

Journal of the Technical University of Gabrovo

https://mc04.manuscriptcentral.com/jtug



MODELING AND OPTIMIZATION OF THE ROUGHNESS AND MICROHARDNESS IN DIAMOND BURNISHING OF CuAl8Fe3 BRONZE

Vladimir Dunchev^{*}, Desislava Drumeva

Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

ARTICLE INFO	
--------------	--

Received 12 August 2020

Accepted 30 October 2020

diamond burnishing, CuAl8Fe3

bronze, roughness obtained,

microhardness, optimization

Article history:

Keywords:

ABSTRACT

In this article, the object of the experimental study is diamond burnishing of cylindrical specimens made of bronze CuAl8Fe3 in terms of the roughness obtained and microhardness. For this purpose, planned experiment, analysis of variance and regression analysis were performed sequentially. The governing factors were the spherical surface radius of the diamond tip, burnishing force and feed rate. Based on the regression models obtained of the roughness and surface microhardness, one-objective optimizations under the minimum roughness criterion and maximum surface microhardness, and two-objective optimization of the studied process were conducted. As a result, the respective optimal values of the governing factors were established. Using the governing factor optimal values obtained from the two-objective optimization, the impact of the number of passes and working scheme (one-way or two-way) on the roughness obtained and surface microhardness was additionally studied. It was established that the implementation of the diamond burnishing process with four passes in the conditions of one-way operating scheme provides roughness of $R_a \approx 0.075 \ \mu m$ and surface microhardness of $HV_{0.05} \approx 305$.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Алуминиевите бронзи (CuAl9Fe5, CuAl8Fe3, CuAl10Ni, CuAl10Fe3Mn1) са цветни сплави, характеризиращи се с добра якост, износоустойчивост и корозионна устойчивост, в т.ч. във водна среда. Наличието на желязо действа по посока на издребняване на зърната, което придава допълнителна якост на тези сплави. Поради това са предпочитани конструкционни материали за различни приложения: в индустрията - за зъбни (най-често червячни) колела, гайки, водачи, корпуси и уплътнения в клапани и помпи, втулки, бутала, тръби за офшорни платформи и др.; в корабостроенето - за двигатели, витла, елементи и покрития за хардуер; за елементи в оръжейната промишленост. Типично приложение на алуминиевите бронзи е за изработване на втулки за плъзгащи лагери, чиято експлоатация е свързана с ударни и значителни знакопроменливи натоварвания. Един от най-широко използваните бронзи от тази група е CuAl8Fe3 БДС EN 10092-75. Относителното движение между шийката на вала и лагерната втулка се реализира при тангенциален контакт - триене при плъзгане, което води до генериране на значително количество топлина. Поради това работоспособността на плъзгащите лагери практически се лимитира 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, лагерните

© 2020 Journal of the Technical University of Gabrovo. All rights reserved.

повърхнини трябва да отговарят на следните основни изисквания към качеството: точност на размерите -7-8 ми клас, отклонения от кръглост и цилиндричност - 5-20 µт в зависимост от номиналния диаметър, ниска грапавост - $R_a < 2.5 \, \mu m$, повишена микротвърдост [1]. Комплексът от характеристики на повърхностните слоеве, най-важните от които са грапавост, микротвърдост, остатъчни напрежения и микроструктура, определя т.н. Surface Integrity (SI). За конкретен режим на работа на плъзгащия лагер (най-често гранично или течно триене), експлоатационното поведение (трибологично, уморно и устойчивост на корозия) се определя преди всичко от SI [2]. Конвенционалният подход за обработване на бронзовите лагерните повърхнини се базира върху обработване със рязане - разстъргване и фино разстъргване или свредловане и последващо райбероване. Ефективен подход за подобряване на SI в аспект на ниска грапавост, повишена микротвърдост, създаване на зона с полезни остатъчни напрежения на натиск и модифицирана микроструктура е подходът, базиран върху повърхностно пластично деформиране в студено състояние, известен като mechanical surface treatment (MST). Методите, реализиращи MST са бъдат динамични (shot peening, laser shot peening, water cavitation) или статични, известни като burnishing. При burnishing методите ротационен деформиращ елемент се притиска статично към

