

ВЛИЯНИЕ НА УСЛОВИЯТА НА ОХЛАЖДАНЕ И ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА РЯЗАНЕ ПРИ СТРУГОВАНЕ, ВЪРХУ ГРАПАВОСТТА НА ОБРАЗЦИ ОТ ТЕРМООБРАБОТЕНА СТОМАНА 42CRMO4

Калин Анастасов

¹*Технически университет – Габрово, Катедра Машиностроителна техника и технологии, България, e-mail: kalinanastasov@abv.bg*

EFFECT OF COOLING CONDITION AND TURNING GOVERNING FACTORS ON THE ROUGHNESS OF HEAT-TREATED 42CRMO4 STEEL SPECIMENS

Kalin Anastasov

¹*Technical University – Gabrovo, Department of Mechanical Engineering and Technologies
e-mail: kalinanastasov@abv.bg*

Abstract

This paper presents the results from a comprehensive study on the roughness obtained of the turned low-alloy 42CrMo4 steel specimens after preliminary heat treatment: normalization, quenching and high-temperature tempering. The influence of the cutting regime parameters under different cooling condition (flood lubrication, dry cutting, compressed air and cool generated by a vortex tube) was investigated. Roughness experimental models depending on the cutting regime parameters (speed, depth, and feed) under the used cooling conditions were obtained via second order optimal composition experimental design and regression analyses. Graphical visualizations of the models were presented. The comparison between the experimental results and those predicted by the models showed good agreement. The analyses conducted revealed that the feed has the strongest influence on the obtained roughness for all different process conditions, while the influence of the speed and depth of cut is negligible.

Keywords: low-alloy steel, cutting regime, dry cutting, theoretical models.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В процесите на механична обработка чрез рязане върху обработената повърхнина винаги остават следи от режещия инструмент, които представляват съвкупност от произволно разположени или подредени в определен ред падини и върхове, които формират повърхностната текстура на повърхнината, която се характеризира с голям брой параметри имащи функционално значение върху нейните свойства – коравина на контакт, якост на умора, кондуктивна топлопроводност, електропроводимост, триене и износване, мазане, механично уплътняване, корозия при умора, осигуряване

допуските при сглобяване и други. Върху нейното формиране влияят елементите на режима на рязане – скорост на рязане V_c , m/min (m/sek при шлифоване), подаването f , mm/rev и дълбочината на рязане a_p , mm. Също така съществено влияние оказва вида на обработвания материал с неговите физико-механични характеристики, твърдостта технологията на получаване на изходната заготовка, металоурежещата машина с нейната стабилност, режещия инструмент с неговата геометрия и не на последно място условията на протичане на процеса на рязане, а именно мазането и охлаждането в зоната. Целта на използването на мазане и

охлаждане в зоната на рязане е да се намали генерираната топлина, подобряване на качеството на обработената повърхнина, намаляване на износването на режещия инструмент, отмиване на стружките и други. При класическата обработка чрез рязане, с малки изключения се прилага мажещо охлаждаща течност (МОТ). Приложението на МОТ, наред с решаването на проблемите, предизвиква нови такива, а именно технико-икономически, екологични и здравни. Решаването на проблемите предизвикани от широкото приложение на МОТ без това да окаже влияние на процесите на рязане, представлява стъпка към постигане на устойчиви производствени процеси. За постигане на тази устойчивост, трите основни измерения – екологично, икономическо и социално трябва да се разглеждат едновременно и във връзка едно с друго [8]. В последните години в механичната обработка се изследват и прилагат полусухите и сухи обработки чрез рязане. Основното им приложение при обработка на инструментални стомани е върху предварително термообработени (закалени) материали до твърдост HRC 58 – 62, високи скорости на рязане и малки дълбочини и подавания. Интерес представлява обработването в условията на полусухо и сухо рязане на конструкционни и нисколегирани стомани в термообработено състояние, при средни и ниски стойности на V_C , f и a_p в такива условия, поради широкото им приложение в машиностроенето и обработването им на конвенционални металорежещи машини и инструменти. Изследванията са проведени върху заготовки от нисколегирана стомана 42CrMo4, в състояние след термообработка – подобряване.

