



## EXPERIMENTAL STUDY OF FRICTION COEFFICIENT IN DIAMOND BURNISHING OF CuAl8Fe3 BRONZE

Angel Anchev, Desislava Drumeva\*

Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 28 May 2021

Accepted 10 June 2021

#### Keywords:

diamond burnishing, CuAl8Fe3 bronze alloy, regression analysis, friction coefficient, sliding velocity

### ABSTRACT

The article presents the results from an experimental study to determine the friction coefficient in diamond burnishing process of specimens made of CuAl8Fe3 bronze alloy. The experimental study was performed on a lathe C11 using a specially developed device containing a strain gauge beam. The studied burnishing process was implemented through a deforming tool with a spherical tip made of polycrystalline artificial diamond. The experimental study was performed in the range of sliding velocity  $v = 43 - 172 \text{ m/min}$ . A regression analysis was performed and a mathematical model of the friction coefficient depending on the sliding velocity was obtained.

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

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Алуминиевите бронзи са група цветни сплави на медна основа, характеризиращи се с добра статична якост, висока якост на умора, висока корозионна устойчивост, висока пластичност и износоустойчивост. Поради това алуминиевите бронзи са предпочитани конструкционни материали за детайли, подложени на повърхностни налягания, корозия и износване в различни индустриални приложения: зъбни колела, скрепителни елементи, водачи, елементи в клапани и помпи, бутала, тръби за морски платформи, елементи в морски двигатели и морски витла. От друга страна, дори и при ниски температури, алуминиевите бронзи имат по-висока пластичност в сравнение с никел-алуминиевите бронзи. Следователно, тези цветни сплави са много подходящи за студено повърхностно пластично деформиране, което значително може да подобри комплексното състояние на повърхностните им слоеве, а оттам – експлоатационното им поведение. Едно от типичните приложения на алуминиевите бронзи е за изработване на втулки за плъзгащи лагери, чиято експлоатация е при тангенциален контакт – триене при плъзгане със съответната стоманена лагерна шийка. Жизненият цикъл на плъзгащите лагери се лимитира от състоянието на вътрешните работни повърхнини на бронзовите втулки, респ. от основните повреди в тях – износване, задиране и загаряване [1]. Следователно, за подобряване на експлоатационното поведение на лагерните втулки, освен висока точност на формата и размерите, необходимо е да се модифицират повърхностните слоеве по посока на по-ниска грапавост, повишена микротвърдост, подобрена (издробенена) микроструктура и създаване на зона с полезни остатъчни напрежения на натиск. Тези характеристики са от

особено значение, когато експлоатацията на плъзгащите лагери е свързана с наличие на ударни и значителни знакопроменливи натоварвания. За такива условия на експлоатация един от предпочитаните алуминиеви бронзи е CuAl8Fe3 БДС EN 10092-75. В този аспект е целесъобразно да се приложи технология на обработване на лагерните втулки, базирана върху студено повърхностно пластично деформиране (ППД) [2-4]. Доказано ефективен статичен метод за ППД е методът диамантно заглаждане, чиято кинематика е подобна на тази при струговане. В основата на метода е еластично-пластичното деформиране на третираната повърхнина при контакт триене при плъзгане чрез статично притиснат под действие на деформираща сила деформиращ елемент, съдържащ накрайник със сферична работна част – най-често от поликристален изкуствен диамант [5, 6]. Задълбочен обзор и приложни изследвания на различни аспекти на процеса диамантно заглаждане по отношение на широка номенклатура конструкционни материали е направен от изследователски колектив от Технически университет – Габрово [7, 8]. Ефективността му е доказана както по отношение на подобряване на комплекса от характеристики на повърхностните слоеве (Surface Integrity) [5, 6, 9-12], така и по отношение на уморното поведение и износоустойчивостта [13-15]. На основата на процеса диамантно заглаждане са разработени подходи за повишаване на уморната дълготрайност на отворите в краищата на жп релсите и наставовите планки в т.н. наставови възли [16, 17].

