

УДК 669.018.25

О. Сорока<sup>1</sup>, докт. техн. наук; Ю. Родічев<sup>1</sup>, канд. техн. наук;  
В. Ковальов<sup>2</sup>, докт. техн. наук; Я. Васильченко<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України,

<sup>2</sup>Донбаська державна машинобудівна академія

## ЗМІЦНЕННЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВАЖКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ НА ОСНОВІ ПОВЕРХНЕВОЇ ТА ОБ'ЄМНОЇ МОДИФІКАЦІЇ ФІЗИЧНИМИ МЕТОДАМИ

**Резюме.** Аналіз роботи та відмов інструменту при обробці на важких верстатах показав, що поряд з виходом з ладу інструменту внаслідок зносу майже половина відмов спричиняється крихким руйнуванням різальної частини твердосплавної пластини, яке проявляється у викришуванні різальних кромок та сколюванні різальної частини. Це зумовлює необхідність застосування методів поверхневої та об'ємної модифікації для підвищення ресурсу й роботоздатності інструменту. Показано, що ефективним методом підвищення поверхневої міцності та зносостійкості твердого сплаву є нанесення PVD – покриттів дискретного типу з параметрами, які цілеспрямовано обираються за критеріями адгезійної та когезійної міцності. Отримано, що обробка твердосплавного інструменту імпульсним магнітним полем призводить до зростання границі міцності на згин при статичному навантаженні на 16...27%, підвищення періоду стійкості до руйнування на 17% та зменшує розкид величин показників, які характеризують експлуатаційну надійність різальних інструментів.

**Ключові слова:** важкі верстати, різальний інструмент, ресурс, знос, відкол, викришування, PVD – покриття, ОІМП, когезійна міцність, міцність на згин, стійкість, руйнуюча подача.

O. Soroka, Yu. Rodichev, V. Kovalov, Y. Vasilchenko

## STRENGTHENING OF CARBIDE CUTTING TOOL FOR HEAVY MACHINERY ON THE BASE OF SURFACE AND BULK MODIFICATION BY PHYSICAL METHODS

**Summary.** Analysis of the tool work and refusals, when heavy cutting, showed that in addition with the tool wear, almost half of refusals are caused by brittle fracture of the cutting carbides, which manifests itself in the microchipping of cutting edges and tool cutting part chipping. This determines necessity to use methods of surface and bulk modification to improve tool performance and life time. As the method of surface modification the plasma vapor deposition (PVD) was chosen and the pulsed magnetic field treatment was suggested as a method for bulk modification. It is proposed to create discrete surface topography coatings with purposeful chosen parameters that can prevent the loss of stability of coating elements under the action of compressive residual stresses and cohesion cracking under tensile stresses. For longitudinal compression, the discrete region size is calculated using the theory of stability of elastic systems; under tensile stresses cohesion cracking of a coating can be avoided if a coating region size would be determined from the calculated crack step. This increases the efficiency of PVD – coatings and extends the sphere of their application to carbide cutting tool for heavy machines. Tests in industrial conditions showed that the life time of replaceable insert SNMN 190912T with TiN discrete coating increases in 3.7 times and 1.45 times as compared with the uncoated tool and one with continuous coating. It is obtained that the treatment of carbide tool with pulsed magnetic field leads to an increase in bending strength limit under static load by 16 ... 27%. The dependence of this increase on the treatment regime and tool material was found. Laboratory tests for carbide cutting tool by "breaking feeding" method showed that the pulsed magnetic field treatment leads to an increase in the period of resistance to fracture by 17% and reduce the coefficient of variation by 34%. Application of pulsed magnetic field minimizes

scatter values of indicators characterizing operational reliability of cutting tool. It is concluded that promising methods to improve tool performance and life time are techniques that combine surface and bulk modification.

**Key words:** heavy machine, cutting tool, life time, wear, chip, microchipping, PVD – coating, cohesive strength, pulsed magnetic field treatment, bending strength, resistance, breaking feeding.

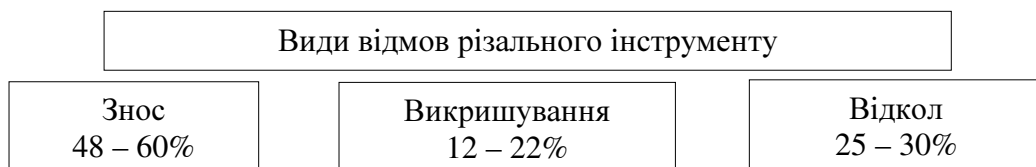
**Вступ.** Ефективність процесу металообробки деталей значною мірою залежить від ресурсу різального інструменту. Система «інструмент-деталь» є однією з таких, що визначається як екстремально навантажена – умовами її експлуатації є високі температури та надвисокі статичні й циклічні контактні навантаження. «Екстремальність» такої системи підвищується при обробці на важких верстатах, до суттєвих особливостей якої відносяться великі розміри деталей, що обробляються (циліндри, вали, штоки, бандажі довжиною до 24000 мм і більше, діаметром до 5000 мм, масою до 250 тонн); великі глибини різання (15...20 мм) і подачі (до 3 мм); висока вартість заготовок; великий шлях різання; високі виробничі витрати, пов'язані з вартістю унікального устаткування; нерівномірність припусків. Підвищення ресурсу інструменту при обробці на важких верстатах є надзвичайно важливим унаслідок значної вартості важких верстатів і необхідністю скоротити час простою при заміні інструменту, а також високою вартістю самого твердосплавного інструменту.



