



## ENHANCEMENT OF FATIGUE STRENGTH OF CuAl9Fe4 BRONZE VIA DIAMOND BURNISHING

Angel Anchev\*

Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 26 May 2021

Accepted 17 June 2021

#### Keywords:

CuAl9Fe4 bronze, fatigue life enhancement, diamond burnishing

### ABSTRACT

Aluminum bronzes are non-ferrous alloys characterized by good strength, wear resistance and corrosion resistance, because of which these bronzes are preferred construction materials for various applications. When the aluminum content is over 9%, heat treatment can be performed in order to improve the mechanical properties - tensile strength, fatigue strength. Further increase of fatigue strength can be realized by means of surface plastic deformation. One method of this is diamond burnishing. The article shows the effect of using diamond burnishing on the fatigue behavior of samples made of CuAl9Fe4 bronze. DB with one pass increases the limited fatigue strength by 11.9% - from 420 to 470MPa. At the same time, the fatigue life increases more than 40 times. Increasing the number of passes from one to six increases the effect of DB in terms of fatigue behavior - the limited fatigue strength increases from 420 to 490 MPa, i.e., by 16.7%, and the fatigue life increased more than 77 times. Based on the results from the fatigue tests, it was concluded that DB is an effective, reliable and economical method for increasing the fatigue strength and, respectively, the fatigue life of CuAl9Fe4 aluminum bronze components.

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

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Алуминиевите бронзи са цветни сплави, характеризиращи се с добра якост, износоустойчивост и корозионна устойчивост, включително във водна среда. Наличието на желязо води до издробеняване на зърната, което придава допълнителна якост на тези сплави. Поради това, тези бронзи са предпочитани конструкционни материали за различни приложения: за зъбни (най-често червячни) колела, гайки, водачи, корпуси и уплътнения в клапани и помпи, втулки, бутала, тръби за офшорни платформи, в корабни двигатели, корабни витла и елементи, за елементи в оръжейната промишленост [1,2]. Един от широко използваните бронзи от тази група е CuAl9Fe4. Повишеното съдържание на алуминий довежда до по-ниска плътност спрямо чистата мед, което е от голямо значение за практическото приложение на този бронз. Освен това съдържание на алуминий над 9% позволява да се извърши термообработка, с цел подобряване на механичните характеристики – якост на опън, якост на умора. Допълнително повишаване на тези характеристики може да се постигне чрез повърхностно пластично деформиране (ППД) [3]. Резултатът от ППД се изразява в повишена повърхностна микротвърдост, въведени остатъчни напрежения на натиск и издробенна микроструктура на повърхностния и подповърхностните слоеве. Ефективен и същевременно икономичен метод за ППД е диамантно заглаждане (ДЗ) [3,4,5]. Кинематиката на метода (фиг. 1) е аналогична на тази

при струговане и разстъргване, но вместо режещ клин, инструментът е снабден с диамантен деформиращ елемент, най-често със сферичен край.

Ефектът от ДЗ върху якостта на умора е изследван в [3], включително и върху алуминиев бронз CuAl9Fe4. В литературата [6] няма информация за изследване на ефекта изобщо на ППД върху якостта на умора на алуминиев бронз CuAl9Fe4.

Основна цел на настоящото изследване е да се определи якостта на умора на образци от алуминиев бронз CuAl9Fe4 обработени посредством диамантно заглаждане. За постигане на целта е проведен натурен експеримент, базиран върху машина за 3-точково въртеливо огъване UBM [7,8].

### 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИ

Изходният материал (алуминиев бронз CuAl9Fe4) е идентифициран посредством химичен анализ, механични тестове, фазов анализ и анализ на микроструктурата.