По-големите възможности на диамантното заглаждане в аспект на минимизиране на получената грапавост в сравнение с процесите, използващи контакт триене при търкаляне (roller (ball) burnishing) е доказана

\* Corresponding author. E-mail: ddrumeva7@gmail.com

в [18]. Този позитивен заглаждащ (smoothing) ефект при диамантното заглаждане се дължи на присъщата за този метод по-голяма еквивалентна пластична деформация и относително по-големите тангенциални напрежения. Очевидно, в контекста на приложението на диамантното заглаждане за довършващо обработване на бронзови лагерни втулки, е необходимо да се познава коефициента на триене при плъзгане между диамантения накрайник и обработвания материал. Повисокият коефициент на триене способства за отлагането на частици от обработваната сплав върху инструмента с последващо влошаване на качеството на обработваната повърхнина и ускорено износване [19]. Коефициентът на триене при диамантно заглаждане включва две компоненти – деформационна и адхезионна, като приносът на първата компонента представлява 15-40% [20]. Изследванията върху коефициента на триене предимно са насочени по отношение на твърди високо-легирани, високо-въглеродни стомани [21] и ниско легирани стомани [22].

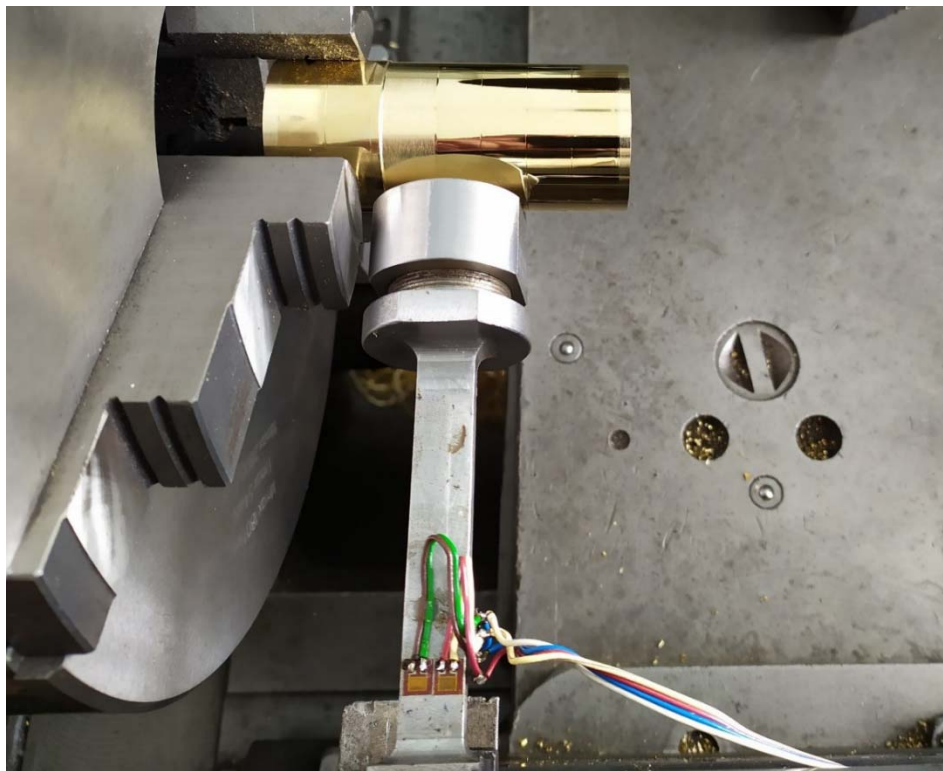
Ефективен подход за задълбочено изследване на напрегнатото и деформирано състояние в повърхностните слоеве след ППД са числените симулации. Отчитайки спецификата на процеса диамантно заглаждане, определящ фактор за адекватността на компютър-

ните модели е реалистичната оценка на коефициента на триене.

