлено, що для підвищення експлуатаційної стійкості та запобігання деградації металу пакувального інструмента наноструктурне покриття необхідно наносити за розробленими параметрами технології осадження (іонно-плазмовим методом із застосуванням криволінійного фільтра) з усіх чотирьох його сторін. Зміцнювали інструмент при стабільних показниках коерцитивної сили. Проведені випробування на тертя та зношування зміцненого пакувального інструмента показали, що максимальну зносостійкість поверхні забезпечує покриття ZrN, яке має найвищий рівень мікротвердості та в 2 рази зменшує коефіцієнт тертя в порівнянні з вихідним станом зі сталі X12 (табл.2).

Таблиця 2 – Результати трибологічних випробувань

№	Покриття	Ширина доріжки тертя, мм	Момент тертя, Н·м	Коефіцієнт тертя
1	ZrN	0,37	1,5	0,13
2	ZrO <sub>2</sub>	0,45	1,5	0,13
3	TiN	0,52	3,5	0,31
4	Вихідний зразок X12	0,42	3	0,27

Після випробувань спостерігається мінімальне падіння мікротвердості у покритті ZrN на 12,6%. Розкид показників зменшується з 24,37% до 9,38%.

Тому в якості поверхневого шару в зміцнюючій багатшаровій композиції  $ZrO_2/ZrN$  осаджували нітрид цирконію.

Наявність шару  $ZrO_2$  забезпечує формування вторинних кисневих захисних структур на робочій поверхні та частка  $O_2$  в них складає 8,04-9,71%. Таке поєднання шарів з різними сполуками та властивостями забезпечує необхідні споживчі властивості робочій поверхні інструмента.

Дослідження поверхні тертя багатшарового покриття  $ZrN/ZrO_2$  після випробувань виявили, що найбільш великі краплі в нітридному шарі при стендових випробуваннях, частково по границях викришуються (рис.14,а) і в цих зонах відзначається підвищена концентрація кисню (табл.3) за рахунок його дифузії з шару  $ZrO_2$ , який межує. Частка кисню досягає 17,43 - 24,16% та він може «зберігатися» в порах і по мірі збільшення часу експлуатації відновлювати зношені вторинні захисні структури, підвищуючи стійкість не тільки зміцненої деталі, але і сполученої у спряженні.

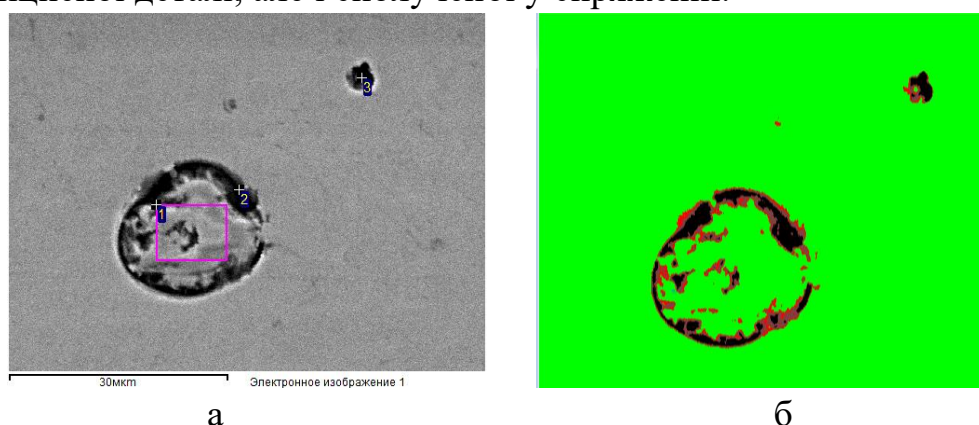


Рисунок 14 – Мікроструктура поверхні тертя покриття  $ZrN/ZrO_2$  (а), яка теоретично описана в кольорах (б)

Таблиця 3 – Основні компоненти на поверхні покриття  $ZrN/ZrO_2$  (згідно рис.14)

Спектр	C	N	O	Cr	Fe	Zr
1	9.50	7.79	17.43		0.38	64.90
2	30.53		24.16	0.47	10.67	33.23
3	25.02	8.97	21.64		0.40	43.66

Після випробування на тертя та зношування теоретично досліджено структуроутворення в багатшаровому покритті  $ZrO_2/ZrN$  та оцінено виникаючі зміни. Показано, що у великій краплі в процесі тертя формуються зони (рис.14,б) із взаємодією трьох (чорний колір) та двох (зелений) компонентів, а також локальні ділянки, які складаються з одного елемента (червоний). При зношуванні відбувається перебудова структури покриття та вона стає більш однорідною (змінюється з 6,65 до 46,82%). В прилеглих до доріжки тертя зонах даний показник змінюється в 1,7 рази. Виникаючі зміни у

структурутворенні при зношуванні багатошарової композиції  $ZrO_2/ZrN$ , подібні до процесів, виявлених в покриттях TiN.

