



DIAMOND BURNISHING PROCESS EFFICIENCY TO INCREASE THE WEAR RESISTANCE OF SLIDING BEARING BUSHINGS MADE OF CuAl8Fe3 BRONZE

Galya Duncheva*, Angel Anchev, Desislava Drumeva
 Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 June 2021

Accepted 28 June 2021

Keywords:

wear resistance, sliding bearing bushings, diamond burnishing, CuAl8Fe3 bronze

ABSTRACT

In this article, the object of the experimental study is wear resistance of sliding bearing bushings made of CuAl8Fe3 bronze after diamond burnishing. Tribological studies were performed under boundary lubricant conditions and dry friction conditions. In order to evaluate the efficiency of the diamond burnishing process, a comparison of the wear characteristics of three groups of specimens was made: treated only by cutting, subjected to diamond burnishing with one pass; subjected to diamond burnishing with six passes. It has been proved that under boundary lubricant conditions, the specimen subjected to diamond burnishing with six passes has 2.27 times higher wear resistance compared to the wear resistance of the specimen treated by cutting, and 1.42 times higher wear resistance than that of the specimen subjected to diamond burnishing with one pass. Under dry friction conditions, the specimen subjected to diamond burnishing with one pass has 2.45 times higher wear resistance than the wear resistance of the specimen treated by cutting, and lower wear resistance than that of the specimen subjected to diamond burnishing with six passes. Applying of diamond burnishing with six passes leads to 2.3 times higher wear resistance under dry friction conditions compared to the conventional case of holes machining.

© 2021 Journal of the Technical University of Gabrovo. All rights reserved.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Известно е, че работоспособността на плъзгащите лагери се определя от състоянието на работните повърхнини на лагерните втулки. За минимизиране на работата на силите на триене, а оттам на износването и задирането като основни повреди в лагерните втулки, за вътрешните работни повърхнини на лагерните втулки се изискват висока точност на размерите ($7-8$ -ми клас) и отклоненията от кръглост и цилиндричност, ниска грапавост $R_a \leq 0.63 \mu\text{m}$ и повишена микротвърдост [1]. Комплексът от характеристики на повърхностните слоеве определя т.н. Surface Integrity (SI). За конкретен режим на работа на плъзгащия лагер (най-често гранично или течено триене), експлоатационното поведение (трибологично, уморно и устойчивост на корозия) се определя преди всичко от SI [2]. Конвенционалният подход за обработване на вътрешните работни повърхнини на втулките се реализира чрез рязане – разстъргване и фино разстъргване или свредловане и последващо райбероване. Повърхностното пластично деформиране (ППД) (burnishing) е ефективен подход за подобряване на SI на повърхностните слоеве и експлоатационното поведение. От методите за ППД, използващи контакт триене при плъзгане между деформиращия елемент и третираната повърхнина (sliding burnishing methods), най-голямо практическо приложение намира методът диамантно заглаждане (ДЗ). При

ДЗ деформиращият елемент е накрайник със сферична работна повърхнина, изработен най-често от синтетичен диамант. Прегледът на научните публикации, посветени на ДЗ, показва, че са проведени ограничен брой изследвания на трибологичното поведение в аспект на износване [3]. Обект на изследване на износване след ДЗ са различни стомани, а именно: инструментални [4], аустенитна хром-никелова стомана AISI 316Ti [5], конструкционни за оси във вериги в петролната индустрия [6], средно-въглеродна конструкционна стомана Rb40 (съответстваща на AISI 1335) [7]. В литературата липсват изследвания на износоустойчивостта на цветни сплави след ППД.

От гледна точка на типичното за алуминиев бронз CuAl8Fe3 приложение за изработване на втулки за плъзгащи лагери, от практически интерес е да се оценят потенциалните възможности на процеса ДЗ за повишаване на износоустойчивостта им. Тази статия представя резултати от сравнително експериментално изследване на характеристиките на износването и износоустойчивостта на образци тип втулки от алуминиев бронз, чиито отвори са обработени чрез рязане и ДЗ.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОД НА ИЗСЛЕДВАНЕ

2.1. Материал

Обект на експериментално изследване на износване е алуминиев бронз CuAl8Fe3 EN CW303G с химичен състав според Таблица 1.

* Corresponding author. E-mail: duncheva@tugab.bg

На база на механични изпитания на едномерен опън върху изпитвателна машина *Vibrophone 100/ Zwick/ Roell* са получени следните материални характеристики на изследвания бронз:

$$E = 0.56 \times 10^5 \text{ MPa}; R_{0.2} = 219 \text{ MPa};$$

$$R_m = 542 \text{ MPa}; A_5 = 27.8\%.$$

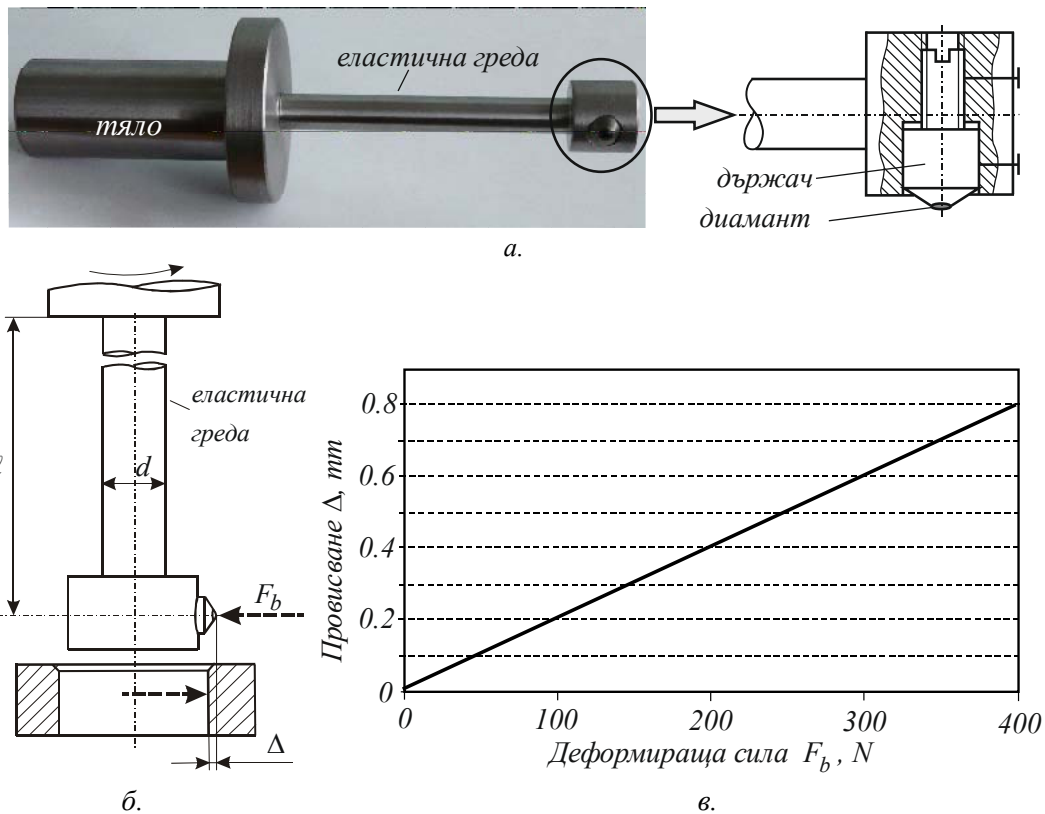
За изработване на втулките е използван прокат с диаметър 40 mm .

2.2. Устройство за диамантно заглаждане на отвори

За ДЗ на отворите на образците е използвано устройството с еластично действие, показано на фиг. 1. Големината на деформиращата сила F_b се задава чрез огъвната деформация (провисването) Δ на еластичната греда (фиг. 1б).

Таблица 1 Химичен състав на бронз $\text{CuAl8Fe3}\%$

Zn	Sn	Si	Mn	Al	Ni	Pb	Fe	P	S	Co	Cu
<0.01	<0.01	0.029	0.24	8.22	0.28	0.02	3.47	<0.001	0.005	0.012	87.70



Фиг. 1. Устройство за ДЗ на отвори

а. общ вид; б. функционална схема; в. функционална зависимост $F_b = F_b(\Delta)$



а.



б.

Фиг. 2. ДЗ на отворите на втулките

а. позиция на инструмента преди въвеждането му в отвора; б. позиция на инструмента по време на процеса ДЗ

Функционалната зависимост $F_b = F_b(\Delta)$ (фиг. 1в) се описва с известната формула:

$$\Delta = \frac{F_b \ell^3}{3EJ}, \quad (1)$$

където ℓ дължината на еластичната греда, E е модул на Young, $J = \frac{\pi d^4}{64}$ е осов инерционен момент на напречното сечение на еластичната греда, d е диаметър на напречното сечение.

2.3. Детайли на експеримента на износване

Обект на изследване са три групи образци тип втулки от алуминиев бронз CuAl8Fe3, чиято вътрешна работна повърхнина е обработена както следва: само чрез рязане (P); ДЗ с един преход ($ДЗ, n=1$); ДЗ с шест прехода при разнопосочна схема ($ДЗ, n=6$). Вътрешните работни повърхнини на образците са обработени върху универсален струг чрез технология, включваща две последователни операции за свредловане на отвора и последващо разстъргване. ДЗ е извършено върху универсален струг (фиг. 2а,б) с получените на основа на проведената двучелева оптимизация оптимални стойности на параметрите на процеса, едновременно минимизиращи грапавостта и максимизиращи повърхностната микротвърдост [7].

Образците от бронз за трибологичните изпитания представляват сегменти, изрязани от обработените втулки (фиг. 3) със следните размери: външен радиус $R_e = 19.5 \text{ mm}$, вътрешен радиус $R = 13 \text{ mm}$, централен ъгъл $\varphi = 50^\circ$ и дебелина $c = 5.99 \div 6.63 \text{ mm}$. С цел точно съответствие с условията на експлоатация на плъзгащите лагери, експерименталното изследване на трибосистемата „бронз - стомана“ е проведено по кинематичната схема „неподвижен сегмент - въртяща се ролка“. Противотялото представлява ролка от лагерна стомана с външен диаметър 26 mm , вътрешен диаметър 7.8 mm и твърдост $HRC 58$.