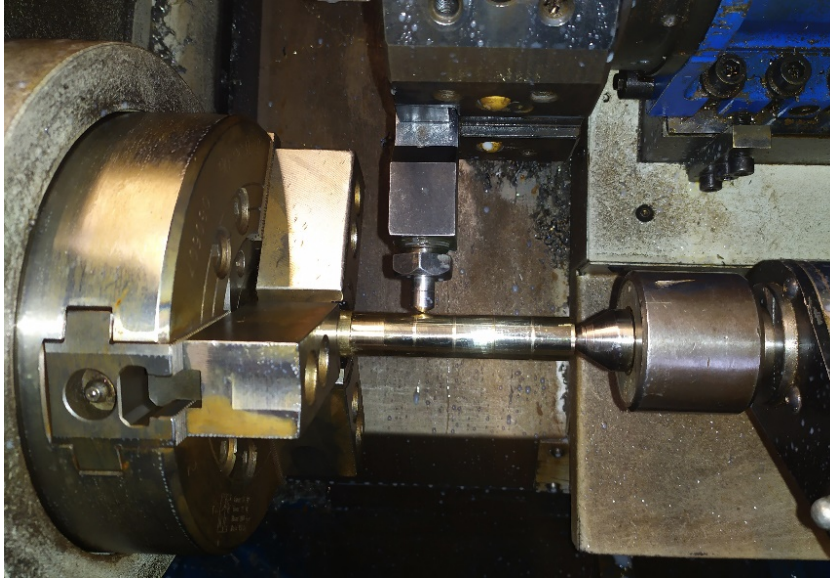
Химичният състав (в %) е показан в табл. 1. Основните механични характеристики на материала в състояние на доставка са получени чрез тест на чист опън както следва: модул на Young  $E = 0.60 \times 10^5 \text{ MPa}$ , граница на провлачване  $R_{0,2} = 356 \text{ MPa}$ , якост на опън  $R_m = 676 \text{ MPa}$ , удължение  $A_5 = 18.7\%$  относително свиване  $z = 48\%$ . Получените стойности на механич-

\* Corresponding author. E-mail: anchev@mail.bg

ните характеристики са осреднени от изпитването на три образца с форма и размери в съответствие със стандарта за изпитване на опън БДС EN ISO 6892-1:2020. Изпитанията са направени в лаборатория „Енергоспестяващи технологии за удължаване на жизнения цикъл и повишаване на експлоатационната сигурност“ към центъра за компетентност „Интелигентни мехатронни еко- и енергоспестяващи системи и технологии“ при ТУ-Габрово върху машина за статични и динамични изпитания ZWICK Vibrophore 100.

В лаборатория „Интелигентни системи за изследване на структура и свойства на материали“ е проведен

фазов анализ чрез рентгенов дифрактометър Brucker D8 Advance. Резултатите от който са представени на фиг.2. Фазите които са отчетени са основно на медта, самите пикове са отместени към по малките ъгли спрямо изчислените в табл.2 на чистата мед. Това се дължи на разворените алуминиеви атоми, които деформират кристалната решетка. От електронното съединение  $\gamma$ - $(\text{Cu}_9\text{Al}_4)$  е отчетена само линията (300), тъй като тази линия е с най висок интензитет спрямо другите линии на съединението табл. 2. Високо дисперсните интерметални съединения на  $(\text{Fe}_3\text{Al})$ , не са отчетени.



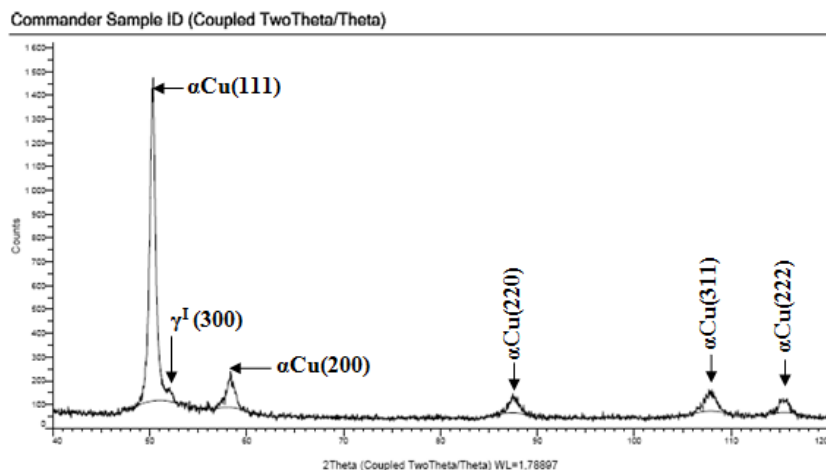
Фиг. 1. Реализиране на процеса ДЗ върху струг с ЦПУ

Таблица 1 Химичен състав на бронз  $\text{CuAl}_9\text{Fe}_4$  %

Cu	Al	Fe	Mn	Sn	Ni	Pb	Si	P	S	Co	Zn
84.41	9.68	4.52	0.607	0.002	0.346	0.046	0.057	0.002	0.0077	0.0347	0.0944

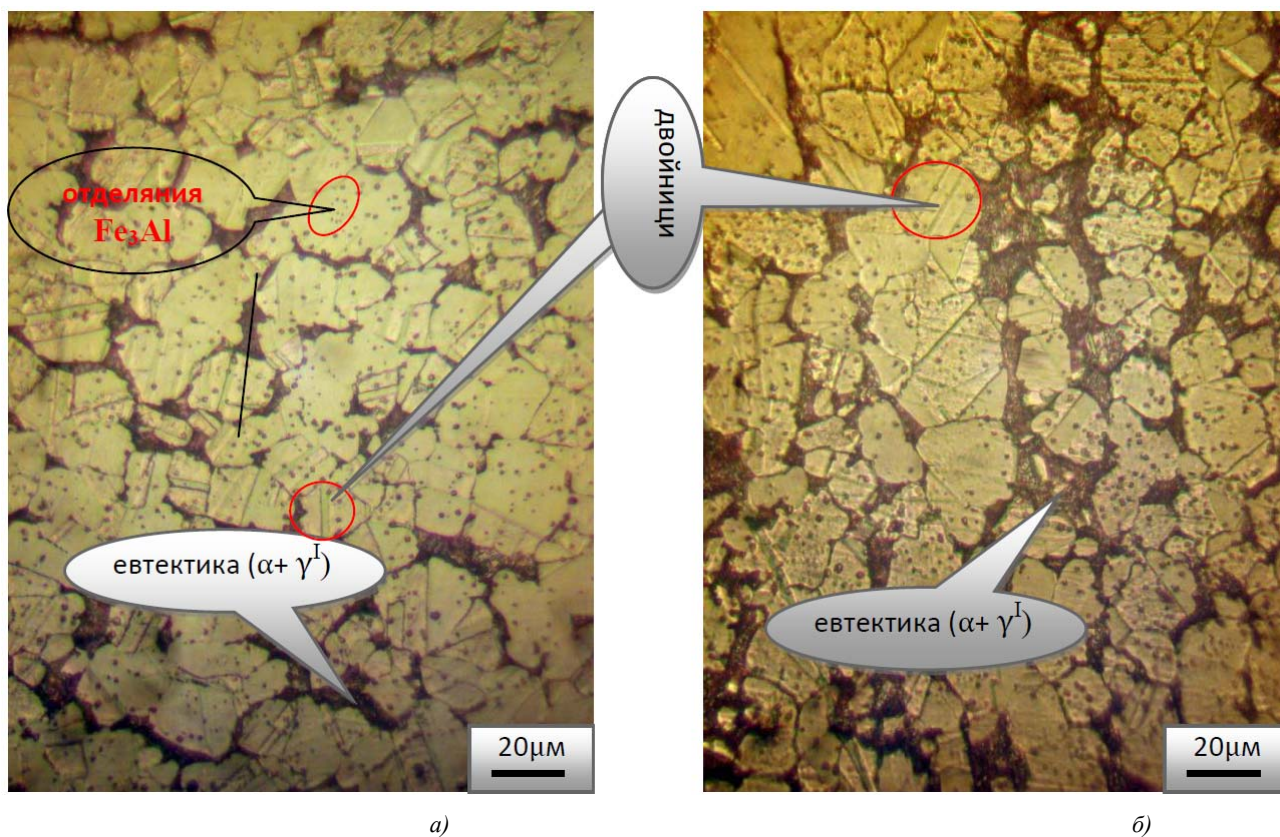
Таблица 2 Рентгенови ъгли-Со излъчване

$\alpha$ -Cu			$\text{Cu}_9\text{Al}_4$		
HKL	$2\theta$	I(интензитет)	HKL	$2\theta$	I(интензитет)
111	$50^\circ 48'$	1	330	$49^\circ 48'$	1
200	$59^\circ 48'$	0,86	442	$60^\circ 10'$	0,70
220	$89^\circ 22'$	0,71	600	$76^\circ 7'$	0,80
311	$111^\circ 23'$	0,86	642	$98^\circ 36'$	1
222	$119^\circ 5'$	0,56			



Фиг. 2. Рентгенов фазов анализ, излъчване-Со





Фиг. 3. Микроструктура на алуминиев бронз  $CuAl9Fe4$ , увеличение  $X500$ : а) в радиално направление; б) в осово направление

Наличието на двойници (фиг. 3а и 3б) е доказателство за наличието на термомеханична обработка в процеса на производство на сплавта. Те пресичат зърната на  $\alpha Cu$  и се наблюдават и както в радиално направление (фиг. 3а), така и в осово направление (фиг. 3б). При наличното разпределение на алуминия в зърната и появата на възможност за формиране на  $\beta Cu$ , е възможно да протече евтектоидно разпадане на  $\beta$  зърното, което е стабилно до температура  $T=565^{\circ}C$ .

Уморните тестове са проведени върху изпитвателна машина UBM (фиг. 4), работеща по схема триточково огъване. Машината осигурява постоянен товар с честота 50 Hz и асиметричен цикъл с коефициент на асиметрия  $R=-1$ . Тестовите са проведени на стайна температура до разрушаване на всеки изпитван образец.

Изключение са образците достигнали  $10^7$  цикъла (постигнали са т. нар. ограничена якост на умора), без да е настъпило разрушение. За всяка експериментална точка (т.е. амплитуда на напрежението), се тества по един образец, за да се получи дадената  $S-N$  крива. Минималният брой образци тествани във всяка група е 10. При установяването на голямо отклонение на броя цикли до разрушение, в сравнение с очаквания брой цикли при конкретната амплитуда на напрежението, теста се повтаря толкова пъти при същата амплитуда на напрежението, докато се получи резултат попадащ в границите на очакваното разсейване на експерименталните точки на кривата.

Върху струг с ЦПУ T200 са изработени три групи образци с форма на пясъчен часовник с минимален диаметър  $7.5\text{ mm}$  и дължина  $110\text{ mm}$ . Първата група са образци обработени само чрез рязане, с последен преход осигуряващ минимална грапавост.

Образците (фиг. 5) от другите две групи бяха подложени на ДЗ посредством устройство с еластично

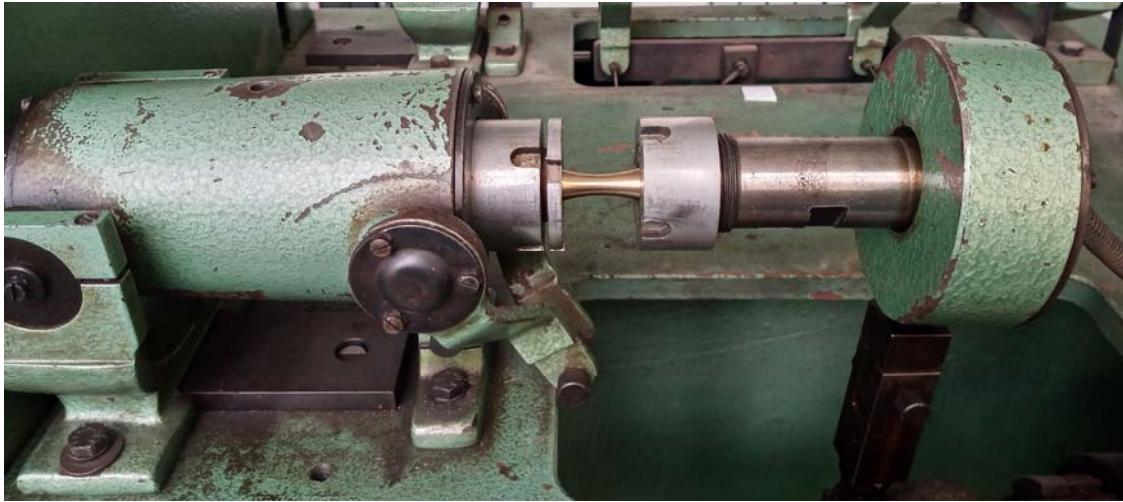
закрепване на деформирания елемент (фиг. 1). Последният е изработен от поликристален диамант със сферичен край. ДЗ и на двете групи образци е осъществено със следните параметри на процеса: радиус на сферичния край на диаманта  $r = 4\text{ mm}$ , сила на притискане на диаманта към обработваната повърхнина  $F_b = 345\text{ N}$ , подаване  $f = 0.07\text{ mm/rev}$ , скорост на относително плъзгане  $v = 80\text{ m/min}$ . Параметрите на процеса са установени в [1] и осигуряват едновременно оптимални стойности на получената грапавост и микротвърдост. За втората група ДЗ е осъществено с един преход, а за третата група – с шест прехода при еднопосочна работна схема. Използвана е смазочно-охлаждаща течност Носcut 795-Н, както при струговане, така и за ДЗ.

### 3. РЕЗУЛТАТИ И КОМЕНТАРИ

Получените S-N криви са показани на фиг. 6. Независимо, че за цветни сплави, каквато е алуминиевият бронз  $CuAl9Fe4$ , границата на умора (обикновено тя е условна граница) се дефинира за  $2 \times 10^8$  цикъла, в настоящото изследване кривите са ограничени до т. нар. „ограничена якост на умора“ с цел съкращаване времетраенето на изпитанията. ДЗ с един преход повишава ограничената якост на умора с 11.9% - от  $420\text{ MPa}$  до  $470\text{ MPa}$ . Същевременно, уморната дълготрайност се повишава повече от 40 пъти. Повишаването на броя на преходите от един до шест увеличава ефекта от ДЗ по отношение на уморното поведение – ограничената якост на умора се увеличава от  $420\text{ MPa}$  до  $490\text{ MPa}$ , т.е. с 16.7%, а уморната дълготрайност се повишава повече от 77 пъти. Следва да се отбележи, че се наблюдава и друг ефект от увеличаване броя преходи. ДЗ с един преход

осигурява практически един и същ ефект както в малоцикловата, така и в мегацикловата област. Докато при увеличеният брой преходи се забелязва тенденция за относително намаляване на полезния ефект с

увеличаване на броя на циклите до разрушение. Следва да се отбележи също, че разсейването на получените резултати при ДЗ с един преход е най-малко.



Фиг. 4. Тест на умора на 3-точково въртеливо огъване върху UBM



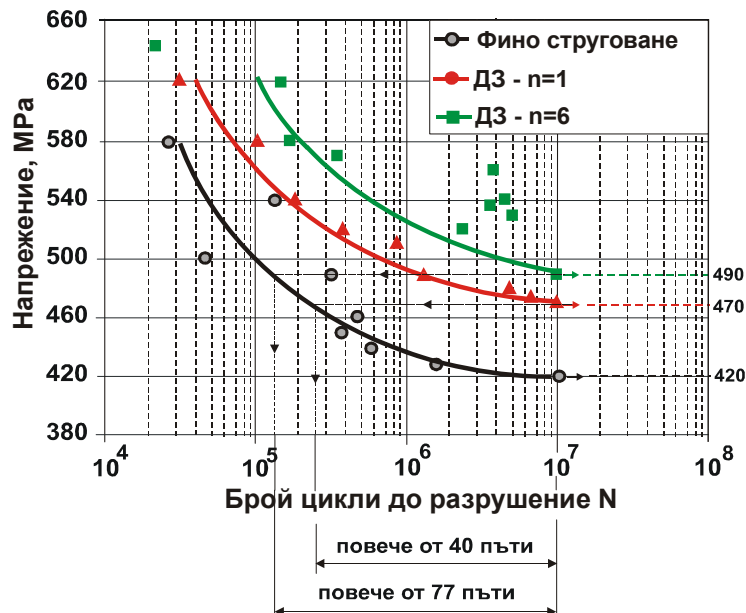
Фиг. 5. Образци обработени посредством ДЗ с шест прехода и еднопосочна работна схема

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено е експериментално изследване за определяне на якостта на умора на образци от алуминиев бронз  $\text{CuAl9Fe4}$  обработени посредством ДЗ и технологични параметри на процеса, осигуряващи едновременно минимизиране на грапавостта и максимизиране на повърхностната микротвърдост. Установено е, че най-голямо увеличение на ограничената якост на умора нараства се наблюдава при

образците с шест прехода, и също така относително намаление на полезния ефект от ППД с увеличаване на броя цикли до разрушение.

На базата на получените резултати от уморните тестове може да се направи следният извод: ДЗ е ефективен, надежден и икономичен метод за повишаване на якостта на умора и, респективно, уморната дълготрайност на компоненти от алуминиев бронз  $\text{CuAl9Fe4}$ .



Фиг. 6. S-N криви

## 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. 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] Maximov J., Duncheva G., Amudjev I., Anchev A., Dunchev V. Diamond Burnishing. Ex-Press. Gabrovo. (2021)
- [4] Korzynski M. Slide diamond burnishing, in: Korzynski, M. (Ed), Nonconventional Finishing Technologies. Polish Scientific Publishers, Warsaw (2013) 9-33
- [5] 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
- [6] Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Ichkova M. Slide burnishing – review and prospects. J Adv Manuf Technol 104 (2019) 785-801
- [7] Duncheva G., Maximov J., Dunchev V., Anchev, A., Atanasov T., Capek J. Single toroidal roller burnishing of 2024-T3 Al alloy implemented as mixed burnishing process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 111 (2020) 3559-3570
- [8] Maximov J., Duncheva G., Dunchev V., Anchev, A.P., T. P. Atanasov. Improvement in Fatigue Performance of 2024-T3 Al Alloy Via Single Toroidal Roller Burnishing, Journal of Materials Engineering and Performance (2021) 30:2256–2266