Запропонована комплексна технологія дозволила подовжити міжремонтний період та термін експлуатації інструмента в 14 разів за рахунок запобігання розвитку деградаційних процесів та істотного збільшення рівня механічних властивостей зміцненої поверхні.

При зношуванні поверхневого шару пакувального інструмента більше 5 мм перед зміцненням наноструктурним покриттям використовували попереднє відновлення його наплавленням з модифікуванням нанесеного шару немагнітною складовою детонаційної шихти, яка містить дрібнодисперсні і нанорозмірні алмази, а також різноманітні модифікуючі домішки. Виконано порівняльні дослідження за двома варіантами відновлення зношеного шару інструмента з однаковими параметрами технологічних процесів: без введення домішок електродами АНО-21, ЦЛ11, Т-590 та з їх обмазкою модифікуючою шихтою. Встановлено, що при наплавленні електродом ЦЛ11 без модифікуючої домішки формуються тріщини у зоні термічного впливу. При використанні електроду АНО-21 виявлено зони неоднорідності з істотним падінням мікротвердості. Найбільш стабільні властивості відновленого шару забезпечуються з введенням шихти. Модифікуюча домішка в 2-3 рази зменшує глибину проплавлення деталі та перехідного шару. Кращих результатів досягнуто при використанні електроду Т590 з обмазкою немагнітною складовою модифікуючої шихти з алмазною фракцією. Запропонована технологія забезпечує підвищення мікротвердості і зносостійкості (табл.4). Наявність більш дрібної немагнітної фракції сприяла формуванню вторинних захисних структур на поверхні тертя відновленого шару.

Для надання необхідних властивостей та підвищення зносостійкості відновленій поверхні інструмента після наплавлення наносили зміцнююче цирконієве покриття за розробленою технологією.

Таблиця 4 – Коефіцієнт зношування та мікротвердість відновлених покриттів

№	Тип наплавлення	Коефіцієнт зношування, раз		Мікротвердість, кгс/мм <sup>2</sup>	
		покриття	ролик	до іспитів	після іспитів
1	Електрод ЦЛ-11	1,0	1,5	4,2	3,9
2	Електрод АНО-21	1,0	1,0	4,9	3,6
3	Електрод Т-590	0,0	1,0	6,5	3,8
4	Електрод Т-590 + модиф.	0,0	0,0	7,8	6,6
5	Електрод АНО-21+ модиф.	1,5	1,8	6	4,6
6	Електрод ЦЛ-11+ модиф.	2,0	0,0	5,4	4,3

Економічну ефективність виконаних розробок оцінювали на основі впровадження їх на підприємстві харчової промисловості ПАТ «Кондитерська фабрика «Харків'янка» для двох видів різальних інструментів: тонкостінного дискового зі сталі 65Г та пакувального із високовуглецевої легованої - X12.

Економічний ефект впровадження запропонованої технології зміцнення покриттям TiN з використанням ВЧ-розряду для тонкостінного різального інструмента зі сталі 65Г становить 89363,5 грн при обсязі 500 одиниць. Впровадження технології зміцнення інструмента зі сталі X12 з покриттям ZrO<sub>2</sub>/ZrN, нанесеного іонно – плазмовим методом з використанням криволінійного фільтра, дозволило отримати економічний ефект у розмірі 62535,7 грн при обсязі 20 одиниць. Сумарний економічний ефект запропонованих розробок в умовах підприємства на обладнаннях моделей CD-A компанії «Urschel Laboratories, Incorporated» (виробництва США) та MC1DT-T компанії MC Automations (Італія) досягає 151899,2 грн. Очікуваний економічний ефект при використанні розроблених технологій зміцнення ножів в масштабах трьох великих українських підприємств з аналогічним обладнанням буде досягати 455697,6 грн.

## ВИСНОВКИ

У роботі представлені нові експериментальні, теоретичні і технологічні науково-обґрунтовані результати досліджень та статистичні промислові іспити, які забезпечують вирішення науково-прикладних задач - підвищення експлуатаційної стійкості різальних інструментів зі сталі 65Г (тонкостінні дискові ножі для подрібнення горіхів) та X12 (для розрізання металізованої плівки при пакуванні цукерок), що працюють у харчовій промисловості в умовах циклічних навантажень, зносу й корозійної пошкоджуваності.

У виконаних дослідженнях одержано наукові та прикладні результати:

1. Проведено детальний аналіз сучасних літературних джерел та патентів, виявлено параметри, що впливають на структуру та властивості захисних зміцнюючих покриттів. Структура в значній мірі залежить від параметрів процесу нанесення нанопокриттів, включаючи метод осадження, напруги зміцнення на підкладці, тиску азоту в камері, струму дуги, температури росту покриття. Встановлено, що фізико - механічні властивості покриттів залежать від розміру зерен, залишкових напружень, стехіометрії зміцнюючих фаз, орієнтації кристалів, щільності дефектів, наявності підвищеного розміру крапельної фракції, неоднорідності розподілу хімічних елементів та фазових складових, а також товщини шару. У зв'язку з цим, важливим є розробка параметрів технології зміцнення інструментів, які дозволять мінімізувати неоднорідність покриття, знизити частку крапельної складової і рівень напружень.

