

УДК: 621.762.4:546.261

**І.В. Коваль, Л.Г. Бодрова, Г.М. Крамар, С.Ю. Мариненко, Я.О. Ковальчук**  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ РУЙНУВАННЯ ТВЕРДИХ СПЛАВІВ НА ПОЛІКАРБІДНІЙ ОСНОВІ В УМОВАХ ТЕРМОЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

*Досліджено термостійкість твердих сплавів системи TiC-VC-Ni-Cr, легованих нано- і дрібнозернистим WC, під дією циклічного нагрівання-охолодження з температур 600, 700, 800 °С до кімнатної. Встановлено кількість циклів при різкому переохолодженні у воді, що спричиняють появу тріщин у зразках при заданому градієнті температур. За даними фрактографічного аналізу визначено особливості руйнування сплавів.*

*Ключові слова:* тверді сплави, полікарбідна основа, термостійкість, фрактографія.

**И.В. Коваль, Л.Г. Бодрова, Г.М. Крамар, С.Ю. Мариненко, Я.О. Ковальчук**  
Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ПОЛИАРБИДНОЙ ОСНОВЕ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

*Исследована термостойкость твердых сплавов системы TiC-VC-Ni-Cr, легированных нано-мелкозернистым WC, под действием циклического нагревания-охлаждения с температур 600, 700, 800 °С до комнатной. Установлено количество циклов при резком переохлаждении в воде, которые приводят к образованию трещин в образцах при заданном градиенте температур. По данным фрактографического анализа определены особенности разрушения сплавов.*

*Ключевые слова:* твердые сплавы, поликарбидная основа, термостойкость, фрактография.

**I.V. Koval, L.H. Bodrova, H.M. Kramar, S.Yu. Marynenko, Ya.O. Kovalchuk**  
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

### **INVESTIGATION OF THE POLYCARBIDE HARD ALLOYS FRACTURE NATURE UNDER THERMO-CYCLE ADDINGS**

*Thermal resistance of TiC-VC-Ni-Cr system hard alloys alloyed by the nano- and fine-grain WC under cycle heating-cooling from 600, 700, 800 °C till the room temperature has been investigated. The number of cycles under sharp overcooling in water, which results in the crack initiation in the specimens under the given temperature gradient has been found. The alloy with 15 wt. % of nano-WC possess thermal resistance, which is in 1,8...2,6 times higher than those of alloys with fine-grain WC. When the content of nano-WC increases from 5 till 15 wt. %, the thermal resistance of alloys increases in 1,2...2 times. According to the fractography analysis the alloys fracture characteristics have been found. The carried out analysis of the interrelation of the shear micro-profile with the structure elements has shown, that the alloy fracture is of the brittle fracture mechanism nature both through the grain boundaries and through the grain itself. In the alloys with 15 wt. % nano-WC the elements of micro-plastic fracture are available.*

*Keywords:* hard alloys, polycarbide base, thermal resistance, fractography.

**Постановка проблеми.** Тверді сплави є основним матеріалом для виготовлення сучасного металорізального інструменту, проте їх виробництво пов'язано з використанням дефіцитної кобальтової та вольфрамової сировини. В останні роки в металообробці знаходять все ширше використання без- та маловольфрамові сплави на основі карбіду титану, які мають ряд переваг порівняно з вольфрамо-кобальтовими [1,2]. Високі експлуатаційні характеристики, співставні з вольфрамо-кобальтовими, мають тверді сплави на полікарбідній основі з нікель-хромовою зв'язкою [3]. Твердосплавні інструменти із таких сплавів, як правило, експлуатують в екстремальних умовах, пов'язаних з дією високих температур та термоциклічних навантажень. При високошвидкісному точінні пластинами із без- та маловольфрамових твердих сплавів та пластичній деформації в зоні різання і тертя виникають температури, що сягають 800-850<sup>0</sup>С, і, навіть, при використанні мастильно-охолоджуючих рідин виникають значні градієнти температур, які можуть призвести до утворення мікротріщин. Тому важливою характеристикою таких сплавів є термостійкість, знання якої дозволяє спрогнозувати їх поведінку в умовах експлуатації, пов'язаних з термоциклічними навантаженнями. Відомо [4], що однією з основних вимог при створенні твердих сплавів з високою термічною стійкістю є забезпечення формування мікроструктури з мінімальним розміром карбідних зерен та, як показали останні дослідження, – використанням нанодисперсних вихідних матеріалів [2]. Тривалий час роботи інструмента забезпечується, в основному, зносостійкістю, твердістю, термостійкістю та міцністю його різальних елементів.

