

**ISTRAŽIVANJE KVALITETA FUNKCIONALNIH POVRŠINA
BESKONTAKTNOM METODOM PRI STRUGANJU TOPLO
KOVANOG ČELIKA 41Cr4**

**THE RESEARCH OF FUNCTIONAL SURFACES ROUGHNESS
QUALITY BY MEANS OF THE NONCONTACT METHOD IN
TURNING OF THE WARM FORGED STEEL 41Cr4**

Ibrahim Plančić, dipl.inž.maš.
Mašinski fakultet u Zenici
Univerzitet u Zenici, Zenica

Dino Ključanin, dipl.inž.maš.
Mašinski fakultet u Zenici
Univerzitet u Zenici, Zenica

Edin Begović, dipl.inž.maš.
Mašinski fakultet u Zenici
Univerzitet u Zenici, Zenica

Omer Beganović, dipl.inž.met.
Institut Kemal Kapetanović
Univerzitet u Zenici, Zenica

REZIME

U radu je predstavljen kombinovani uticaj obrade slobodnim kovanjem kao prethodne obrade deformisanjem i obrade struganjem kao finalne obrade na kvalitet funkcionalnih površina finalnih izradaka, kroz sekvencijalni redosljed izvođenja pri obradi čelika 41Cr4. Korištenjem metodologije planiranog eksperimenta uspostavljena je funkcionalna veza između parametara predmetnih obrada i kvaliteta funkcionalnih površina izraženog preko hrapavosti obrađene površine, kao jednog od osnovnih elemenata integriteta površine i pokazatelja obradljivosti čeličnih materijala. Matematičko modeliranje procesa izvršeno je korištenjem Box-Behnken-ovog plana eskperimenta.

Ključne riječi: slobodno kovanje, obrada struganjem, hrapavost funkcionalnih površina

ABSTRACT

In this paper, the combined effect of the free forging as the preceding forming technology and turning as the end machining technology on the final product functional surface quality in terms of successive order for steel 41Cr4 is presented. The functional correlation between parameters of the aforementioned technologies and surface roughness as one of the surface integrity elementary parameters and machinability indicators of steel materials is investigated by means of the design of experiment methodology. Mathematical modeling of the process is performed according to Box-Behnken experimental design.

Keywords: free-forging, turning, roughness of the functional surfaces

1. UVOD

Na oblikovanje i proizvodnju radnih predmeta, odnosno proizvoda određenog kvaliteta u metaloprerađivačkoj industriji utiče značajan broj uticajnih faktora. Isti se uglavnom

identifikuju kroz projektovanje odgovarajuće tehnologije izrade, te izbor ili konstrukciju alata i mašina za izradu dijelova prema projektovanoj tehnologiji. Pri tome je osnovni cilj savremene proizvodnje dijelova od metala iznalaženje pouzdanih alata i metodologija kojima bi se mogli sagledati kako pojedinačni tako i međusobni uticaji svih proizvodnih parametara na kvalitet finalnih izradaka. Jako važna mjerljiva karakteristika kvaliteta finalnih proizvoda u metalnoj industriji je hrapavost obrađene površine koja je predmet ovoga rada. Hrapavost je elementarni parametar integriteta obrađene površine, a time i kvaliteta samog proizvoda.

Hrapavost materijala je prisutna bez obzira o kojoj se metodi obrade u okviru proizvodnih procesa govori. Sve nastale funkcionalne površine proizvoda su rezultat primjene određene proizvodne tehnologije. Pri tome je najčešći slučaj da se one oblikuju primjenom više proizvodnih tehnologija izrade, a reprezentativne tehnološke varijante izrade i oblikovanja najvećeg broja metalnih proizvoda su svakako obrada rezanjem i obrada materijala deformisanjem.

Navedene proizvodne tehnologije obuhvataju široku lepezu različitih tehnoloških varijanti proizvodnih postupaka izrade dijelova. U okviru ovog rada predmetom istraživanja je tretiran kvalitet proizvoda izražen preko hrapavosti njegove površine koja je oblikovana naknadnom mašinskom obradom struganjem kao reprezentativnim postupkom obrade skidanjem čestica i postupkom slobodnog kovanja kao reprezentativnim postupkom obrade deformisanjem. Prethodna obrada materijala deformisanjem ima uticaj na obradljivost materijala [1]. Kvalitet obrađene površine je osnovni kriterijum obradljivosti materijala [2]. Čelični materijali su najzastupljeniji od svih metalnih materijala i njihovo ispitivanje je od velikog značaja. Pauliuk et al. ističu porast upotrebe čeličnih materijala i to naročito kod zemalja koje se nalaze u privrednom usponu [3]. Ispitivanje obradljivosti kovanih materijala su od značaja posmatrajući izazove koji se postavljaju pri njihovoj obradi. Ovo je izraženo naročito kada se govori o mašinskoj obradi i kvalitativnim karakteristikama materijala kao što je hrapavost čeličnih materijala [4].