2. На основі виконаних всебічних досліджень зношеного тонкостінного інструмента для подрібнення горіхів обґрунтовано ефективність використання покриття TiN. Порівняльно досліджено два способи нанесення таких покриттів: КІБ та з використанням ВЧ- розряду. З урахуванням геометричних розмірів інструмента оптимізували підходи та параметри технологічних процесів, що можуть забезпечувати підвищення їх споживчих властивостей в процесі експлуатації. Для запобігання перегріву тонкостінного інструмента запропоновано циклічний режим очищення їх поверхні та осадження зміцнюючого шару TiN з використанням ВЧ-розряду.

За допомогою розробленого теоретичного підходу до визначення якості покриття оцінено ступінь структурної неоднорідності на різних етапах життєвого циклу зміцнених тонкостінних інструментів. Встановлено, що використання ВЧ - розряду в більшій мірі перешкоджає дифузії компонентів з основного металу та знижує її в 5 разів. Використання такої технології зменшує структурну неоднорідність покриття на 76,4% у порівнянні з методом КІБ і перешкоджає швидкій деградації робочого шару, забезпечує його більшу стабільність при експлуатації.

3. Для своєчасного виявлення якості інструмента застосовували запатентований підхід з використанням магнітного методу неруйнівного контролю за анізотропією властивостей, згідно коерцитивної сили. Це дозволило запобігти експлуатації ножів з наявністю в структурі великої кількості дефектів (порожнин) або підвищеного рівня залишкових напружень. В таких ножах спостерігається зниження показників коерцитивної сили на 42% або підвищення її у 1,8 рази відповідно. Встановлено границю допустимого відхилення, яка не повинна перевищувати 10%.

4. Досліджено мінливість структуроутворення покриття в процесі експлуатації з визначенням суми фаз та їх взаємозв'язку, згідно кольорів зображення, які зазнають суттєвих змін. Встановлено, що перші істотні зміни відбуваються вже після 20 змін роботи та в структурі покриття TiN зменшується кількість нестабільних фаз. Такий характер розподілу зберігається протягом від 20 до 59 змін. Виявлена мінливість структуроутворення пов'язана з пристосуванням покриття, коли в ньому зменшилася локальна неоднорідність, що сприяла стабільній праці зміцненого інструмента. За допомогою кореляційного – регресійного аналізу встановлено, що зносостійкість в більшій мірі залежить від однорідності покриття, а також поєднання двох груп складових, що відповідають нестабільним фазам нітридів і зазнають найбільших змін.

Комплексний підхід зміцнення покриттями тонкостінного інструмента та контролю якості дозволив підвищити експлуатаційну стійкість до 210 разів у порівнянні з вихідним станом за умови використання якісного металу при його виготовленні.

5. У розробках застосовано різні методи та підходи до визначення якості інструмента для розрізання металізованої плівки зі сталі X12 для підвищення його довговічності. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень характеру їх зношення виявлено структурні перетворення, які супроводжуються суттєвими локальними змінами (до 63%) біля краю робочої поверхні, що істотно знижує його експлуатаційні властивості. Під дією деформації відбувається фрагментація дрібних карбідів та спостерігається подальше їх упорядкування по межах зерен. Виникають процеси дифузії. Це призводить до зниження концентрації вуглецю і хрому в спецкарбідах. У центральній частині інструмента карбіди містять до 44,11% хрому, концентрація якого істотно зменшується біля краю робочої поверхні і досягає лише 26,98 – 27,64%. Одночасно в зоні напружень підвищується вміст вуглецю в 1,58 раз.

6. Для подовження терміну служби інструмента зі сталі X12, який, крім зносу, працює в умовах і корозійного пошкодження, запропоновано використання багат шарового покриття  $ZrO_2/ZrN$ , осадженого іонно – плазмовим методом. Для корегування та зменшення кількості значних за розміром крапель в покритті використовували ВЧ – розряд та криволінійний фільтр з частковою сепарацією цієї складової потоку. Розроблена комплексна технологія дозволила подовжити міжремонтний період та термін експлуатації інструмента в 14 разів у порівнянні з вихідним станом. Це досягається за рахунок запобігання деградаційних процесів та підвищення рівня механічних властивостей зміцненої поверхні. Шари з нітриду цирконію забезпечують необхідну зносостійкість, а керамічний – сприяє захисту від корозії та формуванню вторинних захисних структур в процесі тертя.

7. Мінливість структуроутворення оцінювали на металографічних зображеннях покриття  $ZrN/ZrO_2$ , згідно ступеню неоднорідності за її анізотропією. Починаючи вже з 10 пікселів при вертикальному описі структуроутворення, чітко проявляється дифузія компонентів від прилеглих границь смуг  $ZrO_2$  до  $ZrN$  і вона досягає 17%. Найбільш стабільні результати отримали при використанні 20 і 30 точок аналізу, який виявляє формування додаткової структуризації виділень в шарах  $ZrN$  та центрі смуг  $ZrO_2$ .