Номиналната контактна площ A_a за всеки от образците от бронз се изчислява по формулата:

$$A_a = R \varphi c \quad (2)$$

От всяка група образци са изработени по 2 броя, от които единият образец се изследва в условия на гранично триене при смазване с индустриално масло, а другият образец – в условия на триене без смазващо ве-

щество (сухо триене). В Таблица 2 е показана спецификация на образците от бронз, включваща номера, означението, дебелината c , номиналната контактна площ A_a и номиналното контактното налягане p_a . Номиналното контактното налягане p_a е:

$$p_a = \frac{P}{A_a}, \quad (3)$$

където $P = 35 \text{ N} = \text{const}$ е нормалното натоварване.

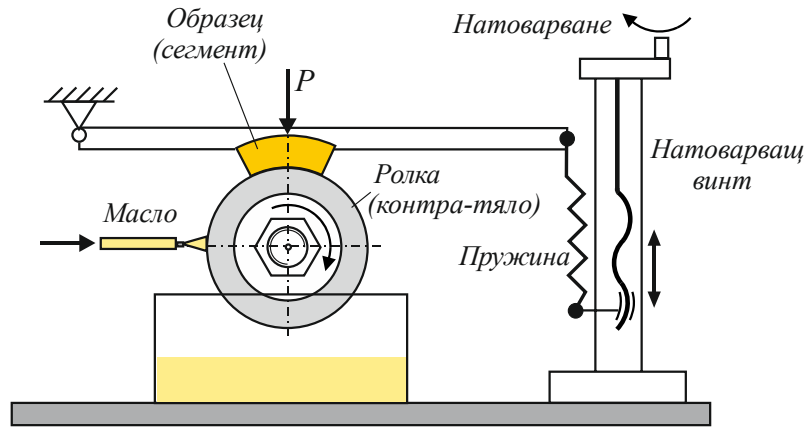
Принципна схема на експерименталната установка за провеждане на трибологичните изпитания е показана на фиг. 4. Изследваният образец (сегмент) се закрепва неподвижно в легло на специално изработен държач в натоварваща греда. Вътрешната цилиндрична повърхнина на образца контактува с повърхнината на въртящата се ролка, неподвижно закрепена за вал, който се върти с постоянна честота – $3000 \text{ min}^{-1} = \text{const}$. Нормалното натоварване P е приложено в центъра на тежестта на контактната площадка между образца и ролката и се задава чрез лостова система в натоварващата греда. Изследването е проведено при еднакви условия за всички образци в два режима на триене: условия на гранично триене при смазване с индустриално масло, което се подава в контакта чрез капково смазване с дебит 20 капки в минута; режим на сухо триене (без смазващо вещество).



Фиг. 3. Втулки, използвани за експериментални образци

Таблица 2 Означения и характеристики на образците и трибосистемата

№ на обр.	Група/ Означение	Дебелина на образца $c_i, \text{ mm}$	Номинална контактна площ		Номинално контактното налягане $p_a, \text{ MPa}$
			$A_{ai}, \text{ m}^2$		
1	Група 1	5.99	67.95×10^{-6}		0.515
2	P (само с рязане)	6.00	68.07×10^{-6}		0.514
3	Група 2	6.35	72.09×10^{-6}		0.486
4	ДЗ, $n=1$	6.37	72.21×10^{-6}		0.485
5	Група 3	6.56	74.45×10^{-6}		0.470
6	ДЗ, $n=6$	6.63	75.16×10^{-6}		0.466



Фиг. 4. Принципно схема на експерименталната установка

За оценка на характеристиките на износването се измерва масовото износване на образците, съответстващо на определен път на триене (време на триене/брой цикли) при постоянно зададени условия – натоварване и скорост на плъзгане. На база на масовото износване се изчисляват съответните характеристики на износването и износоустойчивостта. Методиката включва следната последователност:

1) Измерване на началната маса m_0 на образеца преди триене спомощта на електронна везна WPS 180/C/2 с точност до 0.1 mg . Преди всяко измерване на везната образецът се почиства от механични и органични частици, и се подсушава с етилов алкохол за предотвратяване на електростатичния ефект;

2) Образецът се поставя в държача на натоварващата греда и се задава нормалното натоварване P ;

3) След определен път на триене L , респ. време на триене, се измерва масата на образеца m_i и се изчисляват следните характеристики на износването:

• Масово износване m – разликата между масата на образеца преди триене m_0 и тази след определен път/време на триене $m_i, \text{ mg}$:

$$m = m_0 - m_i \quad (4)$$

• Скорост на износване $\gamma, \text{ mg} / \text{min}$ – разрушената маса от повърхностния слой на образеца при триене за време $t = 1 \text{ min}$:

$$\gamma = m/t \quad (5)$$

• Линейно износване $h, \mu\text{m}$ - износването по направление на нормалата към контактната повърхнина, изразено чрез масовото износване:

$$h = \frac{m}{\rho A_a}, \quad (6)$$

Таблица 3 Характеристики на износването на образец № 2, група P (рязане)