Mjerenje hrapavosti se često vrši kontaktnim metodama putem odgovarajućeg profilometra. Ovaj tip mjerenja zasniva se na direktnom kontaktu sa mjerenom površinom, pri čemu se prikupljanje podataka vrši mehaničkim putem. Kontaktno mjerenje hrapavosti uspješno se primjenjuje pri mašinskoj obradi struganjem [5]. U određenim slučajevima, primjena kontaktnih metoda postaje nepraktična, naročito kada se radi o ograničenjima u pogledu vremena mjerenja i pristupa mjernim površinama. Pored nedostataka kontaktnog mjerenja u pogledu obezbjeđivanja rada profilometra bez spoljnjih vibracija, jako dobrog pristupa mjernim površinama i njihovog neminovnog oštećenja u toku rada, a naročito izraženog kod mekih materijala, ovaj ovaj tip mjerenja pruža jako dobre rezultate mjerenja. Potrebe za bržim prikupljanjem podataka i mjerenjem nepristupačnih površinama u radnom okruženju koje često može biti izloženo različitim tipovima vibracija uslovljava korištenje optičkih - beskontaktnih metoda mjerenja. Beskontaktno mjerenje pokazuje jako dobre rezultate pri mjerenju površina obrađenih postupkom struganja i uspješno se može primjeniti na cilindričnim površinama proizvoda dobijenim struganjem [6]. Kako se ispitivanja kvaliteta površina vrše uglavnom u okviru jedne proizvodne tehnologije na osnovu rezultata određenog postupka, od značaja je sagledati primarni dio proizvodnog procesa u jednoj cjelini.

1.1. Specifičnosti obrade deformisanjem postupkom slobodnog kovanja

Obradom deformisanjem mogu se postići proizvodi sa veoma dobrim kvalitetom obrađene površine, naročito kada se radi o obradi u hladnom stanju. Međutim, obrada u vrućem i toplom stanju predstavlja izazov u pogledu kvaliteta obrađene površine, a generalno se odlikuje grubljom površinom, odnosno lošijim kvalitetom obrađene površine i većim dimenzionim tolerancijama. Reprezentativni postupak obrade u vrućem stanju je slobodno kovanje koje se obavlja na kovačkim mašinama uz pomoć univerzalnih, jednostavnih alata, najčešće

višestrukim ponavljanjem operacije sabijanja između ravnih površina. Pri tome je širenje i izduživanje materijala u svim horizontalnim pravcima slobodno između radnih površina alata usljed čega se dobijaju dijelovi sa znatno većim dimenzionim odstupanjima i grubljim površinama. Međutim, u odnosu na druge tehnologije prerade metala, kovanje nema alternativu jer se istim obezbjeđuje mogućnost izrade relativno kompliciranijih dijelova sa znatno boljim mehaničkim i strukturnim osobinama, dobrom žilavošću i dinamičkom izdržljivošću. Stoga se funkcionalne površine materijala koji je prethodno oblikovan obradom slobodnim kovanjem, naknadno obrađuje tehnologijom obrade skidanjem strugotine. Potreban kvalitet otkovaka prilikom slobodnog kovanja osigurava se pravilnim izborom i odabirom temperature kovanja i stepena prokivanja, odnosno stepena deformisanja kao osnovnih kovačkih parametara.

1.2. Osnovne karakteristike obrade rezanjem postupkom struganja

Veliki broj proizvoda koji se dobija postupkom slobodnog kovanja je osnosimetričan i konstruktivni zahtjevi su, sa tehnološkog stanovišta, u velikoj mjeri ostvarivi obradom struganjem, koja je predmet ovog rada. Obrada struganjem primjenjena u okviru eksperimentalnih istraživanja je ortogonalni tip obrade. Pri obradi struganjem potrebno je obratiti pažnju na elementarne parametre režima obrade, pri čemu se razlikuje:

- brzina rezanja
- posmak
- dubina.

