International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

МОДЕЛИРАНЕ НА ГРАПАВОСТТА ПРИ СТРУГОВАНЕ И ПОСЛЕДВАЩО ППД С КОНТАКТ ТРИЕНЕ ПРИ ТЪРКАЛЯНЕ НА АУСТЕНИТНА СТОМАНА

Пламен Денчев Пеев[1]

[1] *Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, екологични и енергоспестяващи системи и технологии“*

Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, България
**кореспондиращ автор: plamen1@mail.bg*

MODELING OF SURFACE ROUGHNESS IN TURNING AND SUBSEQUENT SURFACE PLASTIC DEFORMATION BY ROLLING-FRICTION CONTACT OF AUSTENITIC STEEL

Plamen Denchev Peev[1]

[1] *Center of Competence “Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies”*

Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria
**Corresponding author: plamen1@mail.bg*

Abstract
This report presents an experimental study on modeling and optimizing the surface roughness resulting from turning followed by surface plastic deformation (SPD) using a toroidal deforming roller on cylindrical specimens made of AISI 316Ti austenitic steel. The study employs a design of experiments based on a second-order optimal composite design, analysis of variance (ANOVA), regression analysis, and single-objective optimization of the two sequential processes, with minimum roughness Ra as the criterion. The optimal parameters determined for the turning process provided a minimum roughness of Ra = 0.315 μm; these parameters were used for the preliminary turning of the specimens subsequently subjected to SPD. The optimal parameters determined for the SPD process provided a minimum roughness of Ra = 0.078 μm.

Keywords: *AISI 316Ti austenite stainless steel; surface roughness; turning; surface plastic deformation; roller burnishing*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Аустенитните стомани са най-широко произвежданите неръждаеми стомани в световен мащаб, поддържайки стабилен дял от около 52% от всички неръждаеми стомани [1]. Основната част от това произ-водство се заема от хром-никеловите аустенитни стомани от серия AISI 300. Тази серия се отличава с висока обща устойчивост на корозия, отлична пластичност, изключителна криогенна устойчивост, добра заваряемост и немагнитни свойства, поради което се използват за разнообразни приложения в химическата, нефтохимическата, фармацевтичната и хранително-вкусовата индустрия, за медицинска техника, енергетиката, автомобилостроенето и корабостроенето. AISI 316 е една от най-масово използваните хром-никелови аустенитни стомани, осо-