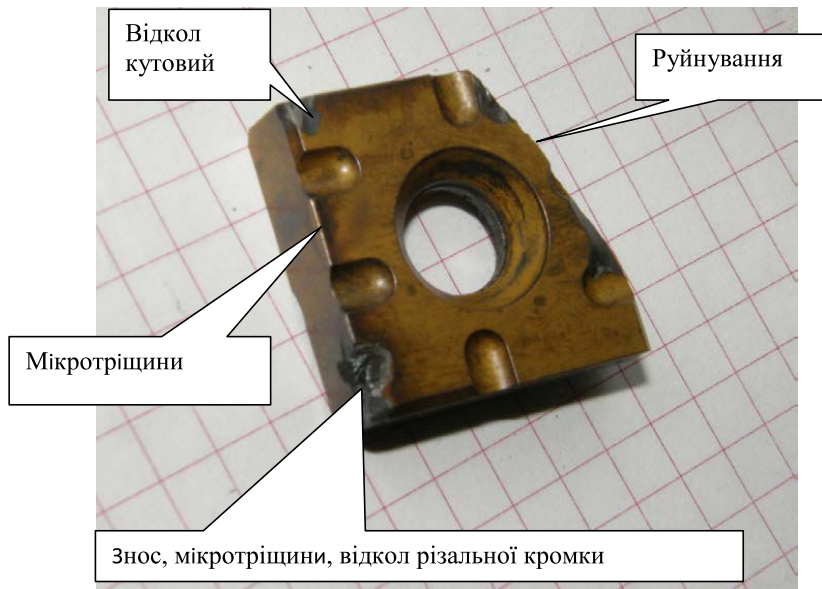
**Рисунок 1.** Деталі-представники виробів підприємства важкого машинобудування

**Figure 1.** Details-representatives of Heavy Machinery enterprise

Аналіз відмов інструменту при обробці на важких верстатах [1] показує, що поряд з виходом з ладу інструменту внаслідок зносу майже половина відмов спричиняється крихким руйнуванням різальної частини твердосплавної пластини, яке проявляється у викришуванні різальних кромки та сколюванні різальної частини (рис. 2, 3). Це пов'язано з тим, що великі значення зрізу зумовлюють зростання величини і зони дії напружень розтягу на передній поверхні інструменту [2].



**Рисунок 2.** Процентний склад видів відмов інструменту для важкого машинобудування

**Figure 2.** Percentage composition of tool refusal modes for Heavy Machinery**Рисунок 3.** Руйнування змінної фрезерної пластини R390-180G12M-PM (а) та напайної різальної пластини з T5K10 (б)**Figure 3.** Failure of milling replaceable insert R390-180G12M-PM (a) and soldered-on blade T5K10 (b)**Рисунок 4.** Види пошкодження та руйнування змінної фрезерної пластини SNGX250800CM30M**Figure 4.** Types of damage and failure of milling replaceable insert SNGX250800CM30M

Аналіз відмов інструменту виявив також неоднорідність ступеня деградації різних ділянок змінних пластин різців та фрез, характерних для важких верстатів (рис. 4).

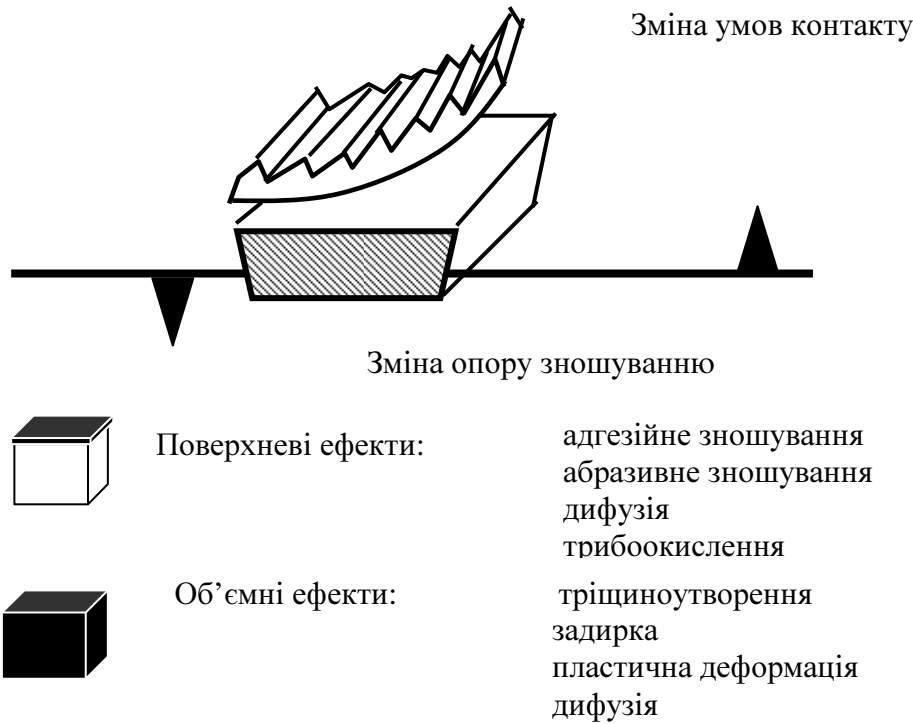
Тому актуальною проблемою є оптимізація технологій матеріалів та елементів для екстремальних умов за критеріями міцності й роботоздатності. Таким чином, напрямами в розв'язанні проблеми продовження ресурсу інструментів для важкого машинобудування є забезпечення поверхневої та об'ємної міцності. Шляхами отримання інструментальних матеріалів з комплексом необхідних в умовах обробки на важких верстатах характеристик слід вважати технології модифікації поверхонь, що дозволяють керувати дефектністю та міцністю поверхневих шарів інструментальних матеріалів, а також об'ємну модифікацію матеріалів та інструменту [3].

**Метою роботи** є дослідження впливу поверхневої та об'ємної модифікації інструментальних матеріалів на характеристики міцності й роботоздатності.

Однозначно відповісти на питання про раціональний вибір того чи іншого виду модифікації досить важко.

**Поверхнева модифікація.** З метою оцінювання властивостей і, у відповідності з цим, визначення області застосування різноманітних видів поверхневої модифікації розглянуто механізми її впливу на зношування та руйнування різального інструменту [4] (рис. 5).

З одного боку, підвищення зносостійкості відбувається за рахунок прямого впливу покриття на механізми зношування, які пов'язані з трьома поверхневими ефектами: адгезійним зношуванням, абразивним зношуванням та трибоокисленням. Покриття впливає також на дифузійні процеси, які полягають у дифузії оброблюваного матеріалу в інструментальний. Процеси дифузії починаються з поверхні інструменту, але впливають також на об'ємні властивості матеріалу і можуть бути віднесені до об'ємних процесів. Покриття впливає на такі об'ємні процеси, як втома (утворення втомних тріщин), опір задиркутворенню та пластичній деформації основи. З іншого боку, покриття на інструменті змінює умови контакту за рахунок зміни розмірів поверхні контакту, коефіцієнта тертя й умов тепловиділення та відведення тепла. Такий вплив можна віднести до непрямой дії покриттів на підвищення зносостійкості.