	Образец № 2, група P (рязане)			
Брой цикли	N	45×10^3	90×10^3	135×10^3
Време, min	t	15	30	45
Път на триене, m	L	510.5	1021	1531.5
Масово износване, mg	m	3.7	6.9	11.3
Скорост на масовото износване, mg/min	γ	0.25	0.23	0.25
Линейно износване, μm	h	7.1	13.3	21.7
Интензивност на износването	i_h	0.014×10^{-6}	0.013×10^{-6}	0.014×10^{-6}
Износоустойчивост	I_h	71.8×10^6	77×10^6	70.5×10^6

където $\rho = 7645 \text{ kg/m}^3$ е плътността на изследвания бронз.

• Интензивност на линейното износване i_h - линейното износване на повърхностния слой на образеца, съответстващо на път на триене $L = 1 \text{ m}$:

$$i_h = \frac{h}{L} = \frac{m}{\rho A_a L} \quad (7)$$

• Абсолютна износоустойчивост I_h - изразява способността на повърхностния слой да се съпротивлява срещу износване и представлява реципрочната стойност на интензивността на износване:

$$I_h = \frac{1}{i_h} = \frac{\rho A_a L}{m} \quad (8)$$

• Относителна износоустойчивост $R_{i,j}$ - отношение между износоустойчивостта на изпитвания образец I_{hi} и износоустойчивостта I_{hj} на образец, приет за база за сравнение при еднакви условия на триене:

$$R_{i,h} = \frac{I_{hi}}{I_{hj}}. \quad (9)$$

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ И КОМЕНТАРИ

3.1. Износоустойчивост в условията на гранично триене

В таблици 3, 4 и 5 са показани експерименталните резултати, получени за масовото и линейното износване, скоростта на износване, интензивността на износване и абсолютната износоустойчивост на образци с номера №2, №4 и №6 от трите групи (табл. 8.7) при мазане с индустриално масло.

Таблица 4 Характеристики на износването на образец № 4, група ДЗ, $n=1$

Образец № 4, група ДЗ, $n=1$				
Брой цикли	N	45×10^3	90×10^3	135×10^3
Време, min	t	15	30	45
Път на триене, m	L	510.5	1021	1531.5
Масово износване, mg	m	1.2	3.7	7.5
Скорост на масовото износване, mg/min	γ	0.08	0.12	0.17
Линейно износване, μm	h	2.2	6.7	13.6
Интензивност на износването	i_h	0.0043×10^{-6}	0.0066×10^{-6}	0.0089×10^{-6}
Износоустойчивост	I_h	235×10^6	152×10^6	113×10^6

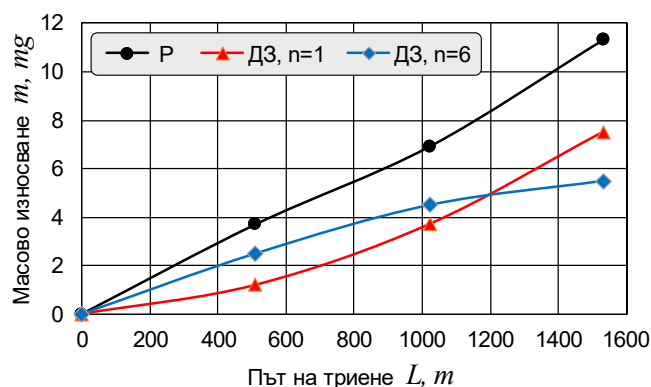
Таблица 5 Характеристики на износването на образец № 6, група ДЗ, $n=6$

Образец № 6, група ДЗ, $n=6$				
Брой цикли	N	45×10^3	90×10^3	135×10^3
Време, min	t	15	30	45
Път на триене, m	L	510.5	1021	1531.5
Масово износване, mg	m	2.5	4.5	5.5
Скорост на масовото износване, mg/min	γ	0.17	0.15	0.12
Линейно износване, μm	h	4.35	7.8	9.6
Интензивност на износването	i_h	0.0085×10^{-6}	0.0077×10^{-6}	0.0062×10^{-6}
Износоустойчивост	I_h	117×10^6	130×10^6	160×10^6

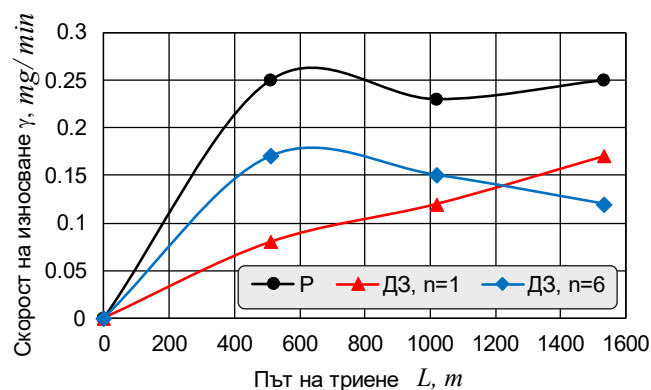
На фиг. 5 е представена кинетичната крива на масовото износване за трите образца, т.е. зависимостта на изменение на масовото износване m от пътя на триене L (брой цикли/време). За образец № 2 (P), обработен чрез рязане, зависимостта $m = m(L)$ е линейна, като в края на експеримента $L = 1531.5 \text{ m}$ масовото износване е 1.5 пъти по-голямо в сравнение с образец № 4 и 2 пъти по-голямо в сравнение с образец № 6. При образците, чиито отвори са обработени чрез ДЗ, зависимостта $m = m(L)$ има различен характер (фиг. 5).

