

**ВЛИЯНИЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ПРОЦЕСА DEEP ROLLING
ВЪРХУ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА SURFACE INTEGRITY НА
ОБРАЗЦИ ОТ ТЕРМООБРАБОТЕНА СТОМАНА 42CrMo4****Мариета Иванова¹, Владимир Дунчев¹, Петя Даскалова¹**¹Технически Университет-Габрово, m.ivanova@tugab.bg¹Технически Университет-Габрово, v.dunchev@tugab.bg¹Технически Университет-Габрово, p.daskalova@tugab.bg

*кореспондиращ автор: m.ivanova@tugab.bg

**INFLUENCE OF DEEP ROLLING PROCESS PARAMETERS ON
SURFACE INTEGRITY CHARACTERISTICS OF HEAT-TREATED
42CrMo4 STEEL SPEICMENS****Marieta Ivanova¹, Vladimir Dunchev¹, Petia Daskalova¹**¹Technical University of Gabrovo, m.ivanova@tugab.bg¹Technical University of Gabrovo, v.dunchev@tugab.bg¹Technical University of Gabrovo, p.daskalova@tugab.bg

*Corresponding author: m.ivanova@tugab.bg

Abstract

The present report presents the results obtained from experimental study of the influence of deep rolling process parameters on the surface integrity of samples of 42CrMo4 steel previously subjected to quenching and high-temperature tempering. The deep rolling process was implemented by a special device with a toroidal deforming roller. The object of measurement and comparison were the roughness obtained, surface microhardness and surface axial residual stresses. The process parameters minimizing the roughness and maximizing the surface microhardness and residual axial compressive stresses were determined.

Keywords: surface integrity; deep rolling; roughness; microhardness; residual stresses.**1. ВЪВЕДЕНИЕ**

Валовите и осите са ротационни елементи с ключово значение в преобразуването на въртеливи движения. Следствие на функцията, която изпълняват в процеса на експлоатация, въртящите се оси са натоварени на въртеливо огъване, а валовите са подложени едновременно на огъване и усукване [1]. В тези условия на експлоатация умората на материала има определящо значение за якостния им ресурс. В случаи на по-отговорни валове и оси предпочитани материали са средновъглеродни ниско-легиранни конструкционни стомани (със съдържание на въглерод от 0,3 до 0,5%), които се под-

лагат на закаляване и високо-температурно отвъръщане с цел повишаване на якостта и твърдостта.

Хром-молибденовата стомана 42CrMo4 е типичен конструкционен материал за такъв тип динамични натоварвания, в т.ч. за валове и оси. Хромът като легиращ елемент в стоманата образува хромови карбиди с въглерода, които повишават твърдостта, статичната якост, износостойчивостта, както и устойчивостта на стоманата срещу корозия. Молибденът дори в малки количества повишава статичната якост, динамична якост и пластичността на стоманата. Той благоприятства запазването на издробенна струк-

тура, дори при високи температури [2].

От практически и научен интерес е повишаването на якостта на умора на валове и оси, изработени от *42CrMo4*. Възможните подходи за повишаване на якостта на умора са: 1). Обемно закаляване и високотемпературно отвярщане; 2). Повърхностно закаляване и отвярщане или химико-термична обработка; 3). Модифициране на повърхностните слоеве чрез студено повърхностно пластично деформиране (ППД) (Surface Cold Working). Модифицирането на повърхностните слоеве се изразява в подобряване на комплексното състояние на повърхностните слоеве, известно като Surface Integrity (SI). Основните характеристики на Surface Integrity са: 2D и 3D параметрите на грапавостта; микротвърдостта на повърхността и профила ѝ в дълбочина; повърхностните остатъчни напрежения и профила им в дълбочина; микроструктурата. Доказано е, че за подобряване на уморното поведение е необходимо съответният процес за довършващо обработване да осигури ниска грапавост, повишена микротвърдост, създаване на зона с полезни остатъчни напрежения на натиск и подобрена микроструктура [3, 4].

