

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПОДІЛЛЯ  
(м. Хмельницький)

*На правах рукопису*

УДК 621.934: 674.053: 621.785.532.57

**Урбанюк Євген Антонович**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ  
ДИСКОВИХ ПИЛ, ЗМІЦНЕНИХ ІОННИМ АЗОТУВАННЯМ  
В БЕЗВОДНЕВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

**Спеціальність 05.02.02 - *Машинознавство***

**АВТОРЕФЕРАТ**

**дисертації на здобуття наукового ступеня**

**кандидата технічних наук**

**Хмельницький - 1997**



00754133 (N)

рукопис

Робота виконана в Технологічному університеті Поділля  
(м. Хмельницький)

*Науковий керівник* - доктор технічних наук, професор  
Каплун Віталій Григорович

*Офіційні опоненти* - доктор технічних наук, доцент  
Костогриз Сергій Григорович  
- кандидат технічних наук, доцент  
Леськів Володимир Дмитрович

*Провідна організація:* ІПМ НАН України


Захист відбудеться "30" "червня" 1997р.  
о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої Ради Д29.01.01  
при Технологічному університеті Поділля за адресою: 280016,  
Хмельницький-16, вул. Інститутська, 11

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці університету

Автореферат розісланий "22" "травня" 1997р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої Ради Д 29.01.01

кандидат технічних наук, доцент

 Г.С. Калда

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Досвід експлуатації круглопильних верстатів, що використовуються для різання деревини та подібних їй матеріалів, свідчить, що техніко-економічні показники процесу розпилювання дисковими пилами в окремих випадках не відповідають сучасним вимогам.

Ефективність використання круглопильних верстатів залежить від рівня організації виробництва, його технологічної підготовки, технічного стану верстатів та працездатності дискових пил, які використовуються.

Дискові пили для обробки деревини працюють в екстремальних умовах: ріжуча частина зубів пил знаходиться під дією динамічних навантажень, високих температур та абразивно-агресивного середовища, що утворюється при різанні в результаті гідролізу деревини при сухому терті і присутності смол та інших хімічно активних речовин. Тому для збільшення їх довговічності потрібен такий комплекс фізико-механічних і хімічних властивостей поверхні елементів ріжучої частини зубів, який міг би забезпечувати високу зношувальну та корозійну стійкість і, разом з тим, достатній рівень пластичності для протидії крихкому руйнуванню внаслідок динамічних навантажень.

Одним із перспективних методів підвищення зносостійкості пар тертя в умовах дії агресивного середовища та динамічних навантажень є іонне азотування в безводневих насичуючих середовищах. Даний метод зміцнення поверхневого шару не тільки забезпечує високу зносостійкість при терті, але й значно підвищує корозійну стійкість металів і дозволяє уникнути водневого окрихчування в процесі зміцнення.

Ефективність застосування іонного азотування дискових пил в безводневому середовищі для підвищення їх довговічності визначається двома факторами: зносостійкістю ріжучої частини зубів та працездатністю дисків пил. Працездатність дисків круглих пил, в свою чергу, визначається їх міцністю, стійкістю плоскої форми рівноваги, динамічною стійкістю та поперечною жорсткістю.

Основними факторами, дія яких може викликати появу критичного стану і призвести до відмови круглої пили, є сили опору різанню, нерівномірне нагрівання по радіусу диска, по-

чатковий напружений стан, викликаний особливостями виготовлення, зміцнення і підготовки пили, а також обертання диска пили при її роботі на критичних частотах.

З попередніх досліджень відомо, що іонне азотування сталей супроводжується появою в поверхневому азотованому шарі значних стискуючих напружень, які є небажаними в периферійній зоні диска круглої пили. Відомості про зміну поперечної жорсткості диска пили, допустимі частоти обертання та інші показники, з допомогою яких можна було б провести оцінку працездатності дисків азотованих пил, відсутні.

Застосування іонного азотування в безводневих насичуючих середовищах для зміцнення поверхні дискових пил відкриває нові перспективи підвищення їх довговічності. Проте, для цього слід вирішити ряд проблем, пов'язаних із вибором оптимальної технології зміцнення та працездатністю дисків пил.

Для вирішення цих проблем необхідні детальні дослідження, чому і присвячена ця дисертаційна робота.

#### Мета та завдання досліджень.

Метою роботи є підвищення довговічності і працездатності дереворіжучих дискових пил, виготовлених із сталі 9ХФ, методом іонного азотування в безводневому середовищі.

У зв'язку із поставленою метою вирішувались наступні завдання:

- аналіз умов роботи і методів зміцнення круглих пил для деревообробки;
- дослідження процесу азотування в безводневому середовищі сталі 9ХФ;
- дослідження зносостійкості азотованої сталі в лабораторних умовах;
- оптимізація режимів іонного азотування дереворіжучих дискових пил по критерію зносостійкості;
- розробка моделі і дослідження напружено-деформованого стану диска пили після іонного азотування в безводневому середовищі;
- розробка технології зміцнення дискових пил із сталі 9ХФ із врахуванням забезпечення їх працездатності /для конкретних умов експлуатації/;

- економічне обґрунтування ефективності застосування методу іонного азотування в безводневому середовищі для підвищення довговічності дискових дереворіжучих пил.