Основна цел на настоящото изследване е да се определи коефициента на триене между диамантения накрайник и образци от бронзова сплав в зависимост от скоростта на плъзгане. За постигане на целта е проведен натурен експеримент, базиран върху специално разработено устройство и методиката, представени в [23].

## 2. ДЕТАЙЛИ НА ЕКСПЕРИМЕНТА

Експериментът е реализиран върху универсален струг С11, използвайки специално разработено за целта устройство (фиг.1). Основен елемент в устройството е конзолна тензометрична гредка с постоянно напречно сечение, в предния край на която е закрепен диамантния накрайник с възможност за управляване големината на деформиращата сила  $F_b$  посредством винтова цилиндрична пружина. В съответствие с физиката на процеса диамантно заглаждане, използваната гредова конструкция е с геометрическа нелинейност, тъй като е натоварена едновременно на натиск от деформиращата сила  $F_b$  и на огъване от силата на триене при плъзгане  $T$ , напречна за конзолната гредка.



Фиг. 1. Реализиране на експеримента върху струг С11

Приема се, че по време на целия експеримент е в сила законът на Кулон, т.е.  $T = \mu F_b$ , където  $\mu$  е търсеният коефициент на триене. Последният зависи от технологичните параметри на процеса диамантно заглаждане. Всички експерименти са проведени при постоянни стойности на радиуса на закръглянето на диамантения накрайник, деформиращата сила и подаването, както следва:  $r = 3 \text{ mm}$ ,  $F_b = 275 \text{ N}$ ,  $f = 0,11 \text{ mm/tr}$ . Тези технологични параметри на процеса са получени в резултат от проведена двуцелева

оптимизация на процеса [12]. Експерименталното изследване е проведено при изменение на скоростта на плъзгане в интервала  $v = 43 - 172 \text{ m/min}$ . За всяка изследвана стойност на скоростта на плъзгане се получава съответно провисване на еластичната линия на гредата  $w(\xi)$ , където  $\xi$  е абсцисата на съответното сечение. На основа на измереното провисване, в съответствие с алгоритъма, описан в [23], се изчислява съответната стойност на коефициента на триене. Провисването  $w(\xi)$  се измерва посредством тензодатчици,

свързани в схема пълен мост. Схемата на свързване отчита натисковото усилие в края на гредата и осигурява най-голяма чувствителност по отношение на приложения огъващ момент. За записване на сигнала в реално време е създаден нарочен виртуален инструмент посредством NI Labview. Сигналят постъпва на диференциален вход на DAQ board NI USB 6212. Честотата на дискретизиране на суровия сигнал е 50 Hz, с последващо осредняване и преобразуване в натурални координати – провисване в милиметри.

Материалът на образците е бронз CuAl8Fe3 EN CW303G с химичен състав, показан в таблица 1.

Получената грапавост след струговане на образците е в диапазона  $R_a = 0.59 \div 0.73 \mu m$ . Процесът диамантно заглаждане е реализиран чрез поликристален диамант, като е използвана смазочно-охлаждаща течност Nakufom 70-19.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ И КОМЕНТАРИ

На фиг. 2 е показан запис на провисването  $w(t, \xi)$ . За всяка експериментална точка са направени по три записа на тази функция и е отчетена средно-аритметичната стойност, като са изключени преходните процеси. Графиката на фиг. 2 е отчетена след 2,1 s от началото на записа, което време е необходимо за достигане скоростта на въртене на шпиндела на струга.

Посредством Qstatlab [24] е проведен регресионен анализ на получените експериментални резултати. За търсената функция  $\mu = \mu(v)$  в натурални координати е получено:

$$\mu = 5,626 \cdot 10^{-8} \cdot v^3 - 1,668 \cdot 10^{-5} \cdot v^2 + 0,001684 \cdot v + 0,0721 \quad (1)$$

Експерименталните резултати и графиката на функцията (1) са показани на фиг. 3. Деформиращата сила  $F_b$  и радиусът на сферичната работна повърхнина на диамантния накрайник  $r$  по време на експеримента са постоянни, което води до постоянна деформационна компонента на коефициента на триене. Това от своя страна означава, че наблюдаваното изменение на големината на коефициента на триене се дължи изцяло на променливата адхезионна компонента.

Таблица 1 Химичен състав на бронз CuAl8Fe3 %

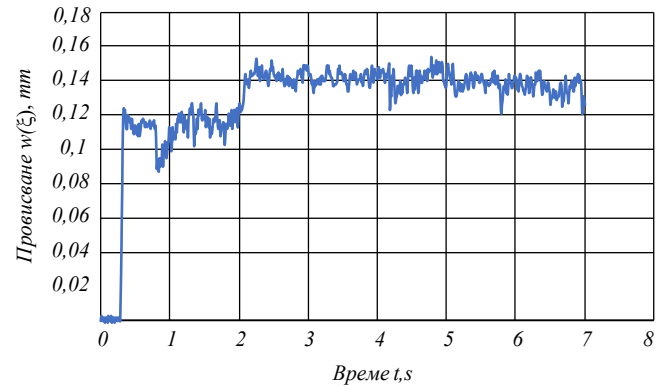
Zn	Sn	Si	Mn	Al	Ni	Pb	Fe	P	S	Co	Cu
<0.01	<0.01	0.029	0.24	8.22	0.28	0.02	3.47	<0.001	0.005	0.012	87.70

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

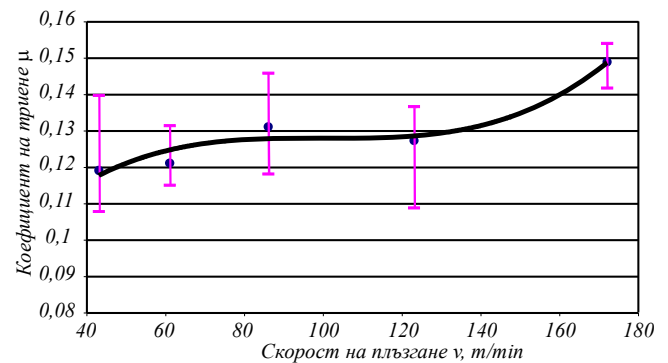
Проведено е експериментално изследване за определяне коефициента на триене при диамантно заглаждане на бронз CuAl8Fe3 в зависимост от скоростта на плъзгане в диапазона  $v = 43 - 172 m/min$  при технологични параметри на процеса, осигуряващи едновременно минимизиране на грапавостта и максимизиране на повърхностната микротвърдост. Получени са стойности в интервала  $\mu = 0,119 \div 0,149$ .

Полученият регресионен модел на функцията  $\mu = \mu(v)$  може да се използва за провеждане на адекватни термомеханични крайно-елементни анализи на процеса диамантно заглаждане на образци от бронз CuAl8Fe3.

При по-малките скорости на плъзгане коефициентът на триене е по-малък с около 7% в сравнение със стойността му в средния диапазон на изменение на скоростта на плъзгане. При максималната изследвана скорост на плъзгане  $v = 172 m/min$  коефициентът на триене е по-голям с приблизително 15,6% в сравнение със средната му стойност. Това увеличение на  $\mu$  може да се обясни с генерирането на по-голямо количество топлина и оттам – локален смекчаващ ефект в зоната на контакта между диамантния накрайник и третираната повърхнина на образца.