Отчитайки положителните ефекти на посочените подходи, може да се очаква синергиен ефект, когато се комбинират подходяща предварителна термична обработка с ППД [3]. Комбинацията от обемно закаляване и високо-температурно отвярщане води до повишаване на механичните характеристики на основния материал на стоманата, а ефектът от ППД се изразява в модифициране на повърхностните слоеве, които са най-натоварените слоеве на валове и осите.

Според начина на прилагане на деформиращото въздействие, методите за ППД се делят на две групи: статични и динамични [5]. Тъй като валове и осите са ротационни тела, целесъобразно е да се използват статични методи за ППД. Според вида на тангенциалния контакт

между деформиращия елемент и обработваната повърхнина, статичните методи за ППД са две групи: методи с контакт с триене при търкаляне и методи с контакт с триене при плъзгане. Като цяло, методите с контакт триене при търкаляне са по-популярни в инженерната практика. Според геометрията на деформиращия/те елемент/ти, методите, използващи контакт с триене при търкаляне, са: Ball Burnishing (деформиращият елемент е сфера) или Roller Burnishing (деформиращият елемент е цилиндрична, конусна или профилна, в т.ч. тороидална ролка). От гледна точка на ефекта, който се цели да се постигне, методите, използващи триене при търкаляне, могат да реализират два процеса: Roller Burnishing (RB) и Deep Rolling (DR) [6].

При процеса RB акцента е върху подобряване на грапавостта и точността на повърхнините. Целта на процеса DR е преди всичко да се постигне уякчаване на материала в повърхностните и подповърхностните слоеве, респ. по-голяма степен на еквивалентната пластична деформация (cold work) и въвеждане на полезни остатъчни напрежения на натиск. Следствие от тези ефекти се модифицира и повърхностната микро-структура. Доказано е, модифицирането на повърхностните слоеве и оттам подобряването на уморното поведение на различни конструкционни материали след DR се дължи на посочените основни ефекти [7-13].

Целта на настоящото изследване е да се оцени влиянието на параметрите на процеса DR върху получената грапавост, повърхностната микротвърдост и повърхностните остатъчни напрежения в стомана *42CrMo4*, предварително термообработена чрез обемно закаляване и високо-температурно отвярщане. За постигане на целта е проведено експериментално изследване върху цилиндрични образци, подложени на DR посредством специално устройство с тороидална деформираща ролка.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИ

2.1 Материал

Материалът в състояние на доставка е стомана $42CrMo4$ във вид на цилиндрични пръти с диаметър $d = 25\text{ mm}$ след горещо валцоване. Прътите са нарязани на работни заготовки с дължина $l = 250\text{ mm}$. Изследваните образци са с работна дължина $l = 35\text{ mm}$. Заготовките са подложени на термична обработка в следната последователност: 1). Нормализация: нагряване до 850°C , задържане за 1 h и следващо охлаждане на спокоен въздух до стайна температура; 2). Закаляване: нагряване до 840°C , задържане за 30 min. и закаляване в масло; 3). Високотемпературно отвярщане: нагряване до 590°C за 3 h и следващо охлаждане на спокоен въздух.

Химичният състав е измерен чрез оптична емисионна спектрометрия с разделителна способност 0,001. Резултатите от химичния анализ са показани в табл. 1

Таблица. 1 Химичен състав на изследваната стомана $42CrMo4$

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
97.1	0.463	0.193	0.842	0.0082	0.0063	1.07
Mo	Ni	Al	Nb	Cu	V	Pb
0.183	0.0066	0.0227	0.0062	0.0352	0.0063	0.0074

2.2 Deep Rolling

Процесът DR е реализиран върху струг Index Traub TNA 400 CNC в условия на мазане, като е използвана смазка Vasco 6000 и режеща пластина DNMG 50608-RF. Финото струговане е извършено със следните параметри: скорост на подаване $f = 0,1\text{ mm/rev}$, скорост на рязане $V_c = 90\text{ m/min}$ и дълбочина на рязане $a_p = 0,25\text{ mm}$. Радиусът на режещият ръб е $r_c = 0,8\text{ mm}$. Началната стойност на грапавостта на образца, получена след струговане е $R_a = 0,835\text{ }\mu\text{m}$. Устройството за реализиране на процеса DR (фиг.1) осигурява еластичен нормален контакт между деформиращата тороидална ролка и обработваната повърхнина. По този начин големината на дефо-

рмиращата сила се задава чрез деформацията на цилиндрична винтова пружина.



