



## EROSION WEAR OF NICKEL COATINGS WITH NANO-SIZE PARTICLES OF SILICON CARBIDE

Mara KANDEVA, Dimitar KARASTOYANOV, Aleksandar VENCL

**Abstract:** *The paper proposes procedure and device for the study of erosion wear of materials and coatings under the action of air jet bearing hard abrasive particles. Experimental results about the coatings mass wear, erosion rate and erosion wear-resistance have been obtained. Chemical Ni coatings were studied containing nano-size particles of silicon carbide. Comparative study was carried out of erosion without and with nano-size particles in both cases with and without heat treatment. The nano-particles were of average size 35 nm by chemical solution between 5 and 7 vol. %. The investigation is related to the completion of the program of the Science Investigations Fund Contract № Д02-13/2009 directed by Assoc. Prof. Dr. Eng. D. Karastoyanov, and CEEPUS Project CIII-BG-0703-01-1213 "Modern Trends in Education and Research on Mechanical Systems - Bridging Reliability, Quality and Tribology".*

**Key Words:** tribology, coatings, wear, erosion, nano-particles

## ЕРОЗИЙНО ИЗНОСВАНЕ НА НИКЕЛОВИ ПОКРИТИЯ С НАНОРАЗМЕРНИ ЧАСТИЦИ ОТ СИЛИЦИЕВ КАРБИД

Мара КАНДЕВА, Димитър КАРАСТОЯНОВ, Александар ВЕНЦЛ

**Резюме:** *В работата е разработена методика и устройство за изследване на ерозионното износване на материали и покрития под въздействието на въздушна струя, носеща твърди абразивни частици. Получени са експериментални резултати за масовото износване, скоростта на ерозията и ерозионната износоустойчивост на покрития от химически никел, съдържащи наноразмерни частици от силициев карбид. Проведено е сравнително изследване на ерозията на покрития без и с наноразмерни частици, нетермообработени и термообработени. Наночастиците имат среден размер от 35 nm с концентрация в химическия разтвор от 5 до 7 обемни процента. Изследването е свързано с изпълнение на задачи по дог. № Д02-13/2009 към Фонд „НИ“ с ръководител проф. д-р инж. Д. Карастоянов и Проект CEEPUS CIII-BG-0703-01-1213 "Modern Trends in Education and Research on Mechanical Systems - Bridging Reliability, Quality and Tribology".*

**Ключови думи:** трибология, покрития, износване, ерозия, наночастици

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Каландрирането е технологичен процес, който се състои в пропускане на материал между валове (каландри) при определени режими до получаване на листов материал – хартия, картон, кожа, фолио и т.н. Каландровите валове в различните производства работят при различни температурно-динамични условия и в резултат на сложните контактни взаимодействия при триене те интензивно се износват.

Увеличаването на ресурса на каландровите валове в световната практика е чрез нанасяне на тънки износоустойчиви покрития от твърд хром. В България колектив от Института по информационни технологии при БАН и Технически университет-София разработва проект за замяна на неекологичния индустриален хром с покрития от никел, съдържащи частици с нано- и микроразмери от различно естество. Проведени са системни изследвания на параметрите на износването и износоустойчивостта на химически никелови покрития с различни наноразмерни частици в условия на сухо триене по повърхнина със закрепени абразивни частици.

При абразията механизмите на износване се свързват с надраскването и в някои случаи с изравняването на повърхностния слой от острите ръбове на абразивните частици.

Ерозията се интерпретира като процес на разрушаване на повърхностния слой вследствие дискретното ударно въздействие на частици, носещи се от флуиден поток [1,2,4].

В настоящата работа се представя изследване на химически никелови покрития в условия на ерозионно износване под въздействието на въздушна струя, носеща абразивни частици.

## 2. ОПИСАНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНИТЕ ПОКРИТИЯ

Наноструктурираните композитни никелови покрития са получени по безтокова химическа технология „ЕФТТОМ-НИКЕЛ“, разработена в Техническия университет-София [3].

