

Міністерство освіти і науки,  
молоді та спорту України

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**КОНДРАТ ГАННА ГЕОРГІЇВНА**



УДК 621.91.01

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ІНСТРУМЕНТІВ  
ІЗ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ ЗА РАХУНОК ПЛІВКОВИХ ПОКРИТТІВ З  
РІЗНИМИ АДГЕЗІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки,  
верстати та інструменти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технології машинобудування в Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти та науки, молоді та спорту України, м. Запоріжжя.

Науковий керівник :

доктор технічних наук, професор  
**Внуков Юрій Миколайович,**  
Запорізький національний технічний  
університет,  
проректор з наукової роботи,  
завідувач кафедри технології  
машинобудування

Офіційні опоненти :

доктор технічних наук, професор  
**Тонконогий Володимир Михайлович,**  
Одеський національний політехнічний  
університет, директор Інституту промислових  
технологій, дизайну та менеджменту

доктор технічних наук, професор  
**Залого Вільям Олександрович,**  
Сумський державний університет,  
завідувач кафедри технології  
машинобудування, верстатів та інструментів

Захист дисертації відбудеться «24» травня 2012 р. о «14» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.12 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «18» квітня 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Пермяков О. А.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Підвищення стійкості різальних інструментів є однією з нагальних проблем сучасної металообробки. У зв'язку з цим широкого застосування набули інструменти з покриттями, оскільки завдяки надтонкій плівці (товщина сягає декількох мікрометрів), не змінюючи об'ємних характеристик інструментального матеріалу в цілому, можна досягти підвищення стійкості інструмента у декілька разів. Однак далеко не завжди вдається отримати позитивний результат від застосування покриттів. Це пов'язано з тим, що, не дивлячись на широке застосування, механізм дії плівкового покриття не до кінця розкрито, і, отже, шляхи його вдосконалення і умови ефективного використання іноді визначені невірно, і, як наслідок, підвищення стійкості при застосуванні покриття не спостерігається, а в окремих випадках навіть відбувається зниження стійкості інструменту з покриттям порівняно зі звичайним інструментом.

Таким чином, розкриття механізму дії плівкового покриття на процес різання і визначення умов ефективного використання інструментів зі швидкорізальної сталі з покриттями, є актуальною задачею, що визначила напрямок досліджень даної дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано на кафедрі технології машинобудування Запорізького національного технічного університету у рамках державних НДР МОНмолодьспорту України: «Підвищення вібростійкості процесу фрезерування нежорстких деталей» (ДР № 0109U000219) та «Дослідження впливу адгезійної активності фрикційної пари на підвищення її працездатності при різних умовах експлуатації» (ДР № 0111U010624), де здобувач була виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі досліджень.** Метою досліджень є виявлення можливостей підвищення зносостійкості інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок нанесення на їх контактні поверхні плівкових покриттів з різними адгезійними властивостями.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено наступні задачі:

1. Визначити механізм дії адгезійної активності контактних поверхонь інструмента із швидкорізальної сталі на основні характеристики процесу різання та стружкоутворення.
2. З'ясувати експериментальними та розрахунковими методами вплив плівкового покриття на формування складових сили різання, температури та контактні характеристики процесу різання інструментами із швидкорізальної сталі.
3. Дослідити працездатність інструментів з плівковими покриттями при різних умовах різання (різні оброблювані матеріали, постійний та змінний перетин зрізу).
4. Визначити вплив різних умов експлуатації на механізм зносу інструментів із швидкорізальної сталі з плівковими покриттями.
5. Розробити загальну схему і дати практичні рекомендації щодо складу оптимального багат шарового покриття для обробки залізовуглецевих матеріалів

інструментами із швидкорізальної сталі на основі дослідження основних експлуатаційних характеристик покриттів із нітридів перехідних металів IV-VI груп.

*Об'єкт дослідження* - процес механічної обробки інструментами із швидкорізальної сталі з плівковими покриттями.

*Предмет дослідження* – працездатність інструментів із швидкорізальної сталі з різними адгезійними властивостями їх контактних поверхонь.

**Методи дослідження.** Теоретичні, експериментальні та промислові дослідження, розробка практичних рекомендацій проводились на основі положень теорії різання, експлуатації інструментів і технології машинобудування. Дослідження експлуатаційних характеристик плівкових покриттів виконувалось за допомогою оригінальних установок (трибометр для визначення відносної адгезійної активності плівок, пристрій для визначення міцності зчеплення покриття з інструментальною основою методом нанесення подряпин). Для дослідження осередків зносу використовувались методи оптичної та растрової електронної мікроскопії. Сили різання вимірювались за допомогою універсального динамометру УДМ-600, сигнал з якого через підсилювач та АЦПФ передавався на ПК для подальшої обробки. Для визначення теплових характеристик процесу різання було застосовано експериментально-розрахунковий метод Резникова А.Н. Експерименти проводились на базі Запорізького національного технічного університету та ДП «УкрНДІспецсталь» (м. Запоріжжя).

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

- експериментально встановлено, що механізм дії покриттів на процес різання полягає в зміні умов тертя на контактних поверхнях інструменту внаслідок зміни їх адгезійної активності до оброблюваного матеріалу;

- вперше доведено, що адгезійна активність контактних поверхонь інструменту є властивістю, змінюючи яку, можна керувати місцем розташування та розмірами осередку зносу на передній поверхні інструменту, а отже, збільшувати його стійкість;

- експериментально встановлено, що інструментальний матеріал проявляє властивість адгезійної активності до оброблюваного матеріалу не на всій площині контакту зі стружкою, а лише на ділянці «пружного» контакту, який і визначає рівень складно-напруженого стану на ділянці «пластичного» контакту у різальній крайки;

- вперше визначено умови ефективної експлуатації інструментів зі швидкорізальної сталі з покриттями в залежності від оброблюваного матеріалу (залізвуглецеві сталі, жароміцні сплави тощо), виду обробки (точіння, фрезерування тощо), товщини зрізу та місця розташування покриття на інструменті (передня, задня поверхня чи обидві); а також умови, в яких використання покриттів недоцільне.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що розроблено схему конструювання багат шарового покриття оптимального складу для підвищення працездатності інструментів із швидкорізальної сталі при обробці різних матеріалів. Працездатність запропонованого багат шарового покриття підтверджено актами випробувань, отриманих на ДП «УкрНДІспецсталь» (м. Запоріжжя) при нарізанні різи

мітчиками (досягнуто підвищення стійкості до 10 разів), що дає змогу стверджувати, що при впровадженні результатів роботи у виробництво можна досягти суттєвого економічного ефекту.

Результати роботи використані в навчальному процесі на кафедрах металорізальних верстатів та інструменту та технології машинобудування Запорізького національного технічного університету при викладанні лекційних курсів з дисциплін «Теорія різання» та «Технологія виготовлення інструментів».

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні дослідження (визначення контактних характеристик процесу різання, розрахунок розподілу напружень та температур на контактних поверхнях інструменту), що увійшли до дисертації, виконані здобувачем самостійно. Постановка задач, експериментальні дослідження та обговорення результатів виконані спільно з науковим керівником і частково зі співавторами публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації доповідались на Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України - очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Одеса, 2007р., м. Запоріжжя, 2009р., м. Житомир, 2011р.); Міжнародному науково - технічному семінарі «Високі технології: тенденції розвитку» Інтерпартнер (м. Харків – м. Алушта, 2008, 2011 рр.).

У повному обсязі дисертація доповідалась на міжкафедральному семінарі кафедри технології машинобудування та кафедри металорізальних верстатів та інструменту Запорізького національного технічного університету.

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено в 7 публікаціях у наукових фахових виданнях України.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел, додатку. Повний обсяг дисертації становить 183 сторінки; з них: 85 рисунків по тексту, 11 рисунків на окремих 11 сторінках, 19 таблиць по тексту, 4 таблиці на окремих 4 сторінках, список використаних джерел з 99 найменувань на 9 сторінках, 1 додаток на 3 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

*У вступі* дана загальна характеристика роботи, обґрунтовано її актуальність, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію про апробацію та публікації основних результатів роботи.