Нисколегираната стомана 42CrMo4, принадлежи в групата стомани, които се експлоатират в състояние след термична обработка. След нея стоманата получава най-добро съчетание от механични свойства – якост, пластичност, удърна жилавост [4]. Стомана 42CrMo4 е широко използвана нисколе-

гирана стомана съдържаща хром ($0,9 \div 1,2$ %) и молибден ($0,15 \div 0,30$ %), предназначена за работа в условия на високо налягане и повишена температура (до 550°C) за различни приложения като: елементи за задвижване на автомобили, болтови възли, ковани части, бронирани материали, в отраслите на енергетиката, нефт и газ и др.[9,10]. Причината поради която тази комбинация от легиращи елементи работи толкова добре, се дължи на техните комплексни свойства. твърдост в дълбочина на изделията [9,10].

Цел на настоящата работа е изследване и моделиране на влиянието на условията на процеса на рязане на елементите на режима върху “2D” параметъра на повърхностната текстура на повърхнината R_a , оказващ влияние върху функционалните свойства на повърхностите на конструкционните елементи на заготовки от нисколегирана стомана 42CrMo4, в състояние след термообработка - подобряване.

2. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

2.1 Материал

Използваният материал е горещовалцована стомана, марка 42CrMo4 с диаметър $\Phi 25\text{mm}$, с химичен състав показан в табл.1. За изследване на химичния състав на материала е използван спектрометър *BELEG LAB 3000s*, представен на фигура 1.

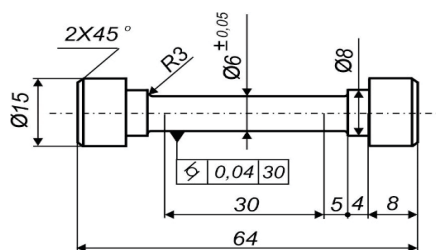
Табл. 1. Химичен състав на стомана 42CrMo4

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
0.47	0.21	0.86	0.11	1.1	0.19	0.06	0.005

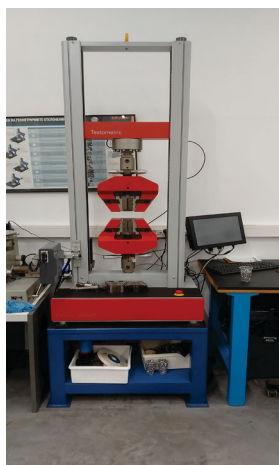


Фиг. 1. Спектрометър BELEG LAB 3000s

Физико-механични характеристики – проведено е изпитание на 3 броя стандартни образци за изпитване на статичен опън в състояние на доставка на материала. След изпитанието са определени якостта на опън, граница на провлачване и относителното удължение на материала. Формата и размерите на образците са представени на фигура 2. Изпитанието е проведено на машина *TESTOMETRIC M500-100AT*, представена на фигура 3.



Фиг. 2. Образец за изпитване на статичен опън



Фиг. 3. Машина *TESTOMETRIC M500-100AT*

Резултатите след изпитанието на статичен опън на заготовките в състояние на доставка са:

- Якост на опън – $R_{p0.2} = 710 \text{ MPa}$;
- Граница на провлачване – $R_m = 753 \text{ MPa}$;
- Относително удължение – $A = 10.7\%$;

Твърдостта HBW е измерена съгласно EN ISO 6506 с помощта на уред за изпитване на твърдост по метода на Бринел с диаметър на индентора $D = 2,5 \text{ mm}$, натоварване $F = 62,5 \text{ kg}$ и време на за-

държане 15 s. Изпитанието е проведено на твърдомер марка *INNOVATEST*.