**Рисунок 5.** Механізми впливу покриття на зношування та руйнування різального інструменту

**Figure 5.** Mechanisms of coating influence on wear and failure of the cutting tool

Вимоги, що висуваються до покриттів, залежать від умов експлуатації та призначення інструменту. Для безперервних процесів, наприклад точіння, необхідним є достатній об'єм матеріалу, який може бути втрачено при зношуванні, і добра адгезія покриття з основою. В переривчастих операціях, типу фрезерування, основна вимога – в'язкість, опір окисленню і достатній рівень напружень стиску. Важливою характеристикою при експлуатації різального інструменту є схопювання з оброблюваним матеріалом. Ще одним критерієм вибору покриття є вид обробки – чорнова або чистова. Чорнова обробка потребує захисту інструменту від високого рівня механічних напружень і температур. Чистові операції залежать від гостроти різальних

кромки, тобто необхідним є тонке покриття, що не збільшує радіус округлення і не знижує в'язкість основного матеріалу.

Серед сучасних покриттів ці вимоги задовольняють покриття, отримані методами хімічного (CVD) та фізичного (PVD) осадження, що широко застосовуються на практиці. Цим методам притаманні як значні переваги, так і недоліки. До переваг CVD-методів відносять: однорідність товщини покриття і незалежність від форми деталі; високу швидкість процесу осадження; високу розмірну стабільність зміцненої деталі; легкість регулювання складу покриття; значну твердість покриття; високу адгезійну міцність, що зумовлена протіканням CVD при високих температурах, завдяки чому активуються термодифузійні процеси і утворюються перехідні шари.

Недоліки методу CVD: протікання процесу при високих температурах, що дозволяє формувати покриття тільки на твердих сплавах; зниження міцності і в'язкості твердого сплаву, коли високотемпературний процес призводить до формування крихкої перехідної зони між покриттям і твердим сплавом, до декарбідизації останнього, і, таким чином, до зниження міцності при згинанні та при ударно-циклічному навантаженні. При потребі отримати високу якість поверхні необхідна додаткова обробка (поліровка). До того ж, нанесення методом CVD можливо лише у виробничих умовах великих інструментальних фірм, тому такі покриття неможливо відновлювати в процесі експлуатації.

Доцільно обирати покриття, які можуть бути нанесені споживачем інструменту на невеликому загальнодоступному устаткуванні. Ця перевага, поряд з іншими значними перевагами, притаманна PVD-покриттям. До переваг вакуум-плазмових покриттів відносяться: достатньо низькі температури процесу (400 – 500°C); висока швидкість нанесення, утворення щільних і твердих покриттів; PVD-покриття не псують матеріал основи, відомо також про підвищення цими покриттями характеристик статичної і втомної міцності основного матеріалу [6, 7]. Порівняння вищезазначених властивостей покриттів з вимогами до різних типів інструменту призводить до висновку, що PVD-покриття добре відповідають вимогам переривчастого різання, чорнової та чистової обробки матеріалу. Натомість, CVD-покриття не відповідають умовам екологічної безпеки, формуються при високих температурах і значному терміні процесу. CVD-покриття за своїми властивостями відповідають застосуванню при безперервних операціях (точіння). Для заміни покриття CVD на PVD і доповнення переваг вакуум-плазмових покриттів більшою товщиною та доброю адгезією з основним матеріалом перспективним є шлях удосконалення конструктивних схем покриттів, що дозволяє характеристика міцності системи «основа-покриття», врегулювати залишкові та зменшити експлуатаційні напруження в поверхневих шарах. До вдосконалень конструктивних схем поверхні відносять створення систем з проміжними та буферними прошарками, багатошарових покриттів, у тому числі мікро-, наноструктурних та наношарових, градієнтних систем і систем, отриманих на основі дуплексних технологій.

Окремим класом поверхонь із удосконаленою конструкцією, слід, вочевидь, вважати поверхні дискретного типу. Цілеспрямована заміна суцільного шару покриття переривчастим (фрагментованим) шаром [8] становить ідею принципу формування покриттів дискретного типу, який запропоновано і розроблено в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України під керівництвом професора Б.А. Ляшенка.

Принцип створення дискретної топографії можна досить успішно реалізувати для PVD-покриттів (рис. 5), зокрема для покриттів, отриманих методом катодно-іонного бомбардування (КІБ). На рисунку 6 вказано параметри покриттів, які підлягають регулюванню. Такі покриття є покриттями з підвищеною кількістю параметрів (товщина, розмір, форма та відстань між ділянками), що підлягають цілеспрямованому вибору. Вибір цих параметрів дає можливість керувати як залишковими, так і експлуатаційними напруженнями в системі основа-покриття, і таким чином уникнути

недоліків покриттів суцільного типу, руйнування яких у вигляді розтріскування (когезійного руйнування) або відшарування (адгезійного руйнування), часто настає до вичерпання ресурсу інструменту з покриттям. У результаті цього покриття не тільки не поліпшує характеристики роботоздатності інструменту, а погіршує їх за рахунок утворення грубого «клаптикового» рельєфу, проростання когезійних тріщин в основу і тому подібне.