*У першому розділі* на основі аналізу наукових праць вчених: Верещаки А.С., Внукова Ю.М., Григор'єва С.М., Залого В.О., Костюка Г.І., Крюкова В.К., Мацевітого В.М., Тонкононого В.М., Трента Е.М та ін. представлено сучасні уявлення про вплив плівкових покриттів на працездатність інструментів із швидкорізальної сталі та основні напрямки підвищення їх експлуатаційних характеристик; а також зроблено висновок про те, що за рахунок зміни адгезійної активності інструменту до оброблюваного матеріалу можна досягти значного підвищення зносостійкості інструментів із швидкорізальної сталі.

У другому розділі описані методи та умови проведення експериментів з визначення основних експлуатаційних характеристик плівкових покриттів з нітридів перехідних металів IV-VI груп періодичної системи: Ti, Zr, Hf; V, Nb; Cr, Mo. Досліджували такі характеристики: адгезійну активність плівкових покриттів до досліджуваних оброблюваних матеріалів; міцність зчеплення плівок з інструментальною основою; власну міцність плівок.

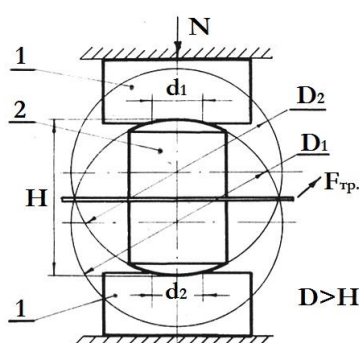
Для визначення відносної адгезійної активності плівкових покриттів до досліджуваних оброблюваних матеріалів використовувався трибометр, який дозволяє моделювати тертя в умовах зчеплення. Показником, що визначається, є коефіцієнт відносної адгезійної активності (рис.1)

$$K_{адг} = \frac{\Delta S_i}{\Delta S_{em}} = \frac{\Delta F_{екс}^i \cdot \tau_{зс}^{em} \cdot S_{em}}{\Delta F_{екс}^{em} \cdot \tau_{зс}^i \cdot S_i}, \quad (1)$$

де  $\Delta S_{em}$ ,  $\Delta S_i$  – адгезійна активність відповідно матеріалу індентора з еталонної та досліджуваної інструментальної сталі до оброблюваного матеріалу;  $\tau_{зс}^{em}, \tau_{зс}^i$  – опір оброблюваного матеріалу зсуву, залежить від навантаження (зміцнення) і температури  $T^\circ C$  (знеміцнення);  $\Delta F_{екс}^{em}, \Delta F_{екс}^i$  – приріст сили тертя при постійному для всіх випадків значенню кута повороту  $\Delta\varphi$  кульового індентора для еталонної та досліджуваної пари (визначається експериментально);  $S_{em}, S_i$  – номінальна поверхня тертя для еталонної та досліджуваної пари.

Оцінку міцності зчеплення плівки з інструментальною основою виконували на спеціальному приборі методом дряпання алмазним конусом. За критичне навантаження прийнято нормальну силу, при прикладенні якої відбувалася втрата зчеплення плівки з основою.

Визначення власної міцності плівкових покриттів проводили методом вдавлювання індентора (алмазного конуса Роквелла) при різних навантаженнях. Міцність оцінювали за ступенем руйнування матеріалу плівки на валику деформації.



Вузол тертя:

- 1 – зразки з оброблюваного матеріалу;
- 2 – індентор з інструментального матеріалу.



- 1 – залежність сили тертя від кута повороту на еталонному зразку;
- 2 – залежність сили тертя від кута повороту на вимірюваному зразку.

Рис. 1. Схема визначення відносної адгезійної активності

У *третьому розділі* визначено механізм впливу адгезійної активності інструментального матеріалу на формування основних характеристик процесу різання та осередку зносу інструмента.

При точінні з підігрівом передньої поверхні різця вплив температури на характер «типових кривих» при різанні інструментом з плівковим покриттям не виявлено; це доводить, що температура впливає на процес різання не безпосередньо, а через зміну адгезійної активності контактних поверхонь інструмента і скорочення довжини контакту.

При нанесенні додаткових адгезійно-активних шарів на контактні поверхні інструменту з покриттям TiN отримано «типіві криві» наближені до тих, що були побудовані при точінні інструментом без покриття. Отже, адгезійна активність впливає на характеристики процесу різання та стружкоутворення безпосередньо, і може бути використана як важіль управління ними.

Дослідження ролі «пружної» та «пластичної» ділянок контакту на передній поверхні інструменту проводилось при точінні різцями з чотирма варіантами нанесення покриття (рис.2).

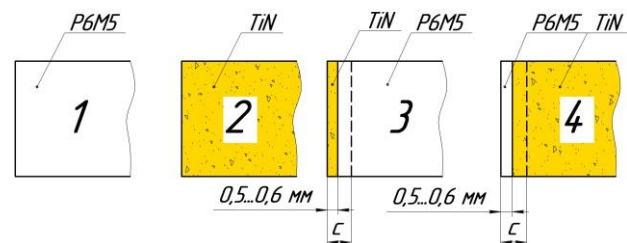


Рис.2. Варіанти нанесення покриття на передню поверхню інструменту

На рис.3 показані «типіві криві», отримані при точінні різцями з варіантами нанесення покриття на передню поверхню, зображеними на рис.2. Криві утворили пари, які складаються відповідно: 1 і 3 – покриття відсутнє на ділянці «пружного контакту», 2 і 4 – покриття нанесене на ділянку «пружного контакту». Доведено, що адгезійна активність інструментального матеріалу проявляється саме на «пружній ділянці» контакту, за рахунок чого і відбувається скорочення довжини контакту при зниженні адгезійної активності.

Дослідження впливу адгезійної активності інструменту на місце розташування та швидкість поширення осередку зносу проведено при точінні сталі 45 інструментами з чотирма варіантами передньої поверхні: без покриття; з покриттям TiN; а також з додатковим адгезійно-активним шаром титану VT1-00 і з додатковим адгезійно-активним шаром на основі заліза, нанесеними на покриття TiN. При нанесенні додаткових адгезійно-активних шарів збільшується ширина лунки зносу та загальна довжина контакту (порівняно з інструментом з покриттям TiN); проте одночасно збільшується ширина «полички», тобто, осередок зносу формується на більшій відстані від різальної крайки (тоді як покриття TiN навпаки – скорочує цю відстань). Отже, змінюючи адгезійну активність контактних поверхонь інструменту, можна керувати місцем розташування і величиною осередку зносу, а значить – і стійкістю інструменту.