Резултатите след изпитване на твърдост са – $\text{HBW} = 224 \text{ kgf/mm}^2$.



Фиг. 4. Твърдомер *INNOVATEST*

2.2 Термична обработка на заготовките

Заготовките са подложени на комплексна термична обработка, данните за която включващи вид, инертна среда, температура и охлаждаща среда са представени в табл. 2.

Времето за нагряване зависи от максималната температура, до която се нагрява стоманата, химичния ѝ състав, сечението на образците и вида на нагревателното устройство. Времето на термична обработка е сума от времето за нагряване до дадената температура и времето на задържане, за протичане на необходимите фазови и структурни превръщания, и хомогенизация на аустенита по въглерод и легиращи елементи.

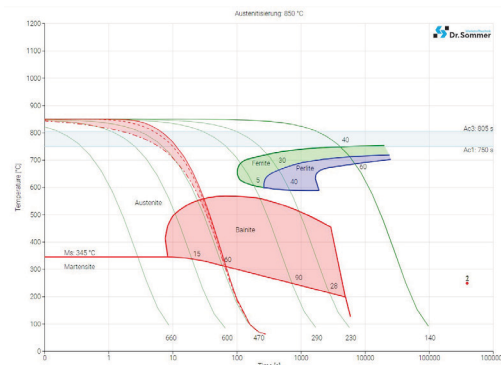
Термичната обработка е проведена във вакуумна пещ HTS, представена на фиг. 5. Параметрите на режима са проектирани и симулирани с помощта на софтуер [6]. Графиките от симулациите са представени на фиг.6 и фиг. 7. На база на симулациите е създадена управляваща програма на съоръжението, представена на фиг. 8.

След термичната обработка са проведени изпитания на физико-механичните характеристики и е определена твърдостта. Данните са:

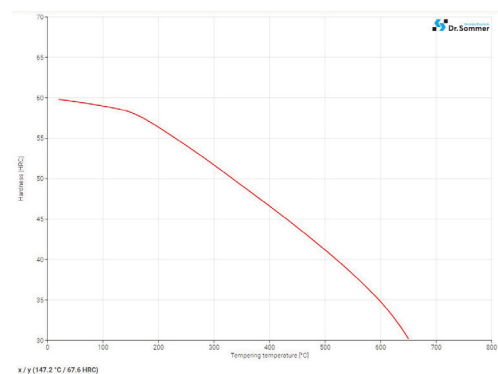
- Якост на опън – $R_{p0.2} = 962 \text{ MPa}$;
- Граница на провлачване – $R_m = 1051 \text{ MPa}$;
- Относително удължение - $A = 11,8\%$;
- Твърдост - $\text{HBW} = 213 \text{ kgf/mm}^2$.



