



EXPERIMENTAL STUDY OF THE ROUGHNESS OF LOW CARBON, MEDIUM CARBON AND TOOL STEEL AFTER DIAMOND BURNISHING

Vladimir Dunchev*, Angel Anchev

Technical University of Gabrovo, Gabrovo, 5300, Bulgaria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 March 2019

Accepted 18 April 2019

Keywords:

diamond burnishing, low carbon steel, medium carbon steel, tool steel, experimental study, roughness

ABSTRACT

In this article the slide burnishing process of cylindrical specimens made of three types of constructional steels (S235 low carbon steel, 45 medium carbon steel and Y8A tool steel) has been studied. The object of this study is the process parameters influence on the roughness obtained. The basic parameters (burnishing force, diamond's tip radius, feed rate and number of passes) have been studied through experimental approach. For that purpose three stages methodology has been developed. As a result of the first stage, the five best combinations for the burnishing force and the diamond's tip radius under constant velocity and feed rate conditions have been determined. On this basis, in the second stage the feed rate impact has been examined. After the second stage end, the optimal basic parameters of the diamond burnishing process providing minimum roughness have been determined. The impact of number of passes has been studied in the third stage. The number of passes varies between one and eight passes for two kind of schemes – one-way and two-way scheme. Under one-way diamond burnishing scheme the minimum roughness ($R_a = 0.109 \mu\text{m}$) has been obtained for the tool steel. For the three steels studied, the improvement in roughness is greater for the one-way working scheme. The two-way scheme is not recommended for S235 steel because the roughness obtained is minimal after one pass. In the conditions of two-way working scheme for 45 medium carbon steel the roughness decreases to six passes, then increases. However, this reduction is 19%, while in a one-way scheme it reaches 31%. As with other burnishing processes, the experimental results confirm that the factors of greatest importance for the roughness obtained are the burnishing force and the diamond's tip radius.

© 2019 Journal of the Technical University of Gabrovo. All rights reserved.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Известно е, че срокът и условията на експлоатация на динамично натоварени метални конструкционни елементи в най-голяма степен зависи от съвкупността от геометрични, физико-механични и металургични свойства на повърхностните слоеве. Тази съвкупност е известна като „surface integrity” (SI). В действителност, по време на изработване на заготовките се получават различни микро-дефекти, които не могат да бъдат избегнати. Следователно, SI ще зависи от технологичния процес на изработване на конструкционните елементи, и в най-голяма степен от вида на довършващото обработване. От гледна точка на подобряване на експлоатационните характеристики (якост на умора, корозионна устойчивост трибологично поведение), с най-голямо значение са следните характеристики на SI: минимална грапавост, повишена микротвърдост, създаване на зона с полезни остатъчни напрежения на натиск и модифицирана микроструктура. Конвенционалните довършващи обработки като фино струговане, фрезование и шлифоване от една страна внасят микро-дефекти в повърхностните слоеве, а от друга страна, се създават остатъчни напрежения на опън [1]. В този аспект особено перспективни са методите за повърхностно пластично де-

формирание (ППД) на повърхностните слоеве (mechanical surface treatment methods). В основата на методите за ППД е идеята за силово контактено взаимодействие в условията на стайна температура между гладък и твърд ротационен деформиращ елемент / елементи и третираната повърхнина. На практика методите за ППД са ефективни по отношение на широка номенклатура от черни и цветни сплави с жилаво-пластично поведение. Според вида на тангенциалния контакт „деформиращ елемент – заготовка“ съществуват две основни групи методи за ППД: с триене при търкаляне (rolling contact) и с триене при плъзгане (sliding contact). Най-голямо практическо приложение намират методите с триене при търкаляне – ball burnishing и roller burnishing. Световен лидер по отношение на методите, използващи триене при търкаляне, е мултинационалната компания Ecoroll. Ecoroll диференцира методите в две групи според ефекта, който се цели да се постигне по отношение на SI – roller burnishing и deep rolling [2]. Основната цел на roller burnishing е преди всичко да се постигне много ниска грапавост (дори огледални повърхнини) и висока точност на формата. Фокусът при deep rolling е поставен преди всичко върху уякчаването (cold work) и създаване на достатъчно интензивна и

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

дълбока зона с остатъчни напрежения на натиск. Множество научни публикации са посветени на изследване на процесите roller burnishing и deep rolling върху конструкционни материали [3-12].