Фиг. 2. Запис на функцията на провисването  $w(t, \xi)$



Фиг. 3. Графиката на функцията  $\mu = \mu(v)$

### 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 мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ № BG05M2OP001-1.002-0023.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Duncheva G.V. Machine Components, Ex-Press, Gabrovo (2019)
- [2] 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)
- [3] Akkurt A., Kurt A., Ozdemir A., Seker U., Comparison of Hole Surface Finishing Processes with Roller Burnishing Method Applied in Copper Materials. *Gazi University Journal of Science* 27 (1) (2014) 721-734
- [4] Maximov J.T., Duncheva G.V., Amudjev I.M. A novel method and tool which enhance the fatigue life of structural components with fastener holes. *Engineering Failure Analysis* 31 (2013) 132-143
- [5] Korzynski M. Slide diamond burnishing, in: Korzynski, M. (Ed), *Nonconventional Finishing Technologies*. Polish Scientific Publishers, Warsaw (2013) 9-33
- [6] Korzynski M., Lubas J., Swirad S., Dudek K. Surface layer characteristics due to slide diamond burnishing with a cylindrical-ended tool. *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 84-94
- [7] Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Ichkova M., Slide burnishing—review and prospects. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104 (2019) 785-801
- [8] Maximov J., Duncheva G., Amudjev I., Anchev A., Dunchev V. *Diamond Burnishing*. Ex-Press. Gabrovo (2021)
- [9] Maximov J., Anchev A., Duncheva G., Ganev N., Selimov K. Influence of the process parameters on the surface roughness, micro-hardness, and residual stresses in slide burnishing of high-strength aluminum alloys. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 39 (8) (2017) 3067–3078
- [10] Tanaka H., Ishii W., Yanagi K. Optimal burnishing conditions and mechanical properties of surface layer by surface modification effect induced of applying burnishing process to stainless steel and aluminum alloy. *J Jpn Soc Technol Plast* 52 (605) (2011) 726– 730 in Japanese
- [11] Luo H., Liu J., Wang L., Zhong Q. The effect of burnishing parameters on burnishing force and surface microhardness. *Int J Adv Manuf Technol* 28 (7–8) (2006) 707–713
- [12] Dunchev V., Drumeva D. Modeling and optimization of the roughness and microhardness in diamond burnishing of CuAl8Fe3 Bronze. *Journal of Technical university Gabrovo* 61 (2020) 29-42
- [13] Maximov J., Anchev A., Dunchev V., Ganev N., Duncheva G., Selimov K., Effect of slide burnishing basic parameters on fatigue performance of 2024-T3 high-strength aluminium alloy, *Fatigue Fract. Eng. Mat. Struct.* 40 (11) (2017) 1893-1904
- [14] Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Ganev N., Amudjev I., Dunchev V., Effect of slide burnishing method on the surface integrity of AISI 316Ti chromium–nickel steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (2018)
- [15] Maximov J., Anchev A., Duncheva G., Ganev N., Selimov K., Dunchev V. Impact of slide diamond burnishing additional parameters on fatigue behaviour of 2024-T3 Al alloy. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 42 (1) (2019) 363-373
- [16] Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Amudjev I., Kuzmanov V. Enhancement of fatigue life of rail-end-bolt holes by slide diamond burnishing. *Eng Solid Mech* 2 (4) (2014) 247-264
- [17] Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V. Crack resistance enhancement of joint bar holes by slide diamond burnishing using new tool equipment. *Int J Adv Manuf Technol* 102 (2019) 3151-3164
- [18] Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V. Slide burnishing versus deep rolling – a comparative analysis. *Int J Adv Manuf Technol* 110 (2020) 1923-1939
- [19] Kallio M., Vuorinen P., Fuentes E., Marañá O. Tribological Behavior of bronze alloys with solid lubricants. *Key Engineering Materials* 527 (2013) 202-210
- [20] Torbilo V., Evsin A., Chigodaev E. About the friction of a diamond indenter on steel. *Machine Science* 5 (1976) 103-109
- [21] Hvorostuhin A., Ilyin N., Friction during diamond burnishing of metals and alloys. *Mechanical Engineering Bulletin*. 11 (1973) 64-65
- [22] Anchev A., Duncheva G., Kuzmanov V., Experimental study of the friction in slide burnishing. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 49 (2015) 29-33
- [23] Maximov J., Anchev A., Kuzmanov V. Investigation of the dynamic behavior of beam structure with geometrical nonlinearity. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 48 (2014) 9-14
- [24] Vuchkov I.N., Vuchkov I.I. *QStatLab Professional*, v. 5.5 – statistical quality control software. User’s Manual, Sofia, 2009