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

бено за приложения в корозионна среда (морска вода, киселини и основи) поради високата ѝ устойчивост на корозия следствие добавянето на молибден (2-3%). При температури над $500^{o}C$ в обикновената AISI 316 стомана се интензифицира дифузията на въглерод, който има голям афинитет към хрома. Дифузията протича с по-голям интензитет по границите на зърната, следствие на което в тези зони се образуват хромови карбиди ($Cr_{23}C_6$), а прилежащите зони обедняват на хром. Когато конценрацията на хром в граничните зони падне под 12% се задейства опасната междукристална корозия. Стабилизирането с титан на модифицираната стомана AISI 316Ti значително подобрява корозионната ѝ устойчивост в корозионна среда при повишени температури. Аустенитната стенноцентрирана кубична (fcc) кристална структура на хром-никеловите стомани води до по-ниски твърдост и износоустойчивост, статична якост и якост при умора, което ограничава обхвата на приложенията им. Следователно, от практически интерес е разработването на подходящи уякчаващи процеси. Важно е да се подчертае, че аустенитната структура на стоманите от серия AISI 300 не позволява подобряване на твърдостта и якостта им чрез обемна топлинна обработка. Ето защо, ефективна идея е идеята за модифициране на повърхностните слоеве с цел да се осигури подходяща комбинация от топографски, физико-механични и металургични характеристики, известни като surface integrity (SI), в корелация с желаното експлоатационно поведение (износване, умора, корозия) [2]. Тази идея е в основата на Surface engineering [3] като съвременно инженерно направление. Особено ефективен подход за повърхностно уякчаване на ротационни компоненти от аустенитни хром-никелови стомани е повърхностното пластично деформиране (ППД). Физическата основа на ППД се състои в силна пластична деформация на повърхностния слой под температурата на рекристализация на метала, поради което този подход е известен като деформационно уякчаване. Според вида на тангенциалния контакт между деформиращия елемент и третираната повърхнина, ППД се реализира с контант триене при търкаляне и триене при плъзгане. В литературата доминират изследванията на процеса диамантно заглаждане (ДЗ), използващ плъзгащ сферичен диамантен деформиращ накрайник. Изследванията на ДЗ са насочени към подобряване на SI и експлоатационното поведение на хром-никелови стомани: AISI 304 [4-7], AISI 317Ti [8]; AISI 321 [9, 10]; AISI 316L [11]. Значително по-малко изследвания са посветени на ППД на аустенитни хром-никелови стомани, използващи контакт триене при търкаляне: чрез хидростатична сфера за третиранена на AISI 304 [12] и AISI 316L [13]; чрез хибриден процес с деформираща сфера и асистирани ултразвукови вибрации [14, 15]; чрез деформираща ролка за третиране на AISI 316L [16] и AISI 316 [17,18]. Ограничен брой изследвания са проведени върху цилиндрични компоненти от AISI 316Ti и се отнасят до приложения на ДЗ [19, 20]. В литературата липсва информация за ефективността на ППД с деформираща ролка на цилиндрични компоненти от AISI 316Ti, насочени по-конкретно към подобряване на SI в корелация с трибологично поведение.

Основна цел на настоящото изследване е да се моделира и оптимизира грапавостта при струговане и последващия процес на ППД с тороидална деформираща ролка на цилиндрични образци от AISI 316Ti.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ

2.1. Материал

Материалът е горещо валцувана отгрята аустенитна стомана AISI 316Ti във вид на пръти с номинален диаметър $\emptyset\ 25\ mm$. Химичният състав, измерен чрез оптичен емисионен спектрометър с разделителна способност 0,001 тегл.%, е, както следва: Fe 66.38, C=0.019, Si=0.554, Mn=1.67, P=0.031, S=0.029, Cr=16.94,

Ni=11.32, Mo=1.77, Cu=0.45, Ti=0.302, Co=0.216 и др. (баланс).

Механичните характеристики са определени като средна аритметична стойност на резултатите, получени от три теста за опън при стайна температура ($20^{o}C$), проведени върху изпитвателна машина Zwick/Roell Vibrophore 100 (Ulm, Германия). Работните участъци на образците за опън са с диаметър 6 mm и дължина 30 mm (фиг. 1).



***Фиг. 1**. Образци за изпитване на опън*

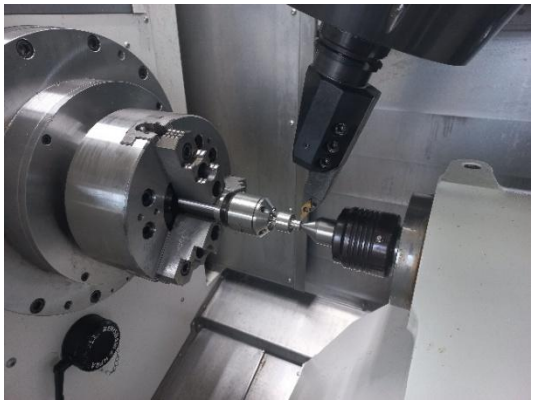
Твърдостта по Бринел е измерена с тестер ZWICK/Indentec ZHVμ-S, използвайки сферичен индентор с диаметър *2.5 mm*, натоварване *62.5 kg* и време на задържане *10 s*. Крайната стойност е получена като средноаритметична стойност от измерванията, проведени по челните повърхности на два цилиндрични образеца. Механичните характеристики са обобщени в Таблица 1.