Фиг. 1 Устройство за реализиране на процеса Deep Rolling

Диаметърът на екваториалната окръжност на тороидалната деформираща ролка е $d = 26\text{ mm}$ радиусът на тороидалната повърхнина е $r = 3\text{ mm}$, а скоростта $v = 100\text{ m/min}$. Обект на изследване е влиянието на деформиращата сила F_b и подаването f , които доказано имат най-голямо влияние върху SI [3].

2.3 Измерване на характеристиките на Surface Integrity

2.3.1. Измерване на грапавост



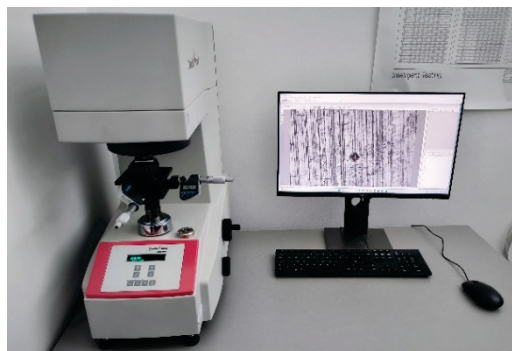
Фиг. 2 Грапавомер Mytutoyo Surftest SJ-210

Грапавостта е измерена чрез грапавомер Mytutoyo Surftest SJ-210 (фиг. 2). Обект на измерване е средно-аритметичното отклонение на профила от средната линия R_a , измерен в осово направление. За всяка експериментална точка стойността на грапавостта е получена като средно-аритметична стойност от измерване по 5 образуващи, разположени на ъгъл 72° .

2.3.2. Измерване на микротвърдост

Измерванията на повърхностната микротвърдост $HV_{0,05}$ са извършени чрез

полуавтоматичен микротвърдомер ZHV μ Zwick Roell (фиг. 3) и време за задържане 10 s. Резултатите за повърхностната микротвърдост са получени като средноаритметична стойност от 15 измервания, равномерно разпределени по три образувачи, разположени на ъгъл 120°.



Фиг. 3. Експериментално устройство за измерване на микротвърдост

2.3.3. Измерване на остатъчни напрежения

За измерване на остатъчните напрежения е използван Рентгенов дифрактометър Bruker D8 Advance X-ray diffractometer (Billerica, MA, USA). Параметрите за измерване на остатъчните напрежения са показани в таблица 2.

Таблица 2

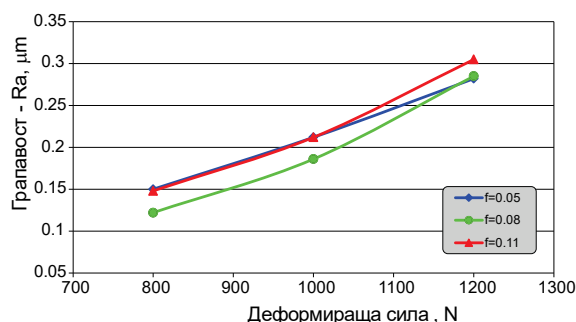
Параметри за измерване на остатъчните напрежения

Измервателен уред	Bruker D8 Advance дифрактометър
Рентгенова тръба	Тръба с дълъг фокус с хромово лъчение
Кристалографска равнина	$Fe(\alpha) - (211)$
Ъгъл на дифракция (2 θ)	146.08° (152° - 160°)
Метод на измерване	Offset coupled TwoTheta/Theta ($\sin^2\psi$ метод)
Режим на сканиране	Continuous PSD fast
Рентгенов детектор	SSD160-2 (1D сканиране)
Използван кулиматор	Standard $\Phi 1.0\text{ mm}$
Време за едно измерване	30 s
Еластична константа s_1	-1.271E-6
Еластична константа $1/2s_2$	5.811E-6
Напрежение	30 kV
Големина на ток	40 mA
Стъпка на отчитане	0.5°
Време за задържане на една стъпка	1 s