2. HRAPAVOST OBRADENE POVRŠINE

Kroz ovaj rad se nastojalo ukazati na mogućnost uticanja na krajnju karakteristiku proizvoda, a koja je od velikog značaja. Posmatrajući pokazatelje obradljivosti tj. kriterijume obradljivosti materijala, hrapavost je svakako jedan od najvažnijih. Hrapavost površine ima direktan uticaj na: dinamičku izdržljivost, pojavu trenja, kontaktno trošenje, pojavu korozije i vizuelni izgled proizvoda.

Jedan od ciljeva koji se nastoji postići, bez obzira o kojoj se tehnologiji obrade materijala govori, jeste postizanje što boljeg kvaliteta obrađene površine, odnosno posmatrajući hrapavost površine njeno smanjenje. Hrapavost površine u ovom radu okarakterisana je kroz parametar visine profila neravnina „ Ra “. Ovaj parametar predstavlja srednje aritmetičko odstupanje profila visine neravnina na posmatranoj referentnoj dužini „ l “ i prikazan je izrazom (1).

$$Ra = \frac{1}{m} \int_0^l R_i(x) dx, \quad (1)$$

gdje su:

m - posmatrani broj profila neravnina

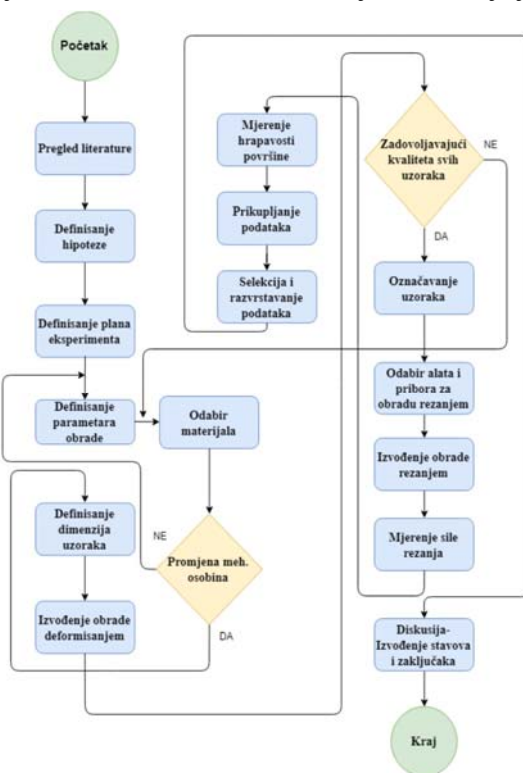
R_i - visina posmatrane neravnine profila

3. EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

U cilju sprovođenja kompletnog istraživačkog zadatka definisan je tok naučno – istraživačkih aktivnosti prikazan algoritmom na slici 1. Tok aktivnosti je podijeljen u četiri funkcionalne cjeline koje su se odnosile na uvodni dio tretirane problematike, aktivnosti u oblasti obrade deformisanjem usmjerene na izradu priprema za obradu rezanjem, aktivnosti u oblasti obrade skidanjem strugotine, odnosno obradu struganjem prethodno izrađenih priprema za dobijanje boljeg kvaliteta površine i na završni dio koji je obuhvatao prikupljanje mjernih rezultata, njihovu selekciju i razvrstavanje, te diskusiju i izvođenje odgovarajućih stavova i zaključaka.

U toku obrade deformisanjem praćena je promjena mehaničkih karakteristika materijala posmatrana prvenstveno kroz tvrdoću materijala. Ovakav način toka realizacije istraživanja je omogućio da se kroz ispitivanja dobije povratna informacija o samom procesu i pojavama koje se javljaju u toku izvođenja, te da se proizvodni proces sagleda detaljnije i istraživanje usmjeri u željenom pravcu.

Nakon što su postavljeni kriterijumi zadovoljeni ispitivanja su nastavljena u pogledu prikupljanja mjernih rezultata, analiza i izvođenju stavova i zaključaka. Eksperimentalni dio rada zasnovan je na posmatranju sekvencijalnog redosljeda obrada. Korištenjem metodologije planiranog eksperimenta, uspostavljena je eksperimentalna postavka na bazi Box-Behnkenovog plana eksperimenta. U sklopu ovog plana eksperimenta definisano je 15 eksperimentalnih taćaka uz odgovarajuće postavke odabranih parametara. Za obje vrste obrade odabrane su vrijednosti uticajnih faktora definisane na tri nivoa, a što je i predstavljeno u Tabeli 1.