^{*} Corresponding author. E-mail: v.dunchev@tugab.bg

обработваната повърхност, като процесът на деформация е непрекъснат във времето. Burnishing методите имат по-широко приложение, тъй като позволяват да се управляват параметрите на съответния процес в корелация с желаните характеристики на SI. В зависимост от вида на тангенциалния контакт между деформиращия елемент и третираната повърхност - с триене при търкаляне или с триене при плъзгане – burnishing методите могат да бъдат: roller (ball) burnishing (деформиращият елемент/и е/са ролка/ролки или сфера/ сфери); slide burnishing; burnishing методи с недефинирано движение на деформиращата сфера, която контактува с по-малки опорни сачми или твърда повърхнина. Терминът "недефинирано движение" е въведен от Maximov et al. [3] поради възможността както за чисто търкаляне, така и плъзгане на деформиращата сфера в зависимост от съотношението между коефициента на триене между деформиращата сфера и обработваната повърхнина от една страна, и този между деформиращата сфера и опорните сачми - от друга страна. Компанията Ecoroll - световен лидер в burnishing технологиите, използва само контакт с триене при търкаляне и класифицира процесите според основния ефект, който се цели да се постигне в аспект на експлоатационни характеристики в корелация със SI. По този начин се изключва формата на деформиращите елементи като признак за класификация. В съответствие с тази идея Ecoroll презентира два вида процеси - roller burnishing и deep rolling. Процесът roller burnishing e насочен преди всичко към постигане на т.н. smoothing ефект, характеризиращ се минимална грапавост $(R_a \le 0.2 \, \mu m)$, както и висока точност на формата и размерите. За тази цел се използват инструменти с множество или една деформираща ролка (multiple and single roller tools). Концепцията deep rolling се използва за обработване на външни и вътрешни цилиндрични и конусни повърхнини, както и профилни повърхнини в елементи, подложени на значителни динамични натоварвания или относителни премествания (износване). Затова при deep rolling акцентът се поставя върху уякчаването (cold work ефект) и създаването на натискови остатъчни напрежения в повърхностните слоеве, а редуцирането на грапавостта е съпътстващ ефект.

Деформиращият елемент при slide burnishing найчесто е синтетичен диамант, тъй като естественият диамант е много скъп. Поради това най-широко приложение намира методът diamond burnishing (диамантно заглаждане (ДЗ)). В аспект на кинематика, методът ДЗ е подобен на струговането, като инструментът е диамантен накрайник, най-често със сферична работна повърхнина. Задълбочен преглед на различни аспекти от приложението на slide burnishing, и в частност на ДЗ, е направен в [3]. Най-много научни публикации са посветени на изследване на SI ($\approx 85\%$), около $\approx 10\%$ - на изследване на експлоатационното поведение, а в останалите 5% - физиката на съответния процес (енерго-силови параметри, трайност на деформиращия елемент, генерираната топлина, коефициент на триене, механизъм на контакт). Получената грапавост е изследваната характеристика на SI (33 %), следвана от микротвърдостта (21 %), остатъчните напрежения (18 %) и микроструктурата (16 %) [3]. От гледна точка на експлоатационно поведение, почти половината изследвания са посветени на уморното поведение (46 %), следвани от изследвания на трибологичното поведение в аспект на износване (27%), корозионна устойчивост (13%), устойчивост на пукнатини от корозия (7%) и други (тестове при малка скорост на деформация, относителни загуби на енергия за разрушаване) [3]. Преобладаващо най-много изследвания на процеса slide burnishing са проведени върху незакалена и закалена стомана (65%). Алуминиевите сплави са най-често изследваните цветни сплави: високо-яка алуминиева сплав 2024-ТЗ (4%) [4-6]; други алуминиеви сплави (14%) - 7075 [7, 8], 1050A [9], LY12 [10-13], Al-Zn-Mg [14], AlCu4MgSi(A) [15], 6061-Тб [16]; алуминиеви композити (5%) - A1Mg1SiCu и A390+SiC [17], АА2124 [18]. Ограничен брой изследвания са посветени на титанови сплави (1%) и магнезиеви сплави (3%) [3]. Относително повече научни публикации са посветени на процеса roller (ball) burnishing на месинг. Mombeini and Atrian [19] изследват влиянието на дълбочината на проникване (индикатор за големината на приложената деформираща сила) върху уморната дълготрайност при въртеливо огъване на образци от месинг C38500 (еквивалентен на CuZn3Pb3 според ISO), подложени на deep rolling посредством две деформиращи сфери. Същевременно е доказана ефективността на процеса deep rolling по отношение на SI (грапавост, твърдост, остатъчни напрежения и микро-структура). Прилагайки деформиращо въздействие с цилиндрична деформираща ролка посредством еластична система, получената грапавост и микротвърдост е изследвана в месинг C26000 (еквивалентен на B927 според ASTM) [20], а в месинг CuZn39Pb2 изследванията са разширени по отношение на отклонението от кръглост [21]. В [22] е установено, че най-голямо влияние върху получената грапавост и микротвърдост при ball burnishing с недефинирано движение на деформиращата сфера на цилиндрични образци от месинг има деформиращата сила, следвана от подаването. Прилагайки т.н. fuzzy logic system (размита логика), същият процес е изследван по отношение на получената грапавост в месинг C3605 (еквивалентен на CuZn36Pb2 според ISO) [23]. Ограничени са изследванията на процеса slide burnishing на други цветни сплави: месинг H62 [11, 12], сплав на основата на никел [24], обезкислородена мед 101 [25]. Прегледът на литературата показва, че липсват изследвания на характеристики на SI, получени при процеса slide burnishing или ДЗ върху образци от бронз CuAl8Fe3 EN CW303G.

Основната цел на настоящото изследване е да се определят оптималните параметри на процеса ДЗ, осигуряващи едновременно минимална получена грапавост и максимална микротвърдост в цилиндрични образци от бронз CuAl8Fe3. За постигане на целта изследването е проведено в следните етапи:

1) Провеждане на планиран експеримент с целеви функции получена грапавост и повърхностна микротвърдост;

2) Провеждане на дисперсионен анализ (ANOVA);

3) Регресионен анализ за моделиране на получената грапавост и повърхностна микротвърдост;

4) Провеждане на едноцелеви оптимизации на процеса ДЗ по критерии минимална грапавост и максимална микротвърдост;

5) Провеждане на двуцелева оптимизация на процеса ДЗ;

6) Изследване на влиянието на броя на преходите и вида на работната схема върху получената грапавост и повърхностна микротвърдост.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

2.1. Материал

За провеждане на експерименталните изследвания е използван бронз CuAl8Fe3 EN CW303G във вид на пръти с диаметри съответно $d = 20 \, mm$ и $d = 44.5 \, mm$. Химичният му състав е показан в Таблица 1.

За определяне на материалните характеристики на изследваната цветна сплав са проведени механични изпитания на едномерен опън върху изпитвателна машина Vibrophore 100/ Zwick/Roell. Получените стойности на механичните характеристики, осреднени от два теста (с много близки резултати), са показани в Таблица 2.

2.2. Устройство за диамантно заглаждане

За провеждане на експерименталните изследвания е използвано специално разработено устройство за ДЗ в съответствие с фиг. 1. Използването на винтова пружина осигурява линеен закон на задаване на деформиращата сила в интервала $F_b = 50 \div 420 \ N$ (фиг. 1). Разработената конструкция позволява лесна смяна на диамантения деформиращ елемент, като по този начин се променя радиуса *г* на сферичната му работна повърхнина. В настоящото изследване са използвани синтетични поликристални диаманти с радиус съответно r = 2;3;4 mm.

2.3. Планиран експеримент

Избран е оптимален композиционен план. Избраните управляващи фактори и техните нива са показани в

Таблица 1 Химичен състав н	на бронз CuAl8Fe3 %	6
-----------------------------------	---------------------	---

таблица 3. Планираният експеримент обслужва две целеви функции - получената грапавост, оценена чрез параметъра R_a, µm и повърхностната микротвърдост HV 0.05 . Използвани са цилиндрични експериментални

образци от изследвания бронз с диаметър $d = 20 \ mm$.

Експериментът е проведен върху струг с ЦПУ – Т200. Използвани са три експериментални образци, подложени на ДЗ с различна стойност на радиуса на сферичната повърхнина на диамантния накрайник г в сьответствие с нивата от табл. 3 (фиг. 2).

Всеки от изпитваните образци се закрепва в патронник и център (фиг. 3). Струговането се извършва по цялата дължина на образеца, а на ДЗ с конкретна комбинация от управляващи фактори на процеса се подлага участък с дължина ≈ 12 mm. По този начин се осигурява близка начална грапавост на образците. Струговането на образците е проведено с твърдосплавни пластини CCMT-120404LF KCP10 при технологични следните параметри: подаване $f = 0.1 \, mm / rev$; скорост на рязане $v_c = 60 \, m/min$ и дълбочина на рязане 0.25 mm. Средната стойност на началната грапавост на образците след струговане е $R_{a}^{init} = 0.55 \ \mu m$. През целия експеримент е използвана смазочно-охлаждаща течност - Hocut 795-Н. Изменението на грапавостта в осово направление във всяка секция (експериментална точка) е оценена чрез параметъра R_a използвайки измервателен уред HUATEC SRT-6210. За всяка точка от плана на експеримента крайната стойност за грапавостта е получена като средно аритметична стойност от пет измервания по пет образуващи, разположени под ъгъл $\approx 72^{0}$.

uv	лица і ли	мичен съсп	ив на орон	із Силіоге	5 /0							
	Zn	Sn	Si	Mn	Al	Ni	Pb	Fe	Р	S	Со	Си
	<0.01	<0.01	0.029	0.24	8.22	0.28	0.02	3.47	<0.001	0.005	0.012	87.70

Таблица 2 Механични характеристики на бронз CuAl8Fe3

Модул на линейни деформации Е, MPa	Граница на провлачване R _{0,2} , MPa	Якост на опън R _m , MPa	Относително удължение A ₅ , %
0.56×10^{5}	219	542	27.8

Таблица 3 Управляващи фактори и техните нива

Vangergeguu darmonu	Нива на управляващите фактори		
э правляваща фактора	Натурални	Кодирани	
Радиус на сферичната повърхнина на	2	-1	
диамантения накрайник, r,тт	3	0	
<i>x</i> ₁	4	+1	
Леформираща сила F ₁ N	150	-1	
μοφοριπαρατίμα σταπά, 1 β, 1	250	0	
x_2	350	+1	
Подаване f mm/rev	0.03	-1	
	0.07	0	
<i>x</i> ₃	0.11	+1	



Фиг. 1. Устройство за ДЗ а. общ вид; б. функционална схема



Фиг. 2. Експериментални образци



Фиг. 3. ДЗ върху струг с ЦПУ-Т200

Фиг. 4. Измерване на повърхностна микротвърдост HV_{0.05}

Измерванията на повърхностната микротвърдост $HV_{0.05}$ са извършени в Технически университет - Габрово посредством микротвърдомер ZHVµ Zwick/ Roell, с възможност за компютърна обработка на резултатите от измерването (фиг. 4). За всяка експериментална точка са направени по 24 измервания. Статистическата обработка на експерименталните резултати е проведена в среда на Microsoft Excel, а за визуализация на резултатите са използвани графики от вида "boxes and mustaches". За крайната стойност на повърхностната микротвърдост е приета стойността, съответстваща на центъра на групиране (медианата).

2.4. Дисперсионен анализ (ANOVA), регресионен анализ и оптимизация (едноцелева и двуцелева)

Дисперсионният анализ (ANOVA), регресионният анализ и оптимизациите (едноцелева и двуцелева) на процеса ДЗ са проведени посредством системата QStatLab [26]. Оптимизационните процедури са проведени в съответствие с генетичен алгоритъм.

2.5. Изследване на влиянието на броя на преходите и вида на работната схема върху получената грапавост и повърхностна микротвърдост

Експерименталното изследване на влиянието на броя на преходите и вида на работната схема (еднопосочна и разнопосочна) е проведено със стойности на управляващите фактори (r, F_b и f), съответстващи на получените от проведената двуцелева оптимизация на процеса ДЗ оптимални стойности. Използвани са цилиндрични образци с диаметър d = 44 mm (фиг. 5).



Фиг. 5. Експериментални образци за изследване на влиянието на броя на преходите и вида на работната схема



Фиг. 6. Работни схеми на процеса ДЗ за изследване влиянието на броя на преходите

Таблица 4 План на експеримента и експериментални резулта

	•		••	Получена средна	Повърхностна
$\mathcal{N}_{\underline{o}}$	$r(x_1)$	$F_b(x_2)$	$f(x_3)$	грапавост	средна микротвърдост
		-	-	R _a , µm	HV _{0.05}
1	-1	-1	-1	0.305	334.5
2	+1	-1	-1	0.256	294.5
3	-1	+1	-1	0.353	340
4	+1	+1	-1	0.176	307
5	-1	-1	+1	0.293	317
6	+1	-1	+1	0.186	290
7	-1	+1	+1	0.276	330
8	+1	+1	+1	0.124	295.9
9	-1	0	0	0.245	325
10	+1	0	0	0.143	294.2
11	0	-1	0	0.181	287
12	0	+1	0	0.131	293
13	0	0	-1	0.105	291
14	0	0	+1	0.107	281

За всяка работна схема (фиг. 6) образците са подложени на ДЗ с брой на преходите съответно $n = l \div 8$. След всеки преход обект на измерване са получената грапавост, оценена чрез параметъра R_a , μm и повърхностната микротвърдост $HV_{0.05}$.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ И КОМЕНТАРИ

3.1. Експериментални резултати от планирания експеримент

Осреднените стойности на двете целеви функции в съответствие с плана на експеримента са показани в Таблица 4.

3.2. Резултати от дисперсионния анализ (ANOVA)

Резултатите от проведения дисперсионен анализ (ANOVA) по отношение на получената грапавост са визуализирани на фиг. 7а, б. Фиг. 7а онагледява главните ефекти за влиянието на трите фактора върху получената грапавост, а фиг. 76 – взаимодействията между факторите.

Фиг 7а, б дава основание за следните коментари:

• Според главните ефекти (фиг. 7а), радиусът $r(x_1)$ е факторът с най-голямо влияние върху получената грапавост, а следващият по влияние фактор е големината на деформиращата сила $F_b(x_2)$;

• Влиянието и на трите управляващи фактора върху получената грапавост е нееднозначно в изследваните интервали н авариране. Получената грапавост е най-

висока, когато управляващите фактори са на долно ниво, и най-ниска - за средно ниво (фиг. 7а);

• Радиусът на сферичната повърхнина на диамантния накрайник $r(x_1)$ си взаимодейства най-силно с подаването $f(x_3)$ и малко по-слабо с големината на деформиращата сила $F_b(x_2)$ (фиг. 76).

Резултатите от проведения дисперсионен анализ (ANOVA) за влиянието на управляващите фактори върху повърхностната микротвърдост $HV_{0.05}$ са визуализирани на фиг. 8а, б. Главните ефекти са показани на фиг. 8а, а взаимодействията между факторите - на фиг. 8б.

На база на фиг. 8 могат да бъдат направени коментарите:

• Радиусът $r(x_1)$ е факторът с най-голямо влияние върху повърхностната микротвърдост $HV_{0.05}$. Може да се очаква най-голяма стойност за $HV_{0.05}$, когато процесът се реализира с най-малък радиус (фиг. 8а). Влиянието на другите два фактора е съизмеримо като степен, но различно по характер в изследваните диапазони на вариране. Очаквано, може да се постигне поголяма повърхностна микротвърдост, когато деформиращата сила $F_b(x_2)$ е най-голяма, а подаването $f(x_3)$ - най-малко (фиг. 8а);

• Взаимодействията на радиуса на диамантния накрайник $r(x_1)$ с другите два фактора имат подчертано по-силно влияние върху повърхностната микротвърдост $HV_{0.05}$.



Фиг. 7. Резултати от ANOVA за получената грапавост R_a , μm а. главни ефекти; б. взаимодействие между факторите

3.3. Регресионни модели. Изследване на регресионните модели

3.3.1. Моделиране и изследване на получената грапавост

Посредством системата QStatLab е получен следния регресионен модел за функцията на получената грапавост:

$$F(R_a) = 0.105 - 0.059 x_1 - 0.016 x_2 - -0.021 x_3 + 0.089 x_1^2 + 0.051 x_2^2 - 0.022 x_1 x_2 - (1)$$

$$0.006 x_2 x_3 - 0.004 x_1 x_3 + 0.01 x_1 x_2 x_3$$

Влиянието на факторите върху функцията $F(R_a)$ е визуализирано на 3D графиките, представляващи сечения на хипер-повърхнината на модел (1) с различни хипер-равнини (фиг. 9а-и). 3D графиките показват вида на функцията $F(R_a)$, когато третият фактор е фиксиран на средно ниво.

За по-задълбочено изследване на влиянието на управляващите фактори върху предсказаната от модел

(1) получена грапавост, са построени т.н. линии на ниво (фиг. 10).

Очевидно, за всички комбинации на радиуса $r(x_1)$ и деформиращата сила $F_b(x_2)$ (с изключение на комбинацията r = 2 mm, $F_b = 150 N$) функцията $F(R_a)$ намалява с нарастване на подаването (фиг. 10а-е). За всички изследвани стойности на деформиращата сила $F_b(x_2)$ функцията $F(R_a)$ се променя нелинейно в зависимост от радиуса $r(x_1)$ (фиг. 10ж-и). За минимизиране на получената грапавост, е целесъобразно процесът ДЗ да се реализира с радиус в диапазона $r = 3 \div 3.5 \ mm$. В изследвания интервал на вариране $F_b(x_2)$ влияе нееднозначно върху функцията $F(R_a)$ (фиг. 10ж-и). Очевидно, независимо от подаването, наймалката и най-голямата стойност на деформиращата сила влошават получената грапавост. Очевидно, функцията $F(R_a)$ клони към минимум, когато процесът ДЗ се реализира с максимално подаване с деформираща сила в интервала $F_b = 250 \div 300 N$.



Фиг. 8. Резултати от ANOVA за повърхностната микротвърдост HV_{0.05} а. главни ефекти; б. взаимодействие между факторите

3.3.2. Моделиране и изследване на повърхностната микротвърдост

Графична визуализация на статистическата обработка на експерименталните резултати за повърхностната микротвърдост за трите стойности на радиуса е показана съответно на фиг. 11а,б,в.

На база на получените крайни стойности за центровете на групиране (медианите) (показани са с хоризонтални линии на фиг. 11), използвайки системата QStatLab е получен следния регресионен модел за функцията на повърхностната микротвърдост:

$$F(HV_{0.05}) = 285.996 - 16.49 x_1 + 4.29 x_2 - -5.31 x_3 + 23.608 x_1^2 + 4.008 x_2^2 +$$
(2)
$$1.488 x_1 x_3 - 1.762 x_1 x_2 x_3$$

Влиянието на факторите върху функцията $F(HV_{0.05})$ е визуализирано на 3D графиките, представляващи сечения на хипер-повърхнината на модел (2) с различни хипер-равнини (фиг. 12а-и). 3D графики-

те показват вида на функцията $F(HV_{0.05})$, когато третият фактор е фиксиран на средно ниво.

Фиг. 13 дава възможност за по-детайлно изследване на влиянието на управляващите фактори върху функцията $F(HV_{0.05})$. Очевидно $F(HV_{0.05})$ нараства с нарастване на деформиращата сила $F_b(x_2)$ и намалява с нарастване на подаването $f(x_3)$ (фиг. 13а-в). Графиките на фиг. 13г-е показват изменението на функцията $F(HV_{0.05})$ за различни стойности на $r(x_1)$ и $F_b(x_2)$ в зависимост от подаването. Те потвърждават резултатите от дисперсионния анализ за влиянието на радиуса върху повърхностната микротвърдост (фиг. 8а) - функцията *F*(*HV*_{0.05}) е най-голяма, когато радиусът е на долно ниво (r = 2 mm) и най-малка, когато радиусът е на средно ниво (r = 3 mm). Графиките, показани фиг. 13ж-и показват изменението на F(HV0.05) за различни стойности на $F_b(x_2)$ и $f(x_3)$ в зависимост от радиуса. Трите серии графики имат подобен характер – функцията $F(HV_{0.05})$ се минимизира за 3 < r < 3.5 mm. От

друга страна, повърхностната микротвърдост намалява незначително с нарастване на подаването. За сравнение, в напречно сечение от цилиндричен образец, обработен само чрез струговане, непосредствено до повърхностния слой е измерена повърхностна микротвърдост $HV_{0.05} \approx 250$. Следователно, прилагането на ДЗ води до увеличение на повърхностната микротвърдост с $12 \div 36$ % в сравнение с конвенционалния случай.



Фиг. 9. Сечения на хипер-повърхнината на функцията $F(R_a)$ с различни хипер-равнини



Фиг. 10 Изменение на функцията $F(R_a)$ - линии на ниво

4. ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПРОЦЕСА ДЗ

4.1. Едноцелеви оптимизации

4.1.1. Оптимизация на процеса ДЗ по критерий минимална получена грапавост

Оптимизацията има за цел определяне на стойностите на управляващите фактори, за които:

$$F(R_a) \to min$$
 (3)

Намерените оптимални стойности на процеса ДЗ в кодирани и натурални стойности, миними-зиращи получената грапавост (функцията $F(R_a)$), са показани в таблица 5. Зависимостта между факторите в кодиран вид x_i и в естествени координати \tilde{x}_i е:

$$x_i = \left(\widetilde{x}_i - \widetilde{x}_{0,i}\right) / \lambda_i , \qquad (4)$$

където:

$$\lambda_{i} = \left(\widetilde{x}_{max, i} - \widetilde{x}_{min, i} \right) / 2, \qquad (5)$$

а $\tilde{x}_{0,i}$, $\tilde{x}_{max, i}$ и $\tilde{x}_{min, i}$ са съответно средно, горно и долно ниво на i-^{тия} фактор в естествени координати.

4.1.2. Оптимизация на процеса ДЗ по критерий максимална повърхностна микротвърдост

Оптимизацията има за цел определяне на стойностите на управляващите фактори, за които:

$$F(HV_{0.05}) \to max \tag{6}$$

Получените от оптимизацията оптимални стойности на управляващите фактори в кодирани стойности са трансформирани в натурални, използвайки формули (4) и (5). Оптималните стойности на управляващите фактори, максимизиращи повърхностната микротвърдост (функцията $F(HV_{0.05})$), са показани в таблица 6.

4.2. Двуцелева оптимизация

Двуцелевата оптимизация на процеса ДЗ е проведена при следните зададени ограничения за двете целеви функции:

$$F(R_a) < 0.18 \ \mu m \ ; \ F(HV_{0.05}) > 300$$
 (7)

Двуцелевата оптимизация е насочена към намиране на компромисни стойности на управляващите фактори в съответствие с (7), за които едновременно е изпълнено:

$$F(R_a) \rightarrow min \quad ; \quad F(HV_{0.05}) \rightarrow max$$
 (8)

В таблица 7 са показани селектираните от компромисната област (Парето фронт) оптимални стойности на управляващите фактори.



r=3mm

□ Fb=150 N; f=0.07mm/tr □ Fb=350 N; f=0.07 mm/tr □ Fb=250 N; f=0.03 mm/tr ■ Fb=250 N; f=0.11 mm/tr



r=4 mm





Фиг. 11. Резултати от статистическата обработка на експерименталните резултати за повърхностната микротвърдост HV_{0.05}









е.



Фиг. 12. Сечения на хипер-повърхнината на функцията F(HV_{0.05}) с различни хипер-равнини

Гаолица 5 Оптимални стоиности на управляващите фактори по критерии минимална грапавос

Радиус на сферичната повърхнина на диамантния накрайник		Деформи	раща сила	Пода	ване
Кодирани	Натурални	Кодирани	Натурални	Кодирани	Натурални
x_{I}	r, mm	<i>x</i> ₂	F_b , N	<i>x</i> ₃	f, mm / rev
0.3673	3.36	0.2535	275.35	1,0000	0.11

Таблица 6 Оптимални стойности на управляващите фактори по критерий максимална повърхностна микротвърдост

Радиус на сферич диамантн	ната повърхнина на ия накрайник	Деформи	раща сила	Пода	ване
Кодирани x ₁	Натурални r, тт	Кодирани x ₂	Натурални F _b , N	Кодирани x ₃	Натурални f , mm / rev
-1.0000	2	1.0000	350.00	-1,0000	0.03

HV 0.05

320

310

300

290

280

1.00

0.50

0.00



Таблица 7 Оптимални стойности на управляващите фактори, получени от двуцелевата оптимизация

Фиг. 13. Изменение на функцията F(HV_{0.05}) - линии на ниво

5. ВЛИЯНИЕ НА БРОЯ НА ПРЕХОДИТЕ И ВИДА НА РАБОТНАТА СХЕМА ВЪРХУ ПОЛУЧЕНАТА ГРАПАВОСТ И ПОВЪРХНОСТНАТА МИКРОТВЪРДОСТ

5.1. Влияние на броя на преходите и вида на работната схема върху получената грапавост

Обобщените резултати за влиянието на броя на преходите и вида на работната схема върху получената грапавост са показани на фиг. 14.

Фиг. 14 дава основание за следните коментари:

• За двете работни схеми и всички стойности на броя на преходите *n*, процесът ДЗ на образци от бронз CuAl8Fe3 EN CW303G осигурява много ниска получена грапавост - $R_a < 0.085 \ \mu m$, съответстваща на практически огледални повърхнини. Тези стойности са предпоставка за значителна редукция на силите на триене, респ. загряването в плъзгащи лагерни двойки, когато бронзовите втулки са подложени на ДЗ с намерените от проведената двуцелева оптимизация оптимални стойности за *r*, F_b и *f*;

• Увеличаването на броя на преходите n води до намаляване на получената грапавост R_a , μm , но в различна степен за двете работни схеми. Реализирането на многопреходна обработка с $n \ge 5$ в условията на еднопосочна схема осигурява забележимо по-ниска и прак-

тически постоянна получена грапавост ($R_a \approx 0.05 \ \mu m$) в сравнение с тази при двупосочната работна схема.

5.2. Влияние на броя на преходите и вида на работната схема върху повърхностната микротвърдост

Графики, визуализиращи резултатите от статистическата обработка на експерименталните резултати за влиянието на броя на преходите n и вида на работната схема върху повърхностната микротвърдост $HV_{0.05}$, са показани на фиг. 15а, б.

Фиг. 15 показва различна тенденция за влиянието на броя на преходите n при двете работни схеми. Очевидно, реализирането на многопреходна обработка в условията на еднопосочна работна схема води до практически постоянна повърхностната микротвърдост $HV_{0.05}$, когато $n \ge 3$. Когато процесът се реализира в условията на разнопосочна работна схема, повърхностната микротвърдост $HV_{0.05}$ нараства до четвъртия преход, след което частично намалява. Вероятна причина за това е ефектът от разякчаване при $n \ge 5$ в повърхностните слоеве следствие от променящата се посока на деформиране. Следователно, от гледна точка на повърхностна микротвърдост, процесът ДЗ с многопреходна обработка трябва да се реализира при еднопосочна работна схема.



Фиг. 14. Влияние на броя на преходите n и вида на работната схема върху получената грапавост R_a , µт



Еднопосочна схема на обработване

Разнопосочна схема на обработване



 Φ иг. 15. Влияние на броя на преходите n и вида на работната схема върху повърхностната микротвърдост $HV_{0.05}$

6. ИЗВОДИ

На основа на резултатите от проведеното експериментално изследване на получената грапавост и повърхностна микротвърдост в цилиндрични образци от бронз CuAl8Fe3 EN CW303G, подложени на ДЗ, могат да бъдат обобщени в следните основни изводи:

• Получен е емпиричен математичен модел, предсказващ получената грапавост R_a , μm в зависимост от радиуса на сферичната работна повърхнина на диамантния накрайник r, деформиращата сила F_b и подаването f. На основа на проведената оптимизация на процеса ДЗ по критерий минимална грапавост, като са получени следните оптимални стойности на управляващите фактори: r = 3.36 mm; $F_b = 275.35 \text{ N}$; f = 0.11 mm/ rev;

• Получен е емпиричен математичен модел, предсказващ получената повърхностна микротвърдост $HV_{0.05}$ в зависимост от радиуса на сферичната работна повърхнина на диамантния накрайник r, деформиращата сила F_b и подаването f. В резултат от проведената оптимизация на процеса ДЗ по критерий максимална повърхностна микротвърдост са получени следните оптимални стойности на управляващите фактори: r = 2 mm; $F_b = 350 \text{ N}$; f = 0.03 mm / rev;

• В резултат от проведената двуцелева оптимизация на процеса ДЗ са определени управляващите фактори, осигуряващи едновременно ниска получена грапавост и висока повърхностна микротвърдост, както следва: r = 4 mm; $F_b = 344.46 \text{ N}$; f = 0.07 mm/rev;

• От гледна точка на минимизиране на получената грапавост и максимизиране на повърхностната микротвърдост, в условията на многопреходна обработка е целесъобразно процесът ДЗ да се реализира с n = 4 при еднопосочна работна схема. При тези условия се постига грапавост $R_a \approx 0.075 \ \mu m$ и повърхностна микротвърдост $HV_{0.05} \approx 305$.

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 енергоспестяваци системи и технологии" № BG05M2OP001-1.002-0023.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Василев Т. Технологични възможности на дорноването за управление на параметрите на качеството и експлоатационните характеристики при довършваща обработка на бронзови лагерни втулки. Автореферат на дисертация за получаване на образователна и научна степен "доктор", Варна, 2013.
- [2] M'Saoubi R. 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 JT, Duncheva GV, Anchev AP, Ichkova MD, Slide burnishing—review and prospects. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 104 (2019) 785-801.
- [4] Maximov JT, Anchev AP, Duncheva GV, Ganev N, Selimov KF Influence of the process parameters on the surface roughness, micro-hardness, and residual stresses in slide burnishing ofhigh-strength aluminum alloys. J Braz Soc Mech Sci Eng 39(8) (2017) 3067–3078.
- [5] Maximov JT, Anchev AP, Dunchev VP, Ganev N, Duncheva GV, Selimov KF Effect of slide burnishing basic parameters on fatigue performance of 2024-T3 high-strength aluminium alloy. Fatigue Fract Eng Mater Struct 40(11) (2017) 1893–1904.
- [6] Maximov JT, Anchev AP, Duncheva GV, Ganev N, Selimov KF, Dunchev VP 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.
- [7] 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.

- [8] Esme U. Use of grey based Taguchi method in ball burnishing process for the optimization of surface burnishing and microhardness of AA7075 aluminium alloy. Mater Technol 44 (2010) 129–135.
- [9] Gharbi F, Sghaier S, Hamdi H, Benameur T Ductility improvement of aluminum 1050A rolled sheet by a newly designed ball burnishing tool device. Int J Adv Manuf Technol 60 (1–4) (2012) 87–99.
- [10] Luo H, Liu J,Wang L, Zhong Q Study of the mechanism of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tools. J Mater Process Technol 180(1–3) (2006) 9–16
- [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] Luo H, Liu J, Zhong Q. Investigation of the burnishing process with PCD tool on non-ferrous metals. Int J Adv Manuf Technol 25(5–6) (2005) 454–459.
- [13] Luo H, Wang L, Zhang C Study on the aluminum alloy burnishing processing and the existence of the outstripping phenomenon. J Mater Process Technol 116(1) (2001) 88–90.
- [14] Pang C, Luo H, Zhang Z, Ma Y Precipitation behavior andgrain refinement of burnishing Al-Zn-Mg alloy. Progress Nat Sci Mater Int 28 (2018) 54–59.
- [15] Szutkowska M, Tobola D, Czechowski K Burnishing of aluminium alloy surface using diamond matrix composite tools. Key Eng Mater 641 (2015) 39–46.
- [16] Tanaka H, Tabuto H, Yanagi K, Futamura M Effect of surface hardened steel texture of preliminary process on burnishing process – a metrological study of hardened steel surface finishing using diamond burnishing tool. J Jpn Soc Technol Plast 50(581) (2009) 555–559 in Japanese.
- [17] Bednarski P, Bialo D, Brostow W, Czechowski K, Polowski W, Rusek P, Tobola D Improvement of tribological properties of matrix composites by means of slide burnishing. Mater Sci 19(4) (2013) 367–372.
- [18] Nestler A, Schubert A Effect of machining parameters onsurface properties in slide diamond burnishing of aluminium matrix composites. Materials Today: Proceedings (2015) 2S S156–S161.
- [19] Mombeini D., Atrian A. Investigation of Deep Cold Rolling Effects on the Bending Fatigue of Brass C38500. Latin American Journal of Solids and Structures 15(4) (2018) e36.
- [20] Frihat MH, Al Quran FMF, Al-Odat MQ Experimental Investigation of the Influence of Burnishing Parameters on Surface Roughness and Hardness of Brass Alloy. J Material Sci Eng (2015) 5:1.
- [21] Tareq A. Abu Shreehah, Developing and investigating of elastic ball burnishing tool. Int J Adv Manuf Technol (2008) 36 270–279 DOI 10.1007/s00170-006-0838-2.
- [22] El-Taweel T.A., El-Axir M.H., Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique. Int J Adv Manuf Technol (2009) 41 301–310 DOI 10.1007/s00170-008-1485-6.
- [23] Sarhan A.A.D., El-Tayeb N.S.M., Investigating the surface quality of the burnished brass C3605—fuzzy rule-based approach. Int J Adv Manuf Technol (2014) 71 1143–1150 DOI 10.1007/s00170-013-5543-3.
- [24] Okada M, Terada S, Miura T, Iwai Y, Takazawa T, Kataoka Y, Kihara T, Otsu M Fundamental burnishing characteristics of Ni-based alloy using coated carbide tool. Proc Manuf 15 (2018) 1278–1283.
- [25] Shiou FJ, Banh QN Development of an innovative small ballburnishing tool embedded with a load cell. Int J Adv Manuf Technol 87(1–4) (2016) 31–41.
- [26] Vuchkov I, Vuchkov I QStatLab Professional, v. 5.5 statistical quality control software. User's Manual, Sofia, 2009.