

О. В. Хижняк, інженер., В. Г. Хижняк, д-р техн. наук., проф. каф. МТО НТУУ (Київський політехнічний інститут), Н. А. Харченко, к. т. н, ст. виклад. каф. ПМ і ТКМ (Сумський державний університет)

## Зносостійкі багатокomпонентні карбідні Ti, V, Cr покриття на сталі У10А та твердому сплаві Т15К6

В статті плануванням експерименту методом симплексних ґраток Шеффе оптимізовані склади вихідних компонентів для комплексного насичення сталі У10А та твердого сплаву Т15К6 титаном, ванадієм, хромом, що дозволило отримувати карбідне покриття (Ti,V,Cr)C з максимальною мікротвердістю та товщиною. Методами фізичного матеріалознавства встановлено фазовий та хімічний склади покриттів, структура, механічні властивості, а саме мікротвердість, мікроміцність, мікрокрихкість, адгезію отриманих покриттів з основою. Мікромеханічні характеристики визначали методом кінетичної мікротвердості. Показано, що покриття (Ti,V,Cr)C в порівнянні з відомими карбідними покриттями має високу тріщиностійкість, мікротвердість, адгезію з основою. Визначено, що зносостійкість сталі У10А з покриттям (Ti,V,Cr)C, в умовах тертя ковзання без змащування вища за зносостійкість сталі з відомими карбідними покриттями в 1,2-2,7 рази, а зносостійкість при різанні сталі Х12М твердосплавних пластин Т15К6 з покриттям (Ti,V,Cr)C вища в 3,5 рази за зносостійкість вихідного сплаву, та 1,5-1,7 рази за зносостійкість пластин з відомими покриттями.

**Ключові слова:** сталь У10А, твердий сплав Т15К6, карбіди, Ti, V, Cr, багатокomпонентні карбіди, планування експерименту, мікромеханічні властивості, зносостійкість.

The paper experiment planning method of simplex lattices proposed «Scheff» optimized composition of the initial components for integrated steel U10A saturation and hard alloy T15K6 titanium, vanadium, chromium, allowing to obtain carbide coating (Ti,V,Cr)C with maximum microhardness and thickness. Methods of physical material set phase and chemical composition of the coating structure, mechanical properties, such as microhardness, mikromitsnist, mikrokrjhkist, adhesion of the coating to the base. These micromechanical characteristics were determined using the method of kinetic microhardness, allowing the load to determine the formation of cracks, the size of the radial cracks. It is shown that the coating (Ti,V, Cr)C compared with the known one-component and two-component carbide coating has high fracture toughness, microhardness, adhesion to the base. Determined that the wear resistance of steel U10A coated (Ti,V,Cr)C, in terms of friction without lubrication for higher wear resistance steel with carbide coating known in 1,2-2,7 times, and wear resistance carbide coated plates T15K6 (Ti,V,Cr)C higher at 3,5 times the wear resistance of the original alloy and 1,5-1,7 times the durability of plates with known coatings.

**Keywords:** steel U10A, hard alloy T15K6, carbides, Ti, V, Cr, multicomponent carbides, design of experiments, mechanical properties, durability.

**Вступ.** Інструментальні сталі та тверді сплави в процесі експлуатації зазнають впливу високих температур та напружень, зносу, корозії. При цьому, найбільше руйнування виробів відбувається на поверхні, що, цілком зрозуміло, призвели до розробки методів підвищення властивостей поверхні інструментів. На цей час відома значна кількість технологій поверхневого зміцнення, що дозволяє підвищити працездатність інструментальних матеріалів [1 – 6].

Найбільш перспективним напрямком підвищення стійкості інструментів є розробка покриттів на основі карбідів перехідних металів IV – VI груп періодичної системи, які відзначають комплексом високих фізико-механічних властивостей [1, 3, 4]. Значна кількість робіт присвячена процесам одно- та двокомпонентного насичення [1, 3, 4]. В той же час, процеси триком-

понентного насичення перехідними металами інструментальних сталей та твердих сплавів досліджені не достатньо.

Необхідно відзначити, що зносостійкість композиції покриття – основа в умовах експлуатації визначаються в першу чергу структурою, мікротвердістю та мікрокрихкістю покриттів [2, 7-9]. Типова ситуація, яка зустрічається на практиці й розглянута в цій роботі це твердий шар на більш пластичній та менш твердій основі. Отримання для карбідних покриттів високого опору тепловому або механічному ударам в силу їх високої крихкості не завжди можливо. Слід зазначити, що для вирішення викладених в роботі питань відсутні методики кількісної оцінки мікрокрихкості твердих покриттів, їх мікроміцності та адгезії з основою.

**Постановка завдання.** Метою запропонованої роботи є отримання

на поверхні інструментальних сталей та твердих сплавів карбідних покриттів титану, ванадію і хрому при одно-, дво- та трьохкомпонентному насиченні; встановлення оптимальних складів вихідних компонентів при трьохкомпонентному насиченні; визначення мікротвердості, мікрокрихкості, адгезійної взаємодії покриттів з основою, зносостійкості.

**Матеріали та методика досліджень.** В якості об'єктів дослідження були вибрані сталі У10А, та твердий сплав Т15К6. Покриття наносили в закритому реакційному просторі за умов зниженого тиску. В якості вихідних компонентів використовували порошки або суміш порошків титану, ванадію, хрому, чотирихлористий вуглець та деревне вугілля [3].

Вплив ефектів взаємодії (склад вихідної суміші) на параметри оптимізації

(товщина, мікротвердість, пористість покриттів, тощо) є суттєвим. В цій ситуації аналітичне представлення в залежності «склад-властивості» можливе при аналізі математичної моделі планування експерименту. Відомий метод Шеффе, який дає можливість побудувати залежність «склад-властивості» [8]. Склад суміші задають симплексом, а поверхню відгуку (властивість) описують аналітичними рівняннями.

Склади вихідних компонентів вибирали відповідно до планів Шеффе [8]. Вони відповідали вузам симплексних ґраток таким чином були досліджені фазовий, хімічний склад, структура, мікротвердість, тощо в широкому діапазоні складів насичуючої суміші.

Мікротвердість карбідних шарів оцінювалися при індентуванні на приладі ПМТ із записом кривої навантаження. Площадка на кривій «зусилля-деформація» відповідала навантаженню утворення тріщини  $P_m$  з розміром  $C$ . Відношення  $P_m / C^2$  було запропоновано називати мікроміцністю покриття ( $\sigma_{mi}$ ). Використання, як характеристики мікроміцності, цілком правомірно. Тріщина, як продовження відбитку піраміди Віккерса, росте в тому випадку, поки розклинююче напруження, ініційоване індентором, перевищує межу міцності на розрив.

В якості величини, що характеризує мікротвердість карбідних покриттів, запропоновано використовувати безрозмірний показник  $\gamma$ , який відображає зв'язок між мікротвердістю покриття ( $P_H / d_H^2$ ) та його мікроміцністю ( $P_T / C^2$ ).

Фазовий та хімічний склад, мікроструктура покриттів визначалися методами сучасного матеріалознавства.

#### Результати досліджень.

Хіміко-термічну обробку сталі У10А та твердого сплаву ВК8 виконували порошковим методом при температурі 1050 оС впродовж 2 годин. В якості вихідних сумішей використовували порошки або суміш порошків Тi, V, Cr. Склади вихідних сумішей відповідали вузам симплексної ґратки. В табл. 1 наведені результати досліджень фазового складу, товщини, мікротвердості покриттів на сталі У10А.

Слід зазначити, що при трикомпонентному насиченню Тi, V, Cr і при двокомпонентних процесах титанованадіювання, титанохромування на сталі У10А і сплаві

ВК8 утворюються дифузійні шари на основі карбіду титану ТiС, легованого в певній мірі ванадієм та хромом.

Сформовані при трикомпонентному насиченні на сталі У10А і твердому сплаві ВК8 шари ТiС відрізняються в залежності від складу вихідної суміші товщиною, мікротвердістю, періодом кристалічної ґратки, пористістю.

Параметрами оптимізації було обрано: мікротвердість, товщину дифузійного шару. Експериментальні результати обраховані в вигляді повного четвертого ступеня, графічна інтерпретація яких наведена на рис. 1.

Слід зазначити, що області оптимальних складів для товщини, мікротвердості та мікротвердості близькі. Розрахунки коефіцієнтів кореляції між вказаними властивостями свідчать про те, що зв'язок є статично значимим.

В роботі показано, що при одночасному насиченні сталі У10А та твердого сплаву Т15К6 титаном і ванадієм, титаном і хромом, титаном, ванадієм, хромом на поверхні останніх формується шар на основі карбіду титану ТiС, товщина, мікротвердість, мікротвердість якого визначається співвідношенням вихідних компонентів. Концентрація ванадію та хрому у шарі ТiС після

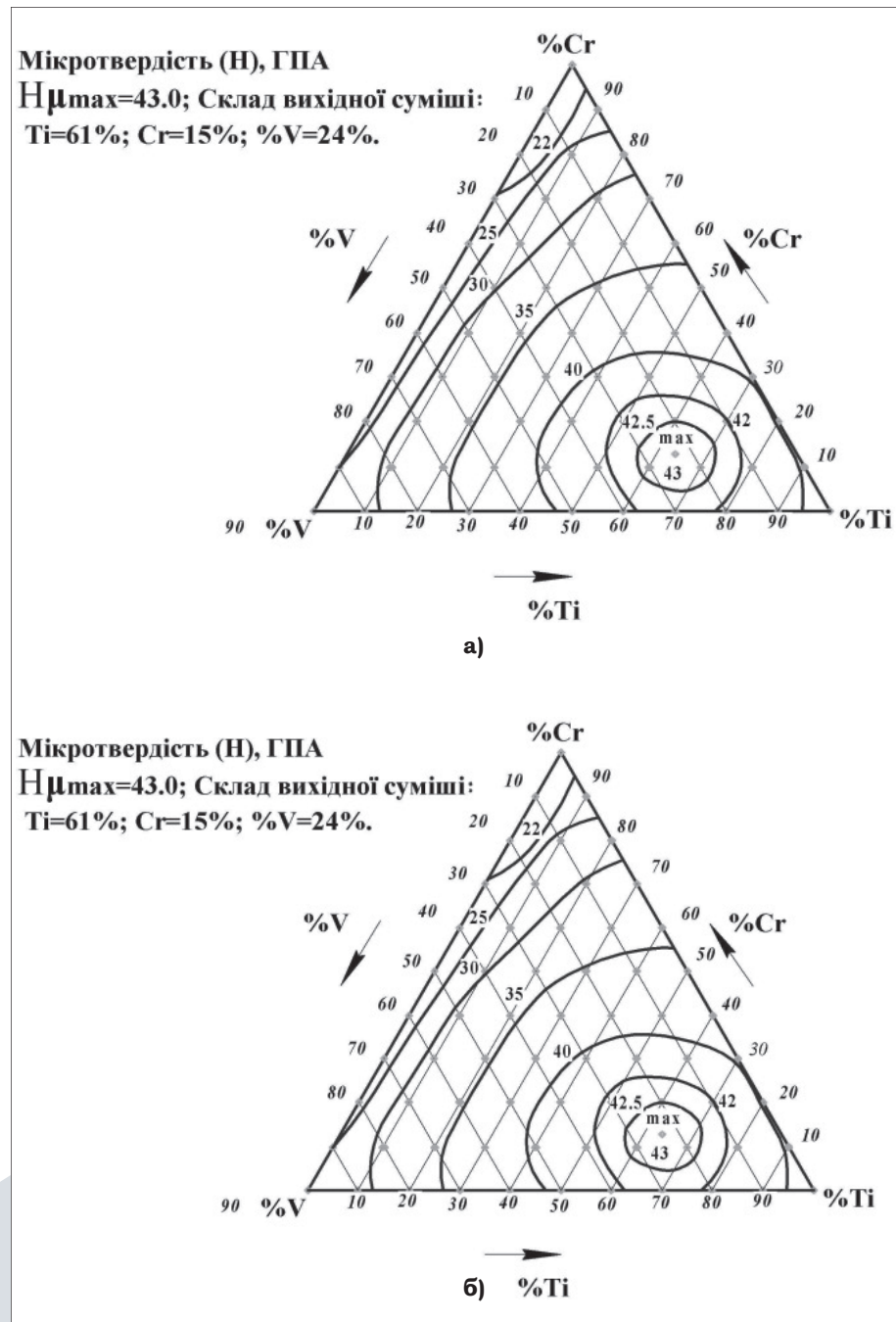


Рис. 1. Зміна товщини шару (а), мікротвердості (б) покриття Ti-V-Cr на сталі У10А

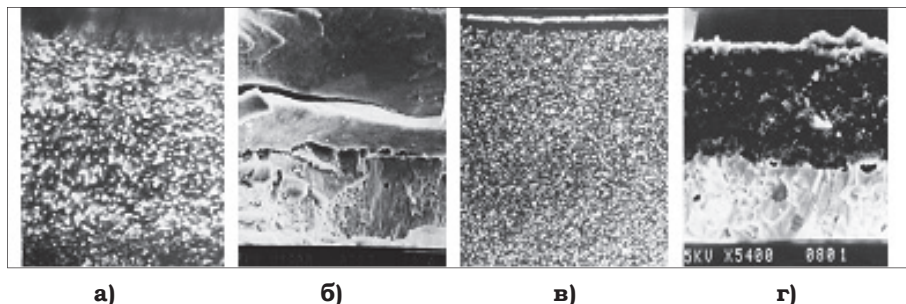
титанванадійхромування становить відповідно 1,5–2,9 та 0,9–1,6 % мас. на сталі У10А; 1,9–3,1; 1,0–1,6 % мас. на твердому сплаві Т15К6. Мікроструктури покриттів (Ti,V,Cr)C наведені на рис. 2.

Загальною ознакою покриттів на сталях та твердих сплавах є дрібнозерниста структура по всій товщині. Встановлено, що карбідні шари (Ti,V,Cr)C складаються з окремих рівновісних зерен розміром 0,5 – 1,0 мкм на сталі У10А та 0,1 – 0,5 мкм на сплаві Т15К6. В покриттях на сталі У10А будова була виявлена металографічним методом шляхом травлення шліфів реактивом Мураками. На твердому сплаві руйнування покриття відбувається при зламі по границях зерен. В цьому випадку формується рельєф, що відповідає формі окремих зерен. Слід зазначити, що виділення окремих фаз на границях зерен відсутнє. Міжкристалітний злам покриття (Ti,

V, Cr)C на сталі Т15К6 обумовлений, вірогідніше за все, низькою когезією зерен.

Останнє підтверджується результатами досліджень механічних властивостей покриттів методом кінетичної мікротвердості наведено в таблиці 2.

Металографічними дослідженнями матеріалу покриття в області проникнення алмазної піраміди приладу ПМТ-3 встановлена присутність зони пластичності та зони руйнування. Остання проявляється у вигляді радіальних тріщин.



**Рис. 2. Мікроструктури титанованадійхромових покриттів на сталі У10А (а, б) та твердому сплаві Т15К6 (в, з); а) –  $\times 1400$ , б) –  $\times 1000$ , в) –  $\times 1200$ , з) –  $\times 5400$ , б, з – злами, а, в – травник Мураками, насичуюча суміш: Ti (65%), V (20%), Cr (15%); а, в – оптичний мікроскоп**

**Таблиця 1. Матриця планування й результати визначення фазового складу, товщини, мікротвердості та мікротвердості покриттів Ti, V, Cr на сталі У10А**

Склад суміші			Позначення, у	Характеристики та властивості покриттів		
Ti	V	Cr		Фазовий склад	Товщина, мкм	Мікротвердість, ГПа
( $x_1$ )	( $x_2$ )	( $x_3$ )				
1	0	0	$Y_1$	TiC	21,0	18,0
3/4	1/4	0	$Y_{1112}$	TiC	22,0	22,0
1/2	1/2	0	$Y_{12}$	TiC	18,0	23,6
1/4	3/4	0	$Y_{1222}$	TiC	17,0	24,7
1/4	1	0	$Y_2$	VC, $V_2C$	14,0	25,1
1/2	3/4	1/4	$Y_{2223}$	VC, $Cr_7C_3$	14,0	34,3
3/4	1/2	1/2	$Y_{23}$	VC, $Cr_7C_3$	18,0	40,7
1/2	1/4	3/4	$Y_{2333}$	VC, $Cr_7C_3$	18,0	42,1
1/4	0	1	$Y_3$	$Cr_7C_3$ , $Cr_{23}C_6$	16,0	39,4
1/4	0	3/4	$Y_{1333}$	TiC	17,5	40,0
1/3	0	1/2	$Y_{13}$	TiC	18,5	37,5
	0	1/4	$Y_{1113}$	TiC	21,0	31,0
	1/4	1/4	$Y_{1123}$	TiC	15,0	36,1
	1/2	1/4	$Y_{1223}$	TiC	12,0	37,5
	1/4	1/2	$Y_{1233}$	TiC	22,0	41,3
	1/3	1/3	$Y_{123}$	TiC	14,0	39,0



Аналіз отриманих результатів показав залежність показників мікрOMEханічних характеристик покриттів від їх твердості, структури (розмір та форма зерен) напружень першого роду. Останній показник визначається різницею в коефіцієнтах термічного розширення покриття і основи, температурою хіміко-термічної обробки, товщиною покриттів, наступною термічною обробкою. Серед досліджених в роботі покриттів найбільші після ХТО напруження виникають в шарах карбіду VC, найменші – в Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Цілоком зрозуміло, що це будуть напруження стиснення, бо коефіцієнт термічного розширення сталей та твердих сплавів вищий, ніж карбідів. Таким чином, тріщини ініційовані алмазним індентором приладу ПМТ-3, паралельна границі покриття – основа.

Встановлено, що найвища міцність характерна для покриттів (Ti,V,Cr)C та Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> при суттєво відмінній мікротвердості. Самим крихким виявилось покриття TiC при мікротвердості 39,8 ГПа практично однакові з мікротвердістю (Ti,V,Cr)C 41,0 ГПа. Саме високе напруження відшарування покриття від основи має місце для шарів Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> та (Ti,V,Cr)C. Високі величини вказаної властивості можна пояснити значним рівнем проникнення титану, ванадію, хрому в ос-

нову, а елементів основи в покриття, та рівнем напружень першого роду. Відомі факти відшарування карбідних покриттів значної товщини при охолодженні після ХТО, або в процесі експлуатації при виникненні в покритті кромки з малим радіусом кривизни. Утворені в покритті такі кромки будуть концентрувати напруження.

Результати випробовувань сталі У10А з покриттями в умовах тертя ковзання без змащування по схемі вал-вкладка без попередньої притирки поверхонь наведено на рис. 3.

Загальною ознакою всіх покриттів при випробовуваннях запропонована методикою, є висока швидкість на початку експерименту з планування. Це зумовлено процесами притирання в перші часи випробовувань, а також значними контактними навантаженнями. Останні з часом, по мірі зростання площі лунки зменшуються, як і зменшується вплив на результати зношування в процесі притирання.

Випробовування показали, що покриття сталі У10А в зоні контакту зношуються за прийнятих жорстоких умов за 20–50 с. експерименту. Весь наступний час випробовувань лабораторних зразків, експлуатації реальних деталей машин, інструментів зношується композиція покриття – основа. Як вже зазначили, формування зон покриття з гострими краями (радіус

заокруглення  $r$ ) при дії в покритті товщиною  $t$  стискуючих напружень  $\sigma_t$  сприяє виникненню нормального напруження  $\sigma_n = \sigma_t \cdot (t/r)$  [11] та відшаруванню покриттів.

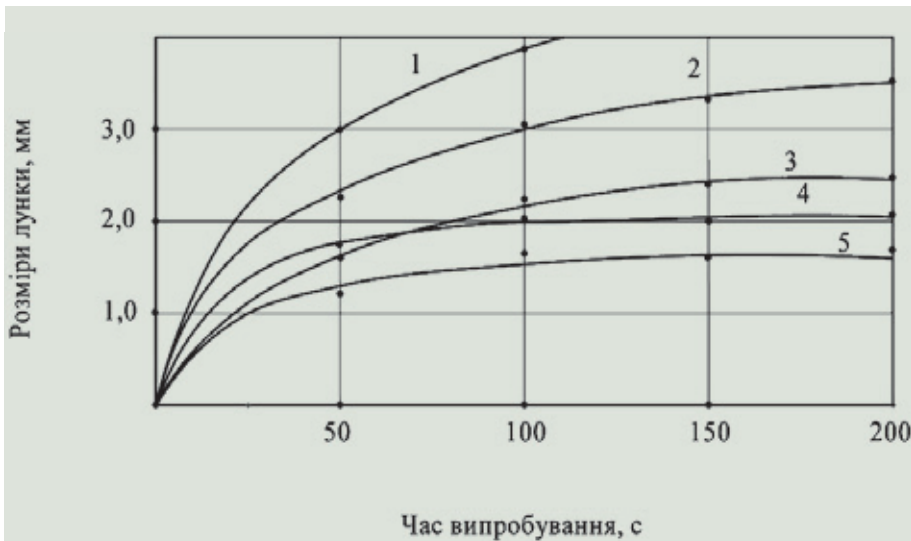
В роботі з метою визначення доцільності нанесення багатоконпонентних карбідних покриттів (Ti, V, Cr) C було проведено стійкісні порівняльні випробовування багатогранних тврдосплавних пластин з механічним кріпленням із сплаву Т15К6 при точінні сталі Х12М (рис. 4).

Випробовування проводили в жорстоких умовах різання відповідно до відомих рекомендацій [12]. Ріжучі властивості пластин з покриттями порівнювали з ріжучими властивостями пластин без покриттів. Аналіз отриманих даних показав, що найбільший ефект при різанні сталі Х12М показав сплав Т15К6 з покриттям (Ti, V, Cr) C. Встановлену залежність можна пояснити з урахуванням відомих факторів, які впливають на стійкість інструменту [3,5,6]: висока твердість сполуки (Ti, V, Cr)C, значні мікрOMEханічні властивості, висока щільність і хороша адгезія з карбідним шаром вторинних структур, що виникають в зоні контакту при різанні.

**Висновок.** Методом планування експерименту визначено оптимальні склади вихідних сумішей для отримання на сталі У10А та твердому сплаві Т15К6

Таблиця 2. Фазовий склад та властивості карбідних покриттів на сталі У10А та твердому сплаві Т15К6 склад насичуючої суміші: Ti 70%, V 15%, Cr 15%; температура 1050 °С;  $\tau=2$  години

Вид обробки	Вихідний сплав	Фазовий склад покриття	Товщина, мкм	Мікротвердість, ГПа	Навантаження утворення тріщини, Рг, Н	Розмір тріщини, С, мкм	Мікроміцність, ГПа	Показник мікрорихкості, $\gamma$	Напруження відшарування покриття, ГПа
Титанування	У10А	TiC	17,5	39,8	0,50	40,5	0,30	130,5	0,07
	Т15К6	TiC	4,5	30,1	0,60	35,0	0,50	61,6	0,19
Ванадіювання	У10	VC	16,0	29,8	0,40	34,5	0,34	87,8	0,12
	Т15К6	VC	5,0	26,6	0,45	31,0	0,47	56,8	0,18
Хромування	У10А	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	8,0	16,2	0,80	35,0	0,65	24,8	0,23
		Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	13,0	17,5	0,45	36,0	0,58	30,2	–
Титанованадійхромування	У10А	(Ti,V,Cr) C	19,5	41,0	0,65	37,0	0,47	86,3	0,12
	Т15К6	(Ti,V,Cr) C	6,5	30,5	0,65	35,0	0,53	57,5	0,14



**Рис. 3. Зносостійкість сталі У10А з карбідними покриттями в умовах тертя ковзання без змащування: 1-У10А; 2-VC; 3-TiC; 4- Cr7C3, Cr23C6; 5-(Ti, V, Cr)C; швидкість ковзання 5 м/с; навантаження 1,5 Н**

багатокомпонентних покриттів (Ti, V, Cr)C з максимальною товщиною та мікротвердістю.

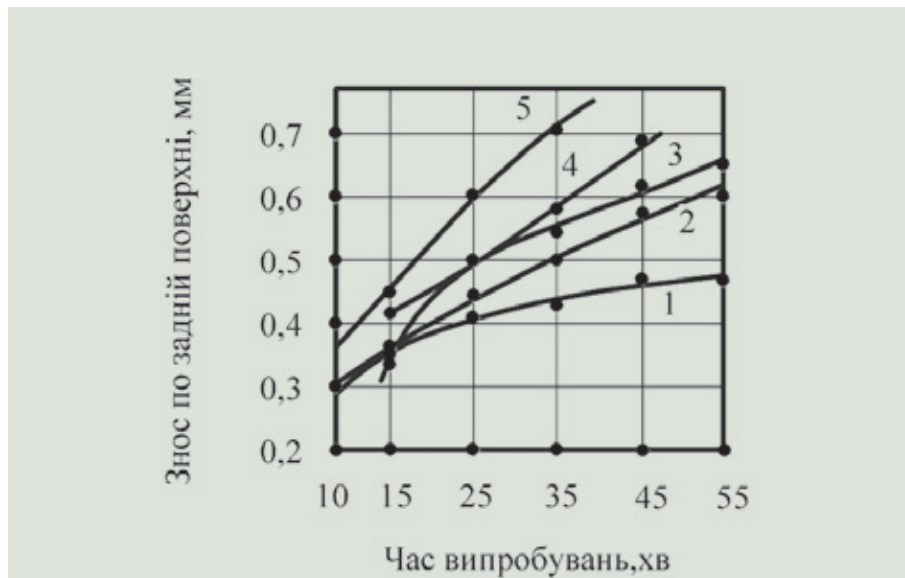
Мікροструктурним аналізом встановлено, що карбідні шари (Ti, V, Cr)C складаються з окремих рівновісних зерен розміром 0,5–1,0 мкм на сталі У10А та 0,1 – 0,5 мкм на сплаві Т15К6.

Мікротвердість шарів (Ti, V, Cr)C, досліджена в роботі, становила 41,0 ГПа на сталі У10А та 30,5 ГПа на сплаві Т15К6. Методом кінетичної мікротвердості показано, що показники мікротвердості, мікрокрихкості, адгезії з основою вище, ніж покриттів на основі карбиду титану TiC; ванадію VC, V<sub>2</sub>C; хрому Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>.

Зносостійкість сталі У10А з покриттям (Ti, V, Cr)C вища за зносостійкість сталі з покриттями на основі карбідів титану, ванадію, хрому в 1,2–2,7 рази, зносостійкість сплаву Т15К6 з покриттям (Ti, V, Cr)C при обробці різанням сталі Х12М зросла в порівнянні з відомими в 1,5–1,7 рази.

#### Список літератури

1. Многокомпонентные диффузионные покрытия на железуглеродистых сталях / А. Г. Ворошин, А. А. Шматов, Б. Б. Хина, С. Д. Башлик. – Минск : БНТУ, 2007. – 470 с.
2. Прокошкин Д. А. Химико-термическая обработка металлов – карбонитрация / Д. А. Прокошкин. – М. : Машиностроение, 1984. – 240 с.
3. Диффузионные карбидные покрытия / В. Ф. Лоскутов,



**Рис. 4. Кінетика зносу твердосплавної пластини Т15К6 з покриттями: 1 – (Ti, V, Cr)C; 2 – (Ti, Cr)C; 3 – TiC; 4 – VC, Cr7C3; 5 в без покриття; точіння сталі Х12М; V=3,3 м/с; S = 0,036 мм/об; τ = 1,0 мм**

В. Г. Хижняк, Ю. А. Куцицкий, М. В. Киндрачук. – К. : Техніка, 1991. – 168 с.

4. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г. В. Борисенко, П. А. Васильев, П. Г. Воронин и др. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.

5. Мацевитый В.М. Покрывание для режущих инструментов / В.М. Мацевитый. – Х. : Вища школа, изд-во при Харьк.ун-те, 1987. – 128 с.

6. Верецака А.С Режущие инструменты с износостойким покрытием / А.С Верецака, И.П.

Третьяков. – М. : Машиностроение, 1986 – 192 с.

7. Хижняк В.Г. Определение скальваемости карбидных покрытий. Диффузионные покрытия на металлах / В.Г. Хижняк, Е.Я. Чудновская. – Киев: ИПМ, 1988. – С. 93-97.

8. Новик Ф. С. Планирование эксперимента на симплекс при изучении металлических систем / Ф. С. Новик. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.

9. Аналитическое определение условий разрушения материалов с защитными покрытиями // Защитное покрытие на металлах / В. И. Похмурский, А. Т. Берестейский, И.А. Гныл и др. – Киев: Наука думка, 1984. – № 18. – С. 25-28.

10. Хижняк В.Г. Определение микрохрупкости карбидных покрытий с использованием метода кинетической микротвердости

// Известия высших учебных заведений. Черная металлургия / В. Г. Хижняк, О. І. Дудка, О. В. Хижняк. – 1996. – № 9. – С. 83-84.

11. Rawel P.C. Vapor deposition / P.C. Rawel. – New Yourk, 1996. – P. 198

12. Методика исследований металлургического инструмента общеметаллургического нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлургических станках. – Часть 1. – М. : Машиностроение, 1974 – 406 с.