Тому важливою проблемою є дослідження термостійкості сплавів на полікарбідній основі TiC-VC-WC/(нано WC) з нікель-хромовою зв'язкою, які показали високі експлуатаційні

властивості в якості металорізального інструменту при обробці широкого класу конструкційних вуглецевих та легованих сталей [3]. Крім того, для з'ясування процесів, що відбуваються в матеріалі під дією термоциклічних навантажень, важливим є питання дослідження характеру руйнування твердих сплавів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі методики дозволяють розрахувати оптимальні параметри режиму різання для даного матеріалу інструмента, визначивши максимальний перепад температур, при якому в умовах нестационарного теплового режиму на зразках з'являються тріщини. Досліджень фрактограм зламів різального інструменту та встановлення механізму руйнування дозволяє спрогнозувати шляхи підвищення його механічних властивостей та експлуатаційної стійкості [5, 6].

Термостійкість є складною характеристикою, що залежить від багатьох факторів: коефіцієнта термічного розширення і теплопровідності матеріалу, структури, складу, форми і розмірів випробовуваного зразка. Для сплавів з високою термічною стійкістю характерним є невисоке значення коефіцієнта термічного розширення та висока міцність.

Термостійкість крихких матеріалів, таких як тверді сплави, оцінюють двома способами: за величиною градієнту температур, необхідного для появи тріщин при визначеному числі циклів нагрівання – охолодження; або за кількістю циклів нагрівання – охолодження, необхідних для появи тріщин у зразках при заданій різниці температур [7]. Величини перепаду температур нагрівання та охолодження для досліджуваних сплавів є близькими і знаходяться у межах похибки, тому застосування другого способу є більш доцільним.

#### **Постановка завдань.**

Метою даної роботи є дослідження термостійкості сплавів системи TiC-VC-NiCr, легованих нано- і дрібнодисперсним WC, залежно від градієнту температур за кількістю циклів нагрівання – охолодження та визначення особливостей їх руйнування із застосуванням фрактографічного аналізу.

#### **Методика досліджень.**

Для одержання зразків сплавів були використані порошки карбідів TiC, VC, WC марки «ХЧ» вітчизняного виробництва з розмірами частинок 1-2 мкм та метали зв'язки з вмістом основного компоненту 99,8%, хрому ПХ-2М та нікелю ПНЕ-1, нанопорошки карбиду вольфраму виробництва «Nanostructured and Amorphous Materials, Inc» (Houston, USA).

Хімічний склад досліджуваних сплавів приведений в таблиці.

Таблиця.

**Хімічний склад досліджуваних сплавів**

№з/п	Хімічний склад, %(мас.)				
	TiC	VC	WC	Ni	Cr
1	72	5	5 нано	13,5	4,5
2	67	5	10 нано	13,5	4,5
3	62	5	15 нано	13,5	4,5
4	72	5	5	13,5	4,5

Для досліджень готували зразки діаметром 8 мм та висотою 4 мм у кількості 5 штук на один вимір. Зразки одночасно нагрівали у муфельній печі до визначеної температури, а потім швидко охолоджували у воді. Термостійкість сплавів оцінювали за кількістю циклів N нагрівання – охолодження, після яких виникає перша тріщина на відполірованому зразку при різних значеннях градієнту температур  $\Delta T$  (600 °C, 700 °C, 800 °C).

Фрактографічні дослідження проводили на скануючих електронних мікроскопах SELMI РЭМ-106И та "Tesla".

**Викладення основного матеріалу.** Результати досліджень термостійкості сплавів з різним вмістом карбиду вольфраму подано на рис. 1.