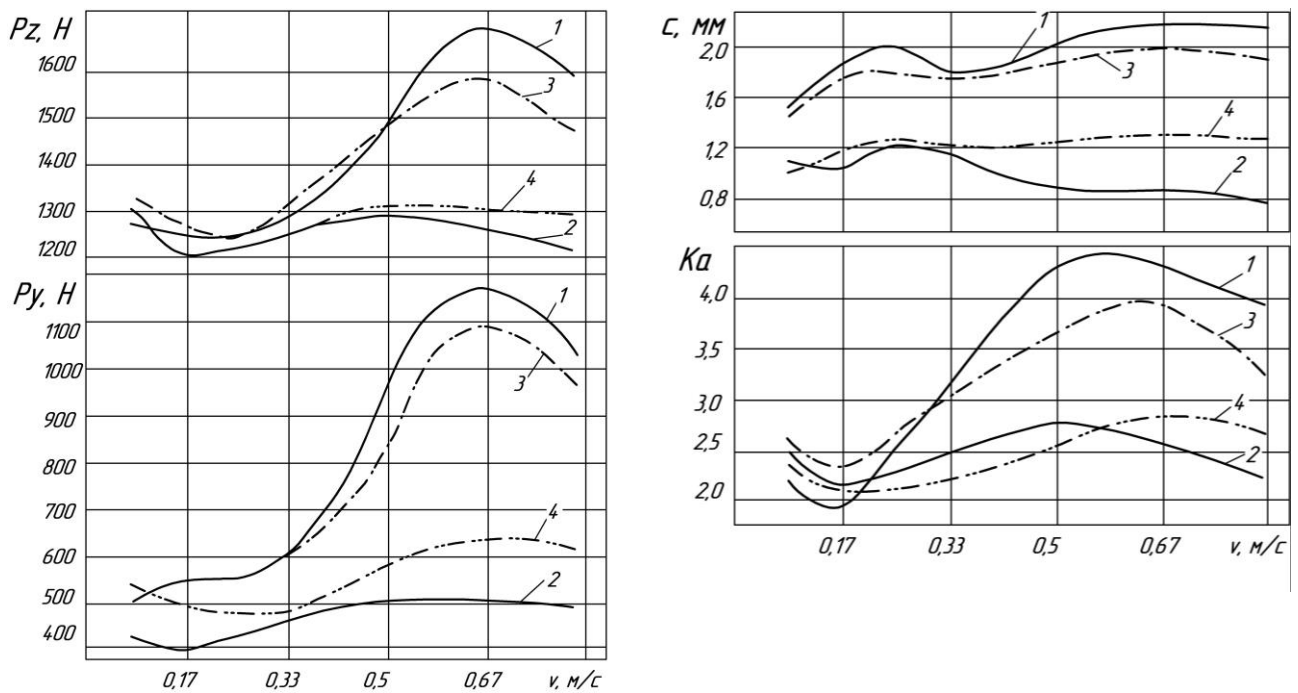


Рис.3. Вплив розташування зон передньої поверхні з різною адгезійною активністю на характер «типових кривих» (номери кривих відповідають номерам варіантів передньої поверхні на рис.3)

Для виявлення матеріалів, при обробці яких використання покриттів є ефективним, за допомогою трибометра визначено коефіцієнт відносної адгезійної активності  $K_{адг}$  інструменту зі сталі Р6М5 з покриттям TiN до різних оброблюваних матеріалів (табл. 1), з наступною обробкою досліджуваних матеріалів даним інструментом. Результати вимірів отриманих при точінні довжин контакту  $c$  і усадки стружки  $k_a$  представлені на рис. 4.

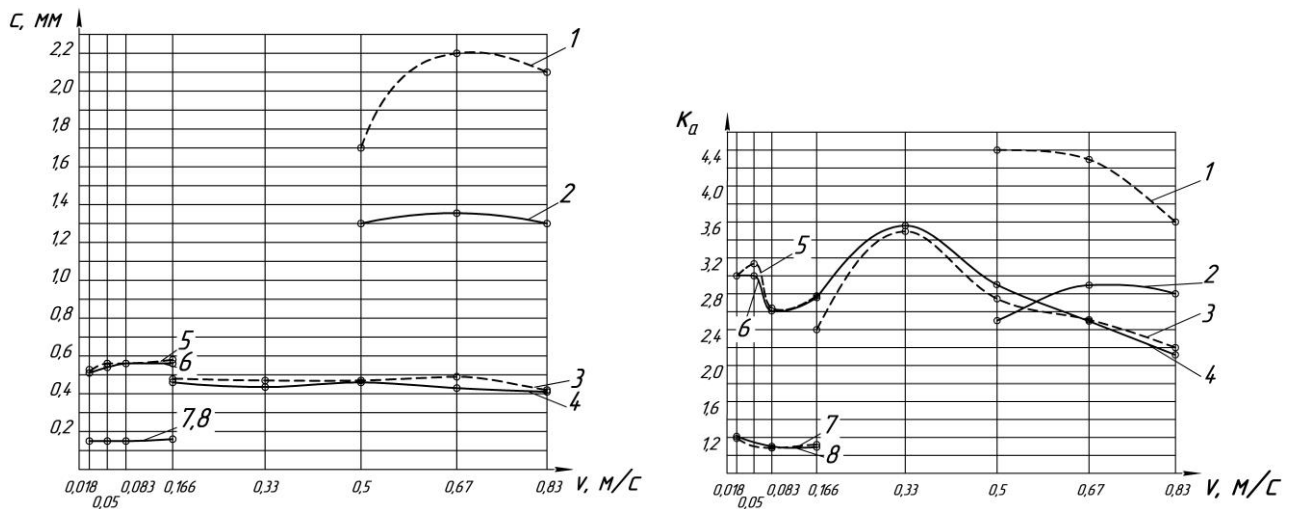
Аналіз експериментальних даних табл.1 і рис. 4, показав, що існують матеріали, при обробці яких застосування покриттів неефективне: при різанні важкооброблюваних матеріалів впливу адгезійної активності інструментального матеріалу на контактні характеристики процесу різання не виявлено (значна різниця в довжині контакту, та усадці стружки спостерігається лише при обробці сталі 45).

Таблиця 1

**Коефіцієнти відносної адгезійної активності нітриду титана до різних оброблюваних матеріалів порівняно з еталоном зі сталі Р6М5 (виміряно на трибометрі)**

Матеріал інстру-менту	Оброблюваний матеріал											
	Сталь 45			12Х18Н10Т			ХН77ТЮР			ВТ1-00		
	$\Delta F / S$	$v$	$K_{адг}$	$\Delta F / S$	$v$	$K_{адг}$	$\Delta F / S$	$v$	$K_{адг}$	$\Delta F / S$	$v$	$K_{адг}$
Р6М5 (еталон)	0,140	0,11	1,0	0,35	0,08	1,0	0,349	0,13	1,0	0,485	0,116	1,0
Плівка TiN	0,046	0,16	<b>0,33</b>	0,07	0,19	<b>0,20</b>	0,288	0,12	<b>0,82</b>	0,603	0,137	<b>1,24</b>





- |                  |                  |                 |               |
|------------------|------------------|-----------------|---------------|
| 1 – Сталь 45/BC  | 3 – 12X18H10T/BC | 5 – ХН77ТЮР/BC  | 7 – ВТЗ- 1/BC |
| 2 – Сталь 45/TiN | 4– 12X18H10T/TiN | 6 – ХН77ТЮР/TiN | 8 – ВТЗ-1/TiN |

Рис. 4. Вплив адгезійної активності на довжину контакту і усадку стружки при обробці різних матеріалів

**Четвертий розділ** присвячено дослідженню впливу покриття на формування температурно-силових та контактних характеристик на різальному інструменті. Експерименти проводили при точінні сталі 45, сталі ШХ15 та жароміцного сплаву ХН77ТЮР. При точінні сталі 45 вимірювали вертикальну  $P_1$  і горизонтальну  $P_2$  складові сили різання при різних режимах обробки (швидкість різання змінювали від 0,166 м/с до 2,33 м/с; задавали 5 подач, що забезпечували зміну товщини зрізу більш ніж в 10 разів (від  $s = 0,39$  мм/об до  $s = 0,036$  мм/об). Точіння виконували інструментом зі швидкорізальної сталі Р6М5 без покриття та з покриттям TiN. Виявлено, що ступінь впливу покриття на складові сили різання зменшується зі зменшенням товщини зрізаного шару. Аналогічні результати були отримані при точінні сталі ШХ15. При різанні сплаву ХН77ТЮР вплив покриття практично був відсутній на всіх режимах обробки.

Для оцінки впливу покриття на параметри стружкоутворення були виміряні складові сили різання, довжини контакту по передній і задній поверхнях інструменту, усадка стружки (табл. 2), за значеннями яких були розраховані величини середнього кута тертя, кута зсуву, сили стружкоутворення, кута дії, середнього нормального напруження, середнього дотичного напруження (табл.3). Аналіз отриманих даних показав, що нанесення покриття на інструмент викликає скорочення довжини контакту, що, в свою чергу, призводить до зростання нормальних напружень, зменшення кута дії, величини сили стружкоутворення, збільшення кута зсуву. Необхідно відмітити, що при цьому величина середніх дотичних напружень змінюється несуттєво.