***Таблица 1**. Механични характеристики на стомана AISI 316Ti*

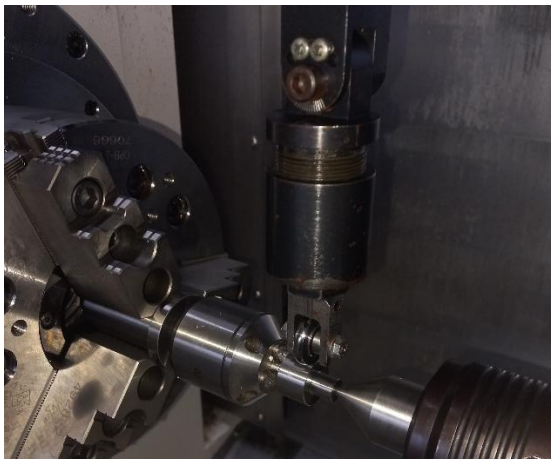
$R_{0.2}$, *MPa*	R_m, *MPa*	*Относително удължение, %*	*Твърдост HB*
$450^{\pm 1}$	$641^{\pm 1}$	40^{+1}	200^{+12}_{-13}

2.2. Детайли на експеримента

Предварителното струговане и последващото ППД с тороидална ролка бяха извършени върху стругово-фрезови обработващ център TM2500 (RAIS, Пазарджик, България), използвайки смазващо-охлаждаща течност Blaser VASCO 6000 (Blaser, Швейцария). При стругованието на цилиндрични образци (фиг. 2) са използвани режеща пластина VBMT 160404-F1, CP500 (Seco Tools, Fagersta, Швеция) и държач PVVBN 2525 M16 EEB9 (Walter AG, Дюселдорф, Германия). За реализация на ППД с тороидална деформираща ролка (фиг. 3) е използвано специално устройство, което осигурява еластичен нормален контакт между деформиращата ролка и обработваната повърхнина.



***Фиг. 2**. Струговане на образци от стомана AISI 316Ti върху стругово-фрезови обработващ център TM2500*



***Фиг. 3.** ППД с тороидална деформираща ролка върху стругово-фрезови обработващ център TM2500*

Обект на моделиране и оптимизиране е получената грапавост след струговане и последващото ППД, оценена с 2D параметъра R_a. За тази цел е проведен планиран експеримент. Отчитайки спецификата на двата процеса, по три управля-

ващи фактора, всеки на три нива на вариране, са приети в съответствие с Таблица 2. Това позволява един и същ оптимален композиционен от втори ред да се приложи за провеждане на планирания експеримент на двата последователни процеса.

Таблица 2. *Управляващи фактори и техните нива при струговане и ППД с тороидална деформираща ролка.*

Процес	***Управляващи фактори***	***Нива***							
		Натурални				***Кодирани***			
Струговане	*Подаване*	$f_c, mm/rev$	*0.05*	*0.1*	*0.15*	x_1	*-1*	*0*	*1*
	Скорост на рязане	$v_c\ , m/min$	*80*	*130*	*180*	x_2	*-1*	*0*	*1*
	Дълбочина на рязане	$a_c\ , mm$	*0.2*	*0.6*	*1*	x_3	*-1*	*0*	*1*
ППД	*Радиус на тороидалната повърхнина на ролката*	r, mm	*3*	*4*	*5*	x_1	*-1*	*0*	*1*
	Деформираща сила	F_b, N	*200*	*400*	*600*	x_2	*-1*	*0*	*1*
	Подаване	$f, mm/rev$	*0.03*	*0.07*	*0.11*	x_3	*-1*	*0*	*1*

2.3. Експериментални резултати

Резултатите за грапавостта R_a са изчислени като средно-аритметична стойност от три повторения в експериментална точка (Таблица 3).