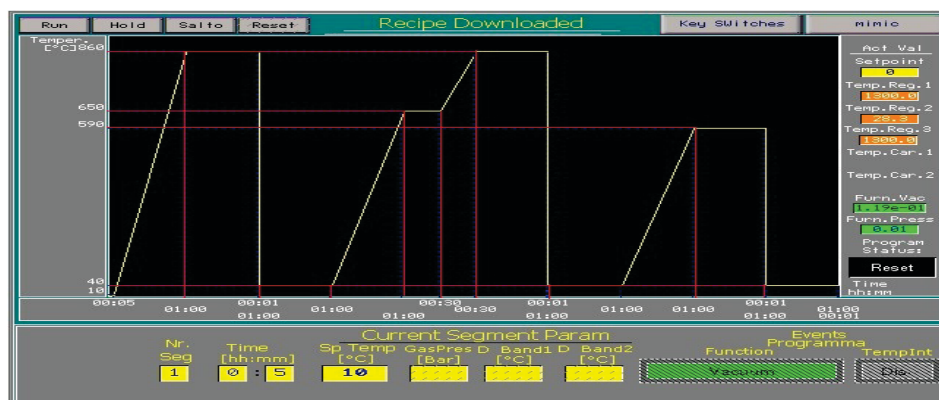
Фиг. 5. Вакуумна пещ HTS



Фиг. 6. Криви на закаляване



Фиг. 7. Крива на отвярщане



Фиг. 8. Управляваща програма на съоръжението за термична обработка

Табл. 2. Нива на управляемите фактори в кодирани и натурални стойности

Вид на термичната обработка	Температура °C	Задържане, min	Инертна среда	Охлаждаща среда
Нормализация	860	60	N ₂ +Вакуум	
Закаляване	860	60	N ₂ + Вакуум	N ₂ 10bar
Отвярщане	590	60	N ₂	

2.3 Експериментален план

2.3.1 План на провеждане на експеримента, условия на протичане и елементи на режима на рязане

За изследване и моделиране влияние-то на елементите на режима на рязане и условията при които протича процеса е планиран и проведен експеримент с три управляеми фактора – скорост на рязане V_C , m/min , подаване f , mm/rev и дълбочина на рязане a_p , mm .

Условията на протичане на процеса са: конвенционално мазане с МОТ (процес 1), сухо мазане (процес 2), сухо мазане с подаване на сгъстен въздух в зоната на рязане (процес 3), сухо мазане с подаване на сгъстен охладен въздух в зоната на рязане посредством системата „Студена дюза“ (процес 4).

Експеримента е проведен като три преходна обработка с два груби и един чист преход, при еднакви други условия.

Режими на рязане при грубите преходи: скорост на рязане $V_C=150$, m/min , подаване $f=0,1$, mm/rev ,

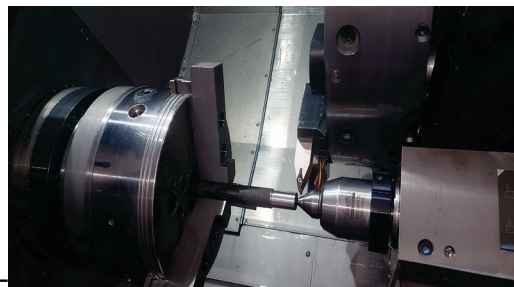
дълбочина на рязане $a_p=0,5$, mm и дължина на обработената повърхнина $L_p = 80mm$.

Чистовата обработка, осигуряваща изследваната грапавост на обработената повърхнина е осигурена при следните параметри на елементите на режима на рязане: скорост на рязане $V_C=130 - 180$, m/min , подаване $f=0,05 - 0,2$, mm/rev , дълбочина на рязане $a_p=0,1 - 1$, mm и дължина на обработената повърхнина $L_p = 80mm$. нивата на

Табл. 3. Нива на управляемите фактори в кодирани и натурални стойности

Управляеми фактори		Нива на факторите		
Кодирани	Натурални	-1	0	+1
X_1	f , mm/rev	0,05	0,125	0,2
X_2	V_C , m/min	130	155	180
X_3	a_p , mm	0,1	0,55	1

Схемата на опитната постановка е представена на фиг. 9.