Уякчаващата компонента в покритията представлява частици от силициев карбид ( $SiC$ ) със среден размер на частиците  $35 \div 40 \text{ nm}$ . Концентрацията на частиците в разтвора е в границите от 5 до 7 об. %.

Изследват се пет серии покрития: образец от базовия материал без покритие, никелово покритие без частици ( $Ni$ ); никелово покритие с наночастици ( $Ni - SiC$ ). Покритията без и с наночастици са подложени на термообработка. Термичната обработка се осъществява в продължение на 6 часа при  $300^\circ C$ . От всяка серия се изследват по 2 броя образци и се вземат средно-аритметични стойности от измерваните параметри.

Микротвърдостта на покритията е определена по метода на Кноор при натоварване 0,5 [N]

Изследваните образци представляват дискове с дебелина 3 mm и диаметър 100 mm.

В таблица 1 са представени данни за химическия състав на базовия материал (подложката), върху която са нанесени никеловите покрития.

**Таблица 1: Химичен състав на материала на подложката**

Химически състав, %							
C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni	Fe
0,4	0,045	0,55	0,45	0,20	0,30	0,30	баланс

Дебелината на покритията се измерва с уред Pocket LEPTOSKOP 2021 Fe в 10 точки от повърхнината и се взема средноаритметичната стойност на измерените показания. Средната дебелина на покритията е  $24 \mu m$ .

В таблица 2 са представени данни за изследваните образци.

**Таблица 2: Данни за покритията: съдържание на наночастици, термообработка, микротвърдост и грапавост**

№	образци	Термообработка	Микротвърдост НК 0,02	Грапавост Ra
1.	Без покритие	-	370	$0,418 \mu m$
2.	Ni – без термообработка	-	450	$0,418 \mu m$
3.	Ni + с термообработка	$300^\circ C$ , 6 часа	860	$0,418 \mu m$
4.	Ni*SiC- без термообработка	-	473	$0,418 \mu m$
5.	Ni*SiC+ с термообработка	$300^\circ C$ , 6 часа	980	$0,418 \mu m$

## 3. ТЕОРИЯ НА ЕРОЗИЙНОТО ИЗНОСВАНЕ ОТ ВЪЗДУШНО-АБРАЗИВНА СТРУЯ

Въздушна струя, носеща абразивни частици с определен дебит на въздушната и твърдата фази, попада върху повърхнината на образца В резултат на периодичните ударни въздействия на абразивните частици покритието постепенно се разрушава и образецът губи от

своята маса. Този вид износване е известно като «струйно-абразивна ерозия» или «струйно-ерозийно износване».

При разработване на теорията на ерозийното износване от въздушно-абразивна струя в настоящата работа се изхожда от закона за контактното взаимодействие в трибологията, който в общия случай в диференциална форма има вида [6]:

$$\frac{dR}{R} = \eta \frac{dA}{A} \quad (1)$$

където  $dA/A$  представлява относителното смущение, действащо върху покритието;  $dR/R$  е относителната на покритието, а  $\eta$  представлява комуникативният потенциал на контактното взаимодействие между смущението (акцията) и реакцията.

В разглеждания случай на износване комуникативният потенциал е постоянен, т.е.  $\eta = 1$ ; относителното смущение (акцията) се представя чрез въздействието на абразивната фаза в струята, по-конкретно чрез нейния масов дебит -  $m_a$ , т.е.

$$\frac{dA}{A} = \frac{dm_a}{m_a} \quad (2)$$

където  $m_a = m_a(t)$  е законът за изменение на ударната маса на абразивните частици, атакуваща покритието чрез въздушна струя, и

$$\frac{dR}{R} = \frac{dm}{m} \quad (3)$$

представлява относителната реакция на покритието, представена чрез относителното му масово износване.

Тук  $m = m(t)$  е законът за масовото износване на покритието.