#### Наукова новизна.

1. Вперше вивчена кінетика іонного азотування в безводневих середовищах сталі 9ХФ та досліджені фізико-механічні властивості і фазовий склад азотованого шару.

2. Досліджена в лабораторних умовах зносостійкість азотованого шару, отриманого на сталі 9ХФ при різних режимах азотування.

3. Проведена оптимізація технологічних режимів азотування сталі 9ХФ по критерію зносостійкості на основі регресійної моделі залежності фізико-механічних та експлуатаційних характеристик азотованого шару від режимних факторів процесу іонного азотування.

4. Досліджено характер зміни параметрів затушення і зношування ріжучої частини зуба азотованої пили до і після переточування, що дозволило зробити висновок про збереження зміцнюючого ефекту після переточувань пил завдяки наявності азотованого шару на бокових гранях зубів.

5. Виконані теоретичні дослідження зміни напруженого стану і плоскої форми диска пили із застосуванням графової моделі пружного тіла та експериментальні дослідження зміни його поперечної жорсткості, які дозволили провести оцінку працездатності диска круглої пили після азотування, встановити допустимі значення геометричних параметрів зони азотування та визначити область допустимих частот обертання.

#### Практична цінність результатів роботи.

Розроблена технологія зміцнення дискових пил, що використовуються для розпилювання деревини, методом іонного азотування в безводневому середовищі.

Застосування іонного азотування приводить до збільшення періоду роботи азотованих пил між переточками, в залежності від умов різання, в 3-5 разів без істотного впливу на стабільність роботи диска і зниження показників якості та енергетичних показників процесу розпилювання.

За рахунок збільшення довговічності азотованих дискових пил витрата дискових пил при збереженні об'ємів виробництва

відповідно скорочується, чим досягається значний економічний ефект.

### Апробація роботи та публікації.

Основні положення дисертації доповідались та обговорювались на Всесоюзній науково-технічній конференції "Новые материалы и технологии термической обработки металлов" (м. Київ, 1985р.), Всесоюзній науковій конференції "Износ в машинах и методы защиты от него" (м. Брянськ, 1985р.), Республіканській науково-технічній конференції "Перспективы развития лесной и деревообрабатывающей промышленности в соответствии с основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года" (м. Свальява, 1986р.), обласній науково-технічній конференції "Применение композиционных материалов в узлах трения технологического оборудования" (м. Хмельницький, 1987р.), науково-практичній конференції з нагоди презентації ТУП "Наукові основи сучасних прогресивних технологій" (м.Хмельницький, 1994р.), науково-практичній конференції "Технологічний університет в системі реформування освіти та наукової діяльності Подільського регіону" (м.Хмельницький, 1995р.), розширеному засіданні кафедри технології машинобудування ТУП (м.Хмельницький, 1996р.).

За результатами виконаних досліджень опубліковано 11 робіт.

### Структура та обсяг роботи.

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, переліку літератури і додатку. Основний текст роботи викладено на 167 машинописних сторінках, в тому числі 48 рисунків і 9 таблиць, окремі матеріали представлені в додатку. Список цитованої літератури містить 125 назв.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтовується актуальність теми, приводиться анотація роботи та основні положення, що визначають наукову та практичну цінність роботи.

В першому розділі на основі проведеного огляду фахових літературних джерел виконаний комплексний аналіз умов роботи та підготовки дискових пил для деревообробки, розглянуті основні концепції зміцнення ріжучої частини зубів та особливості забезпечення працездатності дисків круглих пил.

Приводяться також особливості процесу іонного азотування в безводневому середовищі як методу зміцнення інструментальних і конструкційних сталей нанесенням поверхневого дифузійного азотованого шару. Особлива увага приділялась ефективності методу, ступеню його керованості та екологічній безпеці.

На основі аналізу переваг і недоліків існуючих методів підвищення зносостійкості круглих пил зроблений висновок про те, що іонне азотування є одним із перспективних методів зміцнення ріжучої частини зубів дискових пил, але окремі аспекти його застосування вивчені недостатньо.

На цій основі сформульовані мета і основні завдання досліджень.

У другому розділі викладені методика та засоби проведення досліджень характеристик та властивостей поверхневого зміцненого шару інструментальної сталі 9ХФ після іонного азотування.

Методичною основою досліджень було комплексне вивчення впливу основних технологічних факторів процесу іонного азотування в безводневому середовищі на мікроструктуру, глибину і мікротвердість зміцненого шару, його зносостійкість, характеристики міцності і пластичності зразків з нанесеним азотованим шаром, а також величину залишкових напружень, що виникають в поверхневому шарі після іонного азотування.

Нанесення дифузійного покриття (азотованого шару) на зразки для досліджень проводилось на установці іонного азотування лабораторії прогресивних методів зміцнення Міністерства освіти і НАН України, що працює в ТУП, при режимах, що відповідали плануванню експеримента. Для дослідження комплексного впливу варіювання чотирьох технологічних факторів процесу іонного азотування - температури стадії насичення, тиску в камері, тривалості азотування і складу газового середовища - застосовувався композиційний план Хартлі.

Дослідження впливу режиму іонного азотування на комплекс фізико-механічних властивостей азотованої сталі 9ХФ проводився для наступних інтервалів зміни технологічних параметрів: температура стадії насичення  $t^o=480-600^oC$ , тиск в камері  $p=80-400$  Па, тривалість процесу азотування  $T=20-240$  хвилин і вміст аргону в насичуючому середовищі  $\%Ar_2=0-76$  %.