Изменението на скоростта на износване γ е показано на фиг. 6. За път на триене в интервала $L = 510.5 \div 1531.5 \text{ m}$ при образец № 2, група P, не се наблюдава етап на сработване и скоростта на износване е почти постоянна. Изменението на скоростта на износване за другите два образца (№ 4 и № 6) има противоположна тенденция: за образец № 4, група ДЗ, $n=1$, с увеличаване на пътя на триене скоростта на износване нараства линейно, а за образец - № 6, група ДЗ, $n=6$, скоростта на износване намалява линейно. За един и същи максимален път на триене ($L = 1531.5 \text{ m}$), най-голямо износване има образец № 2, група P, обработен чрез рязане, а най-малко е износването на образец № 6, група ДЗ, $n=6$. В етапа на сработване обаче неговата скорост на износване е по-голяма от скоростта на износване на образца, подложен на ДЗ с $n=1$ (фиг. 8.13). На фиг. 7 е визуализирана зависимостта на изменение на износоустойчивостта на образците от пътя на триене - $I_h = I_h(L)$. Високата износоустойчивост на образец № 4, група ДЗ, $n=1$, при малък път на триене - $L = 510.5 \text{ m}$, е резултат от малката скорост на износване на образца (фиг. 6).

Диаграма на абсолютната износоустойчивост на трите образца, съответстваща на максималния изследван път на триене - $L = 1531.5 \text{ m}$, е показана на фиг. 8. Очевидно, най-висока износоустойчивост $I_h = 160 \times 10^6$ има образец № 6, подложен на ДЗ с $n=6$. Резултатите за относителната износоустойчивост на образците $R_{i,j}$ са показани в Таблица 6 и визуализирани на фиг. 9.



Фиг. 5. Изменение на масовото износване от пътя на триене



Фиг. 6. Изменение на скоростта на износването от пътя на триене

Диаграмата на фиг. 9 показва, че образец № 6, подложен на ДЗ с $n=6$, има 2.27 пъти по-висока износоустойчивост в сравнение с тази на образец № 2, обработен чрез рязане, и 1.42 пъти по-висока износоустойчивост от тази на образец № 4, подложен на ДЗ с $n=1$. Прилагането на ДЗ с $n=1$ води до 1.6 пъти по-висока износоустойчивост в условията на гранично триене в сравнение с конвенционалния случай на обработване на отворите с рязане.

Повишената износоустойчивост на образците, подложени на ДЗ, се дължи на подобреното SI на повърх-

ностния слой на отворите, характеризиращо се със значително по-ниска грапавост и повишена микротвърдост в сравнение с образеца, обработен чрез рязане. Същевременно, повишената износоустойчивост може се дължи на следните механизми, протичащи в контактната зона поотделно или съвместно с доминиране на един или друг от тях:

1) Допълнително повишаване на микротвърдостта и образуване на нови структури в повърхностните слоеве на контактуващите тела вследствие на повишената температура при триене, което намалява адхезионната компонента на триенето и оттам намалява износването;

2) Уякчаването на повърхностния слой следствие от пластичната деформация при ДЗ намалява възможността за пренасяне на материал от едното тяло върху другото, което от своя страна, намалява интензивността на износване. От друга страна, уякчаването на повърхностния слой е предпоставка за намаляване на интензивността или напълно изключване за протичане на процес на водородно износване.

3.2. Износоустойчивост в условията на сухо триене

Режимът на сухо триене относително рядко се среща в инженерната практика. От друга страна, износоустойчивостта на лагерните втулки представлява интерес в случай на авария, при изтичане на мажещото вещество от зоната на контакта, когато трибосистемата преминава в екстремален режим на експлоатация.

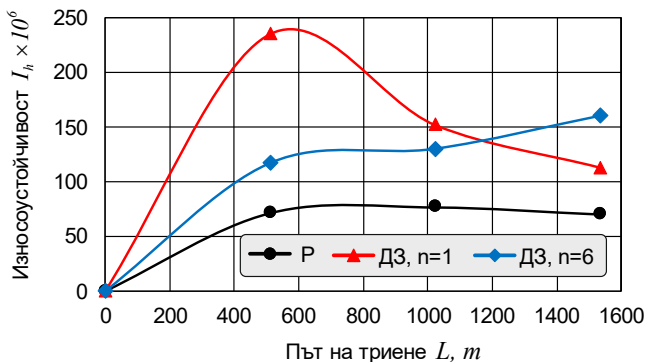
Изследването е проведено по описаната методика при сухо триене с образци №1, №3 и №5 (Таблица 8.7), но за по-кратко време, респ. при по-малък път на триене от този при мазане с масло: $L = 170 \div 510.5 \text{ m}$. По-малкият път на триене е избран поради възможността за задиране и катастрофално износване на втулките вследствие от значителното повишаване на температу-

рата в контактната зона в условията на сухо триене. Резултатите за характеристиките на износването на изследваните образци са показани в Таблицы 7, 8 и 9.

