

УДК 621.785

О. В. ХИЖНЯК, Р. А. КУРДИБАЙЛО, В. Г. ХИЖНЯК

*Національний технічний університет України «КПІ», Україна***ЗНОСОСТІЙКІ БАГАТОКОМПОНЕНТНІ КАРБІДНІ Ti, V, Cr
ПОКРИТТЯ НА СТАЛІ У10А ТА ТВЕРДОМУ СПЛАВІ Т15К6**

В статті планування 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) С 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.

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

Вступ. Інструментальні сталі і тверді сплави в процесі експлуатації зазнають впливу високих температур, зносу та корозії. При цьому, найбільше руйнування виробів відбувається на поверхні, що цілком зрозуміло, призвело до розробки методів підвищення властивостей поверхні інструментів. В теперішній час відома значна кількість технологій поверхневого зміцнення, що дозволяє підвищити роботоздатність інструментальних матеріалів [1-6].

Найбільш перспективним напрямком підвищення стійкості інструментів є розробка покриттів на основі карбідів перехідних металів IV-VI груп періодичної системи, які відзначаються 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 трьохкомпонентного насичення перехідними металами інструментальних сталей та твердих сплавів досліджені недостатньо.

Необхідно відзначити, що в композиції покриття – основа, зносостійкість в умовах експлуатації визначається в першу чергу структурою, мікротвердістю та мікрокрихкістю покриттів [2, 7-9]. Типова ситуація, яка зустрічається на практиці і розглянута в даній роботі - це твердий шар, що нанесено на більш пластичну і менш тверду основу. 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 і методика досліджень. В якості об'єктів дослідження були вибрані сталь У10А, та твердий сплав Т15К6. Покриття наносили в закритому реакційному просторі за умов зниженого тиску. В якості вихідних компонентів ви-

користували порошки або суміші порошоків титану, ванадію, хрому, чотирьох-користий 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 використанні математичної моделі планування експерименту. Відомий метод Шеффе, який дає можливість побудувати залежність «склад-властивості» [8]. Склад суміші задають симплексом, а поверхню відгуку (властивість) описують аналітичним рівнянням.

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

Мікротвердість карбідних шарів оцінювалися при індентуванні на приладі ПМТ із записом кривої навантаження. Плошадка на кривій «зусилля-деформація» відповідала навантаженню утворення тріщини P_T з розміром C . Відношення P_T/C^2 було запропоновано називати мікроміцністю покриття ($\sigma_{мп}$).

Використання $\sigma_{мп}$, як характеристики мікроміцності, цілком правомірно. Тріщина, як продовження відбитку піраміди Віккерса, росте в тому випадку, поки розклинююче напруження, ініційоване індентором, перевищує межу міцності на відрив.

В якості величини, що характеризує мікротвердість карбідних покриттів, запропоновано використовувати безрозмірний показник γ , який відображає зв'язок між мікротвердістю покриття H_m та його мікроміцністю ($\sigma_{мп}$):

$$\gamma = \frac{H_m}{\sigma_{мп}};$$

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

Результати досліджень. Хіміко-термічну обробку сталі У10А та твердого сплаву Т15К6 виконували порошковим методом при температурі 1050 °С впродовж 2 годин В якості вихідних сумішей використовували порошки або суміш порошоків Ті, V, Cr. Склади вихідних сумішей відповідали вузлам симплексної ґратки.

Слід зазначити, що при трикомпонентному насиченні Ті, V, Cr і при двокомпонентних процесах титанованадіювання, титанохромування на сталі У10А і сплаві Т15К6 утворюються дифузійні шари на основі карбіду титану ТіС, легovanого в певній мірі ванадієм та хромом. Сформовані при трикомпонентному насиченні на сталі У10А і твердому сплаві Т15К6 шари ТіС відрізняються в залежності від складу вихідної суміші хімічним складом, товщиною, мікротвердістю, періодом кристалічної ґратки.

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 табл. 1, наведені результати досліджень фазового складу, товщини, мікротвердості покриттів на сталі У10А.