Металографічні дослідження проводились з використанням металографічного мікроскопа МИМ-10. Мікротвердість та глибина азотованого шару визначались з допомогою приладу ПМТ-3.

Вивчення інтенсивності зношування зміцненого шару, отриманого при різних режимах азотування, проводились на установці торцювого тертя. Вимірювання величини зношування зразка здійснювались з допомогою індикаторного пристрою з точністю  $\pm 0,5$  мкм.

Дослідження характеристик міцності і пластичності зразків з нанесеним азотованим шаром виконувалось на розривній машині 2167 Р50, зразки після розривання підлягали фрактографічним дослідженням з допомогою фотографування при 24-кратному збільшенні.

Визначення величини залишкових напружень в азотованому шарі проводилось методом безперервного видалення напруженого шару травленням при автоматичному записі деформації плоского зразка на спеціальному приладі (ПИОН).

Дослідженнями встановлено, що у прийнятих інтервалах зміни зазначених вище технологічних параметрів фізико-механічні і структурні характеристики азотованого шару змінювались в наступних межах: мікротвердість  $HV_{100} = 4370 - 9090$  МПа, глибина шару  $h = 280 - 650$  мкм, фазовий склад на поверхні характеризувався відсутністю шару із вмістом лише нітридних сполук, натомість відмічалась наявність  $\alpha$  - фази, процентний вміст якої змінювався в широких межах, досягаючи 100%.

Результати досліджень після їх математичної обробки були представлені рівняннями регресійної залежності глибини, мікротвердості, інтенсивності зношування азотованого шару і параметрів міцності та пластичності азотованих зразків від технологічних факторів режиму азотування у вигляді повного квадратичного полінома:

$$\varphi(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

де  $\varphi(x)$  - функція відгуку;

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  - коефіцієнти рівняння регресії;

$x_i, x_j$  - незалежні змінні, тобто технологічні фактори.

Таке представлення результатів досліджень дозволило провести комплексний аналіз відповідних залежностей, визначити інтервали варіювання технологічних факторів з точки зору забезпечення оптимальних значень фізико-механічних властивостей і експлуатаційних характеристик азотованого шару, отриманого на сталі 9ХФ.

Встановлено, що інтервали зміни температури  $t^{\circ} = 520 \dots 560$  °С, тиску в камері  $p = 200 \dots 320$  Па, тривалості азотування  $T = 150 \dots 210$  хвилин при вмісті в газовій суміші 20...50% аргону (рис. 1 і 2) відповідають вказаним вище вимогам.

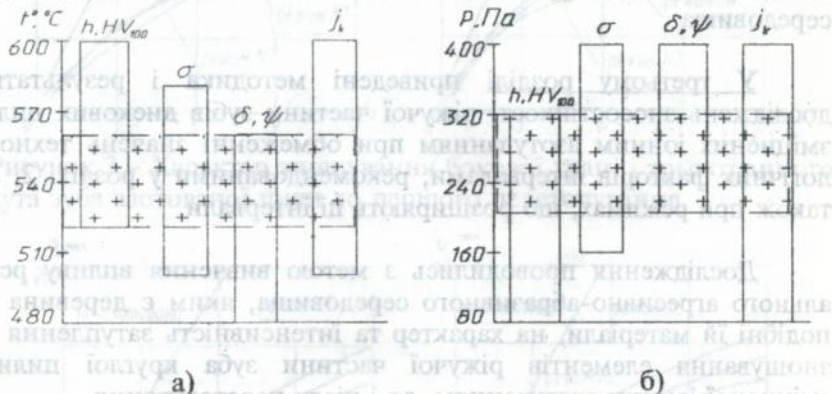


Рисунок 1 - Діаграми вибору оптимальних інтервалів варіювання: а) температури стадії насичення; б) тиску в камері;

Проте, інтенсивність зношування поверхневого шару, з огляду на складність моделювання середовища при різанні різних видів деревини, досліджувалась для нейтрального середовища. Тому визначені інтервали варіювання технологічних факторів можуть бути використані лише для відповідних умов.

Досліджений вплив зміни окремих технологічних факторів на величину і характер розподілу залишкових напружень в

зміцненому шарі, граничні значення яких в поверхневій зоні азотованого шару при різних режимах азотування сталі 9ХФ становлять 380-800 МПа.

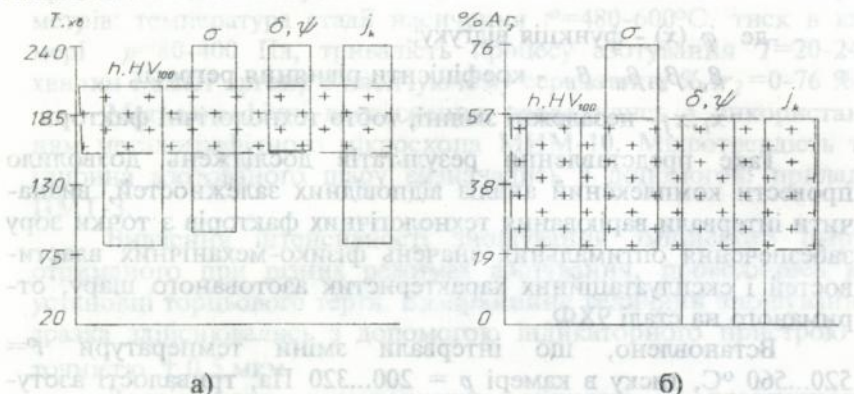


Рисунок 2 - Діаграми вибору оптимальних інтервалів варіювання: а) тривалості дифузійного насичення; б) складу насичуючого середовища

У третьому розділі приведені методика і результати досліджень зносостійкості ріжучої частини зубів дискових пил, зміцнених іонним азотуванням при обмеженні значень технологічних факторів інтервалами, рекомендованими у розділі 2, а також при режимах, що розширюють ці інтервали.