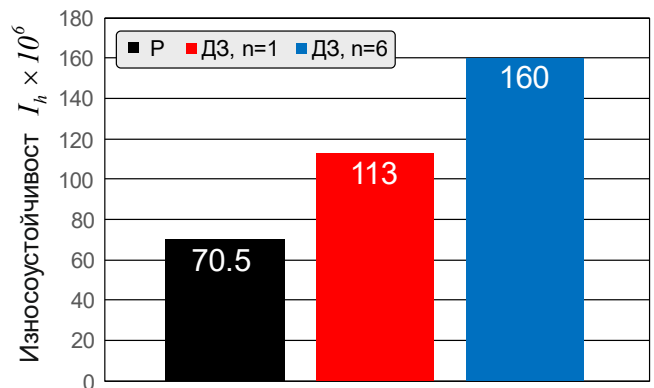
Графична визуализация на зависимостта $m = m(L)$ за трите образеца показана на фиг. 10. При път на триене $L \leq 340 \text{ m}$ масовото износване на образеца, обработен чрез ДЗ с $n=6$, е малко по-голямо в сравнение с другите два образеца. В интервала $340 \leq L \leq 510.5 \text{ m}$ масовото износване на образец № 1, обработен чрез рязане, рязко се увеличава. Тази тенденция се потвърждава и от графиките, визуализиращи изменението на скоростта на износване (фиг. 11). За целия път на сухо триене най-малко е износването на образец № 4, обработен чрез ДЗ с $n=1$.

Графики, визуализиращи зависимостта $I_h = I_h(L)$ в условията на сухо триене, са показани на фиг. 12. Очевидно, обработването на отворите чрез ДЗ влошава износоустойчивостта на изследвания бронз при път на триене $L \leq 410 \text{ m}$. В края на интервала, при път на триене $L \leq 470 \text{ m}$ износоустойчивостта на образците, подложени на ДЗ, е по-голяма от тази на образец № 1, група Р, обработен чрез рязане. Диаграма на абсолютната износоустойчивост, съответстваща на максималния изследван път на триене, е показана на фиг. 12.

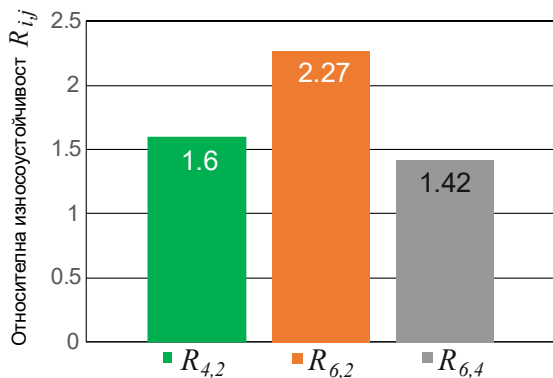
В таблица 10 са показани резултати за абсолютната и относителната износоустойчивост на изследваните образци в условията на сухо триене. Резултатите от таблица 10 за относителната износоустойчивост, съответстващи на максималния изследван път на сухо триене, са представени под формата на диаграма на фиг. 8.21.



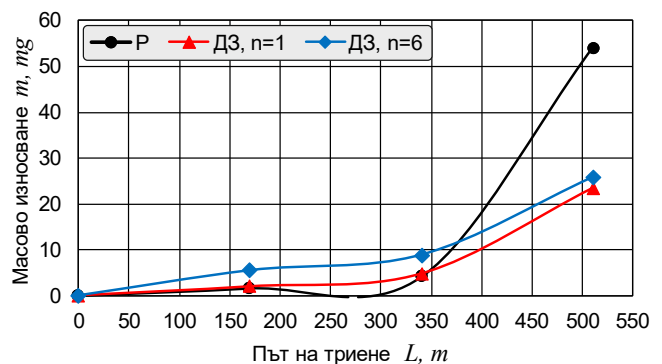
Фиг. 7. Изменение на износоустойчивостта на образците от пътя на триене



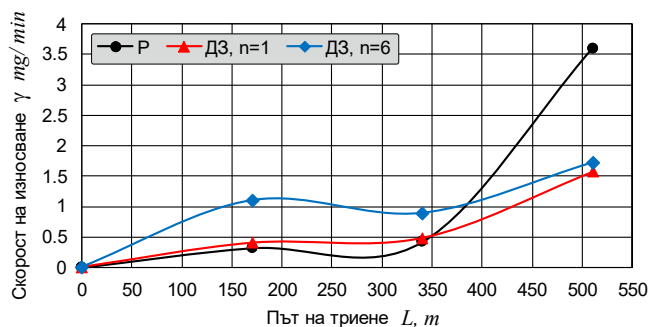
Фиг. 8. Диаграма на абсолютната износоустойчивост при път на триене 1531.5 m