3. Резултати и коментари

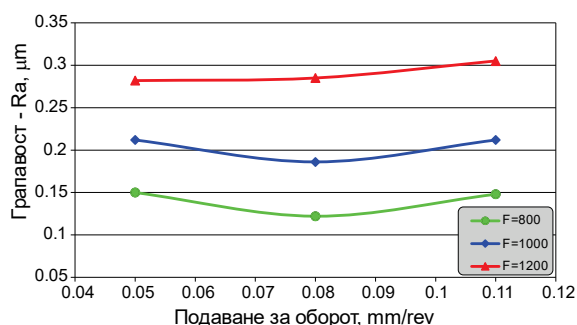
3.1. Грапавост

Резултатите, онагледяващи влиянието на деформиращата сила върху грапавостта на изследваните образци, са илюстрирани на фиг. 4. Наблюдава се влошаване на грапавостта R_a на изследваните образци с нарастването на силата на притискане.



Фиг. 4 Влияние на деформиращата сила върху грапавостта при фиксирани стойности на подаването

Параметърът R_a се минимизира при подаване $f = 0,08 \text{ mm/rev}$ и деформираща сила $F_b = 800 \text{ N}$.

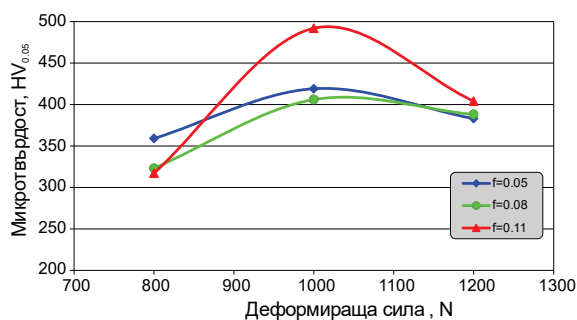


Фиг. 5 Влияние на подаването върху грапавостта при фиксирани стойности на деформиращата сила

Влиянието на подаването върху грапавостта не е еднозначно (фиг. 5). За всички стойности на деформиращата сила грапавостта се минимизира при $f = 0,08 \text{ mm/rev}$.

3.2. Микротвърдост

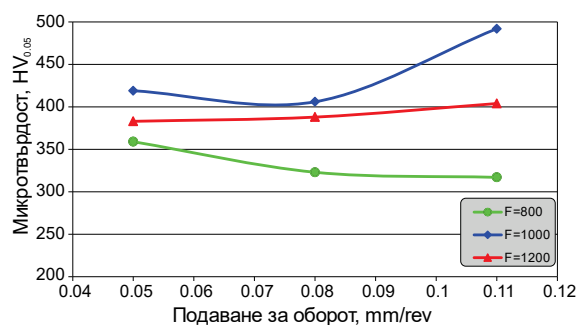
Влиянието на деформиращата сила върху микротвърдостта е показано на фиг. 6. Най-голяма стойност на микротвърдостта е измерена при големина на деформиращата сила $F_b = 1000 \text{ N}$ за всяка изследвана стойност на подаването.



Фиг. 6 Влияние на деформиращата сила върху микротвърдостта при фиксирани стойности на подаването

Максимална стойност на микротвърдостта е отчетена при подаване $f = 0,11 \text{ mm/rev}$ (фиг. 6) и деформираща сила $F_b = 1000 \text{ N}$. Фиг. 7 визуализира влиянието на подаването за трите стойности на деформиращата сила. Изменението на микротвърдостта е в пряка корелация с ефекта на деформационно уякчаване след DR

[3]. При една и съща стойност на радиуса на тороидалната работна повърхнина на ролката, различните комбинации от големина на деформиращата сила и подаването водят до различно циклично натоварване в околност на точките от третираната повърхнина [14]. В резултат ефектът на уякчаване на повърхностните слоеве е различен. Увеличаването на подаването при най-малката изследвана стойност на деформиращата сила ($F_b = 800 \text{ N}$) намалява уякчаването, и оттам – микротвърдостта (фиг. 7). Тази тенденция се обръща при най-голямата изследвана стойност на деформиращата сила.