Отчитайки формули (2) и (3), законът за контактното взаимодействие във форма (1) се редуцира до вида:

$$\frac{dm}{m} = \frac{dm_a}{m_a} \quad (4)$$

Интегрира се израза (4)

$$\ln m = \ln m_a + \ln k \quad (5)$$

или

$$\ln \frac{m}{k} = \ln m_a \quad (6)$$

След антилогаритмуване се намира връзката между двата закона – закона на износването  $m = m(t)$  и закона на ударната абразивна маса  $m_a = m_a(t)$ , т.е.

$$m(t) = k \cdot m_a(t) \quad (7)$$

След отчитане на получените формули и заместване във формула (1) се получава *законът за скоростта на струйно-абразивната ерозия* във вида:

$$\frac{dm}{dt} = k \frac{dm_a}{dt} \quad \text{или} \quad \dot{m} = k \dot{m}_a \quad (8)$$

От закона (8) се определя *интензивността на ерозийното износване*:

$$i_e = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_a} = k \quad (9)$$

Интензивността на ерозията  $i_e$  представлява отношение на скоростта на масовото износване и масовия дебит на абразивната фаза в струята и е бездимензионно число.

Ерозийната износоустойчивост на покритието  $I_e$  се определя като реципрочна стойност на интензивността на износване  $i_e$ , т.е. тя представлява бездименционна величина

$$I_e = \frac{1}{i_e} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}} \quad (10)$$

Ако се запише отношението на износоустойчивостта на покритието към износоустойчивостта на материала без покритие, приет за еталон, то се получава *относителната износоустойчивост при струйно-абразивна ерозия* или относителната ерозийна износоустойчивост, т.е.

$$E_{ie} = \frac{I_e^i}{I_e^o} \quad (11)$$

Относителната ерозионна износоустойчивост  $E_i^e$  представлява бездимензионно число, което показва колко пъти се увеличава или намалява износоустойчивостта на повърхностния слой на даден материал в условия на ерозия, ако върху него се нанесе покритие, т.е. влиянието на покритието върху износоустойчивостта на подложката, върху която е нанесено.

Разработени са устройство и методика, които се основават на описаната теория на струйно-абразивната ерозия.

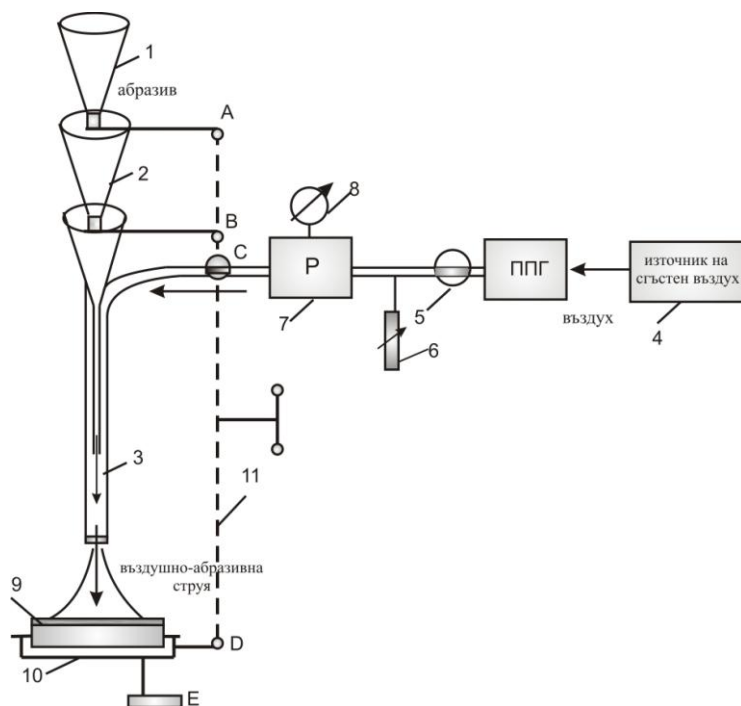
#### 4. УСТРОЙСТВО И МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕРОЗИЙНО ИЗНОСВАНЕ

Изследването на ерозионно износване на покрития с въздушно-абразивна струя се осъществява с устройство, разработено в научно-приложната лаборатория „Трибология“ – катедра МТМ - МТФ при ТУ-София. Параметрите на устройството са съобразени с изискванията на международните стандарти [5].