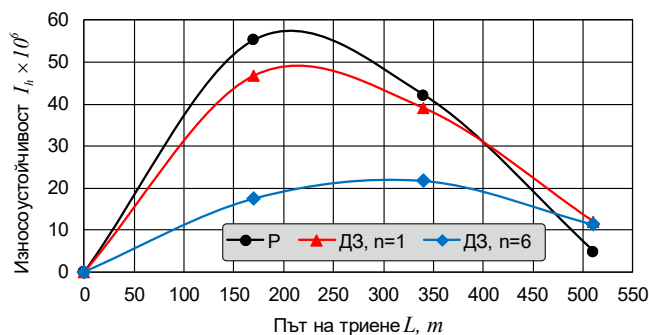
Фиг. 9. Диаграма на относителната износоустойчивост при път на триене $L=1531.5 \text{ m}$



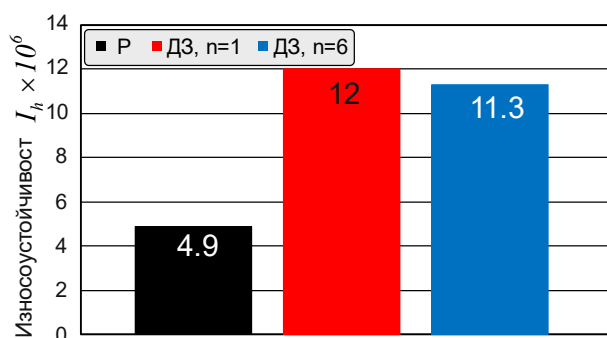
Фиг. 10. Изменение на масовото износване от пътя на триене



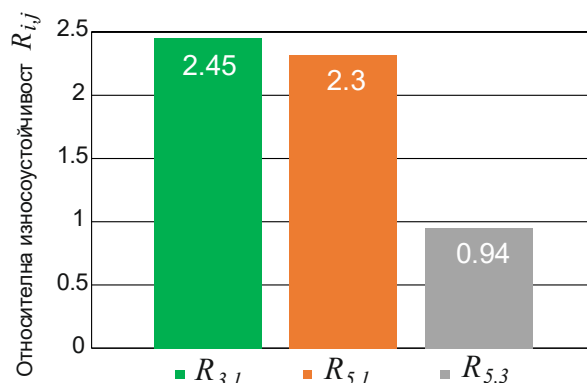
Фиг. 11. Изменение на скоростта на износването от пътя на триене



Фиг. 12. Изменение на износоустойчивостта на образците от пътя на триене



Фиг. 13. Диаграма на абсолютната износоустойчивост при път на триене $L=510.5$ m



Фиг. 14. Диаграма на относителната износоустойчивост при път на триене $L=510.5$ m

Таблица 6 Относителна износоустойчивост при път на триене 1531.5 m

№ на обр.	Означение	Абсолютна износоустойчивост $I_h \times 10^6$	Относителна износоустойчивост $R_{i,j}$
2	P	70.5×10^6	$R_{2,2} = 1$
4	ДЗ, n=1	113×10^6	$R_{4,2} = 1.6$
6	ДЗ, n=6	160×10^6	$R_{6,2} = 2.27$ $R_{6,4} = 1.42$

Таблица 7 Характеристики на износването на образец № 1, група P (рязане)

Образец № 1, група P (рязане)				
Брой цикли	N	15×10^3	30×10^3	45×10^3
Време, min	t	5	10	15
Път на триене, m	L	170	340	510.5
Масово износване, mg	m	1.6	4.2	54.0
Скорост на масовото износване, mg/min	γ	0.32	0.42	3.6
Линейно износване, μ m	h	3.1	8.1	104
Интензивност на износването	i_h	0.018×10^{-6}	0.024×10^{-6}	0.2×10^{-6}
Износоустойчивост	I_h	55.25×10^6	42.1×10^6	4.9×10^6

Таблица 8 Характеристики на износването на образец № 3, група ДЗ, n=1

Образец № 3, група ДЗ, n=1				
Брой цикли	N	15×10^3	30×10^3	45×10^3
Време, min	t	5	10	15
Път на триене, m	L	170	340	510.5
Масово износване, mg	m	2.0	4.8	23.5
Скорост на масовото износване, mg/min	γ	0.4	0.48	1.57
Линейно износване, μ m	h	3.6	8.7	42.6
Интензивност на износването	i_h	0.021×10^{-6}	0.026×10^{-6}	0.084×10^{-6}
Износоустойчивост	I_h	46.9×10^6	39.1×10^6	12×10^6

Таблица 9 Характеристика на износването на образец № 5, група ДЗ, n=6

Образец № 5, група ДЗ, n=6				
Брой цикли	N	15×10^3	30×10^3	45×10^3
Време, min	t	5	10	15
Път на триене, m	L	170	340	510.5
Масово износване, mg	m	5.5	8.9	25.8

Скорост на масовото износване, mg/min	γ	1.1	0.89	1.72
Линейно износване, μm	h	9.7	15.6	45.3
Интензивност на износването	i_h	0.057×10^{-6}	0.046×10^{-6}	0.089×10^{-6}
Износоустойчивост	I_h	17.6×10^6	21.8×10^6	11.3×10^6