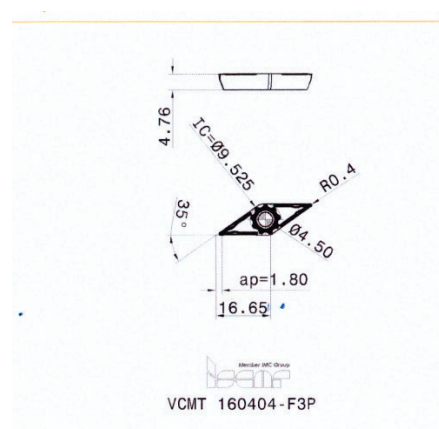
Фиг. 9. Схема на опитната постановка

2.3.2 Режещи инструменти

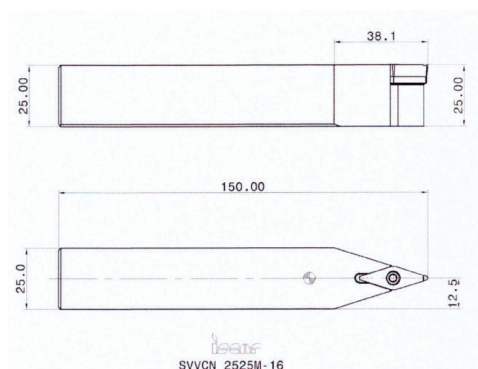
На база на обработваемия материал с неговия вид – нисколегирана стомана, състояние – термообработка подобряване с твърдост, е прието обработката на опитните образци да се извърши с металокерамични сменяеми пластини *VCMT 160404-F3P* на фирма ISCAR [20], установени в призматичен държач *SVVCN 2525M-16* [7], като са осигурени следните геометрични параметри:

- главен установъчен ъгъл $\kappa_p = 72,5^\circ$;
- спомагателен установъчен ъгъл $\kappa_p' = 72,5^\circ$;
- главен заден ъгъл $\alpha_0 = 7^\circ$;
- радиус при върха на инструмента $r_e = 0.4mm$.

Пластината и държача са представени на фиг. 10 и фиг. 11.



Фиг. 10. Пластина VCMT 160404-F3P



Фиг. 11. Държач SVVCN 2525M-16

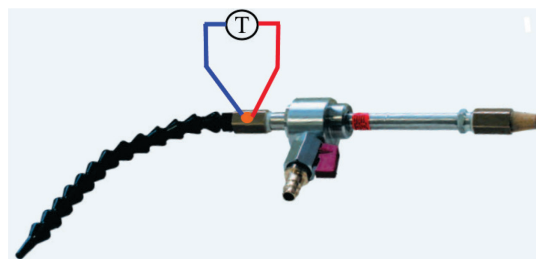
2.3.3 Машина и приспособления

Експериментите са осъществени на струг с ЦПУ, марка *INDEX Traub, mod. TNA 400*.

Приспособленията използвани при експериментите са:

- Въртящ център;
- Патронник хидравличен;
- Устройство „Студена дюза“ необходимо за създаване на отрицателна

температура в зоната на рязане, представена е на фиг.12.



Фиг. 12. Устройство „Студена дюза“ общ вид

Работата на дюзата за студен въздух се основава на принципа на „вихровите тръби“. Входящият въздух под налягане се разделя на студен и горещ въздушен поток. Без необходимост от електромеханични системи, или подвижни компоненти дюзата за студен въздух може да генерира температура на изходящия въздух от -40°C .

Табл. 4. План на експеримента и експериментални данни

№	X ₁	X ₂	X ₃	f, mm/rev	V _c , m/min	a _p , mm	Ra ₁ , μm	Ra ₂ , μm	Ra ₃ , μm	Ra ₄ , μm
1.	-1	-1	-1	0.05	130	0.1	0.188	0.208	0.356	0.519
2.	+1	-1	-1	0.2	130	0.1	2.019	1.819	1.637	1.540
3.	-1	+1	-1	0.05	180	0.1	0.435	0.345	0.266	0.575
4.	+1	+1	-1	0.2	180	0.1	1.836	1.927	1.671	1.838
5.	-1	-1	+1	0.05	130	1	0.198	0.396	0.218	0.345
6.	+1	-1	+1	0.2	130	1	1.823	1.785	1.659	1.602
7.	-1	+1	+1	0.05	180	1	0.305	0.659	0.208	0.794
8.	+1	+1	+1	0.2	180	1	2.013	1.699	1.861	1.644
9.	-1	0	0	0.05	155	0.55	0.388	0.462	0.304	0.249
10.	+1	0	0	0.2	155	0.55	1.975	1.858	2.056	2.153
11.	0	-1	0	0.125	130	0.55	1.149	1.121	1.128	0.819
12.	0	+1	0	0.125	180	0.55	0.906	1.001	0.937	1.014
13.	0	0	-1	0.125	155	0.1	1.036	0.747	0.803	1.080
14.	0	0	+1	0.125	155	1	1.123	0.837	1.272	1.328
15.	0	0	0	0.125	155	0.55	1.247	0.707	0.851	1.569