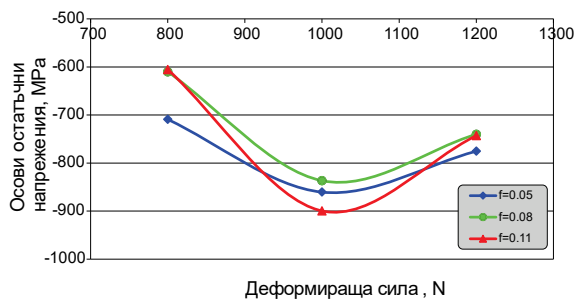


Фиг. 7 Влияние на подаването върху микротвърдостта при фиксирани стойности на деформиращата сила

Комбинацията от средна стойност на деформиращата сила ($F_b = 1000 \text{ N}$) и най-голямо подаване ($f = 0,11 \text{ mm/rev}$) води до най-голяма микротвърдост (фиг. 7). При големина на деформиращата сила $F_b = 800 \text{ N}$, измерената микротвърдост е най-малка за всяка изследвана стойност на подаването. Следователно, от гледна точка на микротвърдост, реализацията на изследвания DR процес с големина на деформиращата сила 800 N не осигурява достатъчно уякчаване на термообработена стомана 42CrMo4.

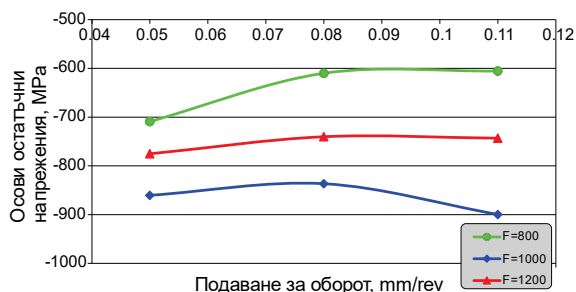
3.3 Остатъчни напрежения

Най-високи по абсолютна стойност осови остатъчни напрежения на натиск са измерени при деформираща сила $F_b = 1000 \text{ N}$ и подаване $f = 0,11 \text{ mm/rev}$ (фиг. 8).



Фиг. 8 Влияние на деформиращата сила върху осовите остатъчни напрежения при фиксирани стойности на подаването

Влиянието на деформиращата сила върху измерените повърхностни осови остатъчни напрежения (фиг. 8) е аналогично на влиянието ѝ върху микротвърдостта (фиг. 6). Реализацията на изследвания DR процес с деформираща сила $F_b=1000\text{ N}$ максимизира остатъчните напрежения за всички стойности на подаването. Този факт показва, че има корелация между ефекта на уякчаване от една страна, и въведените повърхностни осови остатъчни напрежения и повърхностната микротвърдост от друга страна.



Фиг. 9 Влияние на подаването върху осовите остатъчни напрежения при фиксирани стойности на деформиращата сила

Влиянието на подаването върху изменението на повърхностните осови остатъчни напрежения е по-малко (фиг. 9). За всяка стойност на подаването, изменението на деформиращата сила води до значително изменение на осовите остатъчни напрежения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящото изследване е оценено влиянието на деформиращата сила и подаването при процеса DR с тороидална

ролка върху характеристиките на SI на образци от термообработена стомана 42CrMo4. Експерименталните резултати дават основание за следните основни изводи:

✓ Най-ниска грапавост, оценена с параметъра R_a , е постигната при минимална големина на деформиращата сила $F_b=800\text{ N}$ и средна стойност на подаването $f=0.08\text{ mm/rev}$;