## Результати експерименту

Матеріал інструменту	Складові сили різання, Н			Довжина контакту, мм		Усадка стружки		Уширення стружки
	$P_z$	$P_y$	$P_x$	$C$	$C_2$	$K_l$	$K_a$	$K_b$
P6M5	1210	580	390	1,05	0,08	2,54	1,87	1,36
P6M5+ TiN	1170	460	290	0,80	0,09	2,28	1,67	1,36

## Основні параметри процесу стружкоутворення

Матеріал інструменту	Середній коефіцієнт тертя	Кут зсуву, град	Сила стружкоутворення, Н	Кут дії, град	Середнє нормальне напруження, Н/мм <sup>2</sup>	Середнє дотичне напруження, Н/мм <sup>2</sup>
	$\mu$	$\beta_1$	$R$	$\omega$	$q_N$	$q_F$
P6M5	0,839	30,0	1397	29,6	535	449
P6M5+ TiN	0,698	33,0	1290	24,2	694	484

Дослідження впливу адгезійної активності інструменту на характер розподілу і величини контактних напружень (нормальних і дотичних) та температур було виконано на режимах різання, що забезпечують постійне значення усадки стружки та відсутність наросту (табл. 4).

**Режими різання, встановлені для розрахунку розподілу контактних напружень та температур і проведення випробувань на стійкість інструменту зі швидкорізальної сталі**

Номер режиму	Подача $s$ , мм/об	Товщина зрізу $a$ , мм	Швидкість різання $v$ , м/с	Усадка стружки $K_a$
1	0,520	0,370	0,666	2,61
2	0,390	0,280	0,100	2,60
3	0,210	0,150	1,333	2,62
4	0,140	0,100	1,666	2,60
5	0,070	0,050	2,166	2,65
6	0,036	0,025	2,166	2,63

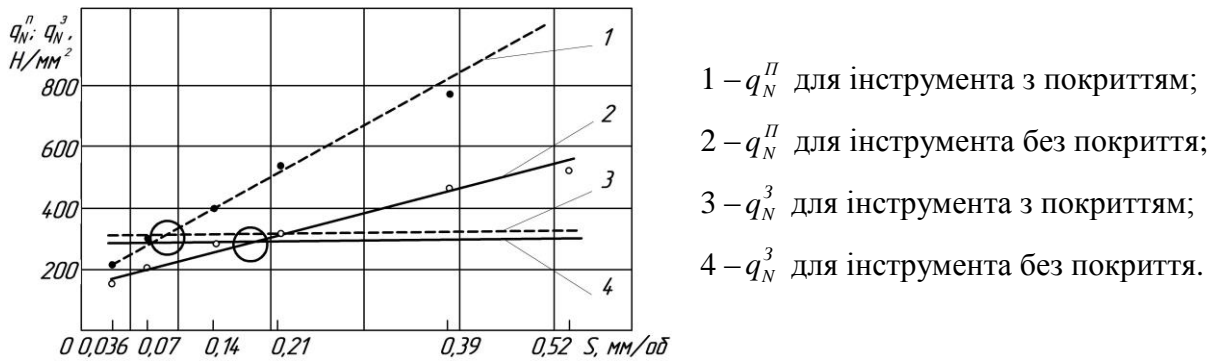


Рис. 5. Вплив товщини зрізу при точінні сталі 45 на значення середніх нормальних напружень на передній і задній поверхнях інструменту

За результатами експерименту розраховано середні нормальні напруження на передній  $q_N^{II}$  і задній  $q_N^3$  поверхнях інструменту (рис.5). Напруження на задній поверхні визначалися методом екстраполяції на нульову товщину зрізу. Нормальні напруження на передній поверхні інструменту з покриттям значно перевищують напруження, що виникають при різанні інструментом без покриття. Нормальні напруження на задній поверхні практично однакові для обох інструментів, крім того, вони не залежать від товщини зрізу.

Розподіл нормальних напружень на передній поверхні інструменту в залежності від товщини зрізу розраховано за методикою М.Ф. Полетики. Результати розрахунку показали, що скорочення довжини контакту призводить до збільшення нормальних напружень у інструмента з покриттям порівняно з інструментом без покриття, причому різниця зменшується зі зменшенням товщини зрізу, і при малих зрізах практично зникає. Аналогічні результати отримані для розподілу контактних температур (розрахунок за методом теплових потоків). Середні температури на інструменті з покриттям нижчі, проте теплові потоки більш інтенсивні, і температурний максимум знаходиться ближче до різальної крайки, ніж у інструмента без покриття.

**У н'ятому розділі** розглянуто працездатність інструментів зі швидкорізальної сталі з покриттям TiN при обробці різних матеріалів з різними товщинами зрізу. У якості критерію зносу прийнято повне теплове затуплення інструменту як таке, що є найбільш об'єктивним, оскільки не пов'язане з вимірюванням розмірів осередку зносу на інструменті (осередки зносу на інструменті з покриттям і без нього мають різні розміри і місця розташування, тому не можуть бути порівняні).

Дослідження проводились при точінні сталі 45 з режимами, наведеними в табл. 4. Встановлено, що існує так зване критичне значення подачі, при якому покриття не проявляє свого позитивного впливу (рис. 6). При збільшенні і зменшенні подачі відносно критичного

значення відносна стійкість інструмента з покриттям -  $\frac{\bar{T}_{P6M5+TiN}}{\bar{T}_{P6M5}}$  зростає.

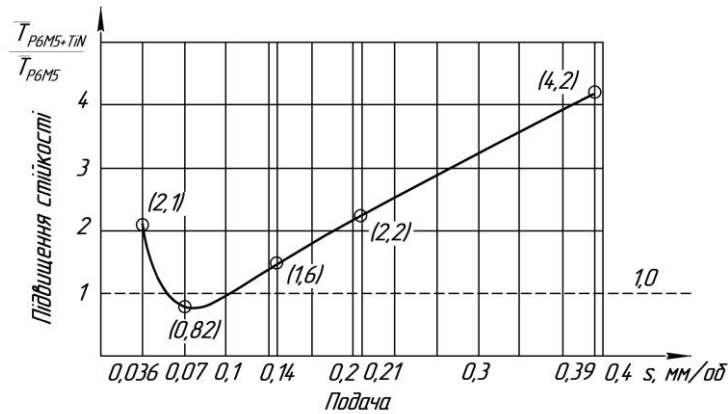


Рис. 6. Вплив подачі –  $s$  на ефективність застосування інструменту з покриттям при точінні сталі 45 (режими різання - табл.6)

Дослідження впливу місця розташування покриття на інструменті (лише на передній або лише на задній поверхні), проведені при точінні і фрезеруванні сталі ШХ15, а також при фрезеруванні сталі 45, показали, що при умовах роботи, подібних до фрезерування, покриття проявляє свій вплив лише на задній поверхні інструменту, в той час, як ефект від нанесення покриття на передню поверхню зростає зі збільшенням товщини зрізу. Випробування на стійкість інструменту з покриттям TiN при фрезеруванні аустенітної нержавіючої сталі 12X18H10T не виявили його переваг перед інструментом без покриття.

**Шостий розділ** присвячено дослідженню механізмів зносу інструментів зі швидкорізальної сталі з покриттям TiN при різних умовах експлуатації (при точінні і фрезеруванні різних оброблюваних матеріалів: конструкційної сталі 45, нержавіючої сталі 12X18H10T та жароміцного сплаву ХН77ТЮР). За результатами експериментів з точіння сталі 45 було побудовано схему руйнування покриття на передній поверхні інструменту зі швидкорізальної сталі при різних товщинах зрізу (рис. 7).