Встановлено, що легування сплавів нанокарбідом вольфраму призводить до суттєвого підвищення термостійкості, яка в 1,8...2,6 рази вища, порівняно зі сплавами, легованими дрібнодисперсним карбідом вольфраму, (рис.1. а).

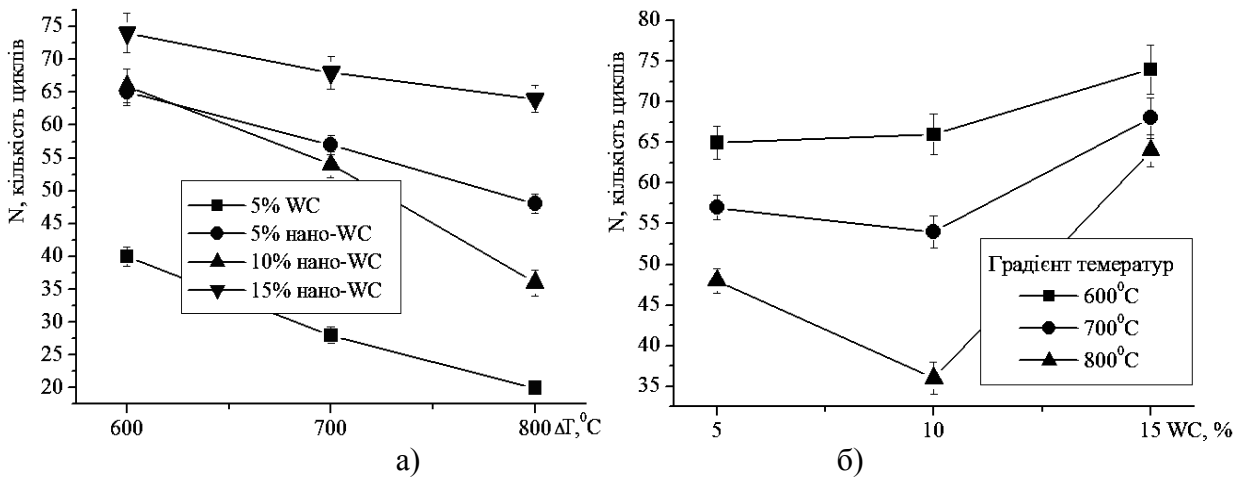


Рис. 1. Залежність термостійкості сплавів TiC-VC-Ni-Cr від градієнта температури (а) та вмісту нано-WC (б)

При підвищенні вмісту WC до 15 (мас)% термостійкість сплавів підвищується, оскільки коефіцієнт термічного розширення сплаву залежить від коефіцієнтів термічного розширення його компонентів (коефіцієнт термічного розширення TiC становить  $0,8 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ , а WC –  $0,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ ) [8].

Встановлено, що сплави із вмістом 15 % (за масою) нано-WC витримують найбільшу кількість циклів при всіх градієнтах температур, їх термостійкість в 1,2...2 рази вища, порівняно з іншими сплавами (рис. 1 а) і при  $\Delta T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  складає 74 цикли. Для сплавів із 15% (за масою) нано-WC, зростання градієнта температур із  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  призводить до зменшення кількості циклів на 13%, а для сплавів із вмістом 5 % і 10 % (за масою) нано-WC це значення становить 26 % і 45 % відповідно. (рис. 1 б).

Макрофрактографічні дослідження сплавів проводили на зламах зразків з нано-WC. Аналіз досліджуваних сплавів показав наявність на всіх зламах сплавів із нано-WC трьох характерних ділянок (рис.2): зародження тріщини, зона стабільного поширення тріщини і ділянки доламу.