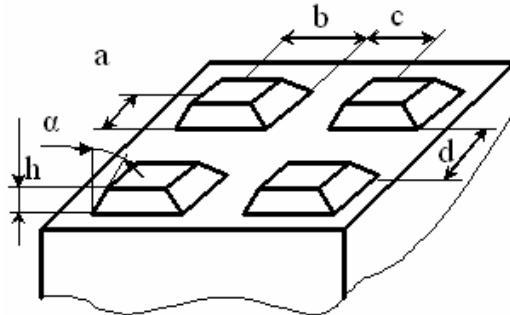


Рисунок 6. Схема дискретного покриття

Figure 6. Scheme of discrete coating

Проведені дослідження [9] показали, що залишкові напруження в покриттях складаються зі структурної та температурної складових, а їх величина та знак залежать від складу покриття та матеріалу основи. Експериментально-розрахунковий метод гнучкого зразка та запропонований нами метод поділу залишкових напружень на структурну й температурну складові дозволили отримати значення залишкових напружень та їх складових для покриттів TiN, (Ti,Al)N, TiCN, які нанесено на твердий сплав. На прикладі покриття TiN отримано, що в покриттях на BK8 зі зростанням товщини покриття значення загальних залишкових напружень від значних напружень стиску для покриттів товщиною до 5 мкм переходять у слабостискаючі в інтервалі 6...7 мкм і стають слаборозтягуючими для покриттів від 8 мкм (рис. 7).

Високий рівень залишкових напружень стиску в тонких покриттях створює сприятливі умови для експлуатації інструментів з покриттям. Уникнути проблеми випинання покриття під дією занадто значних напружень стиску в результаті втрати стійкості при поздовжньому гнутті з подальшим розтріскуванням, яке відбувається за умови локального порушення адгезії, коли напруження стиску в покритті сягають критичної величини  $\sigma_n^{зали}_{кр}$ , можна шляхом обмеження довжини ділянки покриття (критична довжина дискретної ділянки визначається на основі підходів теорії стійкості) [10].

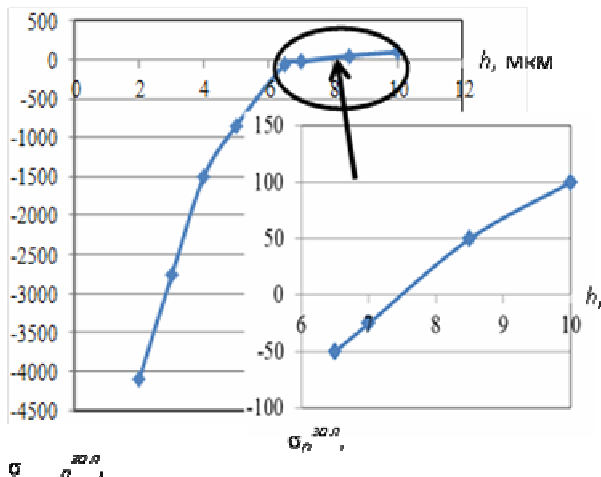


Рисунок 7. Значення залишкових напружень у покритті TiN на BK8

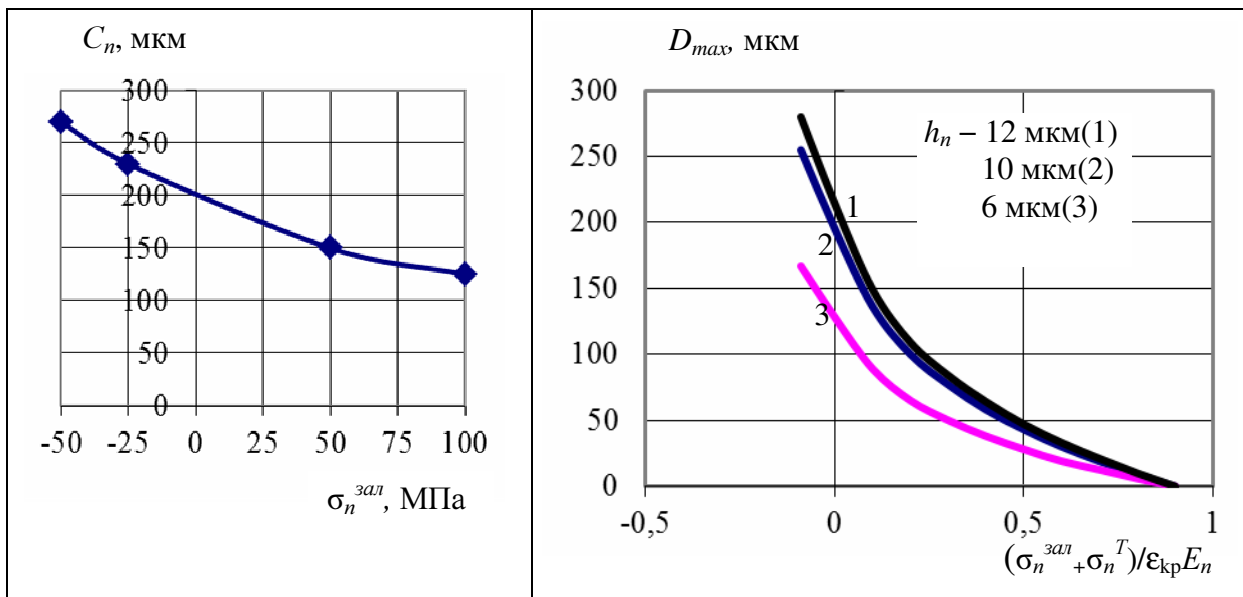
Figure 7. The value of residual stresses in the TiN coating of on tungsten carbide

Для умов різання на важких верстатах, коли навантаження спричиняє експлуатаційні напруження розтягу, а підвищення товщини покриття є бажаним, спостерігається когезійне руйнування захисного шару. Для забезпечення когезійної міцності покриття запропоновано змоделювати природний процес релаксації напружень у покриттях шляхом розтріскування, виходячи з того, що фрагментація покриття буде відбуватися з утворенням регулярної сітки тріщин доти, доки відстань між тріщинами не досягне критичної величини. Превентивне створення регулярного рельєфу з дискретних ділянок запобігає когезійному розтріскуванню покриття, якщо розмір ділянки  $D$  обирати меншим за критичну величину кроку тріщини  $C_n$  [11].

$$C_n = -\frac{1}{k} \ln \left( 0,1 + \frac{\sigma_n^T + \sigma_n^{зал}}{\varepsilon_{кр} E_n} \cdot \left( 1 + \frac{E_n h_n}{E_o H_o} \right) \right), \quad (1)$$

де  $\sigma_n^T$  – напруження в покритті, що виникають під дією температурного градієнта;  $\sigma_n^{зал}$  – залишкові напруження у покритті;  $\varepsilon_{кр}$  – критична деформація основи, за перевищення якої починається когезійне розтріскування;  $H_o$  – напівтовщина основи;  $h_n$  – товщина покриття;  $E_o$ ,  $E_n$  – модулі Юнга основи і покриття;  $y$  – проміжна координата;  $2l$  – базовий розмір;  $k$  – коефіцієнт, що залежить від геометричних та фізико-механічних характеристик основи і покриття.

