

ЕРОЗИЯ НА СФЕРОГРАФИТЕН ЧУГУН, МИКРОЛЕГИРАН С КАЛАЙ, ПОД ДЕЙСТВИЕТО НА ВЪЗДУШНА СТРУЯ, НОСЕЩА АБРАЗИВНИ ЧАСТИЦИ

МАРА КАНДЕВА, БОРЯНА ИВАНОВА

В настоящата статия е разработена методика и е проведено сравнително изследване на износването и износоустойчивостта на серия образци от сферографитен чугун, микролегирани с различно процентно съдържание на калай, подложени на дискретното ударно действие на абразивни частици, носени от въздушна струя. Получени са експериментални резултати за характеристиките на ерозионно масово износване, относителна износоустойчивост и относителната промяна на износоустойчивостта. Установено е, че наличието на калай влияе нееднозначно върху характеристиките на ерозионното износване. При определена стойност на калай, износоустойчивостта намалява и става по-малка от тази на чугун без калай. При повишаване на съдържанието на калай тя нараства и достига максимална стойност, която е 36% от тази на материал без калай. Този резултат за износоустойчивостта е в корелация с твърдостта на материала.

Ключови думи: методика, износване, износоустойчивост, сферографитен чугун.

1. УВОД

Ерозията представлява дискретен процес на разрушаване на повърхностния слой на материалите вследствие на ударното въздействие на частици, носещи се от флуиден поток [1, 2, 3, 4].

Целта на настоящата статия е да се разработи методика и да се проведе сравнително изследване на износването и износоустойчивостта на серия образци от сферографитен чугун, микролегирани с различно процентно съдържание на калай, подложени на дискретното ударно действие на абразивни частици, носени от въздушна струя. Решават се следните задачи:

- разработване на теоретичната основа на методика за експериментално изследване на износването и ерозионната износоустойчивост под действието на въздушна струя, носеща абразивни частици,
- описание на устройство и методика за изследване,

- провеждане на експеримента и обработка на експерименталните резултати,
- анализ на резултатите и изводи.

2. ТЕОРИЯ НА ЕРОЗИЙНОТО ИЗНОСВАНЕ ОТ ВЪЗДУШНО-АБРАЗИВНА СТРУЯ

Ерозийното износване на повърхностния слой на образците се осъществява под действието на въздушна струя, носеща абразивни частици с определен дебит на въздушната и твърдата фаза. В резултат на периодичните ударни въздействия на абразивните частици, повърхностният слой 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 [5, 6]:

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

където dA/A представлява относителното външно смущение, действащо върху повърхностния слой на образца; dR/R е неговата относителна реакция, а η 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 се представя чрез въздействието на абразивната фаза в струята, по-конкретно чрез нейния масов дебит m_a , т.е.

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

Под масов дебит на абразивната струя следва да се разбира количеството абразивни частици в струята, попадащи върху повърхнината на образца за единица време. В случая $m_a = m_a(t)$ представлява законът за изменение на ударната маса на абразивните частици, атакуваща покритието чрез въздушна струя.

Относителната реакция dR/R на повърхнината на образца се представя с отношение на износването за малък интервал от време dm към

износването за цялото време на ерозия, т.е. относителната реакция в случая се изразява чрез относителното износване на повърхностния слой:

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

Тук $m = m(t)$ е законът за масовото износване на материала от действието на частиците.

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

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

Интегрира се изразът (4)

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

или

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

След антилогаритмуване на израза (6) се намира връзката между двата закона – законът на износването $m = m(t)$ и законът за изменение на ударната абразивна маса $m_a = m_a(t)$, т.е.

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

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

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

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

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

Интензивността на ерозията i представлява отношение на скоростта на масовото износване на повърхностния слой и масовия дебит на абразивната фаза в струята. Интензивността на ерозията е бездимензионно число.

Ерозионната износоустойчивост I се определя като реципрочна стойност на интензивността на износване i . Тя представлява бездимензионно число, което показва колко грама абразивна маса m_a е необходима за загуба на 1 грам маса m от повърхнината на образеца за един и същ период от време, т.е.

$$(10) \quad I = \frac{1}{i} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}}$$

Относителната ерозионна износоустойчивост $E_{i,e}$ се определя по формулата:

$$(11) \quad E_{i,e} = \frac{I_i}{I_e} = \frac{I_i}{I_o}$$

където I_i е износоустойчивостта на изпитвания образец, определена по формула (10), а I_e износоустойчивостта на образец, приет за еталон, определена при същите условия на износване.