Дослідження проводились з метою вивчення впливу реального агресивно-абразивного середовища, яким є деревина і подібні їй матеріали, на характер та інтенсивність затуплення і зношування елементів ріжучої частини зуба круглої пили, зміцненої іонним азотуванням, до і після переточування.

Фіксація параметрів затуплення і зношування зубів пил ( $A_B$ ,  $A_n$ ,  $A_3$ ,  $r_n$ ,  $H_B$  і  $r_{02}$ ) проводилась фотографуванням профіля зуба у двох проекціях з допомогою мікрометричної насадки і наступним проектуванням зображення на скран при 200-кратному збільшенні. Вимірювання виконувались при використанні спеціальних шаблонів з точністю  $\pm 0,005$  мм.

В результаті досліджень встановлено, що працездатність ріжучої частини зуба азотованої пили визначається, в основному, наявністю на боковій грані зуба зміцненого шару, який не знімається при переточуванні, що дає можливість при одно-

кратному змiцненнi пили iонним азотуванням зберiгати її властивостi до повного використання азотованого шару, нанесеного по периферiї диска на обох його площинах.

Наявнiсть азотованого шару на бокових гранях зубiв дозволяє значно знизити iнтенсивнiсть затуплення бокових рiзучих кромки, що, в залежностi вiд умов рiзання, приводить до збiльшення перiоду роботи пил мiж переточуваннями в 3-5 i бiльше разiв. Переточування зубiв дискових пил, як видно iз рис. 3 i 4 iстотно впливу на зниження працездатностi азотованих пил не мають.

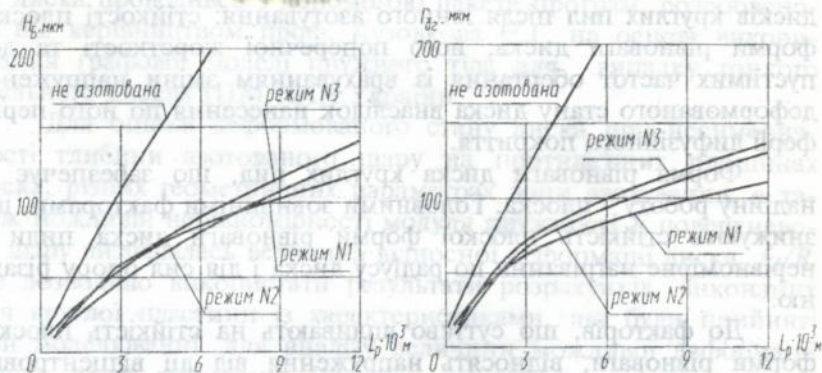


Рисунок 3 - Характер зношування бокової грані і трьохгранного кута зуба азотованої пили до першого переточування



Рисунок 4 - Характер змiни показникiв зношування бокової грані тригранного кута зуба пiсля переточування азотованих пил

Приведені також результати промислових досліджень працездатності дискових пил, зміцнених іонним азотуванням, в умовах роботи окремих деревообробних підприємств України. За результатами досліджень рекомендовані інтервали зміни технологічних параметрів іонного азотування дискових пил із сталі 9ХФ, що враховують конкретні умови їх роботи.

В четвертому розділі приведені результати комплексних теоретичних і експериментальних досліджень працездатності дисків круглих пил після іонного азотування: стійкості плоскої форми рівноваги диска, його поперечної жорсткості та допустимих частот обертання із врахуванням зміни напружено-деформованого стану диска внаслідок нанесення по його периферії дифузійного покриття.

Форма рівноваги диска круглих пил, що забезпечує їх надійну роботу - плоска. Головними зовнішніми факторами, що знижують стійкість плоскої форми рівноваги диска пили є нерівномірне нагрівання по радіусу диска і дія сил опору різанню.

До факторів, що суттєво впливають на стійкість плоскої форми рівноваги, відносять напруження від дії відцентрових сил інерції, попередні напруження від проковування чи вальцювання, а також наявність *залишкових напружень*, що виникають в поверхневому шарі периферійної зони диска внаслідок іонного азотування. Граничні значення зовнішніх факторів, при досягненні яких можлива поява інших форм рівноваги, називають критичними.

З метою оцінки значущості впливу вказаних чинників на стійкість плоскої форми рівноваги дисків стандартних круглих пил для різних умов був проведений аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень з цих питань. За результатами аналізу зроблено висновок про те, що стійкість плоскої форми рівноваги дисків круглих пил після іонного азотування визначається характером розподілу залишкових напружень в периферійній зоні диска.