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ И КОМЕНТАРИ

Резултатите от проведените експерименти са обработени с програмния продукт *QstatLab* и са получени регресионни модели за грапавостта на обработената повърхнина при различните условия в зоната на рязане.

3.1 Регресионни модели на грапавостта при:

- обработка с използване на МОТ (Процес 1)

$$Ra_1 = 1.138 + 0.815f + 0.012V_c + 0.005a_p + 0.071f^2 - 0.083V_c^2 - 0.031a_p^2 - 0.043f \cdot V_c + 0.029V_c \cdot a_p + 0.013f \cdot a_p \quad (1)$$

- обработка при сухо мазане (Процес 2)

$$Ra_2 = 0.883 + 0.702f + 0.030V_c + 0.033a_p + 0.233f^2 + 0.134V_c^2 - 0.135a_p^2 - 0.047f \cdot V_c - 0.009V_c \cdot a_p - 0.096f \cdot a_p \quad (2)$$

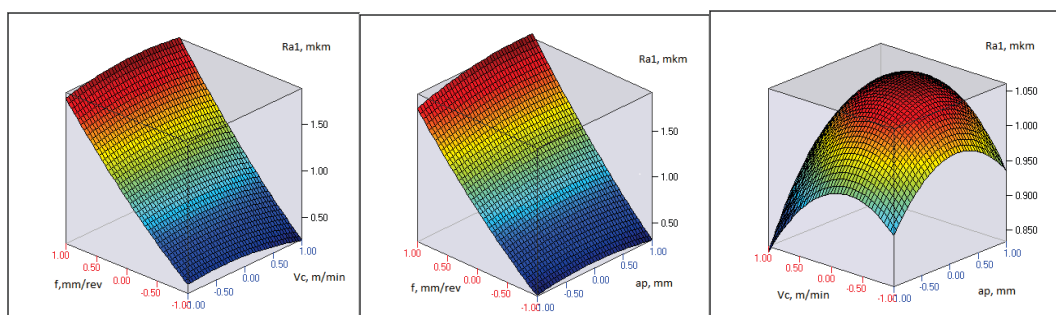
- обработка при сухо мазане с подаване на сгъстен въздух (Процес 3)

$$Ra_3 = 1.051 + 0.753f - 0.006V_c + 0.049a_p + 0.079f^2 - 0.069V_c^2 - 0.064a_p^2 + 0.042f \cdot V_c + 0.031V_c \cdot a_p + 0.051f \cdot a_p \quad (3)$$

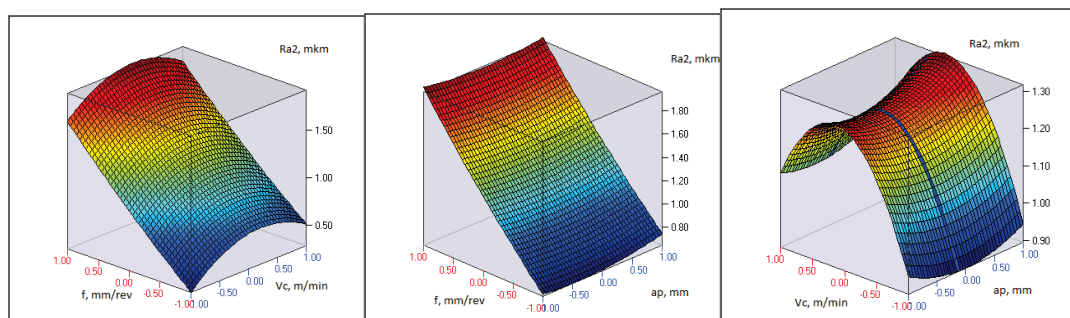
- обработка при сухо мазане с подаване на сгъстен охладен въздух (Процес 4)