Относителната износоустойчивост $E_{i,e}$ е безразмерно число, което показва каква част е износоустойчивостта на изпитвания образец от износоустойчивостта на еталона при едни и същи условия на струйно-абразивна ерозия.

В настоящото изследване на образци от чугун, микролегирани с различно съдържание на калай, за еталон се приема базовият чугун без наличие на калай, т.е. образец № 0 или $I_e = I_o$.

Относителната промяна на ерозионната износоустойчивост $\Delta E_{i,e}$ се представя с отношението:

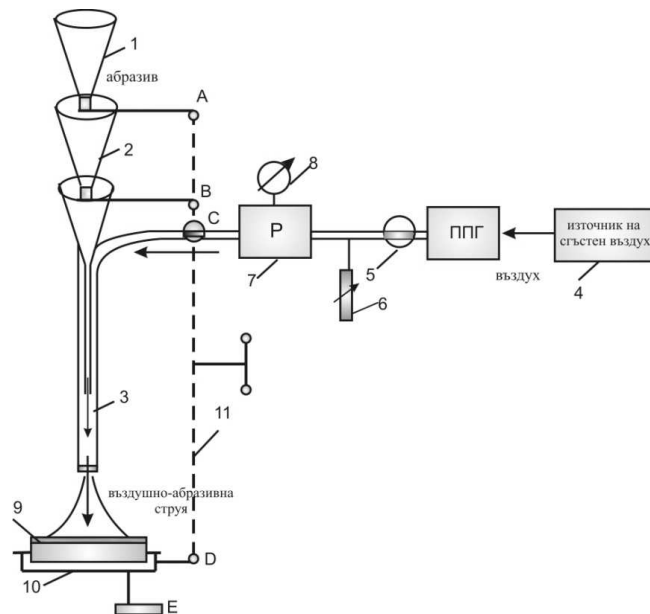
$$(12) \quad \Delta E_{i,e} = \frac{I_i - I_e}{I_e} 100 = \frac{I_i - I_o}{I_o} 100, \quad \%$$

Относителната промяна на ерозионната износоустойчивост $\Delta E_{i,e}$, като бездимензионно число, показва с колко процента износоустойчивостта на изпитвания образец е по-голяма (+) или по-малка (-) от износоустойчивостта на еталона в условия на ерозия.

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

3. УСТРОЙСТВО И МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕРОЗИЙНО ИЗНОСВАНЕ И ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТ

Изследването на ерозионно износване на покрития с въздушно-абразивна струя се реализира с устройство, разработено в научно-приложната лаборатория „Трибология“, катедра МТМ, МТФ при ТУ–София. Параметрите



Фиг. 1. Функционална схема на устройство за изследване и изпитване на повърхностни слоеве в условия на струйно-абразивно износване

Fig. 1. A functional scheme of set-up for studying and testing surface layers under conditions of air-jet-abrasive wearing

на устройството са съобразени с изискванията на международните стандарти [7, 8]. Функционалната схема на устройството е представена на *фиг. 1*.

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

Стационарният, свободно падащ, абразивен поток се формира с помощта на три камери: хранваща 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 на абразивните частици и смесване на въздушния и абразивния поток.

Абразивният материал, преди поставяне в камери 1 и 2, се пресява през комплект от сита и се подсушава в сушилен шкаф за отнемане на влагата от частиците.

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 P за захранване и стабилизиране на зададеното 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 9 се позиционира в държач 1, свързан с реверсивен механизъм 11, с помощта на който се регулират следните параметри: разстоянието ℓ между дюзата и повърхнината 9, ъгълът на взаимодействие α 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 ℓ и ъгъл на взаимодействие α . 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 повърхнината на образца 9 и продължава до момента на изтичане на абразивния материал в камера 1. В този момент се превключва механизмът 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.

Масовият дебит \dot{m}_a на даден абразивен материал с маса m_a в устройството се определя по описаната методика, като се измерва времето t_a за неговото гравитационно изтичане, т.е. без наличие на въздушна фаза. Пресмята се по формулата:

$$(13) \quad \dot{m}_a = \frac{m_a}{t_a}$$

Правят се минимум три измервания и се приема средно-аритметичната стойност на времето t_a .