Як приклад застосування запропонованого методу, із застосуванням залежності (1), визначено  $D_{max} \leq C_n$  для покриття TiN на основі з твердого вольфрамокобальтового сплаву ВК8 (рис. 8) та побудовано (рис. 9) залежність кроку тріщини від співвідношення суми залишкових напружень та експлуатаційних термонапружень у покритті та когезійної міцності покриття для різних товщин останнього.



**Рисунок 8.** Крок тріщини у покритті TiN на основі ВК8 залежно від залишкових напружень у покритті для  $\varepsilon_{кр}=0,15\%$

**Figure 8.** Step of cracks in the coating TiN on tungsten carbide depending on the residual stresses in the coating for  $\varepsilon_{cr}=0,15\%$

**Рисунок 9.** Розрахункова залежність критичного розміру дискретної ділянки покриття  $D_{max}$  від співвідношення суми залишкових напружень та когезійної міцності покриття:  
1 –  $h_n = 12$  мкм; 2 –  $h_n = 10$  мкм; 3 –  $h_n = 6$  мкм

**Figure 9.** Calculated dependence of the critical size of discrete areas of coating  $D_{max}$  on residual stresses and cohesive strength of coating ratio 1 –  $h_n = 12$   $\mu\text{m}$ ; 2 –  $h_n = 10$   $\mu\text{m}$ ; 3 –  $h_n = 6$   $\mu\text{m}$

На рис. 8 точки перетину кривих з віссю ординат відповідають значенням кроку тріщин, що виникають при нульових залишкових напруженнях у покритті

(розтріскування відбувається під дією напружень від силового зовнішнього навантаження). Точки перетину кривих з віссю абсцис відповідають когезійному розтріскуванню під дією залишкових напружень у покритті ще до моменту, коли прикладене зовнішнє навантаження. Ділянки кривих, які розташовані в правому верхньому квадранті, відповідають залишковим напруженням розтягу. В лівому верхньому квадранті розташовані ділянки кривих, які відповідають залишковим напруженням стиску. Ці напруження стиску зменшують дію експлуатаційного навантаження і таким чином запобігають розтріскуванню.

Ефективність застосування покриттів дискретного типу показана при виробничих випробуваннях різців, оснащених змінними багатограними неперезагострювальними різальними пластинами SNMN 190912T при обробці вальцювальних валків зі сталей 60X2СМФ, 75X2МФ, 80X5МФ, 90ХФ (твердість бочки 320 НВ, твердість шийки 30-55 HRC) на важких токарних верстатах КЖ16274Ф3, КЖ16275Ф3 в умовах ЗАТ «Ново-Краматорський машинобудівний завод». Випробовуванням підлягали пластини без покриття, з суцільним TiN покриттям товщиною 4 мкм та з покриттям TiN дискретного типу щільністю 58%. Режими обробки та результати випробувань наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Режими різання та результати випробувань пластин SNMN 190912T

Інструмент	Режими різання			Стійкість інструменту T, хв
	Швидкість різання v, м /хв	Подача S, мм/об	Глибина різання t, мм	
Без покриття	40	1,5	5,0	25±11
З суцільним покриттям				63±9
З дискретним покриттям				92±8

При обробці вальцювальних валків зі сталей 60X2СМФ, 75X2МФ, 80X5МФ, 90ХФ отримано, що стійкість інструменту з суцільним покриттям зростає в 2,5 раза порівняно з інструментом без покриття, а стійкість інструменту з покриттям дискретного типу збільшується в 3,7 раза та 1,45 раза порівняно з інструментом без покриття та з суцільним покриттям відповідно.

Слід зазначити, що в промислово розвинених країнах випуск різальних пластин із зносостійкими покриттями становить 60 – 90% від загального випуску твердосплавних пластин. Разом з тим, при обробці на важких верстатах, коли спостерігають викришування та відколи, як для змінних пластин з покриттями, так і для змінних та напаяних пластин без покриттів, ефективність пластин значною мірою залежить від об’ємних характеристик міцності твердого сплаву.

**Об’ємна модифікація.** Серед фізичних методів об’ємної модифікації інструментальних матеріалів як перспективний для підвищення роботоздатності інструменту для обробки на важких верстатах слід виділити метод обробки імпульсним магнітним полем (ОІМП). Цей метод є швидким, екологічно чистим, легко реалізується за рахунок простоти й низької енергоємності устаткування, відсутності високих вимог до кваліфікації обслуговуючого персоналу. Устаткування не потребує спеціальних умов щодо його розміщення, що зумовлює можливість використання ОІМП як у централізованому виробництві, так і в умовах цеху.

Аналіз літературних джерел показує, що ОІМП підвищує стійкість металорізального інструменту зі швидкорізальних сталей [12, 13], окремі дані існують щодо впливу ОІМП на твердість та зносостійкість твердосплавних пластин [13, 14]. Відомо, що специфіка методу пов’язана з електромагнітною природою цього впливу на структуру матеріалу, особливо у випадку її недостатньої стабільності. За даними [15] після обробки ОІМП швидкорізальної сталі спостерігається новий розподіл дефектних комплексів та знижується рівень залишкових напружень.



Ефективне застосування ОІМП у заводській практиці стримується відсутністю даних щодо впливу цієї обробки, а також різних режимів ОІМП на зміни комплексу властивостей, що визначають експлуатаційні характеристики твердосплавної пластини. Відповідно до [2] в умовах різання на важких верстатах, коли, як зазначалося вище, значна зона передньої поверхні знаходиться в умовах дії напружень розтягу, важливим показником роботоздатності є міцність в умовах розтягу або згину.