При симетричному напруженому стані, коли геометричні параметри і фізико-механічні властивості азотованого шару з обох сторін диска однакові ( $h_A = h_B$  і  $E_{IA} = E_{IB}$ , див. рис. 5), а внутрішні напруження в його серединній зоні та зовнішнє на-

вантаження також відсутні, очевидно, що стійкість плоскої форми рівноваги диска в статиці забезпечується. Отже, про відхилення форми диска від плоскої в статиці можемо вести мову лише у випадку наявності флуктуацій фізико-механічних властивостей зміцненого шару або при несиметричності його геометричних параметрів.

Загальна розрахункова схема для таких умов зображена на рис. 5.

Розрахунок характеристик напружено-деформованого стану диска проводився з допомогою пакета програм, розробленого під керівництвом проф. Кузовкова Є.Г. на основі використання графової моделі пружного тіла для випадку тонкого сталюого диска ІПМ НАН України.

Для оцінки деформованого стану диска при несиметричності глибини азотованого шару на протилежних площинах диска, різних геометричних параметрах зони азотування, а також можливій нерівномірності модуля пружності  $E$  поверхневого шару визначалась величина відносної деформації диска  $f_z/R$ . Це дозволило використати результати розрахунків, виконаних для круглої пластини із характеристиками, які були прийняті при моделюванні, для аналізу величини можливої деформації дисків після зміцнення іонним азотуванням круглих пил із іншими геометричними характеристиками.

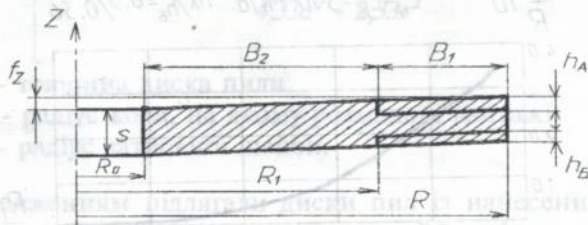


Рисунок 5 - Загальна розрахункова схема

Напружено-деформований стан аналізувався для декількох характерних випадків розбіжності характеристик зміцненого шару з різних сторін диска: при асиметрії тільки глибини азотованого шару (рис. 6 а); при асиметрії як глибини, так і модуля пружності азотованого шару (рис. 6 б).

Важливе значення, особливо при наявності несиметричності глибини азотованого шару, має вплив геометричних пара-

метрів зони азотування, зокрема її ширини і внутрішнього діаметра. Характер зміни кривизни диска при зміні співвідношення  $R_1/R$  азотованої зони показаний на рис. 7.

Геометричні параметри зони азотування ( $R_1 > 0,8R$ ) вибирались із врахуванням забезпечення можливості реалізації усіх способів підготовки диска: проковування або вальцювання серединної зони чи вальцювання по одному колу радіуса  $l = (0,75...0,8)R$ .

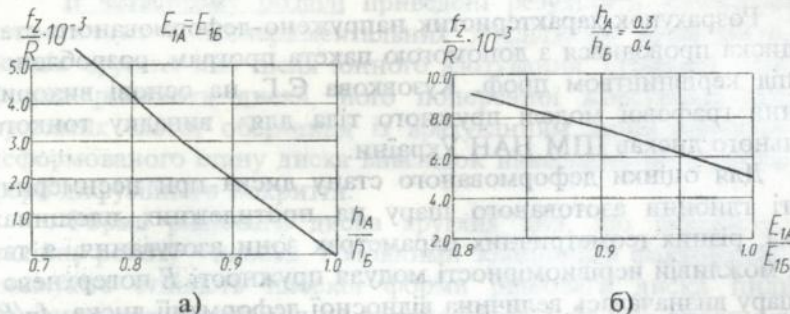


Рисунок 6 - Залежність відносного прогину диска  $f_z/R$  при несиметричності характеристик і властивостей азотованого шару: а) при несиметричності глибини шару; б) при несиметричності глибини і модуля пружності.

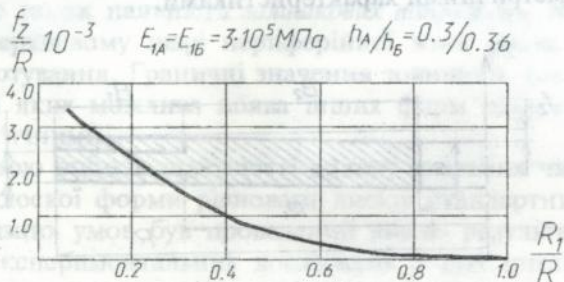


Рисунок 7 - Залежність зміни відносного прогину диска  $f_z/R$  від характеристик зони азотування  $R_1/R$

Аналіз представлених результатів свідчить, що при азотуванні кільцевої периферійної зони диска із внутрішнім радіусом  $R_1 > 0,8R$  для найбільш не вигідних умов розподілу глибини азотованого шару і модуля пружності його поверхневого шару на різних площинах величина осевого прогину диска пили

складає не більше 45% від допустимого відхилення від прямолінійності в контрольній площині диска згідно ГОСТ 24642-81, тобто не є визначальною.

Проведені також дослідження зміни поперечної жорсткості диска пили після нанесення дифузійного азотованого шару при різних режимах азотування. Дослідження виконані з метою оцінки початкового напруженого стану диска пили після зміцнення.