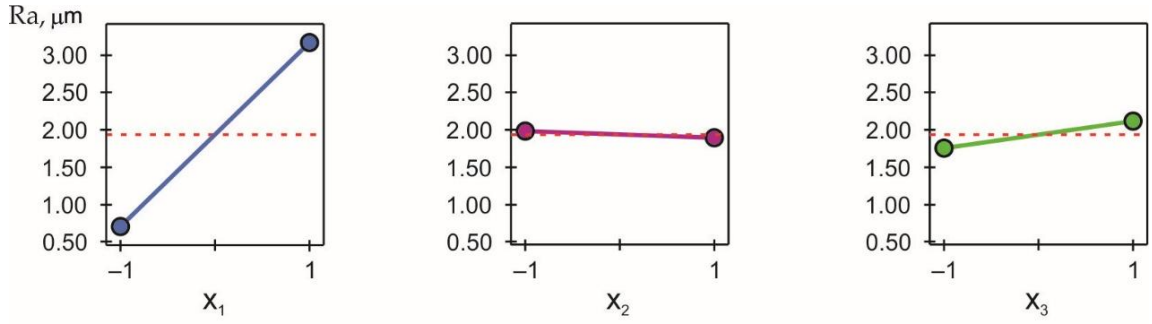
Таблица 3. *План на експеримента и резултати за получената грапавост*

№	x_1	x_2	x_3	***Грапавост R_a , μm***	
				Струговане	***ППД***
1	*-1*	*-1*	*-1*	*0.316*	*0.156*
2	*1*	*-1*	*-1*	*2.079*	*0.206*
3	*-1*	*1*	*-1*	*0.350*	*0.215*
4	*1*	*1*	*-1*	*2.085*	*0.087*
5	*-1*	*-1*	*1*	*0.680*	*0.250*
6	*1*	*-1*	*1*	*2.307*	*0.268*
7	*-1*	*1*	*1*	*0.683*	*0.274*
8	*1*	*1*	*1*	*2.199*	*0.119*
9	*-1*	*0*	*0*	*0.364*	*0.233*
10	*1*	*0*	*0*	*2.079*	*0.165*
11	*0*	*-1*	*0*	*1.028*	*0.203*
12	*0*	*1*	*0*	*0.954*	*0.202*
13	*0*	*0*	*-1*	*1.014*	*0.155*
14	*0*	*0*	*1*	*1.116*	*0.181*

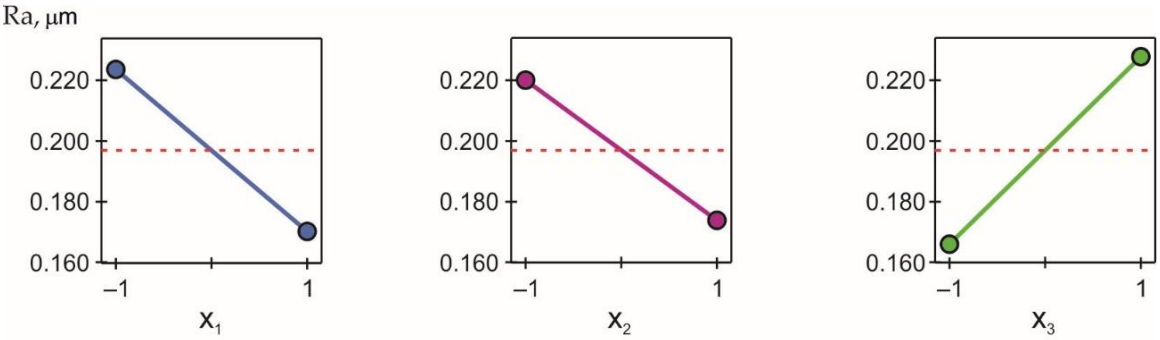
Експерименталните резултати са обработени чрез дисперсионен анализ (ANOVA), регресионен анализ и оптимизация, използвайки специализирания софтуер QStatLab, версия 6.1.1.3 [21].