Методиката за изследване на ерозионното износване и износоустойчивостта с описаното устройство се състои в измерване на масата на образца преди облъчване и след облъчване с двуфазна струя при едни и същи зададени параметри: разстояние ℓ и ъгъл на взаимодействие α , работно налягане P , масов дебит на абразива \dot{m}_a , *фиг. 1*. Параметрите на струйно-абразивното облъчване са дадени в *табл. 1*.

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

ТАБЛИЦА 1. Параметри на струйно-абразивно облъчване

TABLE 1. Parameters of air-jet-abrasive radiation

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

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

С описаните методика и устройство е проведено изследване на пет серии образци от сфероиден чугун, без и с различно съдържание на калай.

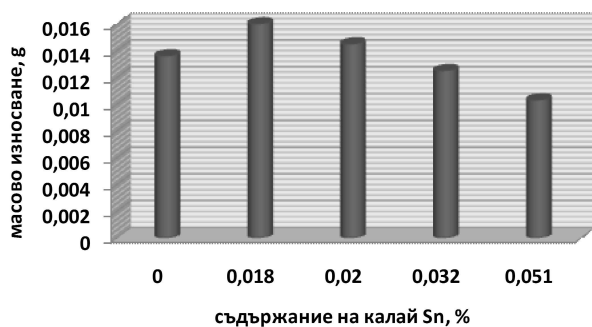
Получени са експериментални резултати за масовото ерозионно износване m , скоростта на масовото износване \dot{m} , интензивността i_e и износоустойчивостта I_e , определени по формули (9) и (10). резултатите са дадени в табл. 2.

На фигури 2, 3 и 4 са построени диаграми и графични зависимости на масовото износване, скоростта на ерозия и ерозионната износоустойчивост на образци при различно съдържание на калай в съответствие с експерименталните резултати от табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Експериментални резултати за масовото износване, скоростта, интензивността на износване и ерозионната износоустойчивост

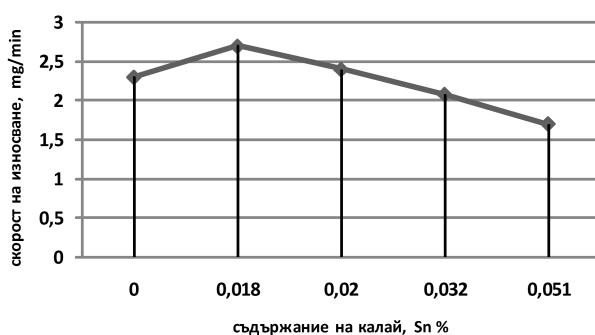
TABLE 2. Experimental results for the mass wearing, the velocity, the wear intensity, and the erosive wear resistance

№	Съдържание на калай Sn, %	Маса преди ерозия, g	Маса след ерозия, g	Масово износване g	Скорост на износване g/min	Интензивност, i	Износоустойчивост, I
0	0.000	30,7059	30,6923	0,0136	$2,30 \times 10^{-3}$	$13,8 \times 10^{-6}$	$7,2 \times 10^4$
1	0,018	33,3629	33,3469	0,0160	$2,70 \times 10^{-3}$	$16,2 \times 10^{-6}$	$6,2 \times 10^4$
2	0,020	39,6461	39,6316	0,0145	$2,40 \times 10^{-3}$	$14,4 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^4$
3	0,032	40,1847	40,1722	0,0125	$2,08 \times 10^{-3}$	$12,5 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^4$
4	0,051	37,0484	37,0381	0,0103	$1,70 \times 10^{-3}$	$10,2 \times 10^{-6}$	$9,8 \times 10^4$



Фиг. 2. Диаграма на масовото ерозийно износване на образци с различно съдържание на калай

Fig. 2. A diagram of mass erosive wearing of samples with different content of Sn



Фиг. 3. Зависимост на скоростта на ерозия от процентното съдържание на калай в чугуна

Fig. 3. A dependence of the velocity of erosion on the content of Sn in cast iron



Фиг. 4. Диаграма на износостойчивостта I на чугун с различно съдържание на калай при струйно-абразивна ерозия

Fig. 4. A diagram of wear-resistance I of iron with different content of Sn at jet-abrasive erosion

В *таблица 3* са представени стойности за относителната ерозийна износостойчивост $E_{i,e}$, определена по формула (11), а в *табл. 4* – данни за относителната промяна на ерозийната износостойчивост $\Delta E_{i,e}$, определена по формула (12).