Стандартні методи випробувань твердих сплавів на згин та інші види тестування з використанням спеціальних зразків не відображають реальних властивостей інструменту внаслідок великої різниці у технології їх виготовлення, конструкції, фактичного напруженого стану та геометрії робочої частини відносно відповідальних ділянок інструменту у зоні різання. Але вони визначають важливі тенденції механічної поведінки, які можуть бути базовими для орієнтовного оцінювання роботоздатності нових інструментальних матеріалів та контролю якості інструменту за відсутності можливості виконання відповідних складних експериментів. Важливість розвитку методів контролю або прогнозування міцності та довговічності зростає внаслідок запровадження нових технологій зміцнення твердих сплавів за рахунок об'ємної та поверхневої модифікації. На жаль, конкретні результати модифікації та дані щодо фактичного рівня підвищення міцності й ресурсу інструменту не надаються виробниками.

У таблиці 2 наведено результати випробувань конструкційної міцності на згин квадратних змінних різальних пластин із твердого сплаву Т5К10 з розмірами 15,875 x 15,875 x 4,76 мм, що використовуються для токарних прохідних і розточних різців і торцевих фрез. На різальні поверхні пластин було нанесено PVD-покриття завтовшки 5 мкм. Пластини було модифіковано з використанням обробки імпульсним магнітним полем. Застосовували два експериментальні режими обробки, що відрізнялися потужністю випромінювання та напруженістю магнітного поля.

Пластини випробовували на триточковий згин. Поверхню з різальною кромкою та покриттям розташовували у зоні дії напружень розтягу. Тестування проведено на гідравлічній машині ZD-4 зі швидкістю навантаження 6,5...10 МПа/с (рис. 10). Випробовували три партії пластин кількістю по 5 шт. Для порівняння міцності на згин традиційних зразків  $\sigma_{зг зр}$  з цього сплаву з реальним рівнем міцності у різальних пластинах  $\sigma_{зг пл}$  у таблиці наведено відношення  $\sigma_{зг пл}/\sigma_{зг зр}$  з урахуванням діапазону зміни літературних даних за різними джерелами щодо границі міцності сплаву Т5К10 (1150-1700 МПа).

Таблиця 2

Конструкційна міцність на поперечний згин різальних пластин зі сплаву Т5К10

Стан пластин	Границя міцності на згин $\sigma_{зг пл}$ , МПа	Розкид $\sigma_{зг \text{ мін}} \dots \sigma_{зг \text{ макс}}$ , МПа	Відношення $\sigma_{зг пл}/\sigma_{зг зр}$	Ступінь зміцнення, %
Вихідний	892	711/1046	0,5 ... 0,75	-
Зміцнений ОІМП за режимом 1	1037	762/1280	0,6 ... 0,9	16
Зміцнений ОІМП за режимом 2	1130	884/1295	0,66 ... 0,98	27

Випробування на міцність при триточковому згині проведено також змінних різальних пластин у формі неправильного шестикутника (ламаний трикутник) з твердого сплаву Т15К6 без покриття з розмірами товщиною 4,76 мм. Дві партії пластин кількістю по 6 шт. тестувались на гідравлічній машині ZD-40 зі швидкістю навантаження 20...22 МПа/с (рис. 11). Досліджували пластини у вихідному стані та

оброблені імпульсним магнітним полем за режимом 2. Поверхню з різальною кромкою та розташовували у зоні дії напружень розтягу. Результати випробувань наведено в таблиці 3.

Аналіз отриманих результатів випробування модифікованих різальних пластин зі сплавів T5K10 та T15K6 показує, що внаслідок впливу комплексу технологічних і конструкційних факторів конструкційна міцність на згин різальної пластини з твердого сплаву є значно меншою, ніж міцність традиційних стандартних призматичних зразків. Залежно від технології оброблення та умов випробувань зразків міцність реальних різальних пластин може зменшуватися на 10...50% відносно результатів традиційних механічних випробувань твердих сплавів на згин, що безпосередньо впливає на роботоздатність інструменту, достовірність оцінок його довговічності та на ефективність його застосування у важких умовах різання.

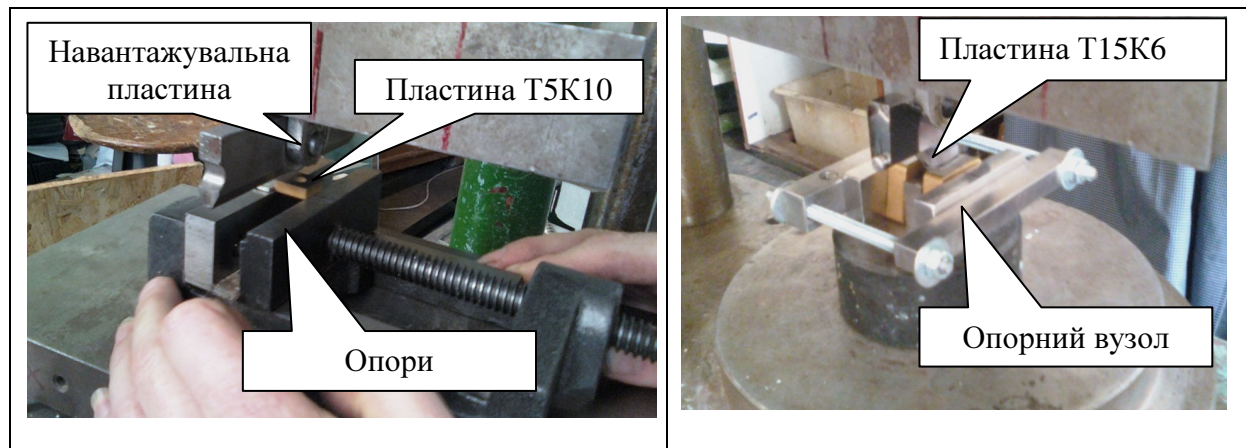


Рисунок 10. Тестування на згин змінної різальної пластини з T5K10 на устаткуванні ZD-4

Figure 10. Bending testing of replaceable insert on ZD-4

Рисунок 11. Тестування на згин змінної різальної пластини з T15K6 на устаткуванні ZD-40

Figure 11. Bending testing of replaceable insert on ZD-40

Для пластин з T15K6 для зразків у вихідному стані отримано також, що значення  $\sigma_{зг\text{ пл.}}$  значною мірою залежить від того, яка поверхня знаходиться в зоні розтягу: при розташуванні плоскої поверхні в зоні розтягу середнє значення  $\sigma_{зг\text{ пл.}}$  становить 799 МПа ( $\sigma_{зг\text{ пл.}}$  при розташуванні в зоні розтягу поверхні з різальною кромкою – 642 МПа).