Фиг. 4 показва резултатите от ANOVA в аспект на т.н главни ефекти, респ. значимостта на управляващите фактори при струговане върху R_a. Очаквано, подаването при струговане (x_1) оказва определящо значение върху грапавостта, като използването на минимално подаване минимизира грапавостта.

Фиг. 5 показва главните ефекти при ППД с тороидална деформираща ролка. И трите управляващи фактори при ППД оказват силно влияние върху параметъра R_a. Реализирането на ППД с максимални стойности на радиуса на тороидалната повърхнина на ролката (x_1) и деформиращата сила (x_2) минимизират грапавостта (фиг. 5). Обратна тенденция се наблюдава за влиянието на подаването (x_3) при ППД върху R_a.



Фиг. 4. *Резултати от ANOVA за главните ефекти при струговане*

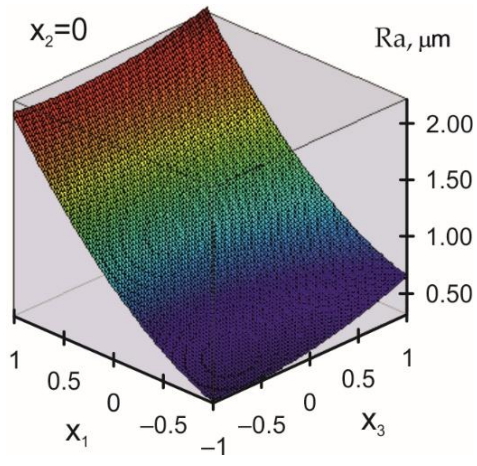


Фиг. 5. *Резултати от ANOVA за главните ефекти при ППД*

На база на проведения регресионен анализ е получен следните регресионен модел на целевата функция Y_{T,R_a} след струговане:

$$Y_{T,R_a} = 0.9701875 + 0.8356x_1 - 0.01393333x_2 + 0.1144x_3 + 0.25164583x_1^2 \quad (1)$$
$$+0.02097917x_2^2 + 0.09464583x_3^2 - 0.01729167x_1x_2 - 0.01779167x_2x_3 - 0.04454167x_{12}x_3$$

Влиянието на подаването и дълбочината на рязане като най-значими фактори при струговане, респ. влиянието на x_1 и x_3 (x_2 е на средно ниво) върху целевата функция, е показано на 3D графиката на фиг. 6.



Фиг. 6. *3D графика, визуализираща влиянието на подаването и дълбочината на рязане при струговане върху* R_a

На база на получения регресионен модел (1), използвайки генетичен алгоритъм [21] е проведена оптимизация на струговането по критерий минимална грапавост R_a. Получените оптимални стойности на управляващите фактори при струговане (Табл. 4) осигуряват минимална грапвост от $R_a = 0.315\ \mu m$. Зависимостта между факторите в кодиран вид x_i и в натурални координати $\tilde{x}_i$ е:

$$x_i = \left(\tilde{x}_i - \tilde{x}_{0,i}\right)/\lambda_i, \quad (2)$$

където:

$$\lambda_i = \left(\tilde{x}_{max,i} - \tilde{x}_{min,i}\right)/2, \quad (3)$$

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.

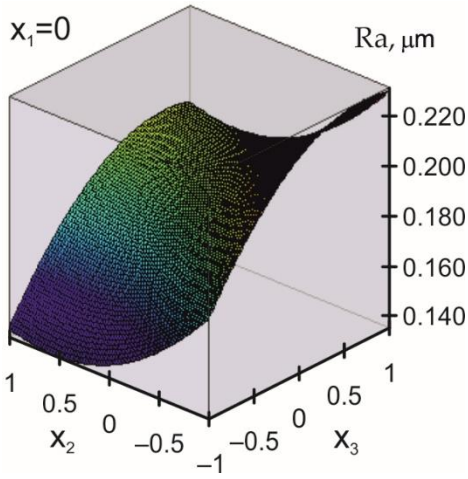
Таблица 4. *Оптимални стойности на параметрите при струговане*