8. При значному зношенні (більше 5 мм) робочої поверхні пакувального інструмента перед зміцненням нанопокриттями проводили його відновлення компенсуючим знос покриттям. Для покращення споживчих властивостей без формування дефектів при наплавленні використовували модифікування рідкої ванни та в якості домішки додавали немагнітну складову вторинної сировини від утилізації боєприпасів. Для досягнення максимального ефекту при відновленні використовували електроди з різним вмістом вуглецю та хрому. Оптимальний результат отримали при використанні електроду Т590 з обмазкою модифікуючої шихтою. Така



технологія відновлення в 3 рази зменшила глибину проплавлення деталі, забезпечила підвищення мікротвердості і зносостійкості.

Економічний ефект від впровадження запропонованих розробок, який базувався на фактично досягнутому підвищенні стійкості двох видів інструмента на підприємстві ПАТ «Кондитерська фабрика «Харків'янка», досягає 151899,2 грн. Очікуваний економічний ефект при використанні розробленої технології зміцнення ножів в масштабах трьох великих українських підприємств з аналогічним обладнанням складе 455697,6 грн.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

1. Скобло Т. С., Сидашенко А.И., Романюк С.П. Разработка технологического процесса повышения эксплуатационной стойкости тонкостенного инструмента. Х.: *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві»*. Вип. 168. 2016. С. 3 - 9.

2. T.S. Skoblo, S.P. Romaniuk et al. Development of complex technology of strengthening of thin-walled cutting tools. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*. 2016. No.6. P. 286-290.

3. Скобло Т.С., Романюк С.П., Омельченко Л.В. Исследование влияния способа наплавки на свойства металла восстанавливаемой детали. Х.: *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві»*. Вип. 183. 2017. С. 145-150.

4. Скобло Т. С., Романюк С.П., Сидашенко А.И., Белкин Е.Л. Применение оптико - математического метода для описания неоднородности структуры режущего инструмента. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 8. С. 159-166.

5. Скобло Т. С., Романюк С.П., Сидашенко А.И. та інші. Повышение износостойкости упрочненных и восстановленных деталей покрытием с применением модифицирования вторичным сырьем. *Проблеми трибології "Problems of Tribology"*. 2017. No 3. С. 51-55.

6. Гончаренко А.А., Романюк С.П. та інші. Особенности структурообразования при модифицировании восстановленного слоя наплавкой. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. №10. С. 20-28.

7. Skoblo T.S., Romaniuk S.P. et al. Strengthening method for thin-walled knives with multi-layer nanocoatings and quality assessment by non-destructive method. *Journal of Advanced Microscopy Research*. 2018. Res. 13. No.3. P. 333-338.

8. Скобло Т. С., Романюк С.П., Сидашенко А.И. Математическая оценка неоднородности структуры режущего инструмента, упрочненного покрытием CrN. Х.: *Вестник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Вип. 80. 2018. С. 74-79.
9. Skoblo T.S., Romaniuk S.P. et al. Surface Morphology and Mechanical Properties of Vacuum-Arc Evaporated CrN and TiN Coatings on Cutting Tool . *Journal of Advanced Microscopy Research*. 2018. Res. 13. No.4. P.477-481.
10. Skoblo T.S., Romaniuk S.P. et al. Study of degradation mechanism of metal-cutting tools and their hardening by ZrN PVD coatings. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*. 2018. No.6. P. 300-303.
11. Taran A., Garkusha I., Romaniuk S. et al. Structure and properties of nanostructured ZrN coatings obtained by vacuum-arc evaporation using RF discharge. *Nanotechnology Perceptions*. 2018. Vol. 14. № 3. P.167-178.
12. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Sidashenko A.I. et al. Complex evaluation of structural state degree of strengthening nanocoatings. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*. 2019. No.1. P. 225-228.
13. Скобло Т. С., Романюк С.П., Сидашенко А.И. та інш. Применение нанотехнологий в машиностроении. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. №15. С. 19-30.
14. Романюк С.П. Исследование влияния технологии осаждения на степень неоднородности структуры формируемых покрытий. Х.: *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства «Інноваційні проекти у галузі технічного сервісу машин»*. Вип. 201. 2019. С.181-190.
15. Taran A., Garkusha I., Romaniuk S. et al. Nanostructured ZrO<sub>2</sub> ceramic PVD coatings on Nd-Fe-B permanent magnets. *Nanotechnology Perceptions*. 2019. Vol. 15. No.1. P.13-20.
16. Романюк С.П. Підвищення зносостійкості пакувального інструмента в процесі експлуатації. Х.: *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства «Проблеми надійності машин»*. Вип.205. 2019. С.206-210.
17. Romaniuk S.P. New Comprehensive Approach to Mathematical Modeling of Metallographic Images of Tool Structures. *Journal of mechanical engineering*. 2019. Vol . 22, No. 4. P.67-73.
18. Скобло Т. С., Сидашенко О. І., Романюк С. П. та інш. Особенности структурообразования под час модифікування покривів для деталей з дисперснозміцнених сталей. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2019. Т. 55, № 6. С.96-103.
19. Романюк С. П. Разработка технологического процесса восстановления поверхности деталей из высокоуглеродистой легированной стали. Х.: *Вісник Національного технічного університету «Харківський*

політехнічний інститут» Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. 2019. №. 26 (1351). С.47-51.

20. Романюк С. П. Исследование стабильности свойств наноструктурных покрытий на нано- и микроуровне. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. №17. С.83-91.

21. Taran A.V., Garkusha I.E., Romaniuk S.P. et al. ZrO<sub>2</sub>/ZrN multilayers on bare sintered NdFeB magnets by ion-plasma deposition with pulsed biasing. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. 2020. Vol. 24, No.1. P. 9-20.

22. Taran A.V., Garkusha I.E., Romaniuk S.P. et al. Influence of plasma-based ion implantation and deposition on the structure, internal stress, mechanical properties of nanocrystalline ZrN coatings. *Nanotechnology Perceptions*. 2020. Vol. 16, No.1. P.56-63.

23. Taran A.V., Garkusha I.E., Romaniuk S.P. et al. Production and characterization of CA-PVD ZrN and ZrCN coatings on aisi d3 high-carbon tool steel. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. 2020. Vol. 24. No. 2. P. 109-120.

24. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Romaniuk S.P. et al. Specific Features of Structure Formation in the Course of Modification of the Coatings on Products Made of Dispersion-Hardened Steels. *Materials Science*. 2020. Vol.55. p.884–891.

25. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Belkin Ye. L., Maltsev T.V. Estimation of local inhomogeneity of multilayer nanostructured ZrN/ZrO<sub>2</sub> coating. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*. 2021. No.1. P.106 -109.

26. Спосіб підвищення експлуатаційної стійкості тонкостінного ріжучого інструменту: пат. №101699 Україна: МПК (2006.01) С23С 14/48, С23С 14/16 /Скобло Т.С., Романюк С.П., Сідашенко О.І. та інш.; №u201503179; заявл. 06.04.2015.; опубл. 25.09.15., Бюл. № 18.

27. Спосіб нанесення багатшарових нанопокриттів: пат. №100201 Україна: МПК (2015.01) С23С 14/00 /Скобло Т.С., Романюк С.П., Сідашенко О.І. та інш.; №u201501556; заявл. 23.02.2015.; опубл. 10.07.15., Бюл. № 13.

28. Спосіб оцінки якості тонкостінних виробів, зміцнених покриттями: пат. №108061 Україна: МПК (2016.01) G01N 27/00, G01B 7/24, G01N 3/08 /Скобло Т.С., Романюк С.П., Сідашенко О.І., та інш.; №u201601141; заявл. 10.02.2016.; опубл. 24.06.16., Бюл. № 12.

29. Спосіб підвищення властивостей покриттів модифікуваням при наплавленні: пат. №117615 Україна: МПК В22D 19/08, В22D 19/10 /Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Романюк С.П. та інш.; u201701633. заявл. 20.02.17.; опубл. 26.06.17., Бюл. № 12.

30. Комбінований спосіб модифікування для підвищення якості

відновлення виробів: *пат. №121869 Україна*: МПК В23К 26/342, С04В 41/87 /Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Романюк С.П. та інш.; u201702218; заявл. 09.03.17.; опубл. 26.12.17., Бюл. № 24.

31. Метод визначення гетерогенної структурної неоднорідності: *пат. №137100 Україна*: МПК (2019.01), G01N 1/00, G01N 3/00, G01N 27/00, G01D 21/00 /Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Романюк С.П., та інш.; u201805708, заявл. 22.05.2018; опубл. 10.10.19., Бюл. № 19.

32. Спосіб підвищення експлуатаційної стійкості спряжень при відновленні деталей: *пат. №137676 Україна*: МПК (2019.01), В23Р 6/04 (2006.01), В23К 9/00, В23К 35/22 (2006.01), С23С 8/00 /Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Романюк С.П. та інш.; №a201812861; заявл. 26.12.2018; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21.

33. Спосіб одержання детонаційної шихти з алмазною фракцією: *пат. №138685 Україна*: МПК В22D 19/00, В22D 19/08 /Скобло Т.С., Нанка О.В., Романюк С.П. та інш.; №u201904939; заявл. 10.05.2019; опубл. 10.12.2019, Бюл.№ 23.

34. Склад детонаційної шихти з алмазами для модифікування: *пат. №144463 Україна*: МПК (2020.01), С01В 32/25 (2017.01), В82В 3/00, В01J 3/08 (2006.01) /Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Романюк С.П. та інш.; №u201905788; заявл. 27.05.2019; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 19.

35. Спосіб підвищення зносостійкості ріжучого інструмента нанесенням багат шарового наноструктурного покриття: *пат. №144854 Україна*: МПК (2020.01), С23С 8/00 /Скобло Т.С., Нанка О.В., Романюк С.П. та інш.; u202003544; заявл. 12.06.2020; опубл. 26.10.2020, Бюл. № 20.

#### **Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

36. Романюк С. П. Новый способ повышения эксплуатационной стойкости тонкостенного режущего инструмента. *Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій*. К., 2016. С. 172–187.

37. Романюк С.П., Скобло Т.С., Сідашенко А.И. Новая комплексная технология упрочнения ножей для дробления орехов в кондитерском производстве. *Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы*: материалы научной конференции. Рубцовск, 2016. С. 97-102.

38. Romanyuk S. P., Pankova O. V. Improvement of durability of thing-walled cutting tools by tin coating. Scientific edition. Abstracts. *IX International Conference of young scientists «Welding and Related Technologies»*. Kyiv, 2017. P.154.

39. Skoblo T.S., Romanyuk S.P., Maltsev T.V. Application of nanotechnology in mechanical engineering. *Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях*: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. Суми, 2017. С. 62.

40. Романюк С. П. Качество пленочного покрытия, нанесенного на тонкостенный режущий инструмент. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції. Кропивницький, 2017. С. 134-135.

41. Скобло Т.С., Романюк С.П., Сидашенко А.И., Демченко С.В. Исследование характера структурной деградации металла упаковочных ножей. *Информационно-аналитический международный технический журнал: Промышленность в фокусе*. 2017. №12. С.53-57.

42. Скобло Т.С., Романюк С.П., Мальцев Т.В. Использование оптико - математического метода для оценки структурной неоднородности деталей. *Энергосбережение и эффективность в технических системах*: материалы IV международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбов, 2017. С.429-430.

43. Романюк С. П., Стеценко С. С. Исследование особенностей структурообразования упрочняющих нанопокровтий. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы международной научно-технической конференции, Одесса, 2018. С. 156 – 158.

44. Romaniuk S.P., Skoblo T.S., Sidashenko A.I. et al. Complex evaluation of structural state degree of cutting knives strengthened by PVD nanocomposite coatings. Scientific edition. Abstracts. *International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion*. Kharkiv, 2018. P.167-168.

45. Romaniuk S. Mathematical modeling in Material Science for technical profile students. Book of abstracts: *10th Interdisciplinary Conference on Nature – Human – Culture with the Statement of the Polish ASAP Chapter*. Wydawnictwo Uniwersytetu Pedagogicznego. Kraków, 2019. p.57.

46. Taran A., Garkusha I., Romaniuk S., et al. Influence of plasma based on implantation and deposition method on structure, internal stress, mechanical properties of nano-crystalline bioinert ZrN coatings. Book of abstracts. *11th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED'11)*. Batumi, 2019. PP.84-85.

47. Романюк С.П. Комплексное восстановление и упрочнении деталей наплавкой, а также нанотехнологиями. *Сучасне матеріалознавство: ідеї, рішення, результати*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2019. С.123-126.

48. Romaniuk S.P., Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Taran A.V. Structural and mechanical properties of B4C coatings obtained by RF-sputtering with external magnetic field. Abstract book. *7th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2019)*. Lviv, 2019. P.433-434.

49. Романюк С.П. Новый комплексный подход математического

моделирования металлографических изображений структуры. *Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання: матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції*. Харків, 2019. С.10.

50. Скобло Т.С. Сидашенко А.И., Романюк С.П. та інш. Теоретическая оценка формирования зерен конгломерата шихты. *Информационно-аналитический международный технический журнал: Промышленность в фокусе*. 2019. №8(80). С.55-57.

51. Скобло Т.С. Романюк С.П. Сидашенко А.И. Особенности структурообразования и свойств упрочненного нанопокрывтиями тонкостенного инструмента. *Информационно-аналитический международный технический журнал: Промышленность в фокусе*. 2019. №10 (82). С.53-57.

52. Романюк С.П. Застосування цифрових технологій для аналізу зображень наноструктурних покриттів. *Проблеми надійності машин: матеріали міжнародної науково-методичної конференції*. Харків, 2019. С.52-53.

53. Романюк С.П. Исследование механических свойств поверхностного слоя упрочненного инструмента. *Информационно-аналитический международный технический журнал: Промисловість в фокусі*. 2020. №2 (86). С.54-56.

54. Романюк С.П. Математический метод исследования структуры упрочняющих нанопокровтий. Тези доповідей II Міжнародної науково-технічної конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні». Харків, 2020. С.270-271.

55. Скобло Т.С., Романюк С. П., Белкин Е.Л., Романченко В.Н. Разработка нового подхода микроскопического анализа структуры покрытий. *Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів: матеріали міжнародної науково-практичної конференції*. Харків, 2020. С.60-67.

56. Скобло Т.С., Романюк С.П., Сайчук О.В. та інш. Состав детонационной шихты з алмазною фракцією для модифікування покриттів. *Информационно-аналитический международный технический журнал: Промисловість в фокусі*. 2020. №11 (94). С.54-56.

**Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

57. Романюк С.П. Неразрушающий метод контроля толщины упрочняющих покрытий. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. №6. С. 106-111.

58. Taran A., Garkusha I., Romaniuk S. et al. Development of niobium based coatings prepared by ion-plasma vacuum-arc deposition. *Plasma Medicine*. 2020. Vol.10. No.1. P. 61-69.

59. Taran A., Garkusha I., Romaniuk S., et al. Characterization of Titanium

Dioxide Coatings Obtained by Vacuum-arc Deposition. *Journal of Advances in Applied Physics*. 2020. Vol. 2. No. 1. p.1-8.

60. Taran A., Garkusha I., Romaniuk S., et al. Structure and Properties of B<sub>4</sub>C Coatings Obtained by RF Sputtering with External Magnetic Field. In: Fesenko O., Yatsenko L. (eds) *Nanomaterials and Nanocomposites, Nanostructure Surfaces, and Their Applications*. Springer Proceedings in Physics, Springer, Cham. 2021. Vol. 246. P. 51-57.

61. Misiruk I.O., Tymoshenko O.I., Romaniuk S.P. et al. Effect of deposition parameters on microstructure and tribological properties of hard CA-PVD multi-component TiAlCrN and TiAlCrCN coatings. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*. 2020. No.6. P.123 -126.

62. Спосіб контролю якості поршневих кілець, зміцнених плівковими покриттями: пат. №110145 Україна: МПК В22D 19/10, В23Р 6/04, С23С8/00, В29С 41/16 /Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Романюк С.П. та інш.; №u201603524. заявл. 04.04.2016.; опубл. 26.09.16., Бюл. № 18.

63. Спосіб відновлення деталей дисперснозміцнених або зі значним скупченням неметалевих включень сталей: пат. №128982 Україна: МПК В22D 19/10, В23Р 6/04, С23С8/00, В29С 41/16 /Скобло Т.С., Нанка О.В., Романюк С.П. та інш.; №u201805772. заявл. 23.05.2018; опубл. 10.10.18., Бюл. № 19.

## АНОТАЦІЯ

**Романюк С.П.** Експериментальні та технологічні основи формування структури і властивостей при зміцненні нанопокриттями інструмента. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство (13 – Механічна інженерія). Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка МОН України. Харків, 2021.

У представленій до захисту дисертаційній роботі викладено результати експериментальних, теоретичних та промислових досліджень, які присвячені вирішенню науково-прикладних задач - підвищення експлуатаційної стійкості різальних інструментів у харчовій промисловості. Запропоновано методологію проведення комплексних досліджень з використанням сучасних традиційних методів та нових розроблених підходів. Для своєчасного виявлення стану інструмента використано запатентований метод неруйнівного магнітного контролю з оцінкою граничних показників, що забезпечать необхідну стабільність його в експлуатації. Проаналізовано ступінь дифузії хімічних компонентів, неоднорідність фаз та оцінено інтенсивність їх змін, які відбуваються в робочому шарі при експлуатації. Для запобігання перегріву тонкостінних дискових ножів запропоновано циклічний режим очищення

поверхні та осадження зміцнюючого шару іонно-плазмовим методом. Для мінімізації неоднорідності покриття та зменшення кількості значних за розміром крапель на зміцненій поверхні в процесі осадження використовували ВЧ – розряд та криволінійний фільтр з частковою сепарацією цієї складової потоку. Для подовження терміну служби пакувального інструмента, який, крім зносу, має і корозійну пошкоджувальність, запропоновано використання багатшарового покриття  $ZrO_2/ZrN$  з формуванням вторинних захисних структур. При значному зношенні робочої поверхні пакувального інструмента перед зміцненням нанопокриттями проводили його відновлення наплавленням з модифікуванням вторинною сировиною з алмазами. Виконані розробки дозволили збільшити експлуатаційну стійкість тонкостінного інструмента в 210 раз у порівнянні з вихідним станом. Використання багатшарового наноструктурного покриття  $ZrN/ZrO_2$  сприяло більш стабільній роботі пакувального інструмента в експлуатації (до 14 разів). Економічний ефект від впровадження розробок досягає 151899,2 грн на рік. Очікуваний економічний ефект складе 455697,6 грн.

**Ключові слова:** тонкостінний та пакувальний різальні інструменти, особливості структуроутворення, механічні властивості, нанотехнології, покриття, модифікування.

## АННОТАЦІЯ

**Романюк С.П.** Экспериментальные и технологические основы формирования структуры и свойств при упрочнении нанопокртиями инструмента. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2021.