На *фигури 5* и *6* са представени диаграми на относителната износостойчивост $E_{i,e}$ и на относителната ерозийна износостойчивост $\Delta E_{i,e}$ по данни съответно в *табл. 3* и *4*.

ТАБЛИЦА 3. Относителна ерозионна износоустойчивост $E_{i,e}$

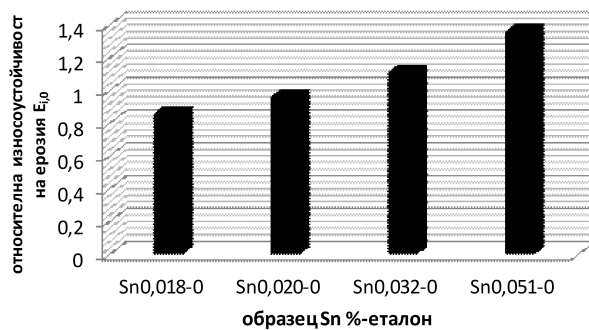
TABLE 3. Relative erosive wear-resistance $E_{i,e}$

Относителна ерозионна износоустойчивост $E_{i,e} = I_i/I_o$			
Sn 0,018-0	Sn 0,020-0	Sn 0,032-0	Sn 0,051-0
0,86	0,96	1,11	1,36

ТАБЛИЦА 4. Относителна промяна на ерозионната износоустойчивост $\Delta E_{i,e}$

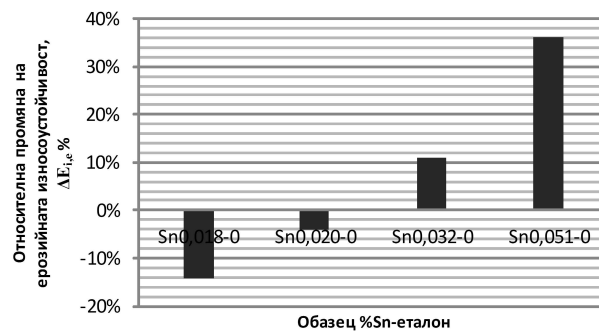
TABLE 4. The relative change of erosive wear-resistance $\Delta E_{i,e}$

Относителна промяна на ерозионната износоустойчивост $\Delta E_{i,e} = \frac{I_i - I_o}{I_o} 100$			
Sn 0,018-0	Sn 0,020-0	Sn 0,032-0	Sn 0,051-0
-14%	-4,2%	+11%	+36%



Фиг. 5. Диаграма на относителната ерозионна износоустойчивост $E_{i,e}$ на чугун с различно съдържание на калай

Fig. 5. A diagram of relative erosive wear-resistance of iron with different content of Sn



Фиг. 6. Диаграма на относителната промяна на ерозионната износоустойчивост $\Delta E_{i,e}$ на чугун с различно съдържание на калай Sn

Fig. 6. A diagram of the relative change of erosive wear-resistance $\Delta E_{i,e}$ of iron with different content of Sn

5. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

От анализа на получените експериментални резултати се установи следното:

- Съдържанието на калай в сферографитния високояк чугун влияе нееднозначно върху износването и износоустойчивостта в условия на струйно-абразивна ерозия.
- Минималното ерозионно износване, т.е. максималната ерозионна износоустойчивост, се наблюдава при образец от чугун, съдържащ максимално съдържание на калай – 0,051%, образец № 4 от изпитваната серия образци със следните експериментални данни, *фиг. 2*: масово износване $m = 0,0103$ g, скорост на ерозия $\dot{m}_e = 1,7 \times 10^{-3}$ g/min и ерозионна износоустойчивост $I_e = 9,8 \times 10^4$. Относителната износоустойчивост е 1,36, *фиг. 5*, а относителната промяна на износоустойчивостта +36%, *фиг. 6*. Минималното ерозионно износване, съответно максималната износоустойчивост на образца, корелира с максималната му твърдост спрямо останалите от изпитваната серия образци, а именно $HB = 277$.
- Максималното ерозионно износване, т.е. минималната ерозионна износоустойчивост се наблюдава не при базовия образец без съдържание на калай, който има минимална твърдост $HB = 197$, както би се очаквало, а при образец № 2 със съдържание 0,018% калай, *фиг. 2*. Неговата относителна ерозионна износоустойчивост е с 14% по-малка от износоустойчивостта на еталонния образец № 0, *фиг. 5*.
- С повишаване на съдържанието на калай в чугуна при стойности 0,018% и 0,020% – образци № 2 и № 3, масовото ерозионно износване е по-голямо от това на образца-еталон № 0, т.е. при това съдържание на калай се влошават съпротивителните възможности на материала при ударно въздействие на абразивни частици. С увеличаване на съдържанието на калай масовото износване и скоростта на ерозия постепенно намаляват и стават по-малки от тези на образца-еталон – образец № 3 с Sn = 0,032%, *фиг. 2* и *3*. Относителната промяна на ерозионната износоустойчивост е $\Delta E_{3,0} = +11\%$ *фиг. 6*.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата статия е разработена методика и е проведено сравнително изследване на износването и износоустойчивостта на образци от високояк чугун, без и с различно процентно съдържание на калай, в условията на ерозия от въздушна струя, носеща абразивни частици.