Кодирани	*Натурални*
$x_1 = -1$	$f_c = 0.05\ mm/rev$
$x_2 = -0.4555$	$v_c = 107\ m/min$
$x_3 = -0.8826$	$a_c = 0.25\ mm$

Посочените оптимални стойности (табл. 4) са използвани при предварителното струговане на всички образци, обработени впоследствие чрез ППД. Регресионният модел на целевата функция Y_{B,R_a} при ППД е, както следва:

$$Y_{B,R_a} = 0.18631875 - 0.02831x_1 - 0.01861x_2 + 0.01268125x_1^2 + \quad (4)$$
$$+0.01618125x_2^2 - 0.01831875x_3^2 - 0.0438875x_1x_2$$

3D графика, визуализираща влиянието на деформиращата сила и подаването (x_2 и x_3) върху целевата функция при ППД, когато радиусът на тороидалната повърхнина на ролката е на средно ниво ($x_1 = 0$), е показана на фиг. 7.



Фиг. 7. *3D графика, визуализираща влиянието на деформиращата сила и подаването при ППД върху R_a*

На база на регресионния модел на грапавостта след ППД Y_{B,R_a} (2) е проведена оптимизация за минимизиране на R_a, използвайки генетичен алгоритъм [21]. След преобразуване на кодираните стойности в натурални (формула (2)) са определени оптималните стойности на технологичните параметри (управляващите фактори) на процеса ППД, показани в Таблица 5. Реализирането на ППД с оптималните параметри води до грапавост $R_a = 0.078\ \mu m$.

Таблица 5. *Оптимални стойности на параметрите при ППД*

Кодирани	*Натурални*
$x_1 = 1$	$r = 5\ mm$
$x_2 = 1$	$F_b = 600\ N$
$x_3 = -1$	$f = 0.03\ mm/rev$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено е експериментално изследване за моделиране и оптимизиране на получената грапавост след струговане и последващо ППД с тороидална деформираща ролка на цилиндрични образци от аустенитна хром-никелова стомана AISI 316Ti. Експерименталното изследване включва планиран експеримент, базиран върху оптимален композиционен от втори ред, дисперсионен анализ, регресионен анализ и оптимизация на двата последователни процеса по критерий минимална грапавост. Определените оптимални параметри след струговане осигуряват минимална грапавост от $R_a = 0.315\ \mu m$, а след ППД – $R_a = 0.078\ \mu m$.

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] Global Stainless Steel Market Outlook 2025–2034: Asia Builds the Future of Stainless Steel. Source: Towards Chemical and Materials via Yahoo Finance, October 2025.

[2] Astankhov V.P. Surface Integrity – Definition and Inportance in Functional Performance (Ed., J. Paulo), Surface Integrity in Mashining, Springer – Verlag London Limited, 2010 e-ISBN 978-1-84-882-974-2

[3] Dwivedi, D.K. Surface Engineering. In Enhancing Life of Tribological Components; Springer: New Delhi, India, 2018; ISBN 978–81–322–3779–2.

[4] Kuznetsov, V.; Tatarintsev, I.; Voropaev, V.; Skorobogatov, A. Surface Nanocrystallization and Improvement of the Mechanical and Tribological Properties of AISI 304 Steel Using Multi-Pass Nanostructuring Burnishing. Materials 2024, 17, 5656.

[5] Argirov, Y.; Maximov, J.; Duncheva, G.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Mechkarova, T. Evolution of Surface Integrity Characteristics and Mechanical Behavior of Diamond Burnished and Turned AISI 304 Steel Specimens After Prolonged Exposure to Natural Seawater. Coatings 2025, 15, 31.