✓ Повърхностната микротвърдост и повърхностните осови остатъчни напрежения на натиск са максимални при средна стойност на деформиращата сила $F_b=1000\text{ N}$ и най-голямо подаване $f=0.11\text{ mm/rev}$. Тези резултати показват еднакви тенденции за влиянието на деформиращата сила и подаването върху тези две характеристики на SI;

✓ Реализацията на изследвания DR процес с максимална стойност на деформиращата сила $F_b=1200\text{ N}$ за всички изследвани стойности на подаването води до редуциране на повърхностните остатъчни напрежения на натиск и микротвърдостта в сравнение със средната стойност на силата $F_b=1000\text{ N}$. Този резултат се дължи на по-слабия ефект на уякчаване на изследваната стомана за посочената комбинация от параметри на изследвания Deep Rolling процес.

Благодарности: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дунчева Г, Машинни елементи. ЕКС-ПРЕС, 2019, ISBN 978-954-490-626-9.
- [2] Максимов ЙТ, Анчев АП, Тодоров ВП, Металознание и термична обработка Част II Термична обработка на металите, Университетско издателство “Васил Априлов”, 2022, ISBN 978-954-683-664-9.

- [3] Дунчева ГВ, Surface Integrity през призмата на Surface Engineering. Университетско издателство “Васил Априлов”, 2023, ISBN: 978-954-683-691-5.
- [4] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Dunchev VP, Explicit correlation between surface integrity and fatigue limit of surface cold worked chromium-nickel austenitic stainless steels. *Int J Adv Manuf Technol* 133 (2024) 6041–6058.
- [5] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Ichkova MD Slide burnishing—review and prospects. *Int J Adv Manuf Technol* (2019) DOI: 10.1007/s00170-019-03881-1
- [6] Ecoroll—catalog http://teco.net.au/-pdf/-ecoroll/-ecoroll-catalog_en_web.pdf.
- [7] Borkar A.P., Kamble P.S., Seemikeri C.Y., Surface Integrity Enhancement of Inconel 718 by using Roller Burnishing process. *International Journal of Current Engineering and Technology* 4 (4) (2014) 2595-2598.
- [8] Rotella G., Rinaldi S., Filice L., Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity. *The Int J Adv Manuf Technol* (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04631-z>.
- [9] Abrão AM, Denkena B, Köhler J, Breidenstein B, Mörke T, Rodrigues PSM, The influence of heat treatment and deep rolling on the mechanical properties and integrity of AISI 1060 steel. *J. Mater. Process. Technol.* (2014) 214 3020-3030.
- [10] Duncheva GV, Maximov JT, Dunchev VP, Anchev AP, Atanasov TP, Capek J Single toroidal roller burnishing of 2024-T3 Al alloy implemented as mixed burnishing process *Int J Adv Manuf Technol* 111 (2020) 3559–3570.
- [11] Duncheva GV, Maximov JT, Dunchev VP, Anchev AP, Atanasov TP, Capek J Finite element and experimental study of the residual stresses in 2024-T3 Al alloy treated via single toroidal roller burnishing. *J Braz Soc Mech Sci Eng* (2021) 43:55 DOI: 10.1007/s40430-020-02775-8.
- [12] Duncheva GV, Maximov JT, Dunchev VP, Anchev AP, Atanasov TP Improvement in Fatigue Performance of 2024-T3 Al Alloy Via Single Toroidal Roller Burnishing. *Journal of Materials Engineering and Performance* 30(3) (2021) 2256–2266.
- [13] Regazzi, D.; Cantini, S.; Cervello, S.; Conte, A.L.; Foletti, S.; Pourheidari, A.; Beretta, S. Improving fatigue resistance of railway axles by cold rolling: process optimisation and new experimental evidences. *Int. J. Fatigue* (2020) doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105603>.
- [14] Maximov JT, Duncheva GV, Anchev AP, Ganey N, Dunchev VP, Effect of cyclic hardening on fatigue performance of slide burnished components made of low-alloy medium carbon steel. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 42 (6) 1414-1425 (2019) <https://doi.org/10.1111/ffe.13001>.