Загальною ознакою будови покриттів на сталях та твердих сплавах є дрібнозерниста структура по всій товщині. Встановлено, що карбідні шари (Ті, V, Cr)С складаються з окремих рівновісних зерен розміром 0,5-1 мкм на сталі У10А та 0,1 – 0,5 мкм на сплаві Т15К6. Будова покриттів на сталі У10А була виявлена металографічним методом шляхом травлення шліфів реактивом Мураками. На твердому

Таблиця 1

Матриця планування і результати визначення фазового складу, товщини, мікротвердості покриттів Ti, V, Cr на сталі У10А

Склад суміші			Позначення у	Характеристики та властивості покриттів		
Ti (x ₁)	V (x ₂)	Cr (x ₃)		Фазовий склад	Товщина, мкм	Мікротвердість, ГПа
1	0	0	У ₁	TiC	21,0	18,0
3/4	1/4	0	У ₁₁₁₂	TiC	22,0	22,0
1/2	1/2	0	У ₁₂	TiC	18,0	23,6
1/4	3/4	0	У ₁₂₂₂	TiC	17,0	24,7
0	1	0	У ₂	VC, V ₂ C	14,0	25,1
0	3/4	1/4	У ₂₂₂₃	VC, Cr ₇ C ₃	14,0	34,3
0	1/2	1/2	У ₂₃	VC, Cr ₇ C ₃	18,0	40,7
0	1/4	3/4	У ₂₃₃₃	VC, Cr ₇ C ₃	18,0	42,1
0	0	1	У ₃	Cr ₇ C ₃ , Cr ₂₃ C ₆	16,0	39,4
1/4	0	3/4	У ₁₃₃₃	TiC	17,5	40,0
1/2	0	1/2	У ₁₃	TiC	18,5	37,5
3/4	0	1/4	У ₁₁₁₃	TiC	21,0	31,0
1/2	1/4	1/4	У ₁₁₂₃	TiC	15,0	36,1
1/4	1/2	1/4	У ₁₂₂₃	TiC	12,0	37,5
1/4	1/4	1/2	У ₁₂₃₃	TiC	22,0	41,3
1/3	1/3	1/3	У ₁₂₃	TiC	14,0	39,0

сплавів руйнування покриття при зламі відбувається по границях зерен. В цьому випадку формується рельєф, що відповідає формі окремих зерен. Міжкристалітний злам покриття (Ti, V, Cr) С на сплаві Т15К6 зумовлений, вірогідніше за все, низькою когезією зерен. Останнє підтверджується результатами досліджень механічних властивостей покриттів методом кінетичної мікротвердості табл. 2.

Таблиця 2

Фазовий склад та властивості карбідних покриттів на сталі У10А та твєрдому сплаві Т15К6; склад насичуючої суміші при титанованадійхромуванні: Ti 70%, V 15%, Cr 15%; температура 1050 °С; τ = 2 год

Вид обробки	Вихідний сплав	Фазовий склад покриття	Товщина, мкм	Мікротвердість, ГПа	Навантаження утворення тріщини, Р _{т.Н}	Розмір тріщини, С, мкм	Мікроміцність, ГПа	Показник мікротвердості, γ	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 ₇ C ₃	8,0	16,2	0,80	35,0	0,65	24,8	0,23
		Cr ₂₃ C ₆	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

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

Параметрами оптимізації було обрано: мікротвердість та товщину дифузійного шару. Експериментальні результати обраховані в вигляді моделі повного четвертого ступеня. Графічна інтерпретація результатів розрахунків наведена на рис. 1.

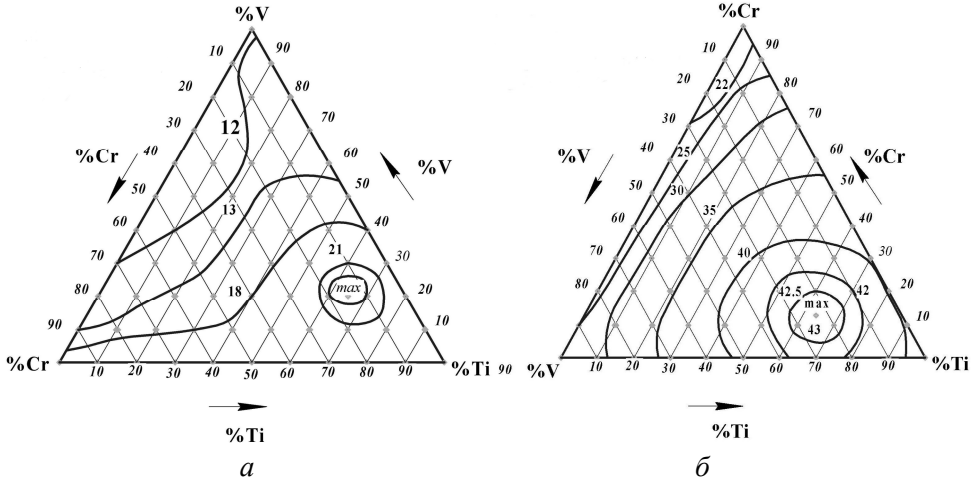


Рис. 1. (а) Зміна товщини шару (α), мкм, $\alpha_{\max}=23,7$ мкм; Склад суміші: $\text{Ti}=62,3\%$; $\text{V}=19,3\%$; $\text{Cr}=18,4\%$; (б) - мікротвердості (Н) ГПа, $H_{\mu \max}=43,0$; Склад суміші $\text{Ti}=61\%$; $\text{V}=24\%$; $\text{Cr}=15\%$, покриття Ti-V-Cr на сталі У10А

Концентрація ванадію та хрому у шарі TiC після 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) С наведені на рис. 2.