$$Ra_4 = 1.241 + 0.629f + 0.104V_c + 0.016a_p + 0.043f^2 - 0.242V_c^2 + 0.046a_p^2 - 0.021f \cdot V_c + 0.017V_c \cdot a_p - 0.022f \cdot a_p \quad (4)$$

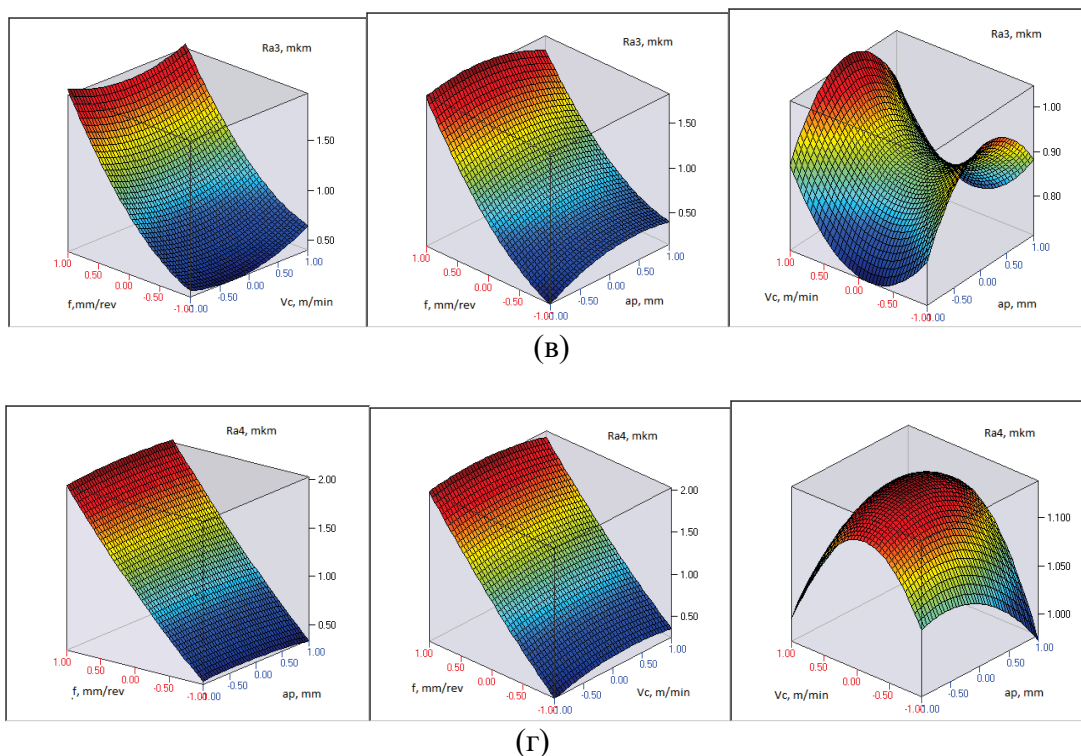
Графична интерпретация на получените резултати е представена на фиг. 13.