Таблица 10 Относителна износоустойчивост при път на триене $L=510.5 m$

№ на обр.	Обозначение	Абсолютна износоустойчивост $I_h \times 10^6$	Относителна износоустойчивост $R_{i,j}$
1	P	4.9×10^6	$R_{1,1}=1$
3	ДЗ, $n=1$	12×10^6	$R_{3,1}=2.45$
5	ДЗ, $n=6$	11.3×10^6	$R_{5,1}=2.3$ $R_{5,3}=0.94$

Диаграмата на фиг. 14 показва, че образец № 3, подложен на ДЗ с $n=1$, има 2.45 пъти по-висока износоустойчивост от образец №1, обработен чрез рязане, и по-ниска износоустойчивост от тази на образец № 5, подложен на ДЗ с $n=6$. Прилагането на ДЗ с $n=6$ води до 2.3 пъти по-висока износоустойчивост в условията на сухо триене в сравнение с конвенционалния случай на обработване на отворите с рязане. Влошаването на износоустойчивостта (с 6%) на образец № 5, подложен на ДЗ с $n=6$, в сравнение с тази на образец № 3, подложен на ДЗ с $n=1$, най-вероятно се дължи на прекомерно голямото уякчаване, получено следствие от по-големия брой преходи. Следователно, за максимизиране на износоустойчивостта на вътрешните работни повърхнини на втулки от бронз CuAl8Fe3, работещи в условията на сухо триене, е целесъобразно процесът ДЗ да се прилага с 1 преход ($n=1$).

4. ИЗВОДИ

Резултатите от проведеното експериментално изследване на износване дава основание за следните основни изводи:

- Доказана е ефективността на процеса ДЗ за значително повишаване на износоустойчивостта на лагерни втулки за плъзгащи лагери от алуминиев бронз CuAl8Fe3, както в условията на гранично триене, така и в условията на сухо триене;

- Доказано е, че в условията на гранично триене износоустойчивостта е най-висока след ДЗ с шест прехода ($n=6$). Образецът, подложен на ДЗ с $n=6$, има 2.27 пъти по-висока износоустойчивост в сравнение с тази на образца, обработен чрез рязане, и 1.42 пъти по-висока износоустойчивост от тази на образца, подложен на ДЗ с $n=1$. Прилагането на ДЗ с $n=1$ води до 1.6 пъти по-висока износоустойчивост в условията на гранично триене в сравнение с конвенционалния случай на обработване на отворите с рязане;

- Доказано е, че в условията на сухо триене износоустойчивостта е най-висока след ДЗ с един преход ($n=1$). Образецът, подложен на ДЗ с $n=1$, има 2.45 пъти по-висока износоустойчивост от тази на образца, обработен чрез рязане, и по-ниска износоустойчивост от тази на образца, подложен на ДЗ с $n=6$. Прилагането на ДЗ с $n=6$ води до 2.3 пъти по-висока износоустойчивост в условията на сухо триене в сравнение с конвенционалния случай на обработване на отворите с

рязане. Следователно, за максимизиране на износоустойчивостта на вътрешните работни повърхнини на втулки от бронз CuAl8Fe3, работещи в условията на сухо триене, е целесъобразно процесът ДЗ да се прилага с 1 преход.

БЛАГОДАРНОСТ

Тази статия е подкрепена от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Наука и образование за интелигентен растеж 2014-2020 г.“, Център за компетентност „Интелигентни мехатрони, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ №BG05M2OP001-1.002-0023.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Vasilev T. Technological capabilities of the burnishing process for control of the quality parameters and the operational characteristics during finishing of bronze bearing bushes. PhD Thesis. Varna. (2013).
- [2] R. M'Saoubi, A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. Int. J. Sustainable Manufacturing 1 (1-2) (2008) 203-236
- [3] Maximov J.T., Duncheva G.V., Anchev A.P., Ichkova M.D., Slide burnishing—review and prospects. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 104 (2019) 785-801
- [4] Tobola D., Brostow W., Czechowski K., Rusek P., Improvement of wear resistance of some cold working tool steels. Wear 382-383 (2017) 29-39
- [5] Maximov J.T., Duncheva G.V., Anchev A.P., Ganey N., Amudjev I.M., Dunchev V.P. Effect of slide burnishing method on the surface integrity of AISI 316Ti chromium-nickel steel. J Braz Soc Mech Sci Eng 40 (194) (2018) <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1135-3>
- [6] Aliev K.T., Aslanov T.I., The influence of diamond burnishing on the fatigue strength and wear resistance of the shafts of petroleum chains. Chem Pet Eng 15(6) (1979) 459-461
- [7] Hamadache H., Laouar L., Zeghib N.E., Chaoui K. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing. J Mater Process Technol 180 (1-3) (2006) 130-136
- [8] Dunchev V.P., Drumeva D.K. Modeling and optimization of the roughness and microhardness in diamond burnishing of CuAl9Fe3 bronze. Journal of the Technical University of Gabrovo 61 (2020) 29-42