

**KVALITET OBRAĐENE POVRŠINE PRI VISOKOBRZINSKOM
STRUGANJU-GLODANJU ČELIKA Č.4131**

**SURFACE QUALITY IN HIGH-SPEED TURN-MILLING
OF STEEL Č.4131**

**Dr. Sabahudin Ekinović, docent,
Zilić Senija, dipl.inž.,
Beganović Alma, dipl.inž.,
Univerzitet u Sarajevu
Mašinski fakultet, Fakultetska 1. Zenica
Bosna i Hercegovina**

Ključne riječi: Kvalitet obrađene površine, visokobrzinsko struganje-glodanje, čelik

REZIME

Struganje-glodanje, a naročito visokobrzinsko struganje-glodanje je postupak obrade kojim se s uspjehom obrađuju osnosimetrični dijelovi. Ovaj postupak obrade nije mnogo zastupljen u industriji, ali su istraživanja u zadnjih 15-tak godina pokazala niz prednosti ovog postupka, kako u odnosu na klasične postupke struganja i glodanja, tako i u odnosu na ostale postupke sa velikim brzinama rezanja. U radu su prikazani rezultati istraživanja kvaliteta obrade čelika Č.4131 pri visokobrzinskom struganju-glodanju u rasponu brzina rezanja od 630 do 1000 m/min i posmacima od 0,856 do 1,142 mm/o. Obradom rezultata dobiveni su matematički modeli za pouzdano predviđanje parametara hrapavosti obrađene površine Ra, Rz, Rmax i p_n.

Keywords: Machined surface quality, high-speed turn-milling, steel

SUMMARY

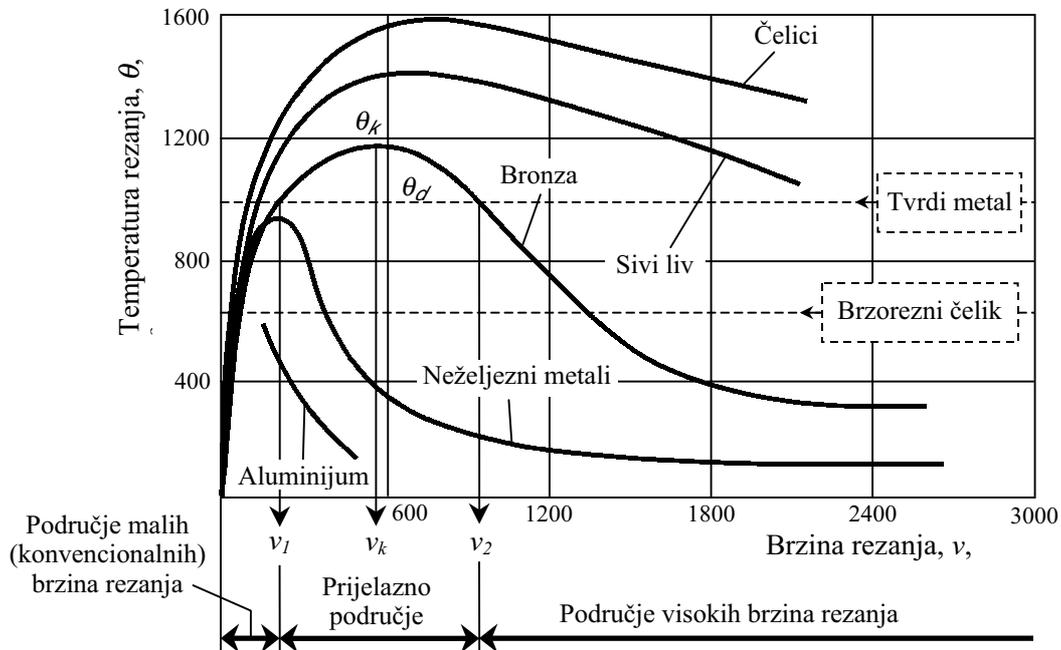
Turn-milling, and high-speed turn-milling in particular, is a machining process, which enables machining of axisymmetric parts with a lot of success. Unfortunately, this technology of machining is not widely applicable in industry. Recent investigations in the last 15 years have shown a so many advantages of high-speed turn-milling in relation to the conventional turning and milling processes as well as to the other machining processes in high-speed range. This paper shows the results of investigation of machined surface quality of workpiece made of steel C.4131, which was machined by high-speed turn-milling with cutting speed in range of 630 to 1000 mpmin and feed from 0.856 to 1.142 mmprev. The analysis of the obtained results gave mathematical models that could be used for reliable prediction of surface roughness parameters Ra, Rz, Rmax, and p_n.

1. UVOD

Uprkos činjenici da se prekomjernim povećanjem brzine rezanja smanjuju rezne sposobnosti alata, uvijek je bila prisutna želja da se prekorači tzv. kritična brzina rezanja. Njemački istraživač C.Salomon je još 20-tih godina prošlog vijeka izvršio prva istraživanja sa, u to vrijeme ekstremno velikim brzinama rezanja (za čelike do 440 m/min, za bronzu do 1600 m/min, za bakar do 2840 m/min i za aluminijum do 16500 m/min), i došao do zaključka da

pri prekoračenju neke kritične brzine dolazi do smanjenja temperature rezanja, slika 1. ŠČ,ŠČ. Dakle, za svaku kombinaciju materijala obratka i alata postoji neka kritična brzina rezanja v_k kojoj odgovara kritična temperatura rezanja θ_k .

Objašnjenje navedenog fenomena u najvećem dijelu se zasniva na analizi dijela rada koji se troši na plastičnu deformaciju u zoni rezanja i dijela rada koji se troši na trenje na tribološkim kontaktima, kao i vremena kontakta alat-strugotina i alat-obrađena površina.



SLIKA 1. ZAVISNOST IZMEĐU TEMPERATURE I BRZINE REZANJA KOD VISOKOBRZINSKIH OBRADA.

Naime, pri prekoračenju kritične brzine rezanja v_k dešavaju se promjene u karakteru stvaranja strugotine. Plastično tečenje koje preovladava kod nastanka strugotine pri konvencionalnim brzinama rezanja se zamjenjuje krtime razaranjem kod obrada sa velikim brzinama rezanja. Ovo ima za posljedicu manju količinu utrošenog rada na plastičnu deformaciju čime se smanjuje količina nastale toplote u zoni rezanja, što u krajnjem rezultira nižom temperaturom rezanja. S druge strane, pri visokobrzinskom rezanju, kontakt reznog klina alata i obratka je veoma kratak tako da najveći dio (oko 90%) nastale toplote pri rezanju odlazi sa strugotinom. Od postupaka visokobrzinskih obrada u industrijskoj upotrebi najviše je zastupljeno visokobrzinsko glodanje, zatim visokobrzinsko struganje-glodanje, visokobrzinsko brušenje, te visokobrzinsko bušenje [3],[4]. Visokobrzinsko struganje za sada ima veoma malu primjenu i još uvijek je u razvojno-istraživačkoj fazi. U odnosu na konvencionalne, visokobrzinske obrade imaju sljedeće prednosti:

