

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ СІЛЬСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

РОМАНЮК СВІТЛАНА ПАВЛІВНА



УДК 539.231

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТОНКОСТІННОГО РЕЖУЧОГО
ІНСТРУМЕНТУ**

Спеціальність 05.02.01 - матеріалознавство

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків-2016

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Скобло Тамара Семенівна,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства ім. Петра Василенка,
професор кафедри технологічних систем ремонтного
виробництва

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Береснев Вячеслав Мартинович,
Харківський національний університет імені
В.Н. Каразіна, професор кафедри матеріалів
реакторобудування та фізичних технологій

кандидат технічних наук, доцент,
Дощечкіна Ірина Василівна,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет, доцент кафедри технології металів та
матеріалознавства

Захист дисертації відбудеться «14» червня 2016 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К64.832.03 при Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських (Артема), 44.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських (Артема), 44.

Автореферат розісланий «13» травня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.М. Власовець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На кондитерських підприємствах експлуатуються імпортні та вітчизняні лінії. До довговічності ріжучих робочих органів пред'являються високі вимоги. Обумовлено це тим, що в більшості випадків напрацювання інструмента 1-2 зміни призводить до простою виробничої лінії, впливає на вартість кінцевого продукту і знижує екологічну безпеку через попадання часток металу в переробну продукцію. Передчасний вихід з ладу пов'язаний зі структурною деградацією металу внаслідок дифузії вуглецю, зносу, пороутворення, корозії, втомної пошкоджуваності та руйнування ножів.

Для підвищення споживчих властивостей інструмента і його стійкості ефективними рішеннями проблеми можуть бути три напрями: застосування більш легованого матеріалу; використання додаткових конструктивних рішень (створення елементів жорсткості); зміцнення виготовлених ножів додатковим нанесенням покриттів. У роботі планується використання всіх цих методів, які можуть забезпечити вирішення даної проблеми.

Розробка технології зміцнення передбачає вивчення чинників виходу з ладу ріжучого інструмента, а саме, аналізу стабільності структурних складових, зумовлених дифузією вуглецю, а також їх впливу на довговічність. У вітчизняних та закордонних роботах авторів Верещаки А.С., Табакова В.П., Андрєєва А.А., Аксенова І.І., Zhang S., Mahan J.E., Bunshah R.F., Abbott S. не висвітлено кінетику, механізм зношування та пошкодження тонкостінного інструмента, не розкрито вплив способів зміцнення на їх властивості, що не дозволяє прогнозувати їх поведінку в процесі експлуатації. Тому дослідження, що спрямовані на стабілізацію структури та властивостей, підвищення експлуатаційної стійкості ріжучого інструмента за рахунок використання сучасних технологій зміцнення, є важливими та актуальними.

Зв'язок роботи з науковими темами і програмами. Робота виконана відповідно до держбюджетної тематики ХНТУСГ ім. Петра Василенка та чинної програми: «Розробка і впровадження нових технологій зміцнення тонкостінних ножів в переробному виробництві» (ДР 0114U006552) у період 2014-2016 рр.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є підвищення експлуатаційної стійкості тонкостінних ножів для кондитерського виробництва шляхом розробки нових методів і технологій їх зміцнення покриттями. Для досягнення поставленої мети вирішували наступні завдання:

- на основі літературних джерел інформації, огляду патентів та авторських свідоцтв виявити найбільш ефективні методи зміцнення, які можливо використовувати для підвищення експлуатаційної стійкості тонкостінних ножів;
- оцінити кінетику і механізм зношування, виявити чинники, які сприяють пошкодженню тонкостінних ножів в процесі експлуатації;
- на основі виявлених факторів, що визначають розвиток пошкодження, запропонувати конструктивні та технологічні методи і параметри процесів, а також матеріали для зміцнення тонкостінних ножів;
- теоретично та експериментально оцінити дифузійні процеси, можливість розігріву леза при експлуатації тонкостінного ножа, а також ступень внеску цих процесів в деградацію структури металу;

- дослідити властивості структури зміцнюючих плівкових покриттів та розробити методи контролю їх товщини і якості, як на стадії виробництва так і експлуатації;
- для підвищення зносостійкості, втомної міцності, жорсткості, самозаточування та корозійної стійкості інструмента в експлуатації запропонувати нові підходи та оцінити їх вплив на споживчі властивості;
- провести лабораторні та промислові випробування зношування виробів, зміцнених новими технологічними процесами, і оцінити їх економічну ефективність.

Об'єкт досліджень - процеси і технології виготовлення, зміцнення та використання ножів.

Предмет досліджень - підвищення довговічності тонкостінного ріжучого інструмента.

Методи досліджень. Запропонована загальна схема і послідовність проведення досліджень для виконання поставленої мети роботи, яка складається з розробки конструктивного рішення, використання різних матеріалів для покриттів та технологічних параметрів зміцнення тонкостінних ножів. При проведенні досліджень використовували різні сучасні методи аналізу структури і властивостей зміцнюючих покриттів. Для аналізу структури застосовували комплексний підхід із використанням методів металографічного, мікрорентгеноспектрального і рентгеноструктурного аналізів, емісійну мікроскопію. Для оцінки механічних властивостей використовували порівняльні дослідження, отримані при вимірюванні макро-, мікро- та нанотвердості з оцінкою цих показників як покриттів, так і вихідного матеріалу. В лабораторних (максимально наближених до реальних) і промислових умовах оцінювали зносостійкість ріжучого інструмента. Теоретично та експериментально, за допомогою запропонованих методик, розраховували температурне поле в різних зонах ножів при експлуатації. Розроблено нові комплексні методики оптико - математичної обробки зображень мікроструктур ріжучого інструмента для опису процесів структуроутворення у вихідних, зміцнених і зношених ножах. Запропоновано методику визначення товщини зміцнюючих покриттів при їх нанесенні і зміні в процесі експлуатації.

Наукова новизна одержаних результатів. Положення, які характеризують наукову новизну дисертаційної роботи, полягають в наступному:

- вперше проаналізовані зміни структурного стану тонкостінних дискових ножів зі сталей 20X13 і 65Г в процесі їх експлуатації при подрібненні горіхів та встановлено їх вплив на працездатність ріжучого інструмента;

- вперше теоретично оцінені температурні поля при експлуатації тонкостінних ножів різного хімічного складу і конструкцій в умовах інтенсивного зношування, які досягають 385 - 575°C, що дозволило вибрати композиції покриттів для зміцнення лева та зменшення дифузії вуглецю і схильності до втомних пошкоджень (руйнування), а також забезпечення самозаточування;

- вперше комплексними методами пошарового мікрорентгеноспектрального аналізу, оптико - математичного опису фазового складу і вимірювання нанотвердості показано, що перехідна зона при зміцненні покриттями характеризується підвищеною міцністю зчеплення з основою завдяки формуванню фаз зі складом перехідних сполук на базі Fe - W - C та Fe - Cr - N, які розташовуються по границях зерен основного металу (доля їх досягає 18,7 та 33,0%);

- на основі експериментальних та теоретичних досліджень вперше для забезпечення стабільності структури матеріалу тонкостінного ріжучого інструмента при експлуатації

рекомендовані комплексні підходи зміцнення покриттями, які забезпечують зменшення схильності до втомної пошкоджуваності на 18% та підвищення нанотвердості і опору пластичній деформації (H^3/E^2) у 5,67 та 93 рази відповідно;

- вперше для тонкостінних ножів з покриттям CrN встановлена залежність типу і кількості фаз та неоднорідність їх розподілу від товщини зміцненого шару, що дозволило визначити вплив зміцнюючих хромовмісних нітридних складових при товщині 800-900нм на їх довговічність.

Практична значимість отриманих результатів. На підставі результатів виконаних досліджень розроблені нові комплексні технологічні процеси нанесення покриттів з однієї сторони тонкостінних ножів, які не призводять до перегріву і фазових перетворень у їх лезах. Для зниження втомної пошкоджуваності використана ефективна конструктивна схема зміцнення ножів створенням смуг жорсткості для запобігання руйнування.

Розроблено технологію контролю якості та стану зміцненого і зношеного шарів.

Всі практично важливі розробки стали основою патентного захисту.

Економічний ефект від впровадження розробленої технології зміцнення покриттями ножів для подрібнення горіхів на машині моделі CD-A компанії «Urschel Laboratories, Incorporated» в харчовій промисловості становить 51111 грн на рік при зміцненні покриттям WC товщиною 100нм та 61000 грн на рік - покриттям CrN товщиною 900 нм. Досягнутий ефект забезпечується за рахунок зниження поточних витрат на придбання нового інструмента, підвищення терміну його експлуатації в 25 - 45 разів.

Особистий внесок. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У тих, які були опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: проведено аналіз експлуатаційної стійкості тонкостінного ріжучого інструмента поточного виробництва [17, 23]; визначені особливості зношування вихідних ножів та з покриттям [3, 4, 18]; розроблені нові методики дослідження вихідної структури і властивостей тонкостінних ножів і зміцнюючих покриттів [2, 19, 22]; оцінена зміна температурного поля при експлуатації ножів [21]; визначено спосіб і параметри технологічного процесу нанесення покриттів [7, 8, 10, 26]; розроблено новий конструктивний метод зміцнення інструмента [6, 9]; оцінені механічні характеристики тонкостінних ножів поточного виробництва і з покриттям [20]; розроблено новий неруйнівний метод визначення товщини зміцнюючого покриття в різних зонах інструмента [11], проведена промислова апробація та оцінена економічна ефективність [16].

Апробація результатів досліджень. Основні результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Стратегические вопросы мировой науки – 2013» (Poland, Przemysl, “Nauka I studia” 2013 г.); «Современные проблемы технологии металлов и качества сварных соединений» (г. Харьков, ХНАДУ, 2014 г.); «Современные проблемы освоения новой техники, технологии, организации технического сервиса в АПК» (Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный аграрный технический университет, 2014 г.); «Проблемы и перспективы инновационного развития агроинженерии, энергоэффективности и IT-технологий» (г. Белгород, БГСА им. В.Я. Горина, 2014г.); «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (м.Харків, ХНТУСГ, 2013 - 2015 pp); «Молодь та сільськогосподарська техніка у ХХІ сторіччі» (м.Харків, ХНТУСГ, 2013-2015pp), «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва» (м.Харків, ХНТУСГ, 2014-2015pp); «Зварювання та споріднені технології» (м.Київ, Інститут електрозварювання

ім.Є.О.Патона НАН України, 2015р.), «Химия, био- и нанотехнологии, экология и экономика в пищевой и косметической промышленности» (г. Харьков, НТУ «ХПИ», 2015г.); «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (м.Кировоград, КНТУ, 2015р.).

Публікації. Основні результати досліджень опубліковані в 30 роботах, в тому числі 8 у спеціалізованих виданнях, які входять до переліку обов'язкових, 4 підготовлено одноосібно, а також 9 - у Польщі, Росії та Білорусії. Розробки захищені 3 патентами України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів і висновків, викладених на 213 сторінках. Робота містить 148 сторінок основного тексту, зокрема, 29 таблиць, 66 рис., 4 додатків. Перелік посилань включає 168 джерел літератури.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі надається обґрунтована актуальність проблеми, сформульована мета і завдання досліджень, наведені основні отримані автором наукові результати, визначена їх новизна і практична значущість, наведено дані про апробацію та публікації результатів досліджень.

Перший розділ «Стан питання і завдання дослідження» присвячений аналізу робіт вітчизняних і зарубіжних досліджень матеріалів, що використовуються, і методів зміцнення тонкостінного ріжучого інструмента. Традиційне зміцнення – гартування не забезпечує одночасно необхідних показників опору втомної і корозійної пошкоджуваності, експлуатаційної стійкості. Відсутня можливість використання відомих методів для поточного контролю якості зміцнення і стану інструмента при експлуатації. Тому перспективним може бути зміцнення поверхні ріжучого інструмента покриттями шляхом розробки нових методів контролю їх стану в період усього життєвого циклу і параметрів технологічних процесів із забезпеченням необхідних властивостей тонкостінних ножів.

Розглянуто дані по складу переробної продукції, а також вимоги і норми, що пред'являються до матеріалів і виробів, поверхні яких контактують з харчовими середовищами. Для виготовлення вузлів і деталей, поверхні яких контактують з харчовими середовищами, допустимими для застосування є нержавіючі та низьколеговані сталі. Наведено вимоги, що пред'являються до тонкостінних ножів, їх механічних властивостей.

Виконаний аналіз відомих літературних і патентних джерел по методах зміцнення плівковими покриттями різних виробів показав, що їх товщина і параметри обробки не підходять для застосування до тонкостінних ножів, у яких перетин леза змінюється від 0,1 до 0,64мм. Це пов'язано з тим, що через нагрів його лезо буде піддаватися фазовим перетворенням, що не забезпечить вимоги експлуатаційної стійкості через пошкоджуваність цієї зони. Тому потрібні нові підходи для отримання необхідних експлуатаційних властивостей таких ножів.

Другий розділ «Методологія, матеріали и методи досліджень» присвячений аналізу існуючих методів, які використовуються для досягнення поставленої в роботі мети та завдань, а також новим розробкам, які стосуються оцінки структури та якості покриттів.

Наведені характеристика і параметри обладнання для проведення зміцнення покриттями тонкостінних ножів зі сталі 65Г (поточного виробництва в Україні). Нанесення покриттів проводили на установці типу «Булат - 6», розробленої в ННЦ ХФТІ (м. Харків). Товщина покриттів змінювалася у межах від 50-100нм і 300-900нм.

Розроблено методологію комплексних теоретичних і експериментальних досліджень, запропонована послідовність їх проведення для досягнення поставленої мети

і завдань роботи, яка представлена діаграмою Ісікави. Вона включає такі основні напрями досліджень: визначення обладнання, технологічних параметрів процесів, способів нанесення і матеріалів покриттів; проведення експериментів по оцінці структури і властивостей зміцнюючих покриттів; розробку і використання теоретичних та експериментальних методів дослідження; оптимізацію товщини і складу зміцнюючого шару, конструктивні рішення.

Для виявлення структурної неоднорідності різних зон тонкостінних дискових ножів використано комплексний підхід із застосуванням методів металографічного, мікрорентгеноспектрального і рентгеноструктурного (дифрактометр «ДРОН-3») аналізів, оптичної (мікроскоп МИМ – 8М) та електронної мікроскопії (JEOL JSM-6390LV, JSM-820 Link "JEOL"). Вони дозволили оцінити якість вихідного металу інструмента, а також однорідність розподілу компонентів і фаз в зміцнюючих покриттях та їх деградацію при експлуатації. У дослідженнях використовували вимірювальний інструмент (штатгенциркуль з електронною цифровою індикацією INTERTOOL MT-3006 і інтерференціальний мікроскоп МИИ-4-0). Вимірювання температури в процесі експлуатації проводили за допомогою дистанційного інфрачервоного пірометра MASTECH MS6530.

Для оцінки механічних властивостей використовували вимірювання макро-, мікро- і нанотвердості (прилад «Nanoindenter G200»). Порівняльно в лабораторних і промислових умовах оцінювали зносостійкість вихідного ріжучого інструмента зміцненого покриттями. Випробування на знос проводили на машині тертя СМТ-1 за схемою «диск-колодка» при різних умовах тертя. В якості середовища випробувань були обрані 3 варіанти. Максимально наближеним до реальних умов експлуатації є середовище, що складається з подрібненої серцевини грецького горіха з водою (1: 1) + 3% кварцового пилу. Виробничі випробування проведені на ПАТ «Кондитерська фабрика «Харків'янка».

Для розробки ефективної технології зміцнення тонкостінних дискових ножів, загальноприйнятих методів дослідження виявилось недостатньо. Оскільки такий інструмент працює в умовах розігріву леза з перемінним перетином, то для оцінки дифузійних процесів необхідно було оцінити температурне поле, структурні зміни і визначити якість і товщину покриттів при їх нанесенні та експлуатації.

Методика оцінки температурного поля, що формується при експлуатації в різних зонах тонкостінного ріжучого інструмента, базувалася на відомій залежності згідно вирішенню рівняння теплопровідності:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial (\lambda T)}{\partial r} + \frac{\partial (\lambda T)}{r \partial r} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial (\lambda T)}{\partial y} \quad (1)$$

де τ - час, г; $T=T(x,y,z, \tau)$ - температура, °С; λ - теплопровідність, Вт/(м·°С); γ – щільність, кг/м³; c - питома теплоємність, Дж/кг·°С.

Розрахунки виконано у циліндричних координатах із заданими початковими і граничними умовами:

$$\text{Початкові: } T(r, y, 0) = T_c \quad (2)$$

де T_c - температура навколишнього середовища;

$$\text{Граничні для леза: } \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = -Q, \quad (3)$$

де величина Q визначається підбором.

$$\text{На гранях ножа, а саме, на половині його товщини: } \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = -Q1 \quad (4)$$

$$Q1 = \alpha (T - T_c), \quad (5)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт / (м² · К).

Спосіб використовували для оцінки зміни розподілу температури за діаметром ножа при циклічному його нагріванні й охолодженні, що призводить до виникнення напружень. Отримані дані необхідні для розуміння кінетики та механізму процесів зміни структури, деформацій і руйнування, які відбуваються в різних зонах ножа.

Розроблено комплексну методику математичної обробки зображень мікроструктур ріжучого інструмента для опису процесів структуроутворення. При аналізі зображення, оцінювали не сам колір, а різницю між ними, що дозволяє не враховувати ступінь травлення структури. Запропонований метод дозволяє оцінити сформовані основні фази, закономірності утворення різних структурних складових зміцнюючого покриття в процесі його нанесення і експлуатації інструмента. Комплексна методика включала 14 показників, що характеризують особливості цифрового зображення. Головні з яких: лапласіан (описує дифузію хімічних елементів) та дивергенція (описує щільність фрагмента зображення) обчислювалися з урахуванням дисперсності структури:

$$l = (l_1 + l_2) / 2 \quad (6)$$

$$\text{де } l_1 = |c_2 + c_4 + c_6 + c_8 - 4c_1| \text{ та } l_2 = |c_3 + c_5 + c_7 + c_9 - 4c_1| / 2$$

$$d = (d_1 + d_2) / 2 \quad (7)$$

$$\text{де } d_1 = |c_2 + c_4 - 2c_1| \text{ та } d_2 = |c_3 + c_5 - 2c_1| / \sqrt{2}$$

Така методика дозволяє встановити стабільність структурних складових при експлуатації, ступінь їх деградації і правильно вибрати ефективний матеріал та параметри зміцнення для підвищення експлуатаційної стійкості ріжучого інструмента.

Запропонована спеціальна методика математичного аналізу металографічних зображень пірамідальних відбитків, отриманих при вимірюванні мікротвердості за Віккерсом, яка служить джерелом інформації про властивості матеріалу інструмента: здатності ножа чинити опір деформації, встановлювати вплив зміцнюючих фаз.

Запропонований неруйнівний метод визначення товщини зміцнюючого покриття в різних зонах ріжучого інструмента після його нанесення, а також контролю стану зношеного шару в процесі експлуатації. Рекомендовано проводити вимірювання з використанням приладів для оцінки мікротвердості з вертикальним навантаженням індентора при 0,245 - 0,490N для формування смуг зсуву плівкового зміцнюючого покриття, а потім здійснювати розрахунок його товщини. За будовою смуг, їх переривчастому або суцільному характеру можливо оцінювати якість покриття, а також залишкову його товщину. Відсутність смуг при індентуванні свідчить про повне зношення покриття. Даний спосіб діагностики захищений патентом України UA 99408.

Третій розділ. «Теоретична оцінка температурного поля і структуроутворення при експлуатації тонкостінних ножів» присвячений результатам теоретичних досліджень. Для встановлення процесів, що призводять до пошкодження та руйнування, теоретично оцінили дифузійні процеси і зміни температурного поля, які виникають у тонкостінному ріжучому інструменті, а потім проаналізували структурні зміни в процесі експлуатації ножів при подрібненні горіхів.

Показано, що в дисковому ножі зі сталі 65Г в найбільш товстій його частині, яка дорівнює 0,64мм, температура становить 48°C (оцінено експериментально), а в найбільш тонкій - біля краю леза - 575°C. Така висока температура леза досягається за рахунок процесів тертя і розвитку напружень, що в ряді випадків вже при невеликому періоді експлуатації (1-2 зміни, протягом яких переробляється 0,9т - 1,8т сировини) призводить до

руйнування карбідів та інтенсивної дифузії вуглецю, розвитку пошкодженості даної зони і її згину. У інструмента зі сталі 20X13 (аналог AISI 420 і S42000) через більший розмір леза, чим у ножів вітчизняного виробництва (65Г), а також значної доли карбідів хрому, максимальна температура не перевищує 385°C. Вона не призводить до перегріву і пластичної деформації леза. Тому лезо зі сталі 20X13 (виробництво США) менш затуплюється і не деформується при експлуатації. Процес деградації структури зменшується при наявності великої частки легованої карбідної фази, ускладнює руйнування і дифузії вуглецю. У зв'язку з цим процес зміни структури відбувається повільніше в період експлуатації. Однак, зростає накопичення напружень другого роду (структурні), що пов'язано з роботою інструмента (леза) в інтервалі магнітного перетворення карбідів, легованих хромом. Це і призводить до відколів леза. Методом рентгеноструктурного аналізу визначено кількість залишкового аустеніту в ріжучому інструменті зі сталі 65Г. Його частка коливається від 7% (у лезі) до 18% (в основній частині). Наявність залишкового аустеніту в металі інструмента зі сталі 20X13 рентгеноструктурним аналізом не ідентифікували. Тому була використана спеціально розроблена методика оптико - математичної обробки металографічних зображень, отриманих методом електронної мікроскопії (рис.1). Виконано порівняльний аналіз 30 зображень мікроструктури ножів: зі сталі 65Г до експлуатації (11шт.), а також 65Г (9шт.) і 20X13 (10шт.) після закінчення терміну їх служби. Зображення були отримані при збільшенні від 50 до 10000, що дозволило оцінити наявність більш дрібних включень фаз і виявити ступінь однорідності сформованої структури.

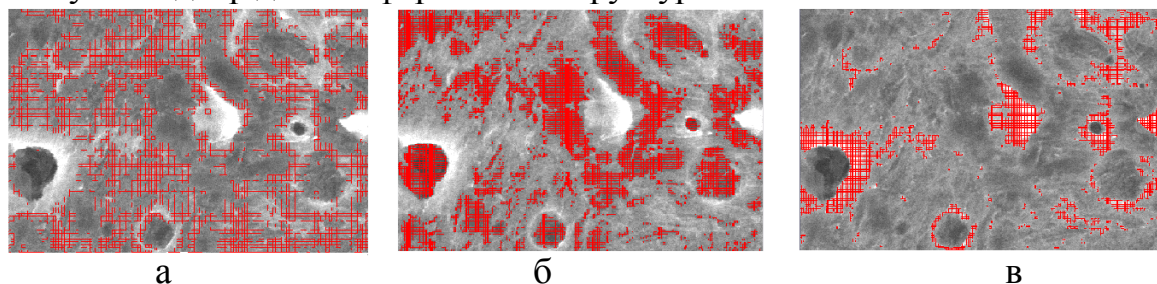


Рис. 1. Розподіл відповідних фаз (виділено червоним кольором) в основі ріжучого інструмента зі сталі 20X13 після експлуатації, х10000, а - мартенсит, б – карбіди, в - ферит

Встановлено, що зношування ножів залежить не тільки від наявності вуглецю в сталі, але і від його кількісного вмісту в кожній фазі, а також виникаючих структурних змін.

Після експлуатації сталі 65Г протягом 1-2 діб за рахунок інтенсивної деформації відбувається розпад залишкового аустеніту (його вміст зменшився на 4% у лезі і до 13,65% в середній частині ножа), що призводить до зміни концентрації вуглецю в локальних зонах. Виявлено 9 типів фериту і 6 типів карбідів, які відрізняються вмістом вуглецю. Їх кількість і відсотковий вміст у фазах відрізняються в різних зонах інструмента. Середня доля фериту з мінімальною часткою вуглецю в вихідному ножі зі сталі 65Г в лезі становить 0,14%, а в середній частині - 1,65%. В ріжучому інструменті зі сталі 65Г після експлуатації його кількість зростає до 1,92% в лезі і - 4,5% в середній частині. У процесі експлуатації відбувається не тільки розпад залишкового аустеніту (табл.1), а й зменшення частки фериту, максимально насиченим вуглецем.

Дослідження кількісного змінення вмісту карбідів, яке проведено на фрагментах 10 на 10 пікселів показало, що у лезі ножа зі сталі 65Г має місце максимальна кількість фрагментів з мінімальною часткою карбідної фази (відповідає 5%). Це характерно як для

нового виробу (72%), так і після експлуатації (64%) та свідчить про те, що такі карбіди досить дрібні і при деформації легко руйнуються та стимулюють дифузійні процеси. Для ножа зі сталі 20X13 після експлуатації відсотковий вміст таких карбідів значно менший - 33%. Таку зміну можна пояснити як більшою загальною часткою карбідної фази в сталі, так і їх стабільністю за рахунок легування хромом. Загальний вміст карбідної фази на фрагментах в основній частині ножів значно вищий. Це пов'язано з тим, що ця зона менш деформована і збереглися вихідні карбіди. Методом регресійного аналізу проаналізували залежність зміни вмісту різних фаз до- та після експлуатації. Проведено розрахунок і аналіз сформованих структур на отриманих зображеннях за допомогою введених функцій, таких як середній колір зображення, середньоквадратичне відхилення кольору, узагальнений градієнт, абсолютне значення лапласіану, абсолютне значення дивергенції, абсолютне значення четвертого лапласіану, нейтральність лапласіану, нейтральність дивергенції, однорідність. Аналізуючи колір зображень, встановили, що після експлуатації відбувається перерозподіл вуглецю в основну частину різального інструмента. Порівнюючи відношення дивергенції (описує щільність фрагмента зображення) для леза ножів зі сталі 65Г до і після експлуатації, виявили, що воно змінюється в 2,9 рази. Це свідчить про те, що після експлуатації структура леза стає більш неоднорідною, має місце пластична деформація.

Таблиця 1

Відсотковий вміст фаз в ножах з досліджених сталей

Ферит	Фази: аустеніт* і мартенсіт**	Карбіди	Характеристика ножа		Зона ножа
81,44	7,10*	11,46	Новий	65Г	Лезо
84,20	3,1*	12,70	Після експлуатації		
75,33	13,9**	10,77	Після експлуатації		
65,65	22,55*	11,80	Новий	65Г	Середина
81,30	8,90*	9,8	Після експлуатації		
53,2	27,3**	19,5	Після експлуатації	20X13	Основа
53,75	24,05*	22,20	Новий	65Г	
64,70	14,00*	21,30	Після експлуатації		
42,03	23,87**	34,1	Після експлуатації	20X13	

Виконано дослідження різних сполучень кольорів на фотографіях з використанням розподілу Бозе-Енштейна. Отримані дані про збільшення сполучень різних кольорів після експлуатації свідчать про розвиток істотної неоднорідності структури. Аналіз цих гістограм в поєднанні з гістограмою кольорів і за допомогою критерію Колмогорова дають уявлення про ідентичність аналізованих 30 фотографій. Розглядалися ймовірності збігів більше 0,5. Таких збігів дуже мало - всього 24 з 435 можливих комбінацій. На підставі даного аналізу зробили висновок про кінетику і ступінь деградації структури ножів, яка відбувається при їх експлуатації (супроводжується зміною типу карбідних фаз за рахунок їх руйнування, дифузії вуглецю та насиченістю цим компонентом феритної складової).

Четвертий розділ «Аналіз експлуатаційної стійкості дискових ножів в кондитерському виробництві» присвячено експериментальним дослідженням руйнування ріжучого інструмента поточного виробництва та механічних характеристик ножів.

Виконано статистичний аналіз експлуатаційної стійкості тонкостінних дискових ножів для подрібнення горіхів в кондитерському виробництві зі сталей 65Г і 20X13. Їх

стійкість, в середньому, не перевищує 1-2 дні. Головними чинниками передчасного виходу з експлуатації леза є (рис.2): крихке руйнування робочих поверхонь (мікро- і макровикришування), формозмінення в результаті руйнування карбідної фази, дифузії вуглецю, пластичної деформації (загин безвуглецевої тонкої частини), а також руйнування (рис.3).



Рис. 2. Вирид металу (а), згин (б), пластичне деформування (в) леза ножа

Вириди металу з леза ножа можливі і в результаті впливу руху в разі твердого включення. Такі руйнування є найнебезпечнішими у виробництві, так як метал, що викришується потрапляє в переробну продукцію. Встановлено, що у лезі ножа зі сталі 65Г при експлуатації спостерігається інтенсивна дифузія вуглецю і кінець леза стає повністю безвуглецевим. Відзначається нерівномірний перерозподіл вуглецю по всьому лезу за рахунок дифузії його в більш деформовані зони (дифузія під напругою). Вміст вуглецю у різних зонах леза ножа змінюється в 1,36 рази. Його середня концентрація в лезі при експлуатації знижується в 2, 8 разів (у порівнянні з новим).



Рис.3. Втомне руйнування основної частини ножів, втрата планшетності (а - зміна форми) і його руйнування (б - на окремі кільцеві складові)

Під дією зовнішніх інтенсивних механічних навантажень виявлені особливі структури типу «білої зони» в області границі лезо - основа ножа. Нерівномірність розподілу компонентів С і Мп пов'язана як з заточкою леза, так і різним ступенем деформації кожної зони при експлуатації. Одночасно, в його основній частині спостерігаються надриви і руйнування внаслідок втомного впливу при вібрації (див.рис.3). Отримані результати дозволяють стверджувати, що зношування відбувається в умовах циклічної деформації, при якій має місце локальна дифузія вуглецю в лезі (рис.4) і втомна пошкоджуваність середньої частини ножа. За результатами мікрорентгеноспектрального аналізу в зоні леза ножа зі сталі 20Х13 при експлуатації відзначається дифузія вуглецю, а також хрому. При цьому, частка першого компонента в різних зонах леза ножа змінюється в 1,7 раз (мінімальна концентрація на його краю), а другого - від 11,15 до 12,07% (на краю - максимальна). Відзначається суттєва відмінність у розподілу вуглецю по всьому ножі. В основній частині (середина і основа) ножа зі сталі 20Х13 після експлуатації вуглецю в 2,3 рази менше, ніж у лезі. Його концентрація після експлуатації стає близькою до нового ножа зі сталі 65Г.

Для оцінки якості виробів поточного виробництва проведено дослідження механічних характеристик тонкостінних ножів. Порівняльні дані по вимірюванню твердості (рис.5) показали істотне розходження в характері змін в процесі експлуатації ножів. Так, при використанні сталі 20Х13 максимальне (порівняно з вихідним станом)

зміцнення характерно для леза, а сталі 65Г – середньої зони ножа, що є наслідком його низьких пружних властивостей, інтенсивної деформації цієї зоною. Це характеризує поведінку сталей в умовах експлуатації. Важливим є конструктивне рішення в ножі зі сталі 20X13 (наявність потовщеного обідка за лезом). Середнє значення твердості при навантаженні 4,9N по радіусу ножа зі сталі 65Г склало 545HV, зі сталі 20X13 - 610HV.

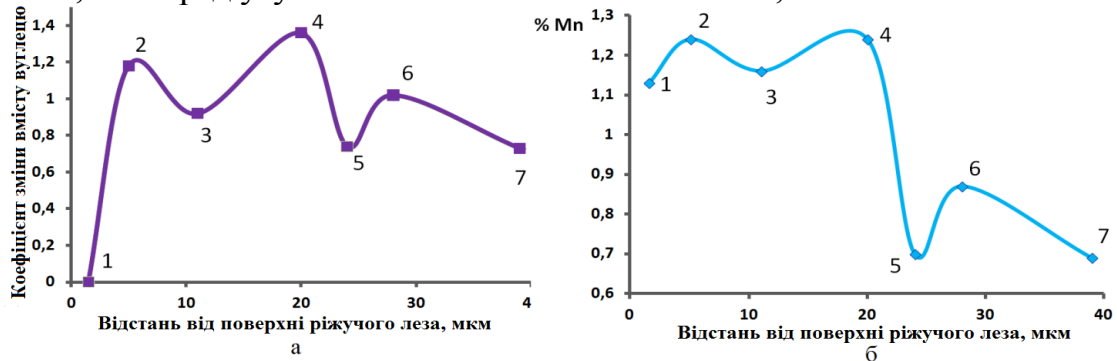


Рис. 4. Зміна концентрації вуглецю (а) і марганцю (б) в лезі ножа зі сталі 65Г після експлуатації (оцінено методом мікрорентгеноспектрального аналізу)

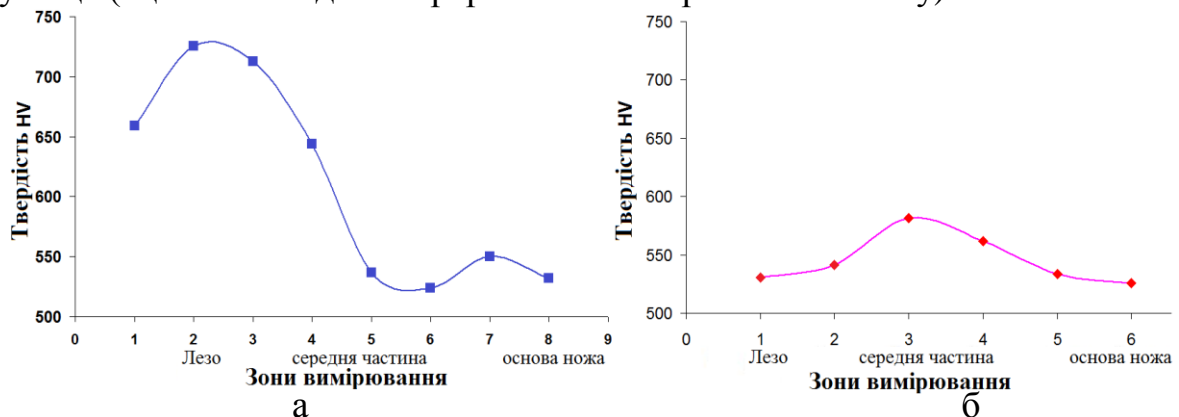


Рис.5. Зміна твердості по радіусу ножа зі сталі 20X13 (а) та 65Г(б) після експлуатації

На основі аналізу кривих навантаження та розвантаження при наноіндентуванні отримані основні механічні характеристики ріжучого інструмента зі сталі 65Г. Середнє значення нанотвердості для вихідного зразка не перевищує 4,09 ГПа і модуля пружності 204,7 ГПа. Пружне відновлення становить 15%.

Проведені порівняльні випробування на зносостійкість зразків ріжучого інструмента зі сталі 65Г показали незадовільні трибологічні характеристики: коефіцієнт тертя в різних середовищах випробувань, наближених до умов експлуатації, склав від 0,06 до 0,11; ширина доріжки тертя від 1,84мм до 4,05мм.

П'ятий розділ «Застосування покриттів для зміцнення і підвищення експлуатаційної стійкості тонкостінного ріжучого інструмента» присвячений експериментальним дослідженням по нанесенню покриттів і формуванню їх властивостей, а також розглянуто промислове впровадження розробок та виконана оцінка ефективності запропонованої технології зміцнення.

Розроблено принципово нову технологію зміцнення тонкостінного ріжучого інструмента, що дозволяє подовжити термін служби виробів, виключити розвиток корозії при експлуатації, зменшити вплив пороутворення, яке зустрічається на поверхні ножа (очистити пори, згладити їх краї), підвищити зносостійкість, опір втомному руйнуванню та забезпечити збереження планшетності. Технологія включає попередню обробку перед

нанесенням покриттів для активації поверхні, її очищення ультразвуком (5хв) і ВЧ - розрядом в середовищі аргону при тиску $P = 2 \cdot 10^{-1}$ Па та негативному зсуві на підкладці - 1кВ протягом 15 хв. Запропоновано покриття із різних матеріалів і зміцнюючих компонентів, які наносили іонно - плазмовим методом (WC) із застосуванням ВЧ розряду в стаціонарному зовнішньому магнітному полі і вакуумно - дуговим (CrN) в присутності ВЧ – розряду. У першому випадку для нанесення нанопокриття використовували складний електрод з С + W. Його підключали до ВЧ-генератору з закритим входом і проводили розпилення в середовищі Аг при тиску $P_{Ag} = 3 \cdot 10^{-3}$ Па. Негативний зсув на ВЧ - електроді становив $E_{см} = - 700$ В. Відстань між ВЧ-електродом і зразком досягала 4 см. Зовнішнє магнітне поле ~ 30 Ерстед. Час нанесення варіювався від 1 до 2 годин залежно від необхідної товщини нанопокриття С + W. Досліджували отримані нанопокриття товщиною $20 \div 100$ нм. У другому випадку для напилення покриття у вакуумній камері був створений тиск не нижче $P = 5 \cdot 10^{-3}$ Па. Для кращої адгезії покриття CrN з ріжучим інструментом наносили підшар чистого Cr (протягом 5хв). Для отримання покриття CrN вакуумну камеру заповнювали азотом чистотою 99,99% до тиску $P = 2 \cdot 10^{-1}$ Па. Негативний зсув на підкладці становив $U_{смещ} = - 80$ В. Параметри вакуумної дуги: струм дуги хромового катода - 110А, $I_{фок} = 0,7$ А. Час нанесення покриття CrN варіювався від 10 до 20 хв. Досліджували отримані покриття товщиною 300 - 900 нм.

Термоелектронною емісією виявлено розподіл компонентів і оцінено склад поверхневого шару інструмента, зміцненого покриттями WC і CrN, які показали рівномірний розподіл компонентів W і С, а також Cr і N по всій поверхні ножа. Виявлено дифузію атомів заліза з основного металу в покриття по межах зерен, концентрація якого в різних зонах досягає 2,51 - 3,83% (для покриття WC) і 7,50% (CrN).

При визначенні механічних характеристик покриттів використовували метод наноіндентування. На основі аналізу отримані характеристики зразка з покриттям CrN. Середнє значення нанотвердості оцінювали по результатам на глибині до 200 нм. Показано (рис.6), що покриття має суттєво більш високий рівень нанотвердості (порівняно з вихідним станом ножа) і досягає 23,19 ГПа. За результатами випробувань середнє значення модуля пружності для зразка з покриттям CrN склало 281,19 ГПа. Пружне відновлення становить 47% (див.рис.6,б). Опір пластичній деформації металу ножа з покриттям CrN збільшився в 93 рази в порівнянні з вихідним.

Проведені випробування на зносостійкість зразків ріжучого інструмента зі сталі 65Г з покриттями WC і CrN, показали, що в умовах, максимально наближених до реальних найбільш високий рівень зносостійкості відзначається у зразка, зміцненого CrN.

У покритті WC виявлено три типи спеціальних карбідів W_2C (28,6%), WC (23,2%) і проміжного за змістом вуглецю і вольфраму WC_{1-x} (2,3%). Частка чистого компонента W становить 27,2%. Зміцнююча фаза в покритті CrN товщиною 300 нм і 900 нм складається, головним чином, з трьох видів нітридів хрому з різною концентрацією азоту: Cr_2N_x (21,93 - 21,48%), Cr_2N (4,40-3,44%) , CrN (19,29 - 24,62%). При цьому доля чистого компонента Cr в покритті 21,4 - 27,26%. Проведений порівняльний аналіз результатів оптико - математичної обробки металографічних зображень покриттів CrN (300 нм і 900 нм) показав, що тип сформованих фаз не залежить від товщини нанесеного шару і свідчить про його ідентичність (табл.2 і 3). Підвищена температура при нанесенні покриття 900 нм сприяє інтенсифікації дифузії заліза та інших компонентів з основного металу ріжучого інструмента по межах зерен з подальшим формуванням поодиноких складних нітридів.

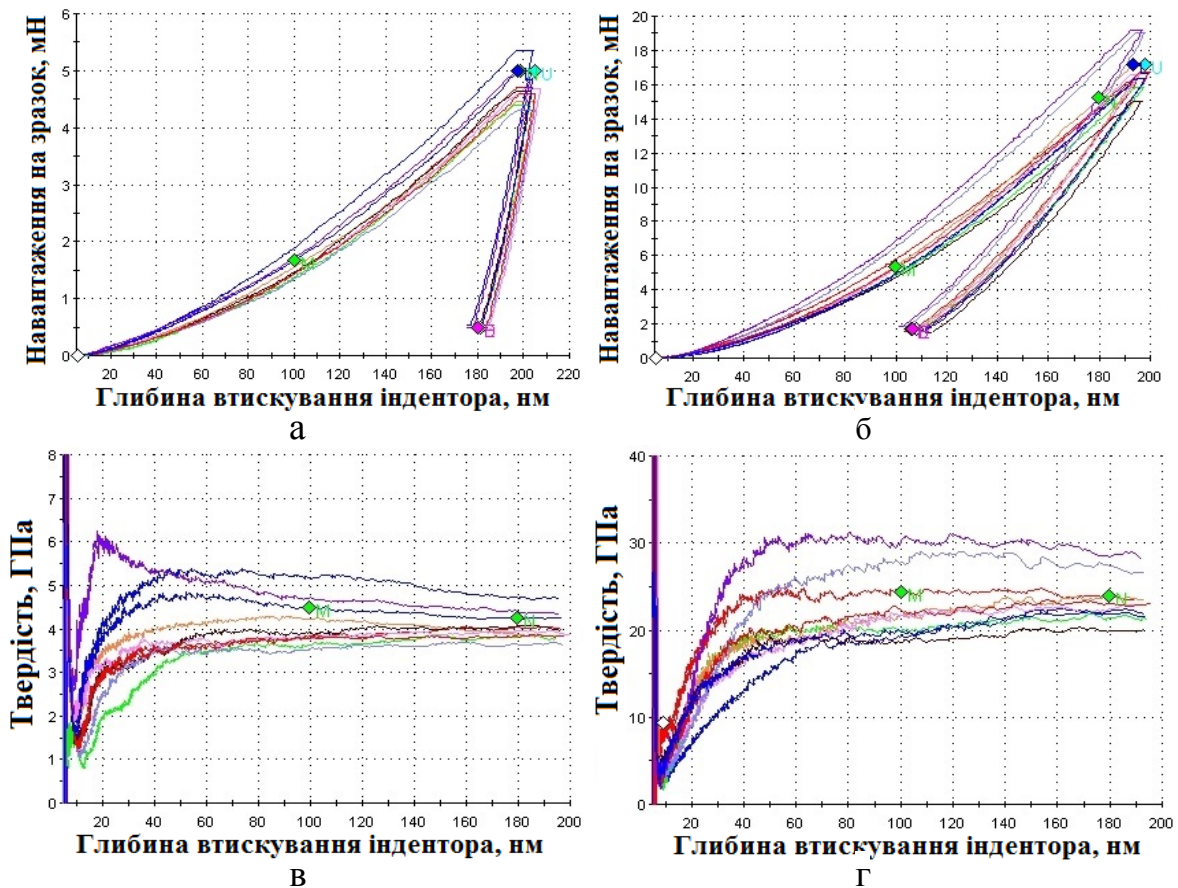


Рис.6. Діаграми втискування індентора (а, б) та залежність нанотвердості від глибини його переміщення (в, г) для вихідного ножа зі сталі 65Г (а, в) і - з покриттям CrN (б, г)

Таблиця 2.

Середні значення розподілу фаз при різній товщині покриття

Cr	Fe _x N _y	(Fe,Cr)N	(Me,Cr)N	Cr ₂ N _x	Cr ₂ N	CrN	Примітка
21,4	2,99	19,68	10,34	21,93	4,40	19,29	покриття CrN товщиною 900нм
27,26	0,84	14,5	7,86	21,48	3,44	24,62	покриття CrN товщиною 300нм

Таблиця 3.

Ступінь однорідності покриття

Cr	Fe _x N _y	(Fe,Cr)N	(Me,Cr)N	Cr ₂ N _x	Cr ₂ N	CrN	Примітка
1,4-15,5	0,59-10,61	0,88-23,43	0,66-4,16	0,43 - 7,48	2,6 - 4,4	0,91-9,69	CrN (900нм)
1,24-12,5	0,04 - 1,0	5,3 - 13,8	0,96 - 11,4	0,38 - 32,6	0,14 - 4,76	5,22-28,3	CrN (300нм)

Проведено дослідження щодо встановлення впливу товщини (x_1) нанесених покриттів і ступеню неоднорідності розподілу зміцнюючих хромовмісних нітридних фаз (x_2) на експлуатаційну стійкість покриттів (y). Використовували план експерименту 2^2 . Отримане наступне рівняння регресії:

$$y=17,5+2,5x_1 +4,5x_2+0,5x_1x_2 \quad (8)$$

В результаті аналізу виявлено, що обидва чинники впливають на експлуатаційну стійкість ножів. Максимальний внесок належить ступеню однорідності розподілу сумарної частки хромовмісних нітридних фаз та досягає 80%.

Для визначення стану шару, зміцнюючого покриття і його товщини, а також оцінки ступеня зносу в різних зонах ріжучого інструмента в процесі експлуатації використовували неруйнівний метод діагностики. Для покриття CrN (900нм) за

допомогою запропонованого методу, використовуючи прилад для оцінки мікротвердості з вертикальним навантаженням при 25-50г аналізували формування смуг зсуву плівкового покриття. Встановили, що в різних зонах ріжучого інструмента до експлуатації його товщина коливається від 785нм до 942нм.

Залежність напрацювання інструмента від товщини зміцнюючих покриттів представлено на рис. 7.

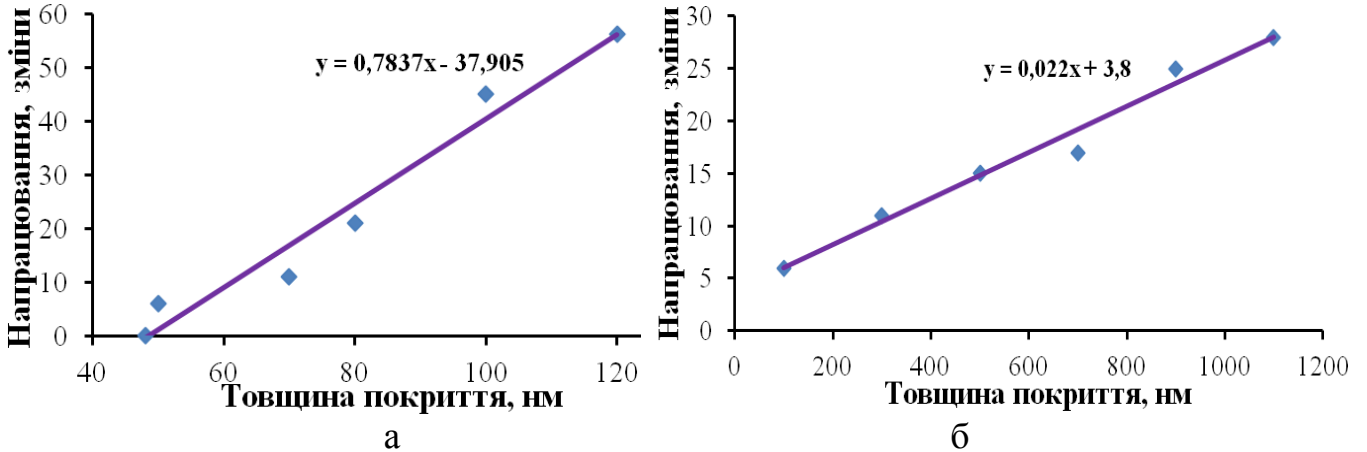


Рис.7. Залежність напрацювання інструмента від товщини покриттів WC (а) і CrN (б)

Промисловими випробуваннями, проведеними в умовах ПАТ «Кондитерська фабрика «Харків'янка», було показано, що максимальну експлуатаційну стійкість має ріжучий інструмент, зміцнений покриттям WC товщиною 100нм і CrN товщиною 900нм. Термін експлуатації дискових ножів з покриттям WC склав 45 робочих днів і CrN - 25, протягом яких перероблено 40,5т. та 22,5т. горіхів відповідно. Покриття WC товщиною 50нм і CrN - 300нм показали мінімальне збільшення експлуатаційної стійкості (в 6 і 11 разів відповідно). Нанесення покриття значно більшої товщини сприяє перегріву леза і деформації, втраті планшетності всього дискового ножа.

Запропоновано спосіб (захищений патентом України UA 95489) підвищення довговічності тонкостінних ножів покриттями з формуванням смуг жорсткості (конструктивне рішення) за рахунок зміцнення леза та підвищення втомної міцності решти частини ножа (рис.8). Промисловими випробуваннями показано, що при такому зміцненні зменшується деформація леза і забезпечується зниження його зносу на 22%, схильність до втомної пошкоджуваності на 18%. Це досягається за рахунок підвищення середньої мікротвердості покриття на 21,83%.

Промислова апробація ріжучого інструмента, зміцненого запропонованим програмованим іонно - плазмовим методом нанесення нанопокриття композицією 50%W + 50%C, підтвердила доцільність такого конструктивного рішення, завдяки якому збільшена експлуатаційна стійкість та ліквідується схильність до втомного руйнування інструмента. Ефект самозагострення ріжучого інструмента з покриттям WC і CrN забезпечується завдяки зміцненню ножів з однієї його сторони. Термоелектронною емісією досліджено розподіл компонентів і склад поверхневого шару леза ріжучого інструмента, зміцненого покриттями WC і CrN, після експлуатації. Встановлено, що при виході ножів з експлуатації, в їх лезі відбувається нерівномірний, острівковий знос покриттів. Спостерігаються зони, в яких практично відсутні компоненти покриття, що і є причиною їх виходу з ладу. При острівковому зносі покриття WC виявлені зони, в яких практично



Рис 8. Шпиндель дискових ножів у сборі зі смугами жорсткості

відсутні чистий компонент (вольфрам) і його карбіди W_2C , WC . У цих областях проявляється наявність Fe і, відповідно, потрібні карбіди системи Fe - W - C, що характеризують перехідний дифузійний шар. При зносі покриття CrN відбувається руйнування складних нітридів з залізом (Fe,Cr)N та формуванням більш стійких зміцнюючих включень CrN.

Економічний ефект від впровадження розробленої технології зміцнення покриттями ріжучого інструмента для подрібнення горіхів на установці моделі CD-A компанії «Urschel Laboratories, Incorporated» в харчовій промисловості становить 51111 грн на рік при зміцненні нанопокриттям WC товщиною 100нм і 61 000 грн на рік - покриттям CrN товщиною 900нм. Досягнутий ефект забезпечується за рахунок зниження поточних витрат на придбання нових виробів, підвищення терміну служби ножів до 25 - 45 разів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі представлені нові наукові результати, які забезпечують вирішення актуального завдання - підвищення експлуатаційної стійкості тонкостінного дискового інструмента шляхом нанесення зміцнюючих покриттів. На підставі розроблених теоретичних і експериментальних досліджень отримані наступні основні результати:

1. Аналізом літературних джерел інформації, патентів та авторських свідоцтв, встановлено, що перспективним може бути зміцнення поверхні ріжучого інструмента покриттями. Однак, існуючі методи зміцнення і параметри обробки не дозволяють використовувати їх для тонкостінних ножів, у яких перетин леза змінюється від 0,1 до 0,64мм. Це пов'язано з тим, що через нагрів його лезо буде піддаватися фазовим перетворенням, що не забезпечить вимоги експлуатаційної стійкості через пошкоджуваність цієї зони. Статистичним аналізом виявлено, що експлуатаційна стійкість ріжучого інструмента для подрібнення горіхів в кондитерському виробництві становить 1-2 зміни, протягом яких переробляється 0,9т - 1,8т сировини. Причиною цього є крихке руйнування робочих поверхонь, формозмінення ріжучого леза, його затуплення в результаті руйнування карбідної фази, дифузії вуглецю, пластичної деформації і втомної пошкоджуваності середньої частини ножа і на його межі з основою. Інтенсивна дифузія знижує вміст вуглецю в лезі інструмента зі сталі 65Г при експлуатації в 2, 8 разів у порівнянні з новим. При дії втомного впливу при вібрації в основній частині ножа спостерігаються надриви, що призводять до утворення тріщин та руйнування.

2. Для встановлення кінетики деградації структури металу ножів теоретично оцінили дифузійні процеси і зміни температурного поля при їх експлуатації. Встановлено, що в дисковому ножі зі сталі 65Г в найбільш товстої його частині, що дорівнює 0,64 мм, температура нагріву досягає 48°C, а в найбільш тонкої - біля краю леза - 575°C. Це відбувається за рахунок процесів тертя і розвитку напружень, що в ряді випадків вже при невеликому періоді експлуатації (1-2 зміни) призводить до руйнування карбідів та інтенсивної дифузії вуглецю у лезі та його згину. В інструменті зі сталі 20X13 через більший перетин леза, максимальна температура не перевищує 385°C та не сприяє перегріву і пластичній його деформації. Процес деградації структури металу при наявності великої частки легованої хромом (до 14%) карбідної фази ускладнює її

руйнування і гальмує дифузію вуглецю. Однак, зростає накопичення напружень другого роду, що призводить до викришування леза.

3. Для якісного та кількісного аналізу структурних змін при експлуатації ножів розроблена методика оптико - математичної обробки металографічних зображень, яка дозволила встановити, що зношування інструмента залежить не тільки від наявності вуглецю в сталі, але і від його кількісного вмісту в кожній фазі, а також структурних змінах. Після експлуатації структура леза стає більш неоднорідною, має місце пластична деформація. Розвиток істотної неоднорідності і деградації структури оцінили на підставі досліджень взаємозв'язку поєднань кольорів на фотографіях, використовуючи розподіл Бозе-Енштейна в поєднанні з гістограмами кольорів за критерієм Колмогорова. Встановлено, що з 435 можливих зв'язків структурних складових (по концентрації вуглецю у фазах) в початковому стані і після експлуатації вони знизилися до 24.

4. Розроблено нові комплексні технологічні процеси зміцнення тонкостінних ножів покриттями складу $W + C$ і $Cr + CrN$, нанесених іонно-плазмовим методом із застосуванням ВЧ розряду в стаціонарному зовнішньому магнітному полі і вакуумно – дуговим в присутності ВЧ – розряду (захищений патентом України UA 98218) відповідно. Для кращої адгезії покриття CrN з ріжучим інструментом наносили підшар чистого Cr . Запропонована технологія включає і попередню обробку перед нанесенням покриттів для активації поверхні, її очищення ультразвуком і ВЧ-розрядом в середовищі аргону. Запропоновано конструктивний спосіб підвищення довговічності тонкостінних ножів наноструктурними покриттями з формуванням смуг жорсткості в основній зоні ножа для підвищення втомної міцності і зміцнення леза. Це зменшує деформацію леза і забезпечує зниження його зносу на 22%. Схильність до втомної пошкоджуваності знижена на 18%, що досягається створенням структури відповідно принципу Шарпі з підвищенням середньої мікротвердості покриття на 21,83%. Промислова апробація ріжучого інструмента, зміцненого запропонованим програмованим іонно - плазмовим методом нанесення нанопокриття композицією 50% $W + 50\% C$, підтвердила доцільність такого конструктивного рішення, завдяки якому збільшена експлуатаційна стійкість.

5. Оцінку якісних і кількісних структурних складових, стан покриття та його знос, проводили оптико-математичною обробкою зображень. У покритті WC виявлено три типи спеціальних карбідів W_2C (28,6%), WC (23,2%) і проміжного за вмістом вуглецю і вольфраму WC_{1-x} (2,3%). Частка чистого компонента W становить 27,2%. Зміцнююча фаза в покритті CrN товщиною 300нм і 900нм складається, головним чином, з трьох видів нітридів хрому з різною концентрацією азоту: $Cr_2 N_x$ (21,93 -21,48%), $Cr_2 N$ (4,40-3,44%) , CrN (19,29 - 24,62%). При цьому чистого компонента Cr в покритті 21,4 - 27,26%.

6. Для визначення механічних характеристик покриттів використовували метод наноіндентування. Показано, що покриття CrN характеризується більш високим рівнем нанотвердості і досягає 23,19ГПа (для вихідного зразка не перевищує 4,09ГПа). За результатами випробувань середнє значення модуля пружності такого покриття досягає 281,19ГПа (для вихідного - 204,7ГПа). Пружне відновлення дорівнює 47%. Опір пластичній деформації металу ножа з покриттям CrN збільшився в 93 рази. На основі отриманого рівняння регресії встановлено, що найбільша зносостійкість ножів досягається при забезпеченні рівномірного розподілу зміцнюючих CrN фаз. При цьому максимальний внесок цього фактору складає 80%, а товщини шару на перевищує 20%.

7. Запропонована технологія зміцнення тонкостінних ножів для умов промислового

виробництва ПАТ «Кондитерська фабрика «Харків'янка». Максимальну експлуатаційну стійкість має ріжучий інструмент, зміцнений покриттями WC товщиною 100нм і CrN товщиною 900нм, які перероблюють 40,5т та 22,5т горіхів відповідно. Підвищення експлуатаційної стійкості досягнуто за рахунок стабільності структури при експлуатації, зменшення схильності до пошкоджуваності леза і опору втомному руйнуванню основної його частини. Ефект самозагострення інструмента з покриттям WC і CrN забезпечується завдяки зміцненню ножів з одного боку. Для оцінки якості зміцнення в процесі експлуатації запропонована технологія неруйнівного контролю. Економічний ефект від впровадження розробленої технології зміцнення покриттями ріжучого інструмента для подрібнення горіхів становить 51111грн на рік при зміцненні нанопокриттям WC товщиною 100нм і 61000грн на рік - покриттям CrN товщиною 900нм. Очікуваний економічний ефект складе 183тис.грн на рік при добовій переробці продукції до 900кг. Запропоновані технології сприяли не тільки досягненню економічного ефекту за рахунок підвищення довговічності, але й екологічній безпеці використання такої продукції.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях

1. Романюк С.П. Анализ методов упрочнения режущих инструментов / С.П. Романюк // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. “Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві”. – Харків, 2013. – Вип. 133. – С.136 – 142.
2. Романюк С.П. Методика математической оценки фазового состава стали./ Т.С. Скобло, Е.Л. Белкин, С.П. Романюк // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка “Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві” – Харків, 2014. – Вип. 146. – С.8-24.
3. Романюк С.П. Исследование особенностей структурных изменений режущего инструмента из сталей 65Г и 20Х13 с помощью математической статистики. /Т. С.Скобло, Е.Л.Белкин, С.П. Романюк //Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка “Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва” – Харків, 2014. – Вип. 151. – С.141-147.
4. Особенности износа дискового режущего инструмента, упрочненного нанопокртиями / Т.С. Скобло, С.П. Романюк та інш. // Проблеми трибології. – Хмельницький, 2014. – №4. – С.44-49.
5. Романюк С.П. Анализ патентов и авторских свидетельств по упрочнению изделий/ С.П. Романюк//Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. “Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві”-Харків, 2015г. – Вип.158. - С.117-126.
6. Повышение долговечности тонкостенного режущего инструмента/Т.С. Скобло, Е.Л. Белкин, С.П. Романюк та інш. // Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка “Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва” – Харків, 2015. – Вип. 163. – С.90-95.
7. Упрочнение режущего инструмента покрытиями / Т.С. Скобло, С.П. Романюк, А.И. Сидашенко, Р.М. Муратов // Металознавство та термічна обробка металів. – Дніпропетровськ, 2015. – №3(70). – С.44-55.
8. Романюк С.П. Разработка комплексного, эффективного способа упрочнения режущего инструмента для переработки сельхозпродукции/Т.С.Скобло, С.П.Романюк, А.И. Сидашенко //Загальнодержавний міжвідомчий науково - технічний збірник

«Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». – Кіровоград: КНТУ, 2015. – Вип. 45. – Частина 1. – С.96 -101.

Патенти на винаходи

9. Патент №95489 України, МПК (2015.01) B23P 9/00, C21D 1/00. Спосіб наноструктурного зміцнення тонкостінного ріжучого інструменту./ Т.С. Скобло, С.П. Романюк та інш.; заявник та патентоутримувач С.П. Романюк. – №u201407614. заявл. 07.07.2014.; опубл. 25.12.14., Бюл. № 24.

10. Патент №98218 України, МПК (2015.01) C23C 14/00, C23C 28/02 (2006.01). Спосіб нанесення нанозміцнюючого покриття для тонкостінних дискових ножів/ Т.С. Скобло, С.П. Романюк, та інш.; заявник та патентоутримувач С.П. Романюк. – №u201410769. заявл. 02.10.2014.; опубл. 27.04.15., Бюл. № 8.

11. Патент №99408 України, МПК (2006.01) G01B 21/08. Спосіб оцінки зносу і залишкової товщини робочого шару деталей з плівковими покриттями. /Т.С. Скобло, А.В. Плугатарев, А.И. Сидашенко, Н.С. Пасько, О.Ю. Ключко, С.П. Романюк; заявник та патентоутримувач Т.С. Скобло і А.В. Плугатарев. – №u201406168. заявл. 04.06.2014.; опубл. 10.06.15., Бюл. № 11.

Основні матеріали та тези конференцій (всього 10)

12. Романюк С.П. Условия эксплуатации ножей для перерабатывающей промышленности и материалы, применяемые для их изготовления/ С.П. Романюк // *Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki - 2013» Techniczne nauki: Przemysł. Nauka i studia. - 2013. - V.29.- str. 19-26.*

13. Математическая оценка структурообразования при эксплуатации ножей, используемых в кондитерском производстве / Т.С. Скобло, С.П. Романюк, А.И. Сидашенко, Е.Л. Белкин // *Современные проблемы освоения новой техники, технологии, организации технического сервиса в АПК: материалы Международной научно-практической конференции. – Минск: БГАТУ, 2014. -№41. – С.225-234.*

14. Романюк С.П. Новый метод оценки фазового состава стали ножей для дробления орехов / Т. С.Скобло, С.П. Романюк, Е.Л.Белкин // *Материалы XVIII международной научно - производственной конференции «Проблемы и перспективы инновационного развития агроинженерии, энергоэффективности и IT-технологий» 26 – 27 мая 2014г. – Белгород, 2014. – С.191.*

15. Романюк С.П. Новый способ упрочнения тонкостенного режущего инструмента нанопокрывтением./С.П. Романюк// *Матеріали VIII Міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», 20-22 травня 2015р. – Київ, 2015. – С.125.*

16. Романюк С.П. Нанопокрывтение - эффективный способ упрочнения режущего инструмента для переработки сельхозпродукции / С.П. Романюк, Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко // *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» 5-6 листопада 2015р. – Кіровоград, 2015р. – С110.*

У закордонних виданнях

17. Романюк С.П. Статистический анализ износа режущего инструмента в перерабатывающей промышленности/Т.С. Скобло, С.П. Романюк // *Хранение и переработка сельхозсырья. – Москва, 2013. – № 7. – С.46-48. (входить до наукометричної бази даних AGRIS).*

18. Романюк С.П. Кинетика структурных изменений ножей в процессе трения

при переработке продукции/Т.С. Скобло, С.П. Романюк, А.И. Сидашенко//Научное обозрение. – Москва, 2014г. – №4. – С.197-204.

19. Романюк С.П. Применение математической статистики при исследовании износа ножей в кондитерском производстве/ Т.С. Скобло, С.П. Романюк, Е.Л. Белкин //Хранение и переработка сельхозсырья. – Москва, 2014. – № 6. – С.46-50. (входить до наукометричної бази даних AGRIS).

20. Романюк С.П. Исследования свойств нанопокровтий на режущем инструменте методом наноиндентирования /Т.С. Скобло, С.П. Романюк, А.И. Сидашенко//Агротехника и энергообеспечение. – Орел, 2014. –№4. – С.92-100.

21. Методика расчета и оценки температурного поля, формируемого при эксплуатации тонкостенного ножа / Т.С. Скобло, С.П. Романюк, А.И. Сидашенко, Е.Л. Белкин // Агротехника и энергообеспечение. – Орел, 2015. – №1(5). – С.8-17.

22. Романюк С.П. Методика определения характера деформации и степени упрочнения поверхности с нанопокровтием/ Т. С.Скобло, С.П. Романюк, Е.Л.Белкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - Москва, 2015. – №9. Том 81. – С.71-74. (входить до наукометричних баз даних: CAS (pt), GeoRef; CAS (core), Scopus, Springer, WoS)

В інших виданнях

23. Романюк С.П. Особенности износа дисковых ножей для кондитерского производства/ Т.С. Скобло, С.П. Романюк, А.И. Сидашенко// Промышленность фокус +. - Харьков, 2012. – №9. – С.38-41.

24. Романюк С.П. Процессы, происходящие в тонкостенных ножах при их изготовлении и эксплуатации/ Т.С. Скобло, С.П. Романюк, А.И. Сидашенко, Е.Л. Белкин// Промышленность в фокусе. – Харьков, 2014. – №3. – С. 54-57.

25. Романюк С.П. Перераспределение углерода в тонкостенном режущем инструменте при эксплуатации/ Т. С. Скобло, С.П. Романюк, Е.Л. Белкин //Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. - Харьков, 2014. - №1. – С.96-105.

АНОТАЦІЯ

Романюк С.П. Підвищення довговічності тонкостінного ріжучого інструменту. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 - матеріалознавство. Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка Міністерства освіти і науки України, Харків, 2016.

На підставі комплексних теоретичних і експериментальних досліджень, запропонована нова технологія зміцнення тонкостінного ріжучого інструмента покриттями із різних матеріалів. Теоретично оцінені температурні поля, що формуються в різних зонах тонкостінного ріжучого інструмента, який піддається інтенсивному зносу і втомній пошкодженості. У ножах зі сталі 65Г вона становить 48°C (в основній частині) і в найбільш тонкій - біля краю леза - 575°C, а зі сталі 20X13 - не перевищує 385°C. Експериментально визначені параметри нанесення і товщина покриттів: WC (використаний іонно - плазмовий метод зміцнення); CrN (вакуумно – дуговий метод). Запропоновано конструктивний спосіб підвищення довговічності тонкостінних ножів наноструктурними покриттями з формуванням смуг жорсткості. Розроблено технологію контролю якості та стану зміцненого та зношеного шару. Запропоновано новий

комплексний оптико - математичний метод оцінки деградації структури при експлуатації ножів та чинників, які призводять до руйнування. Отримано основні механічні характеристики вихідного і зміцненого ріжучого інструмента зі сталі 65Г. Покриття має більш високий рівень нанотвердості і досягає 23,19ГПа (для вихідного не перевищує 4,09ГПа). Пружне відновлення становить 47%. Опір пластичній деформації металу ножа з покриттям CrN збільшився в 93рази. Промислові випробування зміцнених ножів показали підвищення експлуатаційної стійкості в 25 (для покриттів CrN) та 45 разів (для WC).

Ключові слова: тонкостінний ріжучий інструмент, зміцнення покриттями, нітриди, карбіди, властивості, деградація структури, руйнування.

АННОТАЦІЯ

Романюк С.П. Повышение долговечности тонкостенного режущего инструмента. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. - Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2016.

В диссертации, на основании комплексных теоретических и экспериментальных исследований, предложена новая технология упрочнения тонкостенного режущего инструмента покрытиями. Теоретически оценены температурные поля, формируемые в различных зонах тонкостенного режущего инструмента, подвергнутому интенсивному износу и усталостной повреждаемости при эксплуатации. В ножах из стали 65Г она составляет 48°C (в основной части) и в наиболее тонкой – у края лезвия - 575°C, из стали 20X13 - не превышает 385°C. Экспериментально определены параметры нанесения покрытий. Для покрытия WC (нанесено ионно – плазменным методом) основные параметры: давление - $P_{Ar} = 3 \cdot 10^{-3}$ Торр, отрицательное смещение на ВЧ - электроде - $U_{смещ} = -700$ В, внешнее магнитное поле ~ 30 эрстед, время нанесения – 2ч, толщина – 100нм. Для покрытия CrN (нанесено вакуумно – дуговым методом) основные параметры: давление азота - $P = 2 \cdot 10^{-3}$ Торр, отрицательное смещение на подложке составляло $U_{смещ} = -80$ В, ток дуги хромового катода $I_{д} = 110$ А, $I_{фок} = 0,7$ А., время нанесения - 20мин, толщина – 900нм. Предложенная технология включает и предварительную обработку перед нанесением покрытий для активации поверхности, ее очистку ультразвуком (5мин) и ВЧ – разрядом в среде аргона при давлении $P = 2 \cdot 10^{-1}$ Торр и $U_{смещ} = -1$ кВ в течении 15 мин. Предложен способ повышения долговечности тонкостенных ножей наноструктурными покрытиями с формированием ребер жесткости. Разработана технология контроля качества и состояния упрочненного и изношенного слоя. Разработан комплексный оптико – математический метод оценки фазового состава исходных ножей и с покрытием, который позволяет оценить стабильность структуры при эксплуатации ножей и степень деградации упрочняющих фаз, а также однородность свойств в различных зонах режущего инструмента и установить причины его разрушения.

Получены основные механические характеристики исходного режущего инструмента из стали 65Г и упрочненного. Покрытие обладает более высоким уровнем нанотвердості (по сравнению с исходным) и достигает 23,19ГПа (для исходного ножа не превышает 4,09ГПа). Среднее значение модуля упругости покрытия CrN составило 281,19ГПа (для исходного - 204,7ГПа). Упругое восстановление составляет 47%.

Сопротивление пластической деформации металла ножа с покрытием CrN увеличилось в 93 раза по сравнению с исходным. Предложенная новая технология обеспечивает сохранность планшетности инструмента, высокое сопротивление усталостной повреждаемости, повышение износостойкости и эксплуатационной стойкости, снижение отрицательного влияния пор и дефектов, обеспечение эффекта самозатачивания благодаря упрочнению ножей с одной стороны. Выполнены испытания в промышленных условиях на ПАО «Кондитерская фабрика «Харьковчанка». Эксплуатационная стойкость инструмента была повышена в 45 раз у ножей, упрочненных покрытиями WC толщиной 100нм и в 25 раз - CrN толщиной 900нм. Экономический эффект от внедрения разработанной технологии упрочнения покрытиями режущего инструмента в пищевой промышленности составляет 51111грн в год (WC толщиной 100нм) и 61000грн в год (CrN толщиной 900нм).

Ключевые слова: тонкостенный режущий инструмент, упрочнение покрытиями, нитриды, карбиды, свойства, деградация структуры, разрушение.

ABSTRACT

Romaniuk S.P. Increasing of durability of the thin-walled cutting tool. - Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences on speciality 05.02.01. – Materials Science. – Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkov, 2016.

Based on complex theoretical and experimental investigations, a new technology of hardening of the thin-walled cutting tools by coatings from different materials has been proposed. Temperature fields generated in various zones of the thin-wall cutting tool, that undergoes the intensive wear and fatigue defectiveness is estimated theoretically. In knives from 65G steel it is 48 ° C (in the main part) and in the thinnest part, at the edge of the cutting edge, it is 575°C, and from steel 20Cr13 - does not exceed 385°C. Parameters of the covering: WC (ion - plasma method of hardening is used); CrN (vacuum - arc method) - has been defined experimentally. A constructive way of increasing the durability of thin knives by nanostructured coatings with the formation of hardness edges has been proposed. The control technology of quality and of the state of hardened layer and of worn-out layer has been developed. A new complex optical - mathematical method for estimation of structure degradation during the operation of knives has been proposed. The basic mechanical characteristics of initial and hardened cutting tool from the steel 65G has been obtained. The coating has a higher level of the nanohardness and reaches 23,19 GPa (for initial knife does not exceed 4.09 GPa). Elastic recovery is 47%. Resistance to plastic deformation of knife metal with CrN coating has increased in 93 times.

Industrial tests of hardened knives has showed the increasing of operational stability in 25 (for CrN coatings) and in 45 times (for WC).

Keywords: thin-walled cutting tools, hardening by coatings, nitrides, carbides, properties, structure degradation, destruction.

Підписано до друку 04.05.2016р.
Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 120 прим. Зам. №

Надруковано у ЧП "Стиль-издат"
м. Харків, вул. Тринклера, 2, корпус 1, поверх 2, кімната 19
Тел. 758-01-08
www.stil-izdat.com