(а)



(б)



Фиг. 13. Графични зависимости на грапавостта на обработените повърхнини в зависимост от елементите на режима на рязане: скорост на рязане V_C , m/min , подаване f , mm/rev , дълбочина на рязане a_p , mm (а – за процес 1, б – за процес 2, в – за процес 3, г – за процес 4)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено е експериментално изследване с цел изследване и моделиране на влиянието на условията на процеса на рязане и елементите на режима върху “2D” параметъра на повърхностната текстура на повърхнината R_a , оказващ влияние върху функционалните свойства на повърхностите на конструкционните елементи на заготовки от нисколегирана стомана 42CrMo4, в състояние след термообработка - подобряване. Получени са теоретико-експериментални модели за грапавостта, отразяващи комплексното влияние на условията на процеса и елементите на режима на рязане: скорост на рязане V_C , m/min , подаване f , mm/rev , дълбочина на рязане a_p , mm . Експерименталните резултати могат да бъдат обобщени в следните основни изводи:

- Проведеният дисперсионен анализ показва, че и при четирите различни условия на рязане, доминиращо влияние върху грапавостта на обработената повърхнина има подаването f , следвано от

скоростта на рязане V_C и най-слабо влияние оказва дълбочината на рязане a_p .

- Измерванията показват, че минимална грапавост е постигната при следните комбинации от елементите на режима на рязане:

- За Процес 1, при : скорост на рязане $V_C=130$, m/min , подаване $f=0,05$, mm/rev , дълбочина на рязане $a_p=1$, mm , е достигната $Ra = 0.188\mu m$.

- За Процес 2, при : скорост на рязане $V_C=130$, m/min , подаване $f=0,05$, mm/rev , дълбочина на рязане $a_p=0.1$, mm , е достигната $Ra = 0.208\mu m$.

- За Процес 3, при : скорост на рязане $V_C=180$, m/min , подаване $f=0,05$, mm/rev , дълбочина на рязане $a_p=1$, mm , е достигната $Ra = 0.208\mu m$.

- За Процес 4, при : скорост на рязане $V_C=155$, m/min , подаване $f=0,05$, mm/rev , дълбочина на рязане $a_p=0.55$, mm , е достигната $Ra = 0.249\mu m$.

- Резултатите показват съизмерима грапавост на обработената повърхнина при различните условия в зоната на рязане, което показва приложимост при

обработването без използване на МОТ на нисколегирана стомана 42CrMo4, в състояние след термообработка – подбраване.

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] ASME B46.1-2009, Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay), An American National Standard, 2009.
- [2] Astankhov V.P. (2010) Surface Integrity – Definition and Importance in Functional Performance (Ed., J. Paulo), Surface Integrity in Machining, Springer – Verlag London Limited, e-ISBN 978-1-84-882-974-2.
- [3] EN ISO 6506.
- [4] Mirosław Szala, Grzegorz Winiarski, Łukasz Wójcik, Tomasz Bulzak. Effect of Annealing Time and Temperature Parameters on the Microstructure, Hardness, and Strain-Hardening Coefficients of 42CrMo4 Steel. *Materials* 2020, 13, 2022; doi:10.3390/ma13092022, www.mdpi.com/journal/materials.
- [5] Nabil M., O. Taha, T. Elbitar, I. El Mahallawi. Thermomechanical processing of 42CrMoS4 steel. *International heat Treatment and Surface Engineering IHSE* 2010.vol.4 (2). DOI - 10.1179/174951410X12646901266726, pp. 87-92.
- [6] <https://info@werkstofftechnik.com>
- [7] <https://www.iscar.com/eCatalog/>
- [8] Duncheva G, Surface integrity prez prizmata na surface engineering. Universitetsko izdatelstvo, “Vasil Aprilov”, Gabrovo, 2023, ISBN: 978-954-683-691-5.
- [9] Maximov J., Dunchev V., Todorov V. Metaloznanie i termichna obrabotka. Chast I: Metaloznanie. Universitetsko izdatelstvo Vasil Aprilov. Gabrovo. 2024. ISBN 978-954-683-696-0.
- [10] Maximov J., Anchev A., Todorov V. Metaloznanie i termichna obrabotka. Chast II: Metaloznanie. Universitetsko izdatelstvo Vasil Aprilov. Gabrovo. 2024. ISBN 978-954-683-696-0.