Рис.7. Схема утворення тріщин у плівковому покритті на передній поверхні інструменту при точінні сталі 45 з різними товщинами зрізу

а –  $s = 0,39$  мм/об ( $a = 0,271$  мм),  
 $s = 0,21$  мм/об ( $a = 0,148$  мм),  
 $s = 0,14$  мм/об ( $a = 0,12$  мм);

б –  $s = 0,07$  мм/об ( $a = 0,05$  мм);  
в –  $s = 0,036$  мм/об ( $a = 0,025$  мм)

Встановлено, що при великих товщинах зрізу покриття руйнується внаслідок дії розтягуючих напружень. При товщині зрізу, що відповідає умові рівності напружень на передній і задній поверхнях інструменту, покриття не руйнується протягом усього часу роботи, призводячи до теплового затуплення інструменту (точка критичного значення подачі на рис. 6). При малих товщинах зрізу покриття руйнується під дією напружень з боку задньої поверхні інструменту. При фрезеруванні сталі 45 осередок зносу формується переважно на задній поверхні інструменту, незалежно від товщини зрізу покриття на передній поверхні не руйнується (рис.8). При різанні важкооброблюваних матеріалів (сталь 12Х18Н10Т та сплав ХН77ТЮР) покриття руйнується в перші секунди роботи і не проявляє свій вплив на стійкість інструменту (рис. 9).

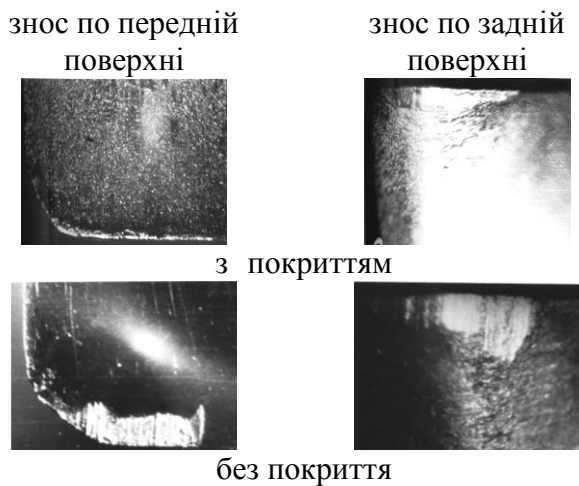


Рис.8. Вид осередків зносу на передній і задній поверхнях інструменту з покриттям TiN та без покриття при фрезеруванні сталі 45 (x40)

Характер руйнування покриття при обробці сталі 12Х18Н10Т свідчить про те, що воно відбулося внаслідок адгезійної взаємодії зі стружкою через хімічну спорідненість оброблюваного та інструментального матеріалів.

При різанні сплаву ХН77ТЮР покриття руйнується внаслідок високих контактних напружень, що перевищують як власну міцність плівки, так і міцність її зчеплення з інструментальною основою.

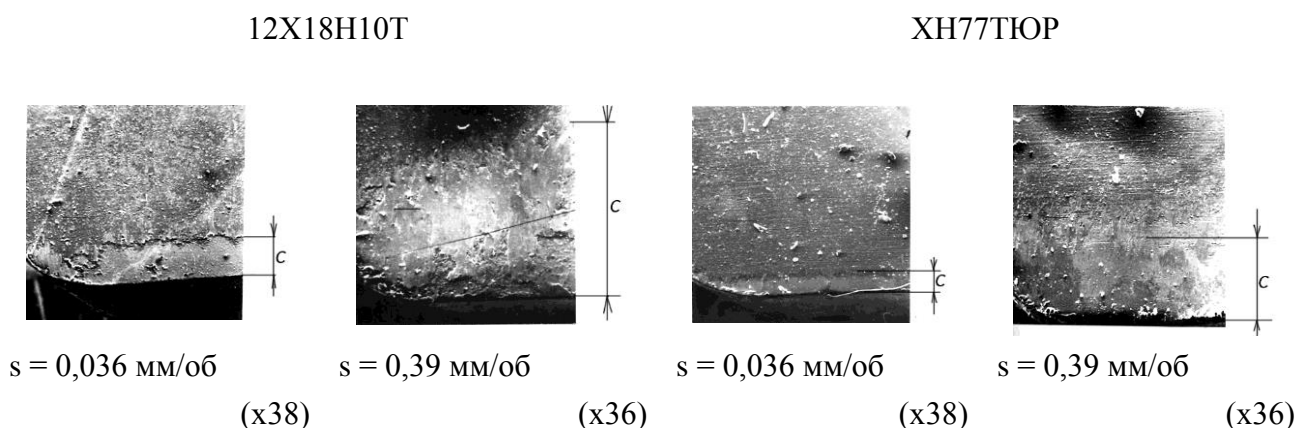


Рис. 9. Характер руйнування покриття на передній поверхні інструмента при точінні сталі 12Х18Н10Т та сплаву ХН77ТЮР

У цьому розділі виконано розробку багатшарових плівкових покриттів для підвищення стійкості інструментів зі швидкорізальної сталі. Для цього проведено

дослідження експлуатаційних характеристик плівок з нітридів перехідних металів IV-VI груп: Ti, Zr, Hf; V, Nb; Cr, Mo.

За результатами досліджень (табл.5) побудовано ряди, в яких дані плівки впорядковані згідно з рівнем проявлених ними властивостей (рис. 10-12), а також залежність відносної зносостійкості розглянутих нітридів від рівня їх адгезійних властивостей та показників міцності (рис. 13).

За одержаними даними складено принципову схему конструювання багатошарового покриття, кожен шар якого в максимальній мірі володіє властивостями, необхідними для виконання його службового призначення (рис. 14).

Таблиця 5

**Результати досліджень експлуатаційних властивостей нітридних плівок**

Матеріал контактної поверхні	Микротвердість $H_c$ , Н/мм <sup>2</sup>	Балл прочності	Адгезионная прочность, $P_{кр}$	Коефіцієнт адгезії с обрабатываемым материалом, $K_{адг}$		Относительная интенсивность износа, J при резании стали 45
				сталь 45	12X18H10T	
P6M5	9360	—	—	1,00	1,00	1,000
TiN	21750	I	85	0,33	0,20	0,305
ZrN	18490	I	130	0,71	0,80	0,309
HfN	25000	I	110	0,54	0,77	0,552
VN	28140	V	105	0,37	0,23	0,674
NbN	31460	IV	70	0,06	0,65	0,333
CrN	26600	I	110	0,51	0,51	0,536
Mo <sub>2</sub> N	27400	V	80	0,82	0,33	1,003

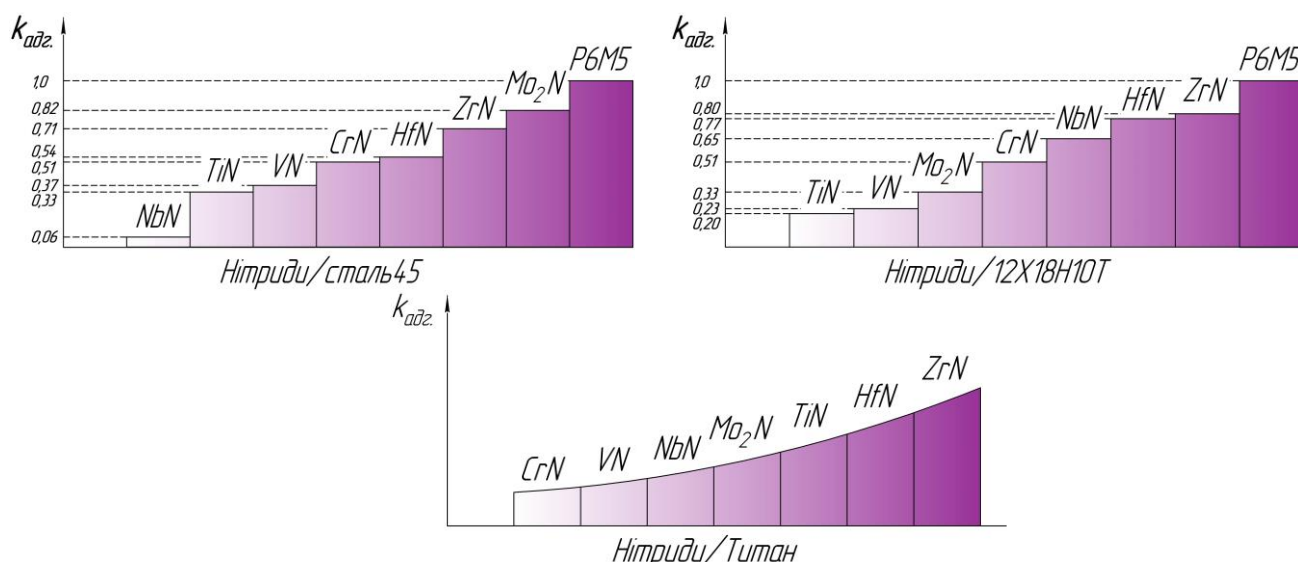


Рис. 10. Ряди адгезійної активності нітридів перехідних металів до різних оброблюваних матеріалів