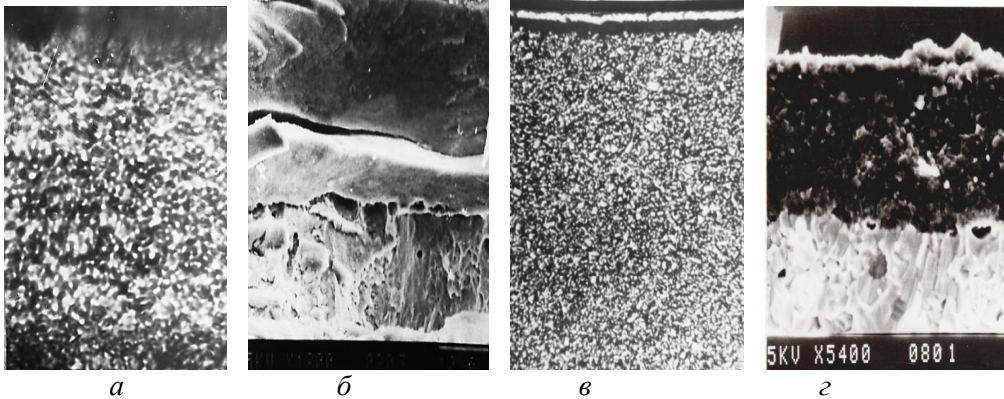


Рис. 2. Мікроструктури титанованадійхромових покриттів на сталі У10А (а, б) та твердому сплаві Т15К5 (в, з); а-х1400; б-х1000 в-х1200; з-х5400; б, з- злами, а, в - травник Мураками; а, в- оптичний мікроскоп, насичуюча суміш: $\text{Ti}(65\%)$, $\text{V}(20\%)$, $\text{Cr}(15\%)$

Аналіз отриманих результатів показав залежність показників мікромеханічних характеристик покриттів від їх твердості, структури (розміри 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 виника-

ють в шарах карбіду VC, найменші – в Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 . Цілком 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, паралельні границі покриття – основа.

Встановлено, що найвища мікроміцність характерна для покриттів (Ti, V, Cr) C та Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 при їх суттєво відмінній мікротвердості. Самим крихким виявилось покриття TiC мікротвердості 39,8 ГПа. Саме високе напруження відшарування покриття від основи має місце для шарів Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 та (Ti, V, Cr) C. Високі величини вказаної властивості можна пояснити значним рівнем проникнення титану, ванадію, хрому в основу, а елементів основи в покриття, а також рівнем напружень першого роду. Відомі факти відшарування карбідних покриттів значної товщини при охолодженні після ХТО, або в процесі експлуатації при виникненні в покритті кромок з малим радіусом кривизни.

Загальною ознакою всіх покриттів при випробовуваннях запропонованою методикою, є висока швидкість зношування на початку експерименту. 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, процес притирання.

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

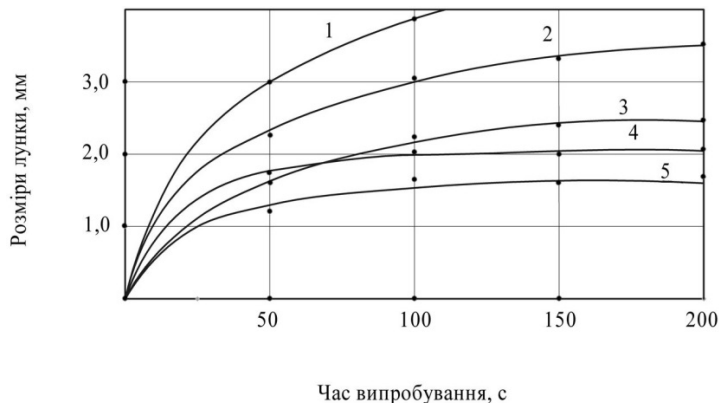


Рис. 3. Зносостійкість сталі У10А з карбідними покриттями в умовах тертя ковзання без змащування: 1-У10А; сталь У10А з покриттями: 2-VC; 3-TiC; 4- Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 ; 5 - (Ti, V, Cr) C; швидкість ковзання 5 м/с; навантаження 1,5Н

Випробовування показали, що покриття на сталі У10А в зоні контакту зношуються за прийнятих жорстоких умов експерименту напротязі 20-50 с.. Весь наступний час зношується композиція покриття – основа. Як вже зазначили, формування зон покриття з гострими краями (радіус заокруглення r) при дії в покритті товщиною t стискуючих напружень σ_t сприяє виникненню нормального

напруження $\sigma_n = \sigma_t \cdot \frac{t}{r}$ [10] та відшаруванню покриттів.