Таблиця 3

Конструкційна міцність на поперечний згин різальних пластин зі сплаву T15K6

Стан пластин	Граничне навантаження (середнє значення) $P$ , кг	Границя міцності на згин (середнє значення) $\sigma_{зг\text{ пл.}}$ , МПа	Розкид $\sigma_{зг\text{ мин...}} \sigma_{зг\text{ макс}}$ , МПа	Відношення $\sigma_{зг\text{ пл.}}/\sigma_{зг\text{ зр}}$	Ступінь зміцнення, %
Вихідний	655	642	549/804	0,61 ... 0,80	-
Зміцнений ОІМП за режимом 2	750	735	608/804	0,67... 0,80	14%

Встановлено також, що застосований спосіб модифікації твердого сплаву Т5К10 дозволяє підвищити його міцність на згин пластини з цього сплаву на 16...27% залежно від режиму обробки, а обробка ОІМП за другим режимом підвищила міцність на згин пластини із Т15К6 на 14%. Встановлено також, що після ОІМП зменшується розкид значень міцності на згин. Можна припустити, що підвищення міцності твердого сплаву в результаті ОІМП пов'язано зі зменшенням напружень розтягу в кобальтовій фазі, що перешкоджає розвитку тріщин.

Виходячи з того, що для ряду крихких матеріалів встановлено емпіричні залежності між характеристиками міцності на згин при короткочасному статичному навантаженні й границею витривалості, та на основі аналізу експериментальних даних щодо визначення границі витривалості титанокобальтових сплавів в умовах віднульового гармонічного циклу можна зробити висновок, що величина границі витривалості твердих сплавів титанокобальтової групи становить 60...75% від значення міцності на згин [16, 17]. Це дає підстави стверджувати, що отримане підвищення після ОІМП характеристик конструкційної міцності та опору руйнуванню інструментального матеріалу при статичному навантаженні повинно підвищити характеристики циклічної міцності та довговічності, які є важливими в умовах роботи різального інструменту [18].

Практичне значення отриманих результатів підтверджується лабораторними випробуваннями різців, оснащених твердосплавними пластинами з Т15К6 без покриття (таблиця 4) методом «руйнуючої подачі» [19].

Таблиця 4

Порівняльні випробування різців при точінні сталі 40Х\*

Інструмент	Період стійкості до руйнування $T_p$ , хв.	Руйнуюча подача $S_p$ , мм/об	Коефіцієнт варіації $V_{Sp}$
Т15К6	12	1,63	0,38
Т15К6+ОІМП	14	2,05	0,25

\*Режими різання: швидкість різання – 40 м/хв.; глибина різання – 8 мм; діапазон подач – 0,8...2,05мм/об.

Статистичні дослідження роботоздатності різців показують, що період їх стійкості має значне розсіювання [1]. Застосування ОІМП дозволяє мінімізувати розкид величин показників, які характеризують експлуатаційну надійність різальних інструментів (табл. 4).

Таблиця 5

Результати випробувань збірних різців Т15К6 при обробці сталі 40Х\*

Матеріал інструменту	Середній період стійкості, хв	Коефіцієнт варіації	$\gamma$ -% період стійкості, хв
Т15К6	42	0,82	12,6
Т15К6+ОІМП	48	0,47	24,5

\*Режими різання: швидкість різання – 78 м/хв.; подача – 0,86 мм/об; глибина різання – 3 мм.

Подальший розвиток методів модифікації твердосплавного інструменту необхідно розвивати в напрямку комбінованих технологій зміцнення. Отримано позитивні результати комбінації ОІМП з попередньою віброабразивною обробкою [19], з літературних джерел відомо про підвищення твердості та зносостійкості при комбінації попереднього нагріву зразка струмами високої частоти з наступним впливом імпульсного магнітного поля високої напруги [20]. Комбіновані технології модифікації твердосплавного інструменту для обробки на важких верстатах мають складатися з процесу об'ємної модифікації (ОІМП) та процесів поверхневого зміцнення, таких, як нанесення зносостійких покриттів, магнітоабразивна обробка тощо.

**Висновки.** Аналіз роботи та відмов інструменту при обробці на важких верстатах показує, що для підвищення ресурсу й роботоздатності інструменту необхідно застосовувати технології зміцнення на основі поверхневої та об'ємної модифікації.

Перспективними методами модифікації твердого сплаву є фізичні методи: метод нанесення PVD-покриттів, у тому числі покриттів дискретного типу, та метод обробки імпульсним магнітним полем.

Показано, що, визначивши максимально припустимий крок тріщини в суцільному покритті, є можливість закласти розміри дискретної ділянки покриття з урахуванням експлуатаційних та залишкових напружень на етапі конструювання різального інструменту з покриттям. Це дозволяє виключити когезійне розтріскування останнього та підвищити когезійну міцність покриття при експлуатації інструменту в умовах напружень розтягу, що є характерним для обробки на важких верстатах.

Отримано, що модифікація твердих сплавів T5K10 та T15K6 обробкою імпульсним магнітним полем залежно від застосованих режимів призводить до зростання границі міцності на згин при статичному навантаженні на 16...27% та на 14%, що дозволяє прогнозувати зростання границі витривалості.

Виробничі випробування в умовах ЗАТ «НКМЗ» показали, що стійкість змінних багатограничних неперезагострювальних різальних пластин SNMN 190912T при обробці вальцювальних валків підвищується в 2,5 раза порівняно з інструментом без покриття, а стійкість інструменту з покриттям дискретного типу збільшується в 3,7 раза та в 1,45 раза порівняно з інструментом без покриття та з суцільним покриттям відповідно.

Лабораторні випробуваннями різців, оснащених твердосплавними пластинами з T15K6 методом «руйнуючої подачі» показали, що обробка імпульсним магнітним полем призводить до підвищення періоду стійкості до руйнування на 17% та зменшення коефіцієнта варіації на 34%.