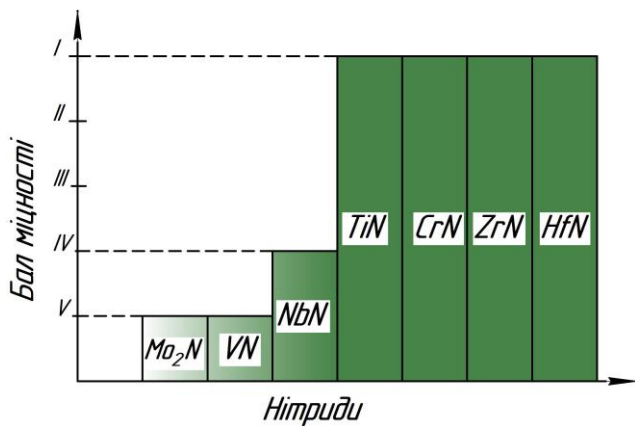


Рис. 11. Ряд нітридів перехідних металів за показниками їх власної міцності

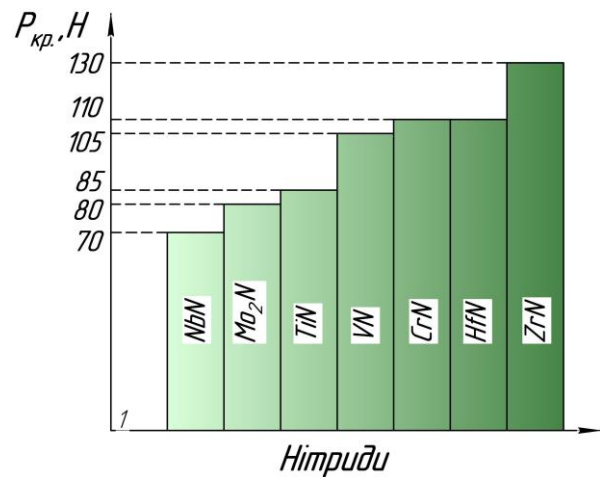
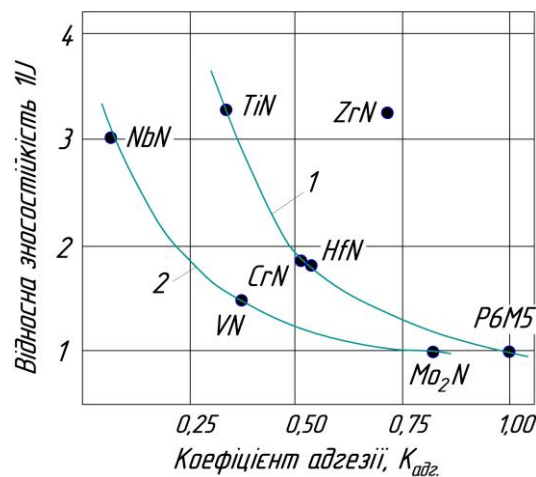


Рис. 12. Ряд нітридів перехідних металів за показниками їх міцності зчеплення з інструментальною основою



1 – I бал міцності;

2 – IV, V бал міцності

Рис. 13. Залежність відносної зносостійкості нітридів перехідних металів від рівня їх адгезійних властивостей та показників міцності

В даній схемі нижній шар – ZrN має високу міцність зчеплення зі швидкорізальною сталлю і високий показник власної міцності півки (I бал), тому він є оптимальним для виконання функцій шару-основи покриття. Наступний, проміжний шар – TiN характеризується високою розчинністю з усіма розглянутими нітридами, і тому може надійно скріплювати верхні шари покриття з шаром-основою. Крім того, нітрид титану має також значну власну міцність (I бал), що дозволяє витримувати високі навантаження. Матеріал верхнього шару покриття, який контактує безпосередньо зі стружкою, вибирається в залежності від оброблюваного матеріалу, його основне призначення – забезпечити мінімальне зчеплення з оброблюваним матеріалом. При обробці залізвуглецевих матеріалів цим вимогам відповідає NbN, титанових та алюмінієвих сплавів – CrN, нержавіючих сталей – TiN і VN, мідних сплавів – VN, нікелевих сплавів – ZrN.

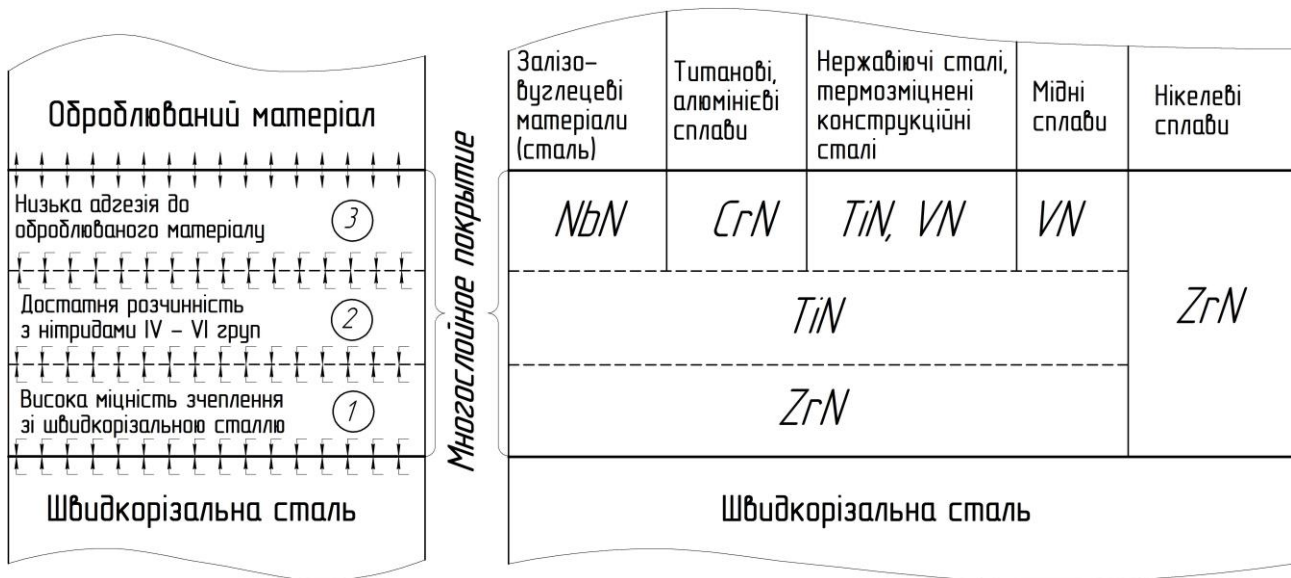


Рис.14. Принципова схема конструювання багатошарового покриття на інструментах зі швидкорізальної сталі при обробці різних матеріалів

Запропоноване для обробки залізобуглецевих матеріалів багатошарове покриття  $ZrN - TiN - NbN$  пройшло випробування в умовах виробництва на ГП «УкрНИИ Спецсталь» при нарізанні різі М12 гайковим мітчиком у деталях зі сталі 45. Випробування проводили при двох частотах обертання інструменту:  $n=680$  об/хв та  $n=960$  об/хв. Оцінювали кількість оброблених деталей до поломки інструменту. Інструмент з покриттям запропонованого складу показав підвищення кількості оброблених деталей (порівняно з інструментом без покриття та з традиційним покриттям  $TiN$ ) до 4,5 та 10 разів на першому і другому режимах відповідно (рис. 15), що підтверджується відповідним актом випробувань.

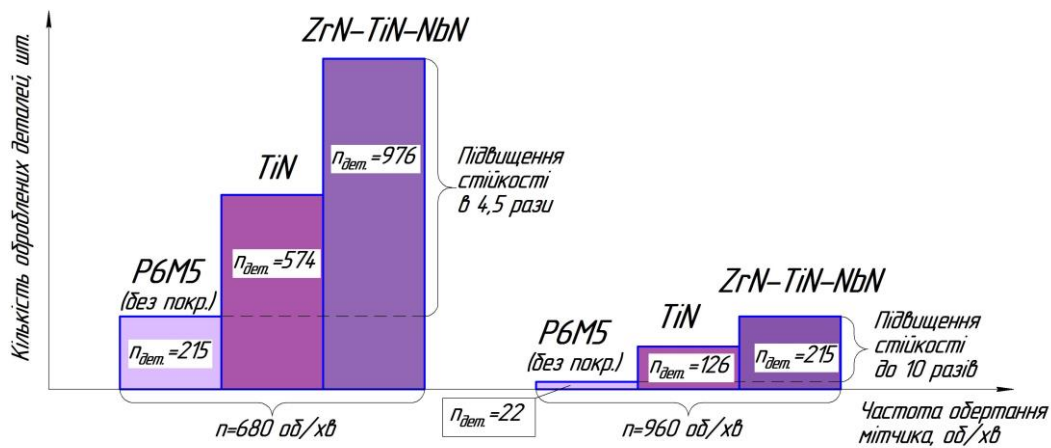


Рис. 15. Результати випробувань гайкових мітчиків з покриттям  $ZrN - TiN - NbN$ , без покриття та з покриттям  $TiN$



## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-практичної задачі підвищення зносостійкості ріжучих інструментів зі швидкорізальної сталі за рахунок нанесення на їх контактні поверхні плівкових покриттів з різними адгезійними властивостями.

1. Проведені експериментальні дослідження із різання конструкційних сталей інструментами із швидкорізальної сталі по визначенню впливу температури та різного рівня адгезійної активності інструменту до оброблюваного матеріалу дозволили встановити, що механізм дії плівкового покриття полягає в зменшенні адгезійної активності контактних поверхонь інструменту до оброблюваного матеріалу, що призводить до скорочення довжини контакту і зміни температурно-напруженого стану різального леза.

2. При обробці залізвуглецевих матеріалів (сталь 45, сталь ШХ15) інструментом з покриттям внаслідок зменшення довжини контакту на передній поверхні зменшуються усадка стружки, середній коефіцієнт тертя, сили різання, середні температури (окрім дотичного напруження на передній поверхні, яке лишається незмінним, та середнього нормального напруження, яке збільшується), проте зростає інтенсивність теплових потоків у різальному клині, і максимальні нормальні напруження і температури концентруються поблизу різальної крайки, що ускладнює температурно-напружений стан леза. При різанні важкооброблюваних матеріалів (XH77ТЮР, BT1-00, 12X18H10T) вплив покриття на контактні та температурно-силові характеристики процесу різання, стружкоутворення, а також стійкість інструментів зі швидкорізальної сталі не виявлено.

3. Виявлено, що інструментальний матеріал проявляє властивість адгезійної активності до оброблюваного матеріалу не на всій площині контакту зі стружкою, а лише на ділянці «пружного» контакту, який і визначає рівень складно-напруженого стану на ділянці «пластичного» контакту у різальної крайки.

4. Нанесення на інструмент зі швидкорізальної сталі додаткових адгезійно-активних шарів з метою зміни адгезійної активності його контактних поверхонь призводить до зміщення лунки зносу на передній поверхні інструменту (лунка утворюється на більшій відстані від різальної крайки, порівняно з інструментом з покриттям TiN), і таким чином, дає можливість керувати розмірами і місцем розташування осередку зносу, а отже, і стійкістю інструменту з покриттям.

5. В ході дослідження працездатності інструментів з плівковими покриттями при різних умовах експлуатації виявлено, що підвищення їх стійкості за допомогою покриттів можливе лише при забезпеченні умов, в яких зміна адгезійної активності проявляє позитивний вплив на процес різання, а саме: оброблюваний матеріал не має належати до важкооброблюваних; необхідність нанесення покриття на робочі поверхні інструменту обумовлюється видом обробки (точіння, фрезерування тощо), який визначає місце переважного формування осередку зносу (передня чи задня поверхня інструменту); товщина зрізу не має бути близькою до критичного значення.

6. Механізм зносу інструментів з покриттями визначається умовами їх експлуатації. При різанні конструкційної сталі руйнування плівки відбувається внаслідок дії високих

розтягуючих напружень і нормального тиску (при великих товщинах зрізу), які спричинюють появу тріщин у всьому об'ємі покриття, розташованих перпендикулярно напрямку сходу стружки; або під дією напружень з боку задньої поверхні (при малих товщинах), коли тріщини орієнтуються паралельно напрямку сходу стружки. У випадку рівності напружень на передній і задній поверхні інструменту покриття не руйнується протягом усього часу роботи інструменту до самого теплового затуплення. При обробці важкооброблюваних матеріалів покриття руйнується при першому контакті з оброблюваним матеріалом внаслідок великих напружень або, якщо матеріали заготовки і інструменту мають хімічну спорідненість, - через сильне адгезійне зчеплення. Тому в таких випадках покриття не проявляє свого впливу на процес різання, і різниця в роботі інструментів з покриттям та без нього не спостерігається.

7. Необхідні експлуатаційні характеристики покриття визначаються тим, яким шаром багатошарової конструкції має служити плівка, що розглядається. Покриття не обов'язково має бути багатошаровим: якщо один шар вдовольняє усі висунуті експлуатаційні вимоги, то його достатньо для успішної обробки заданого матеріалу (наприклад, нітрид цирконія може бути застосований при обробці нікелевих сплавів, до яких він проявляє низьку адгезійну активність, одночасно маючи високі показники власної міцності і міцності зчеплення зі швидкорізальною сталлю). Оптимальним покриттям для обробки залізовуглецевих матеріалів є композиція  $ZrN - TiN - NbN$  ( $ZrN$  забезпечує міцне зчеплення з інструментальною основою,  $NbN$  - проявляє аномально низьку активність до оброблюваного матеріалу, а  $TiN$  надійно скріплює між собою шари покриття), що підтверджено актом випробувань в умовах виробництва на ДП «УкрНДІспецсталь» (м. Запоріжжя).

8. Результати роботи впроваджені в навчальний процес на кафедрах технології машинобудування та металорізальних верстатів та інструменту Запорізького національного технічного університету.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Саржинская А.Г. (Кондрат А.Г.) Анализ особенностей различных подходов при аналитическом расчете сил резания / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – вип. 74. – С.31-56.

*Здобувачем виконано аналіз існуючих методів та підходів до визначення складових сили різання із зазначенням переваг та недоліків кожного з них.*

2. Саржинская А.Г. (Кондрат А.Г.) Методика теоретического определения составляющих силы резания при токарной обработке / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. - вип. 75. – С.63-76.

*Здобувачем розроблено алгоритм теоретичного визначення характеристик процесу різання (усадки стружки, умовного коефіцієнту тертя, довжини контакту на передній поверхні, кута дії тощо), нормальних та дотичних напружень, що виникають на контактних поверхнях при поздовжньому точінні, і величин складових сили різання.*

3. Саржинская А.Г. (Кондрат А.Г.) Влияние условий контактирования инструмента со стружкой на удельную силу трения / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. - №52. – С.377-384.

*Здобувачем розраховано величини дотичних та нормальних напружень при точінні інструментами з різною адгезійною активністю до оброблюваного матеріалу. Зроблено висновок про незмінність дотичних напружень на передній поверхні інструмента.*

4. Саржинская А.Г. (Кондрат А.Г.)Методика теоретического определения составляющих силы резания при фрезерной обработке/ Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская, В.А. Логоминов // Різання і інструмент в технологічних системах. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – вип. 77. – С.31-46.

*Здобувачем виведено теоретичні залежності для визначення питомих сил на контактних поверхнях зуба циліндричної фрези та складових сили різання при фрезеруванні циліндричними фрезами з прямими та гвинтовими зубцями.*

5. Саржинская А.Г. (Кондрат А.Г.) Особенности теоретического определения составляющих силы резания при торцевом фрезеровании сферическими фрезами / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – вип. 5. - С.12-17.

*Здобувачем виведено залежності для визначення питомих сил на контактних поверхнях зуба сферичної фрези та складових сили різання з урахуванням складної геометрії досліджуваного інструмента.*

6. Саржинская А.Г. (Кондрат А.Г.) Исследование адгезионной активности карбидных и нитридных пленок к различным металлам и сплавам/ Ю.Н. Внуков, А.С. Сальников, А.Г. Саржинская //Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. –вип. 6. – С.241-245.

*Здобувачем побудовано ряди відносної адгезійної активності карбідів та нітридів металів IV-VI груп до різних оброблюваних матеріалів. Зроблено порівняльний аналіз властивостей карбідних та нітридних покриттів.*

7. Саржинская А.Г. (Кондрат А.Г.), Внуков Ю.Н. Исследование влияния адгезионной активности инструментального материала на основные характеристики процесса резания / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Різання і інструмент в технологічних системах. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – вип. 79. – С.212-219.

*Здобувачем розраховано характеристики процесу різання на основі виміряних складових сили різання та довжини контакту при точінні різцями з різними варіантами нанесення покриття на передню поверхню. Зроблено висновки про вплив адгезійної активності на контактні характеристики.*

## АНОТАЦІЇ

**Кондрат Ганна Георгіївна «Підвищення зносостійкості інструментів зі швидкорізальної сталі за рахунок плівкових покриттів з різними адгезійними властивостями». – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2012.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-технічної задачі підвищення стійкості ріжучих інструментів зі швидкорізальної сталі шляхом зміни адгезійної активності їх контактних поверхонь плівковими покриттями.

У ході виконання роботи встановлено, що механізм дії покриття на процес різання полягає в зменшенні адгезійної активності контактних поверхонь інструменту до оброблюваного матеріалу, що призводить до зміни умов тертя між ними, і, як наслідок, до скорочення довжини контакту і посиленню температурно-напруженого стану різального леза.

Визначено умови, при яких використання покриттів є неефективним, оскільки зміна адгезійної активності контактних поверхонь інструменту до оброблюваного матеріалу не проявляє позитивного впливу на процес різання (обробка з товщинами зрізу, близькими до критичної величини; різання важкооброблюваних матеріалів; нанесення покриття без врахування місця переважного розташування осередку зносу на робочих поверхнях інструменту).

Дослідження показали, що механізм зносу інструментів з покриттям залежить від умов їх експлуатації (оброблюваного матеріалу, товщини зрізу, виду обробки), які необхідно враховувати в комплексі.

На основі проведених досліджень зроблено висновок, що, змінюючи адгезійну активність інструментального матеріалу до оброблюваного, в умовах, коли дана характеристика проявляє свій вплив на процес різання, можна керувати розмірами і місцем розташування осередку зносу на контактних поверхнях, а значить, і стійкістю інструменту з покриттям.

Запропоновано оптимальний склад покриття для обробки залізовуглецевих матеріалів: ZrN – TiN – NbN (ZrN забезпечує міцне зчеплення з інструментальною основою, NbN - проявляє аномально низку активність до оброблюваного матеріалу, а TiN надійно скріплює між собою шари покриття), що підтверджено актом випробувань в умовах виробництва.

*Ключові слова:* процес механічної обробки, інструменти із швидкорізальної сталі, адгезійна активність, покриття, механізм зносу, стійкість, контактна поверхня, напруження, усадка стружки, сили різання, температура.

**Кондрат Анна Георгиевна «Повышение износостойкости инструментов из быстрорежущей стали за счет пленочных покрытий с разными адгезионными свойствами». – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – «Процессы механической обработки, станки и инструменты». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

Диссертационная работа посвящена решению научно-технической задачи повышения стойкости инструментов из быстрорежущей стали путем изменения адгезионной активности их контактных поверхностей пленочными покрытиями.

В ходе выполнения работы установлено, что механизм действия покрытия на процесс резания состоит в уменьшении адгезионной активности контактных поверхностей инструмента к обрабатываемому материалу, что приводит к изменению условий трения между ними, и, как следствие, к сокращению длины контакта и усилению температурно-напряженного состояния режущего лезвия.

Определены условия, при которых использование покрытий неэффективно, поскольку в таких случаях адгезионная активность не оказывает положительного влияния на процесс резания (обработка с толщинами среза, близкими к критическому значению; резание труднообрабатываемых материалов; нанесение покрытий без учета места преимущественного формирования очага износа на рабочих поверхностях инструмента).

Исследования показали, что механизм разрушения покрытий зависит от условий эксплуатации инструмента (обрабатываемого материала, толщины среза, вида обработки), которые необходимо учитывать в комплексе.

На основании проведенных исследований сделан вывод, что, изменяя адгезионную активность, можно управлять размерами и месторасположением очага износа, а значит, и стойкостью инструмента.

Предложено оптимальное покрытие для обработки железоуглеродистых материалов - композиция ZrN-TiN-NbN (ZrN обеспечивает прочное сцепление с инструментальной основой, NbN проявляет аномально низкое схватывание с обрабатываемым материалом, а TiN надежно скрепляет между собой слои покрытия), что подтверждается актом испытаний в условиях производства.

*Ключевые слова:* процесс механической обработки, инструменты из быстрорежущей стали, адгезионная активность, покрытие, механизм износа, стойкость, контактная поверхность, напряжение, усадка стружки, силы резания, температура.

**Kondrat Anna G. "Improving of the wear resistance of high-speed steel tools through film coatings with different adhesive properties." - Manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.03.01 - The processes of machining, cutting machines and tools. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv, 2012.

The thesis is devoted to solving scientific and technological tasks of increasing the resistance of high speed steel tools by changing their adhesive activity of contact surfaces coated.

In the course of the work established that the mechanism of action of the coating on the cutting process is to reduce the adhesion activity of contact surfaces of the tool to the processed material, which leads to a change in the conditions of friction between them, and, consequently, to reduce the length of contact and increase the temperature and stress state of the cutting blade. Experimentally proved that there are conditions under which the use of coatings is inefficient, since in such cases, the adhesion activity does not exert a positive influence on the process of cutting (treatment with slice thickness, close to the critical value, cutting hard materials, coating, excluding places priority focus of the formation of wear the working surfaces of the instrument). Studies have shown that the failure mechanism of coatings depends on the operating conditions the instrument (of the material, slice thickness, type of treatment), which must be considered together. Based on the studies concluded that by changing the adhesive activity, it is possible to control the size and location of the source of wear, and hence the tool life.

Optimal coverage for the treatment of iron-carbon materials is proposed: ZrN-TiN-NbN (ZrN ensures a strong grip on the tool base, NbN exhibits an abnormally low setting with the material being treated and TiN securely fastened together layers of coating), which is confirmed by the act of testing in a production environment.

*Key words:* the process of machining, high-speed steel tools, adhesive activity, covering the mechanism of wear resistance, the contact surface, the tension, shrinkage chips, cutting forces and temperature.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'V. Anuf', is located in the lower right quadrant of the page. The signature is written in a cursive style with a large, sweeping initial letter.

Підписано до друку 22.03.2012. Формат 60x90/16. Папір офсетний.  
Друк ризографічний. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 93.

---

Запорізький національний університет

69600, м. Запоріжжя, МСП-41  
вул. Жуковського, 66

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників  
і розповсюджувачів видавничої продукції  
ДК № 2952 від 30.08.2007