З допомогою спеціального пристрою визначався прогин  $W$  в точках прикладання 4-х зосереджених вантажів вагою 9,8Н, розміщених на кінцях двох взаємоперпендикулярних діаметрів диска пили. За результатами вимірювань з використанням відомої гіперболічної формули поздовжньо-поперечного згинання визначалось відношення величини початкової пластичної деформації  $\varepsilon_z$  від проковування чи вальцювання дисків до її критичної величини:

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{z\text{кр}}} = 1 - \frac{W_0}{W}, \quad (2)$$

де  $W_0$  - прогин диска з нульовим напруженим станом при навантаженні 4-ма зосередженими вантажами.

$$W_0 = \frac{415 \cdot 10^{-9}}{s^3} \left[ \frac{10,99a^4 - 2,33a^2r^2 - 26,24a^2r^2 \ln \frac{a}{r} - 17,32a^2r^2 \left( \ln \frac{a}{r} \right)}{4,33a^2 + 2,33r^2} \right], \quad (3)$$

де  $s$  - товщина диска пили;

$a$  - радіус кола, на якому розміщені вантажі;

$r$  - радіус затискної шайби.

Дослідженням підлягали диски пил із нанесеним азотом шаром і без нього. Аналіз результатів вимірювань прогину по контуру диска дозволив зробити висновок, що іонне азотування периферійної зони круглих пил після проковування чи вальцювання їх дисків зменшує величину коефіцієнта  $K_\varepsilon$  до значень 0,24-0,34 (для прокованих неазотованих пил його величина знаходиться в межах 0,4-0,7), тим самим частково зменшуючи величину початкових напруження розтягування по периферії диска.

Таким чином, було виявлено, що після іонного азотування спостерігається деяке зменшення напружень розтягування в периферійній зоні диска пили. Саме по собі це явище небажане, але незначне зменшення попереднього натягу диска може бути успішно компенсоване повторним проковуванням чи вальцюванням, а описаний метод оцінки напруженого стану дисків азотованих пил, завдяки своїй простоті, може бути рекомендований для широкого використання.

При аналізі напружено-деформованого стану дисків зміцнених пил було зроблене припущення, що присутність додаткових напружень стискання на периферії диска від іонного азотування має такий же вплив на його працездатність, як і фактори, дія яких приводить до появи аналогічних напружень, наприклад, нерівномірність нагрівання диска.

Радикальним засобом боротьби із виникненням коливань із критичними характеристиками є відстроювання частоти зовнішньої збуджуючої сили від частоти власних коливань диска. Зрозуміло, що повне відстроювання тут неможливе, тому основна увага приділялась найбільш небезпечним формам коливань, тобто таким, що виникають при критичній частоті обертання диска  $n_{кр}^{min}$ , а також в закритичній області.

Був проведений аналіз опублікованих результатів досліджень, виконаних у цьому напрямку іншими дослідниками. Результати аналізу свідчать, що основним фактором оцінки працездатності дисків круглих пил при їх підготовці до роботи з використанням сучасних технологій є визначення частоти власних коливань диска.

У випадку диска постійної товщини з нульовим напруженим станом частоту власних коливань в статичі можна визначити згідно виразу

$$v = \left( m_1 \frac{s}{R^2} \sqrt{f^I(c, \lambda)} \right), \quad (4)$$

$$\text{де } m_1 = \sqrt{\frac{E}{48\pi^2(1-\mu)\rho_\mu}};$$

$f^I(c, \lambda)$  - безрозмірна функція.

При підготовці пили до роботи, тобто проковуванні або вальцюванні, змінюється її напружений стан, а, отже, і час-

тота власних коливань, яку у цьому випадку визначають по формулі

$$v_n = \sqrt{v^2 - m_2 \varepsilon_z \frac{f^{III}(c, \lambda, v_1, n_1)}{R^2}}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_z$  - осьова відносна залишкова деформація в зоні проковування чи вальцювання;

$$m_2 = \frac{E}{4\pi^2 \rho_M};$$

$f^{III}(c, \lambda, v_1, n_1)$  - безрозмірна функція.

Інколи вплив ступеню натягування диска пили на частоти власних коливань зручно оцінювати з допомогою виразу, що враховує зміну його напруженого стану:

$$\frac{v}{v_n} = \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{zкp\lambda}}} = \sqrt{\frac{W_0}{W}}, \quad (6)$$

де  $\varepsilon_{zкp\lambda}$  - критична величина осової залишкової деформації в зоні проковування.

Оцінка впливу зміни напруженого стану пили після іонного азотування периферійної зони диска на зміну його власних частот здійснювалась по аналогії - частота власних коливань диска пили після іонного азотування визначалась за виразом:

$$\frac{v_A}{v} = \sqrt{\frac{W_A}{W_0}}, \quad (7)$$

де  $v_A$  - частота власних коливань диска пили з азотованою кільцевою периферійною зоною;

$v$  - частота власних коливань диска пили з нульовим напруженим станом в статиці;

$W_A$  - прогин азотованого диска, визначений за приведеною вище методикою.