**Conclusions.** Analysis of the tool work and refusals when heavy cutting shows the necessity to use methods of surface and bulk modification for improving tool performance and life time.

It is shown that physical methods such as the plasma vapor deposition (PVD) and the pulsed magnetic field treatment are promising for surface and bulk modification of tool materials.

It is shown that cohesion cracking of a coating under the action of effective tensile stresses which are the sum of operating and residual stresses can be avoided by creating a regular discrete relief with a coating region size determined from the calculated crack step of continuous coating. This increases carbide tool surface strength under operating conditions for heavy machines.

It is obtained that the pulsed magnetic field treatment of cutter plates made of 85% tungsten carbide, 5% titanium carbide, 10% cobalt and plates made of 79% tungsten carbide, 15% titanium carbide, 6% cobalt leads to a dependent on treatment regimes increase in bending strength limit under static load by 16 ... 27% and 14%. This allows predicting the increase of endurance limit.

Tests in industrial conditions showed that the life time of replaceable insert SNMN

190912T with TiN continuous coating increases in 2.5 times as compared with the uncoated one and the life time of the same cutter plate with TiN discrete coating increases in 3.7 times and 1.45 times as compared with the uncoated plate and one with continuous coating.

Laboratory tests for carbide cutting tool by “breaking feeding” method showed that the pulsed magnetic field treatment leads to an increase in the period of resistance to failure by 17% and reduce the coefficient of variation by 34%.

### Список використаної літератури

1. Клименко, Г.П. Основы рациональной эксплуатации режущего инструмента [Текст] / Г.П. Клименко. – Краматорськ: ДГМА, 2006. – 200 с.
2. Лолодзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента [Текст] / Т.Н. Лолодзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
3. Новиков, Н.В. Методы упрочнения поверхностей машиностроительных деталей [Текст] / Н.В. Новиков, А.А. Бидный, Б.А. Ляшенко и др. – Киев: ИСМ АН УССР, 1989. – 112 с.
4. Klocke, F. Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications / F. Klocke, T. Krig. // CIRP Ann. – Manufacturing Technology. 1999. – V. 48, №2. – P. 515 – 525.
5. Васин, С.А. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании [Текст] / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2001. – 448 с.
6. Об упрочняющей роли вакуум-плазменных покрытий [Текст] / А.В. Рутковский, Б.А. Ляшенко, А.П. Гопкало, Е.Б. Сорока // Пробл. прочности. – 1999. – № 6. – С. 123 – 127.
7. Baragetti, S. Fatigue behavior and FEM modeling of thin-coated components / S. Baragetti, G.M. La Vecchia, A. Terranova // International Journal of Fatigue. – 2003. – Vol. 25. – P. 1229 – 1238.
8. Ляшенко, Б.А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры [Текст] / Б.А. Ляшенко, А.Я. Мовшович, А.И. Долматов // Технологические системы. – 2001. – № 4 (10). – С. 17 – 25.
9. Soroka, O.V. Evaluation of residual stresses in PVD-coatings. Part 2 / O.V. Soroka, S.A. Klymenko and M.Yu. Kopeikina // Strength of materials – 2010. – Vol. 42, № 4. – P. 450 – 458.
10. Soroka, O.V. Ensuring stability of PVD coatings by producing a discrete topography with preset parameters // J. of Superhard Mat. – 2009. – Vol. 31, № 5. – P. 347 – 353.
11. Soroka, O.V. Ensuring the Adhesion and Cohesion Strength of PVD (TiAl)N and TiN Coatings / O.V. Soroka, S.A. Klimentenko and M.Yu. Kopeikina // Russian Metallurgy (Metally). – 2011, No.4. – P. 350 – 355.
12. Постников, С.Н. Влияние импульсных полей на усталость быстрорежущей стали [Текст] / С.Н. Постников, А.А. Черников // Электронная обработка материалов. – 1981. – №4. – С. 65 – 68.
13. Комшина, А.В. Перспективность метода низкоэнергетической обработки материалов с использованием магнитного поля [Электронный доступ] / А.В. Комшина, А.С. Помельникова // Наука и образование Научное издание МГТУ им. Баумана 2012. – С. 463 – 488. – Режим доступа к журн.: <http://technomag.edu.ru/doc/454270.html>
14. Дриц, В. Влияние магнитной обработки на эксплуатационные характеристики режущих инструментов и трущихся деталей [Текст] / В. Дриц // Обработка импульсным магнитным полем: материалы IV научно-технического семинара по нетрадиционным технологиям в машиностроении. – София – Горький. – 1988. – С. 85 – 97.
15. Постников, С.Н. Перестройка дефектных комплексов в кристаллических твердых телах под действием магнитных полей допороговых энергий [Текст] / С.Н. Постников, В.Л. Сидоров, А.В. Иляхинский // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюзный межвузовский сборник. – Горький. – 1980. – С. 138 – 143.
16. Соппротивление материалов деформированию и разрушению: справочное пособие в 2т. [Текст] / В.Т. Трощенко, А.Я. Красовский, В.В. Покровский и др.; под ред. В.Т. Трощенко. – Т. 2. – Киев: Наукова думка. – 1994. – 701 с.
17. Лошак, М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов [Текст] / М.Г. Лошак. – Киев: Наук. Думка, 1984. – 328 с.
18. Прогнозування втомної міцності твердих сплавів, оброблених імпульсним магнітним полем [Текст] / О.В. Сорока, Ю.М. Родічев, В.Д. Ковальов, Я.В. Васильченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ – Київ. – 2013. – Вип. 32. – С. 317 – 323.
19. Применение обработки импульсным магнитным полем для упрочнения деталей машин и режущего инструмента [Текст] / В.Д. Ковалев, Я.В. Васильченко, Г.П. Клименко и др. // Вестник двигателестроения. – 2004. – №4. – С. 149 – 151.
20. Овчаренко, А.Г. Исследование влияния комбинированной магнитно-импульсной обработки на качество твердосплавного инструмента [Текст] / А.Г. Овчаренко, А.Ю. Козлюк, М.О. Курепин // Обработка металлов. – 2011. – №3. – С. 95 – 98.

Отримано 01.08.2013