В представленной к защите диссертационной работе изложены результаты экспериментальных, теоретических и промышленных исследований, посвященных решению научно-прикладных задач - повышения эксплуатационной стойкости режущих инструментов в пищевой промышленности. Предложена методология проведения комплексных исследований с использованием современных традиционных методов и новых разработанных подходов. Для своевременного выявления состояния инструмента использован запатентованный метод неразрушающего магнитного контроля с оценкой граничных показателей коэрцитивной силы, обеспечивающих необходимую стабильность инструмента в эксплуатации. Проанализировано степень диффузии химических компонентов, неоднородность фаз и оценена интенсивность изменений, происходящих в рабочем слое при эксплуатации. Для предотвращения перегрева тонкостенных



дисковых ножей при нанесении покрытия предложен циклический режим очистки поверхности и осаждения упрочняющего слоя ионно-плазменным методом. Для минимизации неоднородности покрытия и уменьшения количества значительных по размеру капель на упрочненной поверхности в процессе осаждения использовали ВЧ - разряд и криволинейный фильтр с частичной сепарацией этой составляющей потока. Для продления срока службы упаковочного инструмента, который, кроме износа, имеет и коррозионную повреждаемость, предложено использование многослойного покрытия  $ZrO_2/ZrN$  с формированием вторичных оксидных защитных структур. При значительном износе рабочей поверхности упаковочного инструмента перед упрочнением нанопокрывтиями проведено их восстановление наплавкой с модифицированием вторичным сырьем с алмазами. Проведенные разработки позволили увеличить эксплуатационную стойкость тонкостенного инструмента до 210 раз по сравнению с исходным состоянием. Использование многослойного наноструктурного покрытия  $ZrN/ZrO_2$  способствовало более стабильной работе упаковочного инструмента в эксплуатации (до 14 раз). Экономический эффект от внедрения разработок достигает 151899,2 грн в год. Ожидаемый экономический эффект составит 455697,6 грн.

**Ключевые слова:** тонкостенный и упаковочный режущий инструмент, особенности структурообразования, механические свойства, нанотехнологии, покрытия, модифицирование.

#### ANNOTATION

Romaniuk S.P. Experimental and technological bases of structure formation and properties during tool's strengthening by nanocoatings. - Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences by specialty 05.02.01 - Material Science. – Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation presents the results of experimental, theoretical and industrial research, which are devoted to solving scientific and applied problems - increasing the operational stability of the cutting tools used in the food industry. To increase the operational stability of the cutting tool, a methodology for conducting comprehensive research using modern traditional methods and new developed theoretical and experimental approaches has been developed. For timely detection of tool quality, a patented method of non-destructive magnetic control with measurement of coercive force and theoretical studies with evaluation of the effective level of anisotropy of properties that will ensure the necessary stability of the tool in operation has been proposed. Comprehensive approaches to theoretical studies of structure formation have been developed, which allowed to analyze the

degree of diffusion of chemical components, phase inhomogeneity, structural anisotropy and to estimate the intensity of changes occurring in the working layer during operation. On the basis of the performed comprehensive researches, taking into account damage and geometrical sizes, parameters of technology of strengthening of tools which will provide increase of their consumer properties in the course of operation are offered. To prevent overheating of thin-walled disc knives, a cyclic mode of cleaning their surface and deposition of the reinforcing layer is proposed. To minimize the inhomogeneity of the coating and reduce the number of significant droplets on the hardened surface in the deposition process, RF discharge and a curved filter with partial separation of this component of the flow have been used.

To extend the service life of the tool, which, in addition to wear, has corrosion damage, it is proposed to use a multilayer coating architecture consisting of alternating nitride and zirconium oxide layers to ensure the formation of secondary protective structures. With significant wear of the tool surface made of high-carbon chrome-alloy steel before hardening nanocoatings, it was restored by surfacing with modification of the applied layer by a non-magnetic component of the detonation charge, which contains fine and nanoscale diamonds and various compounds. It is established that the wear resistance of the tool largely depends on the homogeneity of the working surface, as well as structural components that correspond to unstable phases and undergo the greatest changes.

The practical significance of the research work is to develop effective parameters for hardening coatings of thin-walled tools, which increased its service life up to 210 times compared to the initial state, provided the use of quality metal in their manufacture. The use of a multilayer nanostructured zirconium coating contributed to a more stable operation of the tool in operation (up to 14 times) made of X12 steel, which is used to cut the metallized film during packing candies.

The economic effect from the implementation of the proposed developments, which were based on the actually achieved increase in the stability of the tool in operation, reaches 151899.2 UAH. The expected economic effect when using the developed technology to strengthen such a tool on the scale of three large Ukrainian enterprises with similar equipment will be 455697.6 UAH.

**Key words:** thin walled and packing cutting tool, structure formation, mechanical properties, nanotechnology, coating, modification.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1.9. Тир. 100 прим. Зам. № 335-21.  
Підписано до друку 12.05.2021. Папір офсетний

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.  
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (066) 822-71-30  
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру  
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

---

---

**СТИЛЬ** ®  
**ИЗДАТ**   
ТИПОГРАФИЯ  
[www.stil-izdat.com](http://www.stil-izdat.com)