Получени са експериментални резултати за масовото износване, скоростта, интензивността на масово износване, абсолютната и относителната износоустойчивост и относителната промяна на износоустойчивостта.

Установено е, че наличието на калай влияе нееднозначно върху характеристиките на ерозийното износване. До определена стойност на калай от 0,018 % до 0,020% износоустойчивостта намалява и става по-малка от тази на чугун без съдържание на калай. При по-високи стойности, например съдържание от 0,032%, износоустойчивостта нараства и е най-висока при максимално съдържание на калай в изпитваната серия образци – при 0,051%. Ерозийната износоустойчивост в този случай нараства с 36% спрямо тази на базовия образец без калай. Този резултат е в корелация с максималната твърдост на образца.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите на статията изказват благодарност за оказаната финансова и морална подкрепа на „Подкрепа за развитието на докторанти, постдокторанти и млади учени в областта на виртуалното инженерство и индустриалните технологии“, проект BG051PO001-3.3.06-0046.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г а р к у н о в, Д. Триботехника: износ и безызносность. изд. МСХА, Москва, 2001.
2. Р г е е с е, С. Erosion. Academic Press, New York, 1979.
3. К а н д е в а, М., Д. К а р а с т о я н о в, А л. В е н ц е л. Ерозийно износване на никелови покрития с наноразмерни частици от силициев карбид. – Трибологичен журнал БУЛТРИБ, 2013, № 3, 264–271.
4. К а н д е в а, М., М., Т е о ф и л о в а. Erosion of Aluminium Alloys. – Journal of the Balkan Tribological Association, Sofia, 5, 1999, № 3, 182–188.
5. К а н д е в а, М. Контактният подход в инженерната трибология. ТУ–София, София, 2012.
6. М а н о л о в, Н., М. К а н д е в а. Интердисциплинарната парадигма на трибологията. ТУ–София, София, 2010.
7. BS 1615 Испытание струей абразивного порошка (модифицированный метод Шуца и Керна). Британский институт стандартов.
8. ASTM G 76–04: Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets.

EROSION OF DUCTILE IRON MICROALLOYED WITH Sn SUBJECTED TO AN AIR JET OF ABRASIVE PARTICLES

MARA KANDEVA, BORYANA IVANOVA

S u m m a r y

In the present paper a methodology is developed and a comparative study of wearing and wear-resistance of a series of samples from ductile iron, microalloyed with different percentage content of Sn, subjected to discrete impact of abrasive particles of an air-jet is carried out. Experimental results for characteristics of erosive mass wearing, relative wear-resistance, and relative change of the wear-resistance are obtained. It is established that the presence of Sn affects variously on the characteristics of erosive wearing. At a certain value of Sn, the wear-resistance decreases and becomes smaller than the one of iron without Sn. With increasing content of Sn, the wear-resistance increases and reaches to a maximum value which is 36% of that of the material without Sn. This result for wear-resistance is correlated with the hardness of the material.

Key words: methodology, wearing, wear-resistance, ductile iron.

Постъпила на 03.12.2013

Мара Кандева, доц. д-р инж.

e-mail: kandevam@gmail.com

Боряна Иванова, гл. ас. инж.

e-mail: bsaykova@tu-sofia.bg

Технически университет–София

Машинно–технологичен факултет

бул. „Св. Климент Охридски“ № 8

1756 София, България

Mara Kandeva, Assoc. Prof. Ph. D. Eng.

e-mail: kandevam@gmail.com

Boryana Ivanova, As. Prof. Eng.

e-mail: bsaykova@tu-sofia.bg

Technical University of Sofia

Faculty of Machine Engineering

8, St. Kl. Ohridski Blvd

1756 Sofia, Bulgaria