Встановлено, що для азотованих дискових пил з геометричними параметрами  $D = 400$  мм і  $s = 2,2$  мм граничні значення власних частот наступні: мінімальні -  $v_A^{\min} = 210 \dots 225$  Гц для умов закріплення диска  $c = 0,1$  і форми коливань із  $\lambda = 1$ ,

максимальні -  $\lambda_A^{\max} = 11396 \dots 12300$  Гц для  $c = 0,6$  і форми коливань  $\lambda = 4$ .

Із врахуванням можливих форм коливань визначена критична частота обертання диска азотованої пили, яка при значенні допустимого температурного перепаду  $\Delta T = 40$  °С становить  $n_{kp \lambda}^{\min} = 3820$  хв<sup>-1</sup>, а відповідна їй робоча частота обертання диска  $n_{роб} < 3247$  хв<sup>-1</sup>.

Таким чином, дискові пили із сталі 9ХФ малих і середніх розмірів ( $D \leq 400$  мм) після їх зміцнення іонним азотуванням в безводневому середовищі відповідають галузевим вимогам працездатності і можуть ефективно використовуватись на верстатах із діапазоном кутової швидкості пильного вала до 3200 хв<sup>-1</sup>.

Приведені також значення допустимих робочих частот обертання для пил із іншими параметрами.

У п'ятому розділі приводиться розроблена методика оцінки економічної ефективності використання круглих пил, зміцнених іонним азотуванням, що враховує збільшення тривалості їх служби, а також витрати на підготовку та реалізацію процесу зміцнення. Збільшення терміну служби дискових пил зумовлюється значним зростанням зносостійкості ріжучої частини зубів азотованих пил в порівнянні із звичайними та зменшенням товщини шару металу, що знімається при переточуванні.

Запропонована методика дозволяє визначити економічний ефект від впровадження даного методу зміцнення дискових пил в конкретних умовах роботи підприємства.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Розроблена добре керована технологія зміцнення іонним азотуванням в безводневих середовищах дискових пил із сталі 9ХФ, яка дозволяє отримувати дифузійний азотований шар із оптимальними фізико-механічними характеристиками, фазовим складом та зносостійкістю, що відповідають конкретним умовам різання та особливостям підготовки пил.

2. На основі аналізу даних літературних джерел показана перспективність застосування іонного азотування круглих дискових пил для поздовжнього і поперечного розпилювання де-

ревини з метою збільшення зносостійкості ріжучої частини зубів.

Проведений аналіз умов виготовлення, підготовки і роботи дискових пил з метою прогнозування придатності запропонованого методу зміцнення, приведені особливості процесу формування на сталях дифузійного азотованого шару методом газо-плазменного насичення в безводневих середовищах.

3. Досліджено характер впливу на фізико-механічні властивості та глибину азотованого шару, отриманого на сталі 9ХФ, зміни технологічних факторів процесу іонного азотування. Для вивчення комплексного впливу факторів застосовано планування експерименту.

Отримані регресійні залежності характеристик азотованого шару від технологічних факторів іонного азотування, проведена оптимізація режимів зміцнення сталі 9ХФ. При цьому визначені оптимальні інтервали варіювання технологічних факторів режиму іонного азотування, що забезпечують максимальні значення характеристик міцності, пластичності і зносостійкості поверхневого азотованого шару.

Визначені також граничні величини залишкових напружень стискання в поверхневій зоні зміцненого шару, отриманого при різних режимах азотування, що становлять 380...800 МПа.

4. Проведені у виробничих умовах дослідження характеру затуплення і зношування зубів дискових пил для поздовжнього і поперечного різання із нанесеним по периферії азотованим шаром. Результати досліджень показали підвищення зносостійкості пил, зміцнених іонним азотуванням, у 3-5 разів (в залежності від умов роботи) в порівнянні із звичайними.

Встановлено, що основний ефект від зміцнення забезпечується наявністю азотованого шару на бокових гранях зубів.

Виявлено, що рекомендований оптимальний діапазон режимів азотування сталі 9ХФ, з огляду на складні умови роботи ріжучої частини зубів при різанні різних порід деревини і подібних їй матеріалів і з врахуванням реальних умов використання азотованих пил, може бути розширений.

Приведені рекомендації режимів азотування круглих пил, що використовуються при розпилюванні м'яких і твердих листяних порід деревини, хвойних порід деревини, клеєної фанери і ДСП.

5. Проведена комплексна оцінка працездатності диска круглої пили після її зміцнення іонним азотуванням.

Виявлено, що відхилення форми диска від плоскої після нанесення азотованого шару при найнесприятливіших умовах знаходиться в межах допустимого відхилення від прямолінійності в контрольній площині диска згідно із ГОСТ 24642-81.

Визначені оптимальні геометричні розміри зони азотування: азотований шар слід наносити на обох площинах диска у вигляді периферійних кілець із внутрішнім радіусом  $R_1 > 0,8R$ .

З метою оцінки зміни загального напруженого стану диска пили проведено експериментальне дослідження зміни поперечної жорсткості диска пили після азотування в статичі.

Зроблено висновок, що іонне азотування приводить до деякого зменшення попередніх напружень розтягування по периферії диска пили. Відновлення ж необхідного для нормальної роботи пили натягу легко може бути забезпечене повторним проковуванням чи вальцюванням.

На основі зміни поперечної жорсткості диска пили після іонного азотування проведено теоретичне дослідження зміни власних частот диска, визначені критичні значення частот обертання диска пили.