Когато тангенциалният контакт е с триене при плъзгане, деформиращият елемент е със сферична форма, а материалът може да бъде естествен или синтетичен диамант (Synthetic polycrystalline diamond (PCD)), синтеровани твърди сплави (Wolfram carbides, Ferotic C, Silicon carbide) и в редки случаи – инструментална

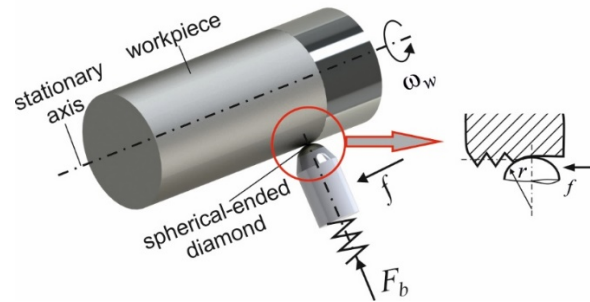


Фиг. 1. Устройство за диамантно заглаждане

Според [13] най-много изследвания (65%) на различни аспекти на процеса диамантно заглаждане са проведени по отношение на различни видове стомани. Експерименталните изследвания, насочени към изследване на различни характеристики на SI включват: микротвърдост – 21%, остатъчни напрежения – 18%, микроструктура – 16%, топография на повърхностните слоеве – 9%, точност на формата – 1% и др. Прави впечатление, че най-често изследваната характеристика на SI е получената грапавост – 33%, като най-често обект на изследване са ниско-легирани стомани [14-24]. Значително по-малко изследвания са свързани с получаваната грапавост след диамантно заглаждане върху инструментални стомани [25-30]. Същевременно, прегледът на научните публикации показва, че липсват изследвания на получената грапавост върху въглеродни стомани.

Основна цел на настоящата работа е да се оптимизира процеса диамантно заглаждане от гледна точка на получаване на минимална грапавост върху цилиндрични заготовки от ниско, средно и високо-въглеродна

стомана [13]. Най-често практическата реализация на тази група методи се свързва с използването на диамантни деформиращи елементи, процесът е известен като диамантно заглаждане (diamond burnishing). Основно предимство на диамантното заглаждане е, че може да се реализира чрез относително прости устройства и инструменти (фиг. 1) върху универсални машини и обработващи центри. Кинематиката на процеса диамантно заглаждане е аналогична на тази при стругане (фиг. 2).



Фиг. 2. Кинематика на процеса диамантно заглаждане

стомана. За постигане на основната цел е използван експериментален подход.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

2.1. Изследвани материали

Обект на експерименталното изследване са три вида въглеродни стомани с различно въглеродно съдържание – съответно S235, стомана 45 и Y8A. Изборът на тези стомани е продиктуван от широкото им приложение в практиката. Стомана S235 се използва предимно за изграждане на метални конструкции в индустрията и строителството на метални съоръжения. Стомана 45 е основен конструкционен материал в машиностроенето за изработване на оси, валове, колянни валове, зъбни колела, валащи, фрикционни дискове и др. Практическите приложения на стомана Y8A са свързани с изработка на инструменти – зенкери, фрезери и др.

Химичният състав на изследваните стомани е показан в таблица 1.

Таблица 1. Химичен състав на изследваните стомани

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu
S235	98.7	0.234	0.202	0.458	<0.005	0.0548	0.106	0.0493	0.0267	0.125
45	98.3	0.499	0.232	0.602	<0.005	0.0264	0.0845	0.0588	<0.005	0.123
Y8A	98.4	0.794	0.238	0.229	<0.005	0.0084	0.0307	0.0453	0.012	0.123

2.2. Детайли на експеримента

Изследванията са проведени върху цилиндрични експериментални образци с диаметър 30 mm и дължина 120 mm. Експерименталното изследване е проведено върху струг T200 с ЦПУ (фиг. 3). За реализиране на процеса диамантно заглаждане е изработено специално

устройство с еластично действие, с възможност за управление на деформиращата сила и лесна смяна на диамантния накрайник. Тялото на инструмента е закрепено към държач със стандартни форма и размери, адаптиран за универсални и стругове с ЦПУ (фиг. 3).



Фиг. 3. Условия на експерименталното изследване

Тъй като деформиращата сила F_b е приложена еластично, след диамантно заглаждане се получава ефект на откопирване на профила на обработената повърхнина, получена от предшестващата обработка. Поради това финалната стругова обработка и диамантното заглаждане са извършени без пребазиране на образците. За струговането е използван стандартен държач с твърдосплавна пластина тип ССМТ120404LF. Проведено е предварително изследване за определяне на технологичните параметри, осигуряващи минимална начална грапавост. Резултатите за технологичните параметри и осреднената начална грапавост за трите стомани са обобщени в табл. 2.

Таблица 2. Технологични параметри, осигуряващи минимална начална грапавост

стомана	$v, \frac{m}{min}$	$f, \frac{mm}{rev}$	a_p, mm	Получена грапавост, $R_a, \mu m$
S235	145	0.1	0.5	1.3
45	175	0.1	0.5	1.1
Y8A	125	0.1	0.7	0.8

За процеса диамантно заглаждане в настоящото изследване са използвани синтеровани изкуствени диаманти тип PCD с различни радиуси на закръгление на диамантния накрайник.

2.3. Методология на експерименталното изследване за получаване на минимална грапавост

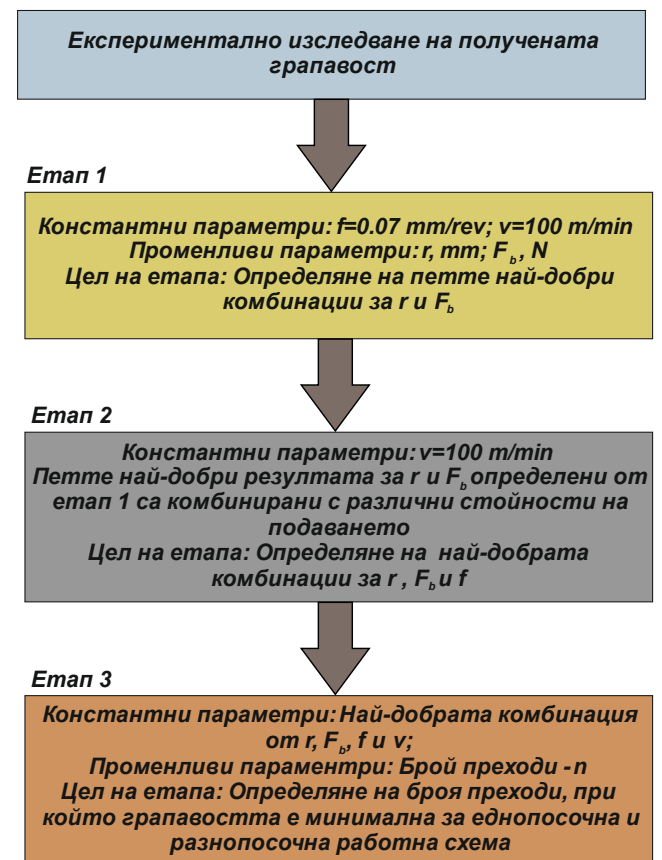
Експерименталното изследване за определяне на параметрите на процеса диамантно заглаждане по критерий минимална грапавост е подчинено на идеята за поэтапно стесняване на факторното пространство. В съответствие с това изследването е проведено последователно в три етапа съгласно схемата, показан на фиг. 4.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

3.1. Първи етап - Експеримент за изследване влиянието на радиуса на диамантния накрайник r, mm и деформиращата сила F_b, N

Целта на този етап е да се изберат петте най-добри комбинации за радиуса на сферичната повърхнина на диамантния накрайник r и деформиращата сила F_b . Нивата на вариране на радиуса r са: 2,3,4,5 mm, а тези на деформиращата сила F_b са: 100, 150, 200, 250, 300, 350 N. Експериментът се провежда в условията на следните постоянни параметри:

- подаване $f = 0.07 mm/rev$;
- скорост $v = 100 m/min$.



Фиг. 4. Методология на експерименталното изследване на процеса диамантно заглаждане за получаване на минимална грапавост

3.1.1. Ниско-въглеродна стомана

Експерименталните резултати са показани в табл. 3.

Таблица 3. Експериментални резултати за ниско-въглеродна стомана от първи етап

№	r, mm	F_b, N	Грапавост $R_a, \mu m$
1	2	100	0.55
2	2	150	0.517
3	2	200	1.438
4	2	250	0.798
5	2	300	0.772
6	2	350	2.514
7	3	100	0.419
8	3	150	0.429
9	3	200	0.55
10	3	250	0.525
11	3	300	0.584
12	3	350	0.587
13	4	100	0.417
14	4	150	0.26
15	4	200	0.163
16	4	250	0.306
17	4	300	0.208
18	4	350	0.209
19	5	100	0.46
20	5	150	0.358
21	5	200	0.268
22	5	250	0.282
23	5	300	0.436
24	5	350	0.34

Получени са следните пет най-добри комбинации:

- 1) $r = 4 mm / F_b = 200 N$
- 2) $r = 4 mm / F_b = 300 N$
- 3) $r = 4 mm / F_b = 350 N$
- 4) $r = 4 mm / F_b = 150 N$
- 5) $r = 5 mm / F_b = 200 N$

3.1.2. Средно-въглеродна стомана

Експерименталните резултати са показани в табл. 4.

Таблица 4. Експериментални резултати за средно-въглеродна стомана от първи етап

№	r, mm	F_b, N	Грапавост $R_a, \mu m$
1	2	100	0.407
2	2	150	0.398
3	2	200	1.34
4	2	250	0.467
5	2	300	1.577
6	2	350	1.73
7	3	100	0.632
8	3	150	0.393
9	3	200	0.282
10	3	250	0.327
11	3	300	0.678
12	3	350	0.228
13	4	100	0.5
14	4	150	0.41
15	4	200	0.305
16	4	250	0.341
17	4	300	0.327
18	4	350	0.345
19	5	100	0.542
20	5	150	0.488
21	5	200	0.439
22	5	250	0.347
23	5	300	0.388
24	5	350	0.565

Получени са следните пет най-добри комбинации:

- 1) $r = 3 mm / F_b = 350 N$
- 2) $r = 3 mm / F_b = 200 N$
- 3) $r = 4 mm / F_b = 200 N$
- 4) $r = 3 mm / F_b = 250 N$
- 5) $r = 4 mm / F_b = 300 N$

3.1.3. Високо-въглеродна стомана

Експерименталните резултати са показани в табл. 5.

Таблица 5. Експериментални резултати за високо-въглеродна стомана от първи етап

№	r, mm	F_b, N	Грапавост $R_a, \mu m$
1	2	100	0.309
2	2	150	0.589
3	2	200	0.583
4	2	250	0.492
5	2	300	2.063
6	2	350	2.51
7	3	100	0.395
8	3	150	0.248
9	3	200	0.383
10	3	250	0.19
11	3	300	0.224
12	3	350	0.252
13	4	100	0.789
14	4	150	0.41
15	4	200	0.161
16	4	250	0.117
17	4	300	0.112
18	4	350	0.1
19	5	100	0.356
20	5	150	0.217
21	5	200	0.26
22	5	250	0.315
23	5	300	0.479
24	5	350	0.36

Получени са следните пет най-добри комбинации:

- 1) $r = 4 mm / F_b = 350 N$
- 2) $r = 4 mm / F_b = 300 N$
- 3) $r = 4 mm / F_b = 250 N$
- 4) $r = 4 mm / F_b = 200 N$
- 5) $r = 3 mm / F_b = 250 N$

3.2. Втори етап - експеримент за изследване влиянието на подаването

Целта на този етап е да се избере най-добрата комбинация за радиус r , деформираща сила F_b и подаване f по критерии минимална грапавост. Експериментът се провежда с избраните от първия етап пет най-добри комбинации за всяка стомана, като се променя подаването f в следния диапазон: 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.12 mm/rev и се поддържа постоянна скорост $v = 100 m/min$.

3.2.1. Ниско-въглеродна стомана

Експерименталните резултати са показани в табл. 6.

Избрана е следната най-добра комбинация: $r = 4 mm, F_b = 200 N, f = 0.07 mm/rev$.

3.2.2. Средно-въглеродна стомана

Експерименталните резултати са показани в табл. 7.

Избрана е следната най-добра комбинация:
 $r = 4 \text{ mm}$, $F_b = 200 \text{ N}$, $f = 0.08 \text{ mm/rev}$.

3.2.3. Високо-въглеродна стомана

Експерименталните резултати са показани в табл. 8.

Таблица 6. Експериментални резултати за ниско-въглеродна стомана от втори етап

№	$\frac{r}{F_b}$	$f, \frac{\text{mm}}{\text{rev}}$	Грапавост $R_a, \mu\text{m}$
1	1	0.04	0.321
2	1	0.06	0.392
3	1	0.08	0.188
4	1	0.1	0.25
5	1	0.12	0.418
6	2	0.04	0.422
7	2	0.06	0.253
8	2	0.08	0.277
9	2	0.1	0.313
10	2	0.12	0.445
11	3	0.04	0.396
12	3	0.06	0.419
13	3	0.08	0.318
14	3	0.1	0.329
15	3	0.12	0.406
16	4	0.04	0.489
17	4	0.06	0.502
18	4	0.08	0.467
19	4	0.1	0.523
20	4	0.12	0.588
21	5	0.04	0.511
22	5	0.06	0.499
23	5	0.08	0.51
24	5	0.1	0.577
25	5	0.12	0.623

Таблица 8. Експериментални резултати за високо-въглеродна стомана от втори етап

№	$\frac{r}{F_b}$	$f, \frac{\text{mm}}{\text{rev}}$	Грапавост $R_a, \mu\text{m}$
1	1	0.04	0.142
2	1	0.06	0.124
3	1	0.08	0.161
4	1	0.1	0.189
5	1	0.12	0.159
6	2	0.04	0.176
7	2	0.06	0.171
8	2	0.08	0.192
9	2	0.1	0.196
10	2	0.12	0.192
11	3	0.04	0.149
12	3	0.06	0.165
13	3	0.08	0.185
14	3	0.1	0.215
15	3	0.12	0.253
16	4	0.04	0.109
17	4	0.06	0.167
18	4	0.08	0.143
19	4	0.1	0.118
20	4	0.12	0.15
21	5	0.04	0.433
22	5	0.06	0.284
23	5	0.08	0.262
24	5	0.1	0.27
25	5	0.12	0.275

Избрана е следната най-добра комбинация:
 $r = 4 \text{ mm}$, $F_b = 200 \text{ N}$, $f = 0.04 \text{ mm/rev}$.

Таблица 7. Експериментални резултати за средно-въглеродна стомана от втори етап

№	$\frac{r}{F_b}$	$f, \frac{\text{mm}}{\text{rev}}$	Грапавост $R_a, \mu\text{m}$
1	1	0.04	0.65
2	1	0.06	0.59
3	1	0.08	0.621
4	1	0.1	0.65
5	1	0.12	0.34
6	2	0.04	0.643
7	2	0.06	0.326
8	2	0.08	1.927
9	2	0.1	1.793
10	2	0.12	1.474
11	3	0.04	0.303
12	3	0.06	0.197
13	3	0.08	0.162
14	3	0.1	0.189
15	3	0.12	0.218
16	4	0.04	0.207
17	4	0.06	0.164
18	4	0.08	0.197
19	4	0.1	0.19
20	4	0.12	0.229
21	5	0.04	0.274
22	5	0.06	0.29
23	5	0.08	0.322
24	5	0.1	0.341
25	5	0.12	0.329

3.3. Трети етап - експеримент за изследване влиянието на броя на преходите

Целта на третия етап от изследването е да се определи броя на преходите осигуряващи минимална грапавост. Експериментът се провежда с избраната от втория етап най-добра комбинация за всяка стомана. Поддържа се: $v = 100 \text{ m/min} = \text{const}$. Влиянието на броя на преходите е изследвано за еднопосочна и разнопосочна работна схема за брой на преходите $n = l \div 8$.

3.3.1. Ниско-въглеродна стомана

а) Експерименталните резултати за еднопосочна работна схема на броя преходи са показани в табл. 9.

б) Експерименталните резултати за разнопосочна работна схема на броя преходи са показани в табл. 10.

3.3.2. Средно-въглеродна стомана

а) Експерименталните резултати за еднопосочна работна схема на броя преходи са показани в табл. 11.

б) Експерименталните резултати за разнопосочна работна схема на броя преходи са показани в табл. 12.

3.3.3. Високо-въглеродна стомана

а) Експерименталните резултати за еднопосочна работна схема на броя преходи са показани в табл. 13.

б) Експерименталните резултати за разнопосочна работна схема на броя преходи са показани в табл. 14.

Таблица 9. Експериментални резултати за еднопосочна работна схема на броя преходи за ниско-въглеродна стомана от трети етап

№	n	Грапавост $R_a, \mu m$
1	1	0.172
2	2	0.138
3	3	0.136
4	4	0.141
5	5	0.132
6	6	0.137
7	7	0.142
8	8	0.146

Таблица 11. Експериментални резултати за еднопосочна работна схема на броя преходи за средно-въглеродна стомана от трети етап

№	n	Грапавост $R_a, \mu m$
1	1	0.166
2	2	0.137
3	3	0.122
4	4	0.120
5	5	0.121
6	6	0.114
7	7	0.118
8	8	0.119

Таблица 13. Експериментални резултати за еднопосочна работна схема на броя преходи за високо-въглеродна стомана от трети етап

№	n	Грапавост $R_a, \mu m$
1	1	0.111
2	2	0.102
3	3	0.118
4	4	0.120
5	5	0.119
6	6	0.114
7	7	0.114
8	8	0.104

4. ИЗВОДИ

Проведено е експериментално изследване на влиянието на основните параметри и влиянието на броя на преходите върху получената грапавост след диамантно заглаждане на цилиндрични образци от три вида конструкционни стомани с различно въглеродно съдържание. Получените експериментални резултати могат да бъдат обобщени в следните основни изводи:

- В условията на еднопосочна обработка, най-ниска е получената грапавост ($R_a = 0.109 \mu m$) за стоманата с най-голямо въглеродно съдържание (У8А), като резултатите за другите две стомани са почти еднакви с измерена по-висока грапавост за ниско-въглеродната стомана (S235). Очевидно, конструкционни стомани с по-висока пластичност и по-малка жилавост се обработват по-трудно както в предшестващото обработване чрез струговане, така и посредством диамантно заглаждане;

- Получени са следните комбинации от основни параметри, осигуряващи минимална грапавост при еднопосочна обработка:

- за стомана S235 - $F_b = 200 N$;

$r = 4 mm$; $f = 0.07 mm/rev$; $v = 100 m/min$;

- за стомана 45 - $F_b = 200 N$;

$r = 4 mm$; $f = 0.08 mm/rev$; $v = 100 m/min$;

- за стомана У8А - $F_b = 200 N$;

$r = 4 mm$; $f = 0.04 mm/rev$; $v = 100 m/min$.

Таблица 10. Експериментални резултати за разнопосочна работна схема на броя преходи за ниско-въглеродна стомана от трети етап

№	n	Грапавост $R_a, \mu m$
1	1	0.184
2	2	0.195
3	3	0.223
4	4	0.218
5	5	0.199
6	6	0.189
7	7	0.197
8	8	0.210

Таблица 12. Експериментални резултати за разнопосочна работна схема на броя преходи за средно-въглеродна стомана от трети етап

№	n	Грапавост $R_a, \mu m$
1	1	0.175
2	2	0.190
3	3	0.174
4	4	0.161
5	5	0.152
6	6	0.142
7	7	0.174
8	8	0.178

Таблица 14. Експериментални резултати за разнопосочна работна схема на броя преходи за високо-въглеродна стомана от трети етап

№	n	Грапавост $R_a, \mu m$
1	1	0.121
2	2	0.128
3	3	0.123
4	4	0.119
5	5	0.119
6	6	0.122
7	7	0.127
8	8	0.120

Както при другите процеси за ППД, тези резултати потвърждават, че факторите с най-голямо значение за получената грапавост са деформиращата сила F_b и радиуса на закръгление на диамантния връх r . Подаването, при което е реализирана минимална грапавост за първите две стомани е почти еднакво, докато за високо-въглеродната стомана минималната грапавост е постигната при два пъти по-малко подаване. Този факт се дължи на по-голямата микротвърдост на стомана (У8А) спрямо другите две, което може да се обясни с по-малкото контактно петно в корелация с цикличния характер на деформационното въздействие за еднакви големи на деформиращата сила и радиуса;

- За трите изследвани стомани подобряването на грапавостта е по-голямо при еднопосочна работна схема. В условията на еднопосочна работна схема влиянието на броя на преходите за минимизиране на получената грапавост е най-голямо при стомана 45, като най-ниска грапавост ($R_a = 0.114 \mu m$) е получена след шестия преход ($n = 6$). За стомана S235 минимална грапавост е получена след петия преход ($R_a = 0.132 \mu m$), като редуцията на грапавостта след втория преход е незначителна. Може да се заключи, че броят на преходите практически няма влияние върху получената грапавост за високо-въглеродна стомана У8А, тъй като няма ясна тенденция, а разсейването е $0.018 \mu m$;

• Не се наблюдава устойчива тенденция за изменение на грапавостта в условията на разнопосочна работна схема за трите вида изследвани стомани. Разнопосочната схема не се препоръчва за стомана S235, тъй като получената грапавост е минимална след $n = 1$. За стомана 45 грапавостта намалява до $n = 6$, след което нараства. Тази редукция обаче е 19%, докато при еднопосочна схема достига до 31%. За стомана У8А броят на преходите практически не води до подобряване на грапавостта при разнопосочна схема.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] El-Axir M. H. A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (9) (2002) 1055-1063
- [2] Ecoroll Catalogue "Tools & Solutions for Metal Surface Improvement". Ecoroll Corporation Tool Technology, USA, 2006
- [3] Gharbi F, Sghaier S, Hamdi H, Benameur T. Ductility improvement of aluminum 1050A rolled sheet by a newly designed ball burnishing tool device. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 60 (1-4) (2012) 87-99
- [4] Othman OA., Basha M., Wagner L., Optimizing the Process Parameters and Investigating the Influence of Shot Peening and Roller Burnishing on Surface Layer Properties and Fatigue Performance of Al 6061 T4. *Sohag J. Sci.* 1 (1) (2016) 65-72
- [5] Kiran A. Patel, Pragnesh K. Brahmbhatt, Surface Roughness Prediction for Roller Burnishing of Al Alloy 6061 Using Response Surface Method. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 6 (3) (2015) 636-640
- [6] Al-Qawabena U.F., Al-Qawabah S.M., Effect of roller burnishing on pure aluminum alloyed by copper. *Industrial Lubrication and Tribology* 65 (2) (2013) 71-77
- [7] Lindemann J., Glavatskikh M., Leyensl C., Oehring M., Appel F., Influence of Mechanical Surface Treatments on the High Cycle Fatigue Performance of Gamma Titanium Aluminides. In: *Ti-2007 Science and Technology*, edited by M. Ninomi, S. Akiyama, M. Ikeda, M. Hagiwara, K. Maruyama. The Japan Institute of Metals (2007) 1703-1706
- [8] Abrão A.M., Denkena B., Köhler J., Breidenstein B., Mörke T., The influence of deep rolling on the surface integrity of AISI 1060 high carbon steel. *Procedia CIRP* 13 (2014) 31 – 36
- [9] Saldana-Robles A, Plascencia-Mora H, Aguilera-Gomez E, Saldana-Robles A, Marquez-Herrera A, Diosdado-De la Pena JA. Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel. *Surface & Coatings Technology* 339 (2018) 191-198
- [10] Dwivedi S. P., Sharma S., Mishra R. K., Effects of roller burnishing process parameters on surface roughness of A356/5%SiC composite using response surface methodology. *Adv. Manuf.* 2 (2014) 303–317
- [11] Nestler A., Schubert A., Roller Burnishing of Particle Reinforced Aluminium Matrix Composites. *Metals* 8 (2) (2018) 95; doi:10.3390/met8020095
- [12] Malleswara Rao J. N., Chenna Kesava Reddy A., Rama Rao P. V., The effect of roller burnishing on surface hardness and surface roughness on mild steel specimens. *International Journal of Applied Engineering Research* 1 (4) (2011) 777-785
- [13] Maximov J.T., Duncheva G.V., Anchev A.P., Ichkova M. D. Slide burnishing – review and prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2019) DOI:10.1007/s 00170-019-03881-1
- [14] Hamadache H, Zemouri Z, Laouar L, Dominiak S. Improvement of surface conditions of 36CrNiMo6 steel by ball burnishing process. *Journal of Mechanical Science and Technology* 28(4) (2014) 1491-1498
- [15] Hankare AV, Sapkal AA, Dounde AA. Effect of diamond burnishing process on surface roughness of AISI 4140 alloy steel. *Journal of Advances in Science and Technology* 13(1) (2017) 405-410
- [16] Huuki J, Laakso SVA (2017) Surface improvement of shafts by the diamond burnishing and ultrasonic burnishing techniques. *Int J Mach Machinabil Mater* 19(3): 246-258
- [17] 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
- [18] Korzynski M, Pacana A, Cwanek J (2009) Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing. *Surf Coat Technol* 203:1670-1676
- [19] Kuznetsov VP, Tarasov SY, Dmitriev AI (2015) Nanostructuring burnishing and subsurface shear instability. *J Mater Process Technol* 217:327-335
- [20] Liska J, Liska K, Kodacsy J (2014) Hard cutting and diamond burnishing of 100Cr6 steel bearings. *Key Eng Mater* 581:169-175
- [21] Liska K, Kodacsy J, Liska J (2013) Investigation of microgeometry on diamond burnished surfaces. In: 8th Research/Expert Conference with International Participations "Quality 2013", Neum, June 06-08, 2013, pp 615-620
- [22] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Dunchev VP (2019) Crack resistance enhancement of joint bar holes by slide diamond burnishing using new tool equipment. *Int J Adv Manuf Technol* DOI: 10.1007/s00170-019-03405-x.
- [23] Maximov JT, Duncheva GV (2012) Finite Element Analysis and optimization of spherical motion burnishing of low-alloy steel. *Proc. IMechE, Part C: J Mech Eng Sci* 226 (1): 161-176
- [24] Maximov JT, Duncheva GV, Amudjev IM, Kuzmanov TV (2012) Modelling the power parameters of the spherical motion burnishing. *Proc. IMechE, Part C: J Mech Eng Sci* 226 (2): 498-510
- [25] Brostow W, Lohse S, Osmanson A, Tobola D (2018) Mechanical finishing and ion beams application to cold working tool steels: consequences for scratch resistance. *Materials Research Society Communications* 8 (1): 178-182
- [26] Shiou FJ, Chen CH (2003) Determination of optimal ball-burnishing parameters for plastic injection moulding steel. *Int J Adv Manuf Technol* 21 (3): 177-185
- [27] Tobola D, Brostow W, Czechowski K, Rusek P, Wronska (2015) I Structure and properties of burnished and nitrided AISI D2 tool steel. *Materials Science* 21 (4): 511-516
- [28] Tobola D, Brostow W, Czechowski K, Rusek P (2017) Improvement of wear resistance of some cold working tool steels. *Wear* 382-383: 29-39
- [29] Tobola D, Kania B (2018) Phase composition and stress state in the surface layers of burnished and gas nitrided Sverker 21 and Vanadis 6 tool steels. *Surf Coat Technol* 353: 105-115
- [30] Tobola D, Rusek P, Czechowski K, Miller T, Duda K (2015) New indicators of burnished surface evaluation – reasons of application. *Metrology and Measurement Systems XXII(2):* 263-274