Slika 1 Algoritam toka realizacije istraživanja

Tabela 1 Eksperimentalna postavka parametara predmetnih obrada

Nivo:	Stepen deformisanja [%]	Posmak [mm/o]	Dubina [mm]
Prvi	12	0.044	0.5
Srednji	23	0.124	1
Drugi	34	0.196	1.5

Uzorci za ispitivanje naknadnom obradom struganjem su dobijeni postupkom slobodnog kovanja koje izvršeno u toplom stanju, na temperaturi 670°C. Mašina korištena za obradu kovanjem je jednocilindarska hidraulićna presa Pitzman&Pfeifer oznake PO 200/4 snage 44 kW, dok je zagirjavanje komada izvršeno korištenjem peći za termićku obradu KPSŹ 45 snage 21 kW proizvođaća Cer-Ćaćak.

Obrada struganjem je izvršena na univerzalnom strugu Potisje – ADA 501 snage 11 kW. U toku obrade, parametar obrade rezanjem – brzina rezanja je imala vrijednost od 70 m/min u svim eksperimentalnim taćkama. Krajnji prećnici uzoraka za obradu su : 45mm, 41mm i 37mm dućine 200 mm prema navedenim stepenima deformisanja, respektivno.



Slika 2. Prikupljanje podataka - Marsurf TS50

Prikupljanje podataka izvršeno je beskontaktnim putem, korištenjem optičkog 3D mikroskopa Marsurf TS 50, a detalji sa mjerenja su prikazani na Slici 2. Matrica plana eksperimenta, redosljed izvođenja i rezultati mjerenja prikazani su u Tabeli 2. Korišteni nosač alata je proizvođača ISCAR PCLNR-3232P-12 u kombinaciji sa reznim alatom Korloy NC 3215-MP.

Tabela 2 Matrica plana eksperimenta

StdOrder	RunOrder	ϕ [%]	a [mm]	s [mm/o]	Ra [μm]
4	1	+1	+1	0	3.3
1	2	-1	-1	0	5.0
14	3	0	0	0	3.4
6	4	+1	0	-1	4.3
5	5	-1	0	-1	6.5
7	6	-1	0	+1	3.0
8	7	+1	0	+1	3.6
12	8	0	+1	+1	3.1
2	9	+1	-1	0	3.8
11	10	0	-1	+1	4.1
13	11	0	0	0	3.0
9	12	0	-1	-1	5.7
10	13	0	+1	-1	4.2
15	14	0	0	0	3.7
3	15	-1	+1	0	3.1

4. ANALIZA REZULTATA

Korištenje navedenog plana eksperimenta omogućilo je da se sa najmanjim brojem eksperimentalnih tačaka proces karakteriše u nelinearnom domenu. Na osnovu rezultata sprovedene analize varijanse, prikazanih u Tabeli 3., određene su karakteristične modelske veličine u matematičkom modelu. Signifikantni parametri su posmak rezanja, dubina rezanja i stepen deformisanja respektivno. Također, uticaj interakcija je prisutan i to interakcije prvog reda između stepena deformisanja i posmaka, te kvadrata posmaka rezanja. Nedostatak mogućeg predviđanja je odsutan sa vrijednošću od 0.482.

Tabela 3. Analiza varijanse optimalne modelske postavke

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	13.5969	2.7194	16.99	0.000
ϕ	1	0.8514	0.8514	5.32	0.047
a	1	3.0012	3.0012	18.75	0.002
s	1	5.4590	5.4590	34.11	0.000
s*s	1	1.5890	1.5890	9.93	0.012
ϕ *s	1	1.9794	1.9794	12.37	0.007
Error	9	1.4404	0.1600		
Lack-of-Fit	7	1.1937	0.1705	1.38	0.482
Pure Error	2	0.2467	0.1233		
Total	14	15.0373			

Na pragu značajnosti $\alpha=0.05$, na osnovu izvršenih analiza i određenih vrijednosti standardne greške, te zadovoljavajućih vrijednosti koeficijenata detereminacije prikazanih tabelom 4.2, uspostavljen je matematički model prikazan izrazom 4.

$$Ra = 10.916 - 0.1321\phi - 1.225a - 57.9s + 113.3s^2 + 0.841\phi \cdot s \quad (4.1)$$