[6] Maximov, J.; Duncheva, G.; Ichkova, M.; Anastasov, K. Optimal Diamond Burnishing of Chromium Nickel Austenitic Stainless Steels Based on the Finishing Process Surface Integrity–Operating Behavior Correlations. Metals 2025, 15, 574.

[7] Varga, G.; Markopoulos, A.P. Tribological Aspects of Slide Friction Diamond Burnishing Process. Materials 2025, 18, 4500.

[8] Korzynski M.; Dudek K.; Bartosz K.; Kocurek P. Equilibrium surface texture of valve stems and burnishing method to obtain it. Tribology International 2018 124 195-199.

[9] Skoczylas, A.; Zaleski, K.; Matuszak, J.; Ciecielag, K.; Zaleski, R.; Gorgol, M. Influence of Slide Burnishing Parameters on the Surface Layer Properties of Stainless Steel and Mean Positron Lifetime. Materials 2022, 15, 8131.

[10] Duncheva, G, Maximov, J, Anchev, A, Dunchev, V, Argirov, Y, Velkov, S. Modeling and Optimization of Surface Integrity and Sliding Wear Resistance of Diamond-Burnished Holes in Austenitic Stainless Steel Cylinder Lines. Machines 2023 11 872.

[11] Dyl, T.; Rydz, D.; Szarek, A.; Stradomski, G.; Fik, J.; Opydo, M. The Influence of Slide Burnishing on the Technological Quality of X2CrNiMo17-12-2 Steel. Materials 2024, 17, 3403.

[12] Nikitin I.; Altenberger I. Comparison of the fatigue behavior and residual stress stability of laser-shock peened and deep rolled austenitic stainless steel AISI 304 in the temperature range 25–600 ◦C. Materials Science and Engineering A 465 (2007) 176–182.

[13] Yilmaz, H.; Sadeler, R. Impact wear behavior of ball burnished 316L stainless steel. Surface & Coatings Technology 2019 363 369-378.

[14] Velázquez-Corral, E.; Wagner, V.; Jerez-Mesa, R.; Lluma, J.; Travieso-Rodriguez, J.A.; Dessein, G. Analysis of Ultrasonic Vibration Assisted Ball Burnishing Process on the Tribological Behavior of AISI 316L Cylindrical Specimens. Materials 2023, 16, 5595.

[15] Shi, YL., Shen, XH., Xu, GF. et al. Surface integrity enhancement of austenitic stainless steel treated by ultrasonic burnishing with two burnishing tips. Arch. Civ. Mech. Eng. 20, 79 (2020).

[16] Tugay, I.O.; Hosseinzadeh, A.; Yapici, G.G. Hardness and wear resistance of roller burnished 316L stainless steel. Materials Today: Proceedings 2021 47 2405-2409.

[17] Ünal, E., Albar, H.B. & Karaca, F. Effect of Roller Burnishing on the Mechanical Behavior and Surface Quality of AISI 316 Stainless Steels. J. of Materi Eng and Perform 2026 35 1266–1275.

[18] Maximov, J.; Duncheva, G.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Anastasov, K.; Daskalova, P. Effect of Roller Burnishing and Slide Roller Burnishing on Surface Integrity of AISI 316 Steel: Theoretical and Experimental Comparative Analysis. Machines 2024, 12, 51.

[19] Maximov, J.T.; Duncheva, G.V.; Anchev, A.P.; Ganev, N.; Amudjev, I.M.; Dunchev, V.P. Effect of slide burnishing method on the surface integrity of AISI 316Ti chromium–nickel steel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2018, 40:194

[20] Sirtuli, L.J.; Stergiopoulou, X.; Norgren, S.; Bushlya, V. Impact of burnishing on surface integrity of AISI 316Ti stainless steel. Procedia CIRP 144 (2026) 126–131.

[21] Vuchkov, I.N.; Vuchkov, I.I. QStatLab Professional, version 6.1.1.3; Statistical Quality Control Software, User's Manual; QStatLab: Sofia, Bulgaria, 200.