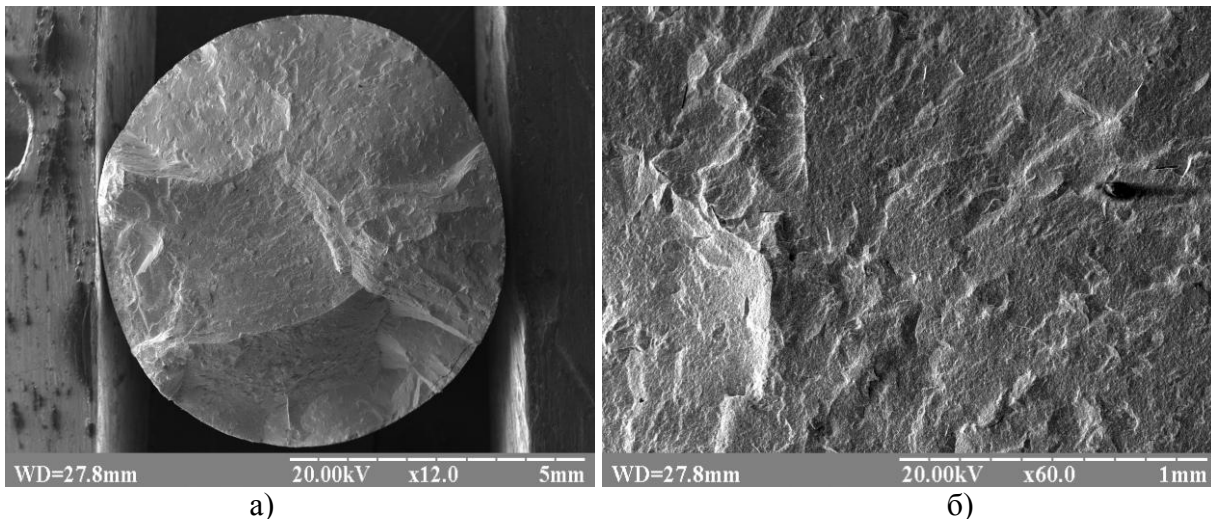
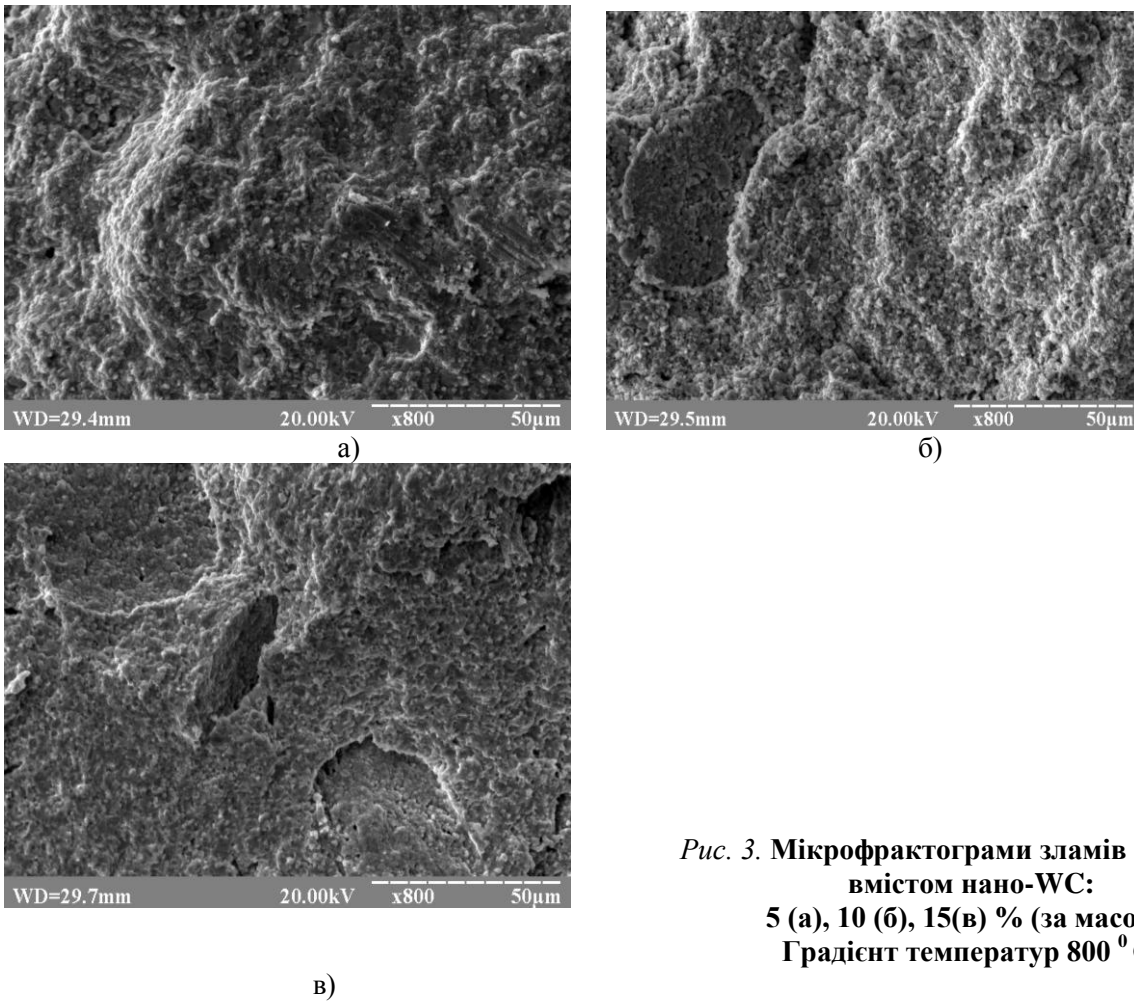


Рис. 2. Макрофрактограми зламу сплаву системи TiC-VC-NiCr, легованого 5 % (за масою) нано-WC при збільшенні  $\times 12$  (а) і  $\times 60$  (б). Градієнт температур  $800 \text{ }^\circ\text{C}$

Окрім мікрорельєфу ямкової будови, спостерігали гладкі безструктурні ділянки з невисокою хвилястістю, що є поверхнями гладкого розшарування (рис 2 б). Вони спостерігаються найчастіше коли руйнування відбувається, головним чином, в результаті зрізу, внаслідок великої деформації матеріалу перед руйнуванням, а кількість мікропустот в матеріалі є незначною.

Дослідження взаємозв'язку мікрорельєфу зламу з елементами структури показало, що руйнування сплавів відбувається за крихким механізмом руйнування як по границях зерен, так і безпосередньо по карбідному зерну, а також присутні ознаки мікропластичного руйнування. На

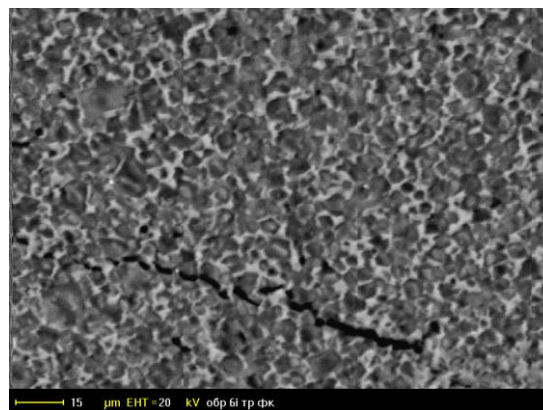
мікрофрактограмах усіх сплавів, помітні площадки і річковий візерунок зламів, а також спостерігаються окремі характерні ділянки у вигляді ямок та язичків (рис. 3).



**Рис. 3. Мікрофрактограми зламів сплавів із вмістом нано-WC: 5 (а), 10 (б), 15(в) % (за масою). Градієнт температур 800<sup>0</sup> С.**

Мікрофрактограми сплавів з різним вмістом нанокарбиду вольфраму мають різну орієнтацію вторинних субмікротріщин. Сітка вторинних субмікротріщин різноорієнтована для сплавів із вмістом 5 і 10 (за масою)% нано-WC (рис. 3 а,б). Для сплавів із вмістом 15 % (за масою) нано-WC помітно, що структура є більш дрібнодисперсною та з меншою кількістю гострокутових границь зерен (рис. 3 в). Окрім того, на фрактограмі виявлено меншу кількість ознак крихкого руйнування. Таким чином встановлено, що руйнування сплаву із вмістом 15 % (за масою) нано-WC відбувається за більш пластичною схемою порівняно зі сплавами, що містять 5 і 10 % (за масою) нано-WC.

На рис.4. представлено хід мікротріщини в області сканування сплаву з 15 % (за масою) нано-WC.



**Рис. 4. Хід мікротріщини у сплаві TiC-VC-NiCr з 15 % (за масою) нано-WC.**

Раніше проведеними дослідженнями [6] встановлено, що карбідні зерна неоднорідні за структурою і складаються з ядра і периферійного шару, що характерно для безвольфрамових твердих сплавів, тобто, мають кільцеву будову, а зв'язка розподілена у вигляді тонких прошарків між карбідами. З ростом вмісту нано-WC розмір карбідних зерен зменшується і дисперсність структури зростає. Дрібні частинки нано-WC розчиняються у зв'язці, що сприяє зміцненню зв'язків карбід-метал і дисперсійному зміцненню зв'язки в цілому. Як видно з рис.4, саме металева зв'язка, насичена вольфрамом, відіграє буферну роль і гальмує розвиток мікротріщини у сплаві.

#### **Висновки.**

В результаті проведених досліджень встановлено, що легування тугоплавкої основи нанокарбідом вольфраму призводить до підвищення термостійкості сплавів – при градієнті температур 600°C вони витримують більше 65 циклів нагрівання-охолодження, а з дрібнозернистим – 40. Сплави із вмістом 15 % (за масою) нано-WC витримують найбільшу кількість циклів при всіх градієнтах температур. Підвищення градієнта температур із 600°C до 800°C для сплавів із вмістом 15 % (за масою) нано-WC призводить до зменшення кількості циклів на 13%, тоді як для сплавів із вмістом 5 % (за масою) і 10 % (за масою) нано-WC це значення становить 26 % і 45 % відповідно.

Фрактографічними дослідженнями встановлено особливості руйнування сплавів під дією термоциклічних навантажень, яке відбувається головним чином за крихким механізмом руйнування як по границях зерен, так і безпосередньо по карбідному зерну, з ознаками мікропластичного руйнування.

#### **Список використаних джерел:**

1. Третьяков В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. - М.: Металлургия, 1975. - 528с.
2. Richter V. Nanoscaled Hardmetals – Fiction or Reality? / V. Richter, J. Poetschke, R. Holke, A. Michaelis // 18 Plansee Seminar, 2013. – Reutte, Austria, 2013 – 17 P.
3. Мариненко С.Ю. Експлуатаційні властивості та механізми локального зношування твердих сплавів, легованих нанокарбідом вольфраму при точінні / С.Ю. Мариненко, І.В. Коваль, Г.М. Крамар, Л.Г. Бодрова // Вісник ТНТУ. — 2015. — № 3, - С. 95-102.
4. Кислый П. С. Спекание тугоплавких соединений / П. С. Кислый, М. А. Кузенкова. – К. : Наук. Думка, 1980. – 167 с.
5. Bodrova L.G. Effect of Nano WC Alloying Additions on the Structure Formation of TiC-5VC-18NiCr Cermets / L.G. Bodrova, Kramar G.M., Mul O.V. [et al.] // Proceedings of the World Congress and Exhibition PM-2010 EPMA.- London, UK., 2010-vol. 3.-P. 479-484.
6. Bodrova, L. Reactively Sintered Hardmetals from Alloyed W-Co-C Phases / L. Bodrova, G. Kramar, V. Lazaryuk, S. Marynenko // Proceedings EURO PM-2007 (15-17 October 2007, Toulouse, France, EPMA, London, UK). – V.1. – P. 203–208.
7. Емельянов А.Н. Температуропроводность без вольфрамовых твердых сплавов при повышенных температурах / А.Н. Емельянов, В.И. Туманов // Порошковая металлургия. 1989. №11. – С.66-69.
8. Некоторые физико-механические характеристики твердых сплавов на основе карбида титана и сложных карбидов титана-молибдена с никель-молибденовой связкой / А.В.Коротаев, С.С.Орданьян, З.В.Прилуцкий и др. - Черкассы, 1986. -18с.

#### **Рецензенти:**

**Стухляк Петро Данилович**, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, д.т.н., проф.

**Кондратюк Віктор Лукич**, директор центру післядипломної освіти Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка, к.т.н., доц.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2017