Обґрунтований висновок, що дискові пили із сталі 9ХФ малих і середніх розмірів ( $D < 400$  мм) після їх зміцнення іонним азотуванням відповідають галузевим вимогам працездатності і можуть ефективно використовуватись на верстатах вітчизняного та зарубіжного виробництва із діапазоном кутової швидкості пильного вала до  $3200$  хв<sup>-1</sup>.

6. Визначена економічна ефективність застосування іонного азотування дискових пил із сталі 9ХФ із врахуванням витрат на підготовку та реалізацію процесу зміцнення.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ

1. Каплун В.Г., Пастух И.М., Урбанюк Е.А. Упрочнение дисковых пил азотированием в тлеющем разряде // Новые материалы и технологии термической обработки металлов: Тез. докл. Всесоюз. научно-техн. конф. (Киев, окт. 1985г.). - М, 1985. - С. 121-122.

2. Каплун В.Г., Пастух И.М., Силина Л.А., Урбанюк Е.А. Повышение износостойкости фрез азотированием в тлеющем

разряде // Износ в машинах и методы защиты от него: Тез. докл. Всесоюз. научной. конф. - Брянск, 1985. - С. 96-97.

3. Каплун В.Г., Урбанюк Е.А. Повышение стойкости дисковых пил ионным азотированием // Перспективы развития лесной и деревообрабатывающей промышленности в соответствии с основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года: Тез. докл. Республ. научно-техн. конф. - Свалява, 1986. - С. 108-109.

4. Каплун В.Г., Лукьянюк М.В., Паршенко А.В., Урбанюк Е.А. Исследование процесса трения и износа при обработке композиционных материалов // Применение композиционных материалов в узлах трения технологического оборудования: Тез. докл. обл. научно-техн. конф. - Хмельницкий, 1987. - С. 40-41.

5. Каплун В.Г., Пастух И.М., Урбанюк Е.А. Влияние ионного азотирования на износостойкость пары ДСП - хромованадиевые стали // Применение композиционных материалов в узлах трения технологического оборудования: Тез. докл. обл. научно-техн. конф. - Хмельницкий, 1987. - С. 50-52.

6. Урбанюк Е.А. Прогнозирование свойств инструмента, упрочненного ионным азотированием // Управление триботехническими и прочностными свойствами механических систем: Сборник научных трудов ХТИ. - К.: УМК ВО, 1990. - С. 17-19.

7. Урбанюк Е.А. До питання оцінки динамічної стійкості дисків круглих пил після іонного азотування // Наукові основи сучасних прогресивних технологій: Тези допов. науково-практ. конф. з нагоди презентації ТУП. - Хмельницький, 1994. - С. 156.

8. Каплун В.Г., Урбанюк Е.А. Вплив додаткових напружень від іонного азотування на працездатність дискових пил // Технологічний університет в системі реформування освіти та наукової діяльності Подільського регіону: Тези допов. наук.-практ. конф. - Хмельницький, 1995. - С. 124-125.

9. Урбанюк Е.А. Оцінка напруженого стану дисків круглих пил після іонного азотування // Проблеми сучасного машинобудування: Збірник наукових праць (До 30-річчя МФ ТУП). - Хмельницький, 1996. - С. 27-28.

10. Каплун В.Г., Кузовков Е.Г., Урбанюк Е.А. Аналіз напружено-деформованого стану дискових пил після іонного азотування // Проблеми трибології (Problems of Tribology): Міжна-

родний науковий журнал. - Хмельницький, 1996. - №1. - С. 96-100.

11. Каплун В.Г., Урбанюк Є.А. Визначення частоти власних коливань диска пили після іонного азотування як критерію оцінки його працездатності // Актуальні проблеми техніки і суспільства: Збірник статей викладачів та наукових співробітників ТУП. Вип.2. - Хмельницький: ТУП, 1996. - С.136-139.

## АННОТАЦІЯ

Урбанюк Є.А. Исследование работоспособности и долговечности дисковых пил, упрочненных ионным азотированием в безводородных средах.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.02 "Машиноведение", - ТУП. 1997.

В работе рассмотрены вопросы повышения износостойкости дисковых пил из стали 9ХФ. Исследован механизм затупления и изнашивания режущей части зубьев с упрочненным слоем, изучены аспекты влияния остаточных напряжений в азотированном слое на работоспособность диска пилы.

## THE SUMMARY

Urbanjuk Y.A. Investigation of capacity for work of circular saws, consolidated by ionitriding in non-hydrogenous mediums.

The thesis for scientist degree of Candidate (technical sciences), speciality 05.02.02 "Machine studyings", - TUP. 1997.

The work considers the questions of increasing wear steadfastness of circular saws made of steel 9ХФ.

Mechanism of blunting and wearing out of teeth's cutting parts with strengthened layer is investigated. Also aspects of residual strains'influence on the capacity for work of saw's disk in nitrogen layer are studied.

Ключові слова: диск, пила, зносостійкість, іонне азотування, залишкові напруження, працездатність.

8 ee + c 8A

Підписано до друку 19.05.97.  
1,0 друк. арк., 1,25 ум. друк. арк.  
Наклад 100 прим.      Замовл. №107

---

Редакційно-видавничий центр ТУП.  
280016 м.Хмельницький, вул.Інститутська 7/1

436544