Функционалната схема на устройството е представена на фиг. 1.

Предназначението на устройството е да се формира въздушна струя, носеща абразивни частици като се задават два самостоятелни независими стационарни потока – въздушен и абразивен.

Стационарният, свободно падащ абразивен поток, се формира с помощта на три камери: захранваща камера (1), която се запълва с работния абразивен материал; стабилизираща камера (2), запълнена със същия вид абразив и работна камера (3), която е предназначена за ускоряване абразивните частици и смесването на въздушния и абразивния поток. Абразивният материал преди поставяне в камери (1) и (2) се пресява през комплект от сита и се подсушава в сушилнен шкаф за отнемане на влагата от частиците.



**Фиг. 1:** Функционална схема на лабораторна уредба за изследване и изпитване на повърхностни слоеве и покрития в условия на струйно-абразивно износване

Въздушният поток се подготвя последователно от източник на сгъстен въздух (4); пневмо-подготвяща група (ППГ) за пречистване на въздуха от механични частици, влага и маслени пари; превключвател (5) и регулатор на налягане (6) за захранване и стабилизиране на

фиксираното въздушно налягане  $P$  в камера (7). Налягането  $P$  се измерва по скалата на манометър (8), включен към камера (7).

Формирането на работната двуфазна струя, като краен продукт от смесването, се осъществява на изхода на работната камера (3).

Изпитваният образец (10) се позиционира в държача (11), свързан с реверсивен механизъм (12), с помощта на който се регулират следните параметри: разстояние  $\ell$  между дюзата и повърхнината (9), ъгъл на взаимодействие  $\alpha$  между оста на струята и нормалата към повърхнината (9) на образца.

Последователността на работа с устройството е следната: подходящо подготвеният образец (9) се поставя в държача (10) като с реверсивния механизъм (11) се позиционира на определено разстояние  $\ell$  и ъгъл на взаимодействие  $\alpha$ .

Смесителната работна камера (3) се захранва с пречистен въздух чрез отваряне на превключвателя (5) като се задава стационарно работно налягане  $P$  с регулатора (6).

Работното количество абразивен материал се поставя в захранващата камера (1) при запълнена стабилизираща камера (2) със същия вид абразив при затворен механизъм (11).

С отваряне на механизма (11) започва процесът на струйно-абразивно облъчване на покритието (9) на образца и продължава до момента на изчерпване на абразивния материал в камера (1). В този момент се превключва механизъм (11), с което едновременно се прекратява изтичането на въздушния поток от камера (7) и на абразивния поток от работната камера (1) и стабилизиращата камера (2).

Методиката за изследване на ерозионно износване с описаното устройство се състои в измерване на масата на образца преди облъчване и след облъчване с двуфазна струя при фиксирани параметри: разстояние  $\ell$  и ъгъл на взаимодействие  $\alpha$ , работно налягане  $P$ , масов дебит на абразива  $\dot{m}_a$ .

Масата на образците се измерва с електронна везна WP-S-180/C/2 с точност до  $0,1 \text{ mg}$ . Преди всяко измерване с везната образецът се почиства с разтвор, неутрализиращ статичното електричество и се подсушава.

Масовият дебит на абразива  $\dot{m}_a$  се определя предварително чрез измерване с хронометър на времето  $t$ , за което изтича количеството абразивен материал  $m_a$  от камерата (2) през изходната дюза, без наличие на въздушна фаза, т.е.  $\dot{m}_a = m_a / t$

В таблица 3 са представени параметрите на експеримента.

**Таблица 3: Параметри на струйно-абразивното облъчване**

№	Параметър	Стойност
1.	Ъгъл на взаимодействие	$\alpha = 0^\circ$
2.	Работно налягане на въздушната фаза	$P = 10^5 \text{ Pa}$
3.	Масов дебит на абразивната фаза	$\dot{m}_a = 166,7 \text{ g / min}$
4.	Абразивен материал	Корунд черен
5.	Среден размер на абразивните частици	$d_a = 500 \text{ }\mu\text{m}$
6.	Разстояние между дюзата и повърхнината	$\ell = 10 \text{ mm}$
7.	Продължителност на облъчването	$t = 6 \text{ min}$

## 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

С описаните методика и устройство е проведено изследване на пет серии никелови покрития и на материала на основата без нанесено покритие. Получени са експериментални резултати за масовото ерозионно износване  $m$ , скоростта на масовото износване  $\dot{m}$ , интензивността  $i_e$  и износоустойчивостта  $I_e$ , определени по формули (9) и (10). Резултатите са представени в таблица 3.

**Таблица 4: Експериментални резултати**

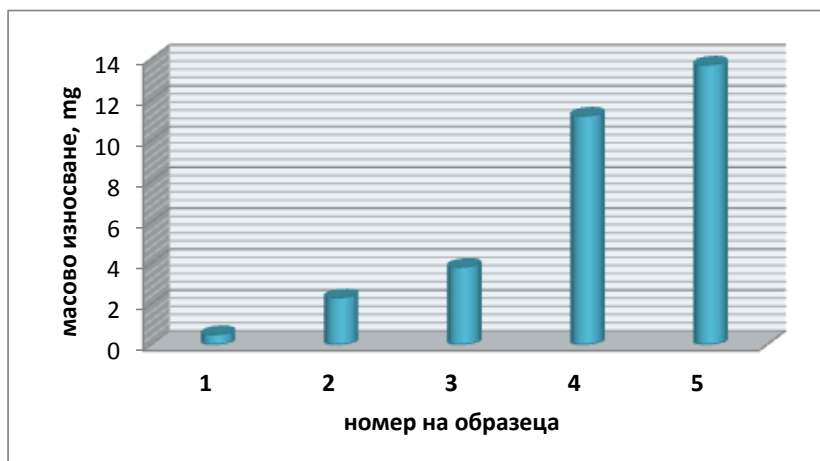
№	образци	маса преди ерозия, $g$	маса след ерозия, $g$	износване $g$	Скорост на износване $mg / min$	Интензивност $i_e$	Износоустойчивост $I_e$
1.	Без покритие	64,6202	64,6197	0,0005	0,008	$3 \cdot 10^{-3}$	$0,33 \cdot 10^3$
2.	Ni – без термообработка	63,6215	63,6192	0,0023	0,38	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$0,43 \cdot 10^3$
3.	Ni + с термообработка	64,5753	64,5715	0,0038	0,63	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^3$
4.	NI*SIC- без термообработка	75,0376	75,0264	0,0112	1,87	$11 \cdot 10^{-3}$	$0,09 \cdot 10^3$
5.	NI*SIC+ с термообработка	73,1352	73,1215	0,0137	2,28	$13,7 \cdot 10^{-3}$	$0,07 \cdot 10^3$

В таблица 5 са представени стойности за относителната ерозийна износоустойчивост, определена по формула (11).

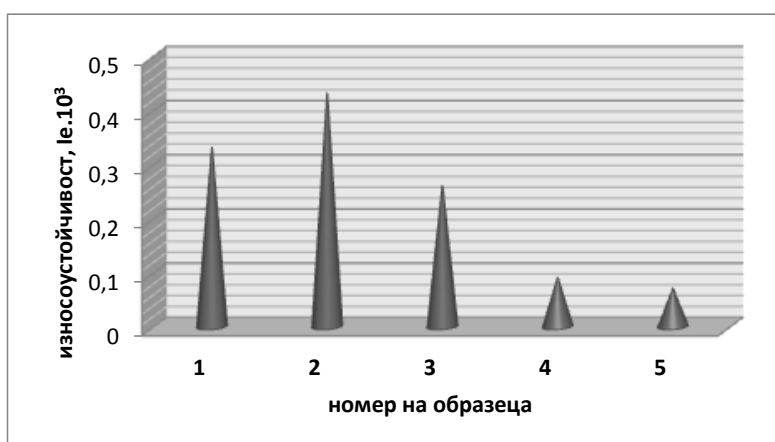
**Таблица 5: Относителна износоустойчивост на покритията приструйно-абразивната ерозия**

$E_{ie} = I_e^i / I_e^o$			
$E_{21}$	$E_{31}$	$E_{41}$	$E_{51}$
1,3	0,79	0,27	0,21

На фиг. 2, фиг. 3 и фиг. 4 са представени диаграми на масовото износване, износоустойчивостта и относителната износоустойчивост за изследваните образци при струйно-абразивна ерозия.



**Фиг. 2: Диаграма на масовото ерозийно износване на покритията**



**Фиг. 3: Износоустойчивост на покритията при струйно-абразивна ерозия**



**Фиг. 4: Относителна износоустойчивост при струйно-абразивна ерозия**

Анализът на получените експериментални резултати води до следните основни констатации и изводи:

1. Най-висока износоустойчивост имат никелови покрития без наночастици и без термообработка. Износоустойчивостта им е 1,3 пъти по-висока от тази на подложката и 1,65 пъти по-висока от тази на никелово покритие без частици с термообработка.

2. Присъствието на наноразмерни частици от силициев карбид като уякчаваща фаза в химически никеловите покрития най-общо води до понижаване на ерозийната им износоустойчивост. Най-ниска износоустойчивост имат термообработените никелови покрития

с наночастици от SiC и износоустойчивостта им е 6,14 пъти по-ниска от тази на никелово покритие без частици и без термообработка.

3. Допълнителната термообработка на композитните покрития с наночастици влошава допълнително ерозионната износоустойчивост с около 120%.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение може да се обобщи, че никеловите покрития, съдържащи наночастици от силициев карбид не са подходящи за повърхнини, подложени на ударно въздействие от твърди частици. Тяхната малка устойчивост на динамични ударни въздействия вероятно се дължи на намаляване на пластичните свойства на композитното покритие от присъствието на силиций и повишаване на крехкостта. Такова предположение ще бъде проверено в бъдещи системни изследвания на ерозионното износване на никелово покритие с наноразмерни частици от други нетвърди метали като мед, калай и др.

## БЛАГОДАРНОСТИ

*Изследването и публикуването на настоящата работа е резултат от изпълнение на задачи и финансовата подкрепа по договор № Д02-13/2009 към Фонд „НИ“ с ръководител проф. д-р инж. Д. Карастоянов и CEEPUS Project CIII-BG-0703-01-1213 “Modern Trends in Education and Research on Mechanical Systems - Bridging Reliability, Quality and Tribology”.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Прис К., Эрозия, перевод от англ., Мир, Москва, 1982.
2. Хенли В., Анодное оксидирование алюминия и его сплавов, перевод от англ., Металлургия, Москва, 1986
3. Gavrilo G., C. Nicolov, Electroless Nickel and Composite Coatings, Technika, Sofia, 1985
4. Kandeva M., M. Teofilova, Erosion and aluminium alloys, Journal of the Balkan Tribological Association, Sofia, vol 5, № 3, 1999, 182-188.
5. BS 1615 Испытание струей абразивного порошка (модифицированный метод Шука и Керна), Британский институт стандартов
6. Кандева М., Контактният подход в инженерната трибология, ТУ-София, София, 2012

## КОРЕСПОНДЕНЦИЯ

### **Мара КАНДЕВА**

Технически университет- София,  
1000 София, бул. Кл. Охридски, 8, блок 3, лаб. 3125  
E-mail: [kandeva@tu-sofia.bg](mailto:kandeva@tu-sofia.bg)

### **Димитър КАРАСТОЯНОВ**

ИИКТ – БАН, София,  
1113 София, ул. Акад. Г. Бончев, блок 2  
E-mail: [dimikara@abv.bg](mailto:dimikara@abv.bg)

### **Aleksandar VENCL**

Belgrade University  
Faculty of Mechanical Engineering  
E-mail: [avencl@mas.bg.ac.rs](mailto:avencl@mas.bg.ac.rs)