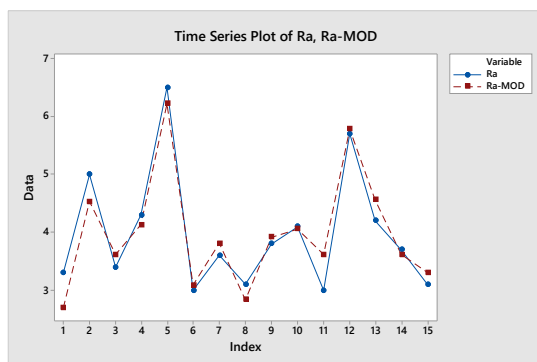
Tabela 4. Sumarne karakteristike modela

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.400055	90.42%	85.10%	73.24%

Nakon upoređivanja ekperimentalno dobijenih vrijednosti i vrijednosti dobijenih matematičkim modeliranjem procesa, dobijeno je veoma dobro podudaranje rezultata, te je predstavljeni model usvojen kao adekvatan. Proračunate modelske vrijednosti su prikazane u Tabeli 5. Također, navedene vrijednosti su grafički predstavljene dijagramom na slici 3.

Tabela.5. Modelske vrijednosti parametra Ra

StdOrder	RunOrder	ϕ [%]	a [mm]	s [mm/o]	Ra-MOD [μ m]
4	1	+1	+1	0	2.695
1	2	-1	-1	0	4.532
14	3	0	0	0	3.614
6	4	+1	0	-1	4.129
5	5	-1	0	-1	6.222
7	6	-1	0	+1	3.088
8	7	+1	0	+1	3.808
12	8	0	+1	+1	2.836
2	9	+1	-1	0	3.92
11	10	0	-1	+1	4.061
13	11	0	0	0	3.614
9	12	0	-1	-1	5.788
10	13	0	+1	-1	4.563
15	14	0	0	0	3.614
3	15	-1	+1	0	3.307



Slika 3. Uporedni prikaz modelskih i eksperimentalnih vrijednosti parametra Ra

5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Cjelovitim sagledavanjem procesa i njegovih sekvencijalnih tehnologija obrade, te pravilnim izborom parametara režima, moguće je uticati na kvalitativne karakteristike proizvoda. U toku naknadne obrade skidanjem strugotine identifikovan je uticaj prethodne obrade deformisanjem materijala u toplom stanju postupkom slobodnog kovanja na izradak, posmatran kroz kvalitet obrađene površine. Izvršenim analizama uspješno je uspostavljen adekvatan predviđajući matematički model sa visokim vrijednostima stepena determinacije na pragu značajnosti $\alpha=0.05$ koji dobro opisuje posmatrani proces. Pri posmatranom pragu značajnosti primjetan je uticaj interakcije prvog nivoa između stepena deformisanja i posmaka, te kvadrata stepena deformisanja. Metodom prikazanom u radu su u funkcionalnu vezu dovedeni parametri obrade slobodnim kovanjem i parametri obrade struganjem sa jedne strane i hrapavost materijala kao pokazatelj obradljivosti materijala, odnosno bitne karakteristike kvaliteta proizvoda sa druge strane.

6. LITERATURA

- [1] S. Ekinović, Obradljivost čeličnih materijala, Zenica: Mašinski fakultet u Zenici, Univerzitet u Sarajevu, 1999.
- [2] E. M. Trent, Metal Cutting, London: Butterworth, 1977.
- [3] S. Pauliuk, T. Wang and D. B. Müller, "Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 71, pp. 22-30, 2013.
- [4] T. Abbas, M. Alata, A. E. Ragab, M. M. E. Rayes and E. A. E. Danaf, "Prediction Model of Cutting Parameters for Turning High Strength Steel Grade-H: Comparative Study of Regression Model versus ANFIS," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, 2017.
- [5] J.-E. Ståhl, F. Schultheiss and S. Hägglund, "Analytical and Experimental Determination of the Ra Surface Roughness during Turning," in *Procedia Engineering: 1st CIRP Conference on Surface Integrity*, Bremen, 2011.
- [6] V. V. Silberschmidt, S. M. A. Mahdy, M. A. Gouda, A. Naseer, A. Maurotto and A. Roy, "Surface-roughness improvement in ultrasonically assisted turning," in *2nd CIRP 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI): Procedia CIRP 13*, Nottingham, 2014.