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



Рис. 4. Кінетика зносу твердосплавної пластини T15K6 з покриттями: 1-(Ti, V, Cr) C; 2-(Ti, Cr) C; 3-TiC; 4- VC, Cr7C3; 5-без покриття; точіння сталі X12M; $V = 3,3$ м/с; $S = 0,036$ мм/об; $\tau = 1,0$ мм

Випробовування проводили в жорстоких умовах різання відповідно до відомих рекомендацій [11]. Ріжучі властивості пластин з покриттями порівнювали з ріжучими властивостями пластин без покриттів. Аналіз отриманих даних показав, що найбільший ефект при різанні сталі X12M показав сплав T15K6 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 мікромеханічні 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 T15K6 багатоконпонентних покриттів (Ti, V, Cr)C з максимальною товщиною та мікротвердістю.

Мікроструктурним аналізом встановлено, що карбідні шари (Ti, V, Cr)C складаються з окремих рівновісних зерен розміром 0,5-1 мкм на сталі У10А та 0,1 – 0,5 мкм на сплаві T15K6.

Мікротвердість шарів (Ti, V, Cr)C, становила 41,0 ГПа на сталі У10А та 30,5 на сплаві T15K6. Методом кінетичної мікротвердості визначено, що показники мікроміцності, мікрокрихкості, адгезії з основою вищі, ніж показники покриттів на основі карбіду титану TiC; ванадію VC, V₂C; хрому Cr₇C₃, Cr₂₃C₆.

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 T15K6 з покриттям (Ti, V, Cr)C при обробці різанням сталі X12M зростає в порівнянні з відомими в 1,5 – 1,7 рази.

Список літератури

1. Многокомпонентные дифузионные покрытия на железоуглеродистых сталях: монография / Л.Г. Ворошнин, 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.: Металлургия, машиностроение, 1984.-204с.
3. Диффузионные карбидные покрытия / В.Ф. Лоскутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницкий, М.В. Киндрачук. - К.: Техніка, 1991. -168 с.
4. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Борисенко Г.В., Васильев П.А., Воронин П.Г. [и др.]. М.: Металлургия, 1981. - 424 с.

5. Мацевитый В.М. Покрытие для режущих инструментов. / В.М. Мацевитый // Х.: Вища школа. изд-во при Харьк.ун-те, 1987. – 128 с.
6. Верещака А.С. Режущие инструменты с износостойким покрытием / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. М. Машиностроение, 1986 – 192с.
7. Хижняк В.Г. Определение скалываемости 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 симплексе при изучении металлических систем / Ф.С. Новик -М.: Металлургия, 1985.- 256с.
9. Аналитическое определение условий разрушения материалов с защитными покрытиями. Защитное покрытие на металлах / В.И Похмурский, А.Т. Берестейский, [и др.]. – 1984. – вып. 18. – с. 25-28.
10. Pawel P. C. Vapor deposition. / P. C Pawel – New York, 1996. – P.198
11. Методика исследований металургического инструмента общеметаллостроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металургических станках. часть 1. – М.: Машиностроение, 1974. – 406 с.

Стаття надійшла до редакції 17.04.2015

O. V. KHYZHNIAK, R. A. KURDYBAILO, V. G. KHYZHNIAK

WEAR-RESISTANT CARBIDE MULTICOMPONENT Ti, V, Cr COATING ON STEEL AND U10A HARD ALLOY T15K

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, microstrength, microfragility, 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.

Хижняк Олег Вікторович – інженер, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», вул. Політехнічна, 35, корп. № 9, м. Київ, Україна, 03056.

Курдубайло Руслан Анатолійович – студент бакалавр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», вул. Політехнічна, 35, корп. № 9, м. Київ, Україна, 03056, E-mail: 0303ruslan@ukr.net.

Хижняк Віктор Гаврилович – д-р. техн. наук, проф., професор кафедри металознавства та термічної обробки інженерно-фізичного факультету, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», вул. Політехнічна, 35, корп. № 9, м. Київ, Україна, 03056, тел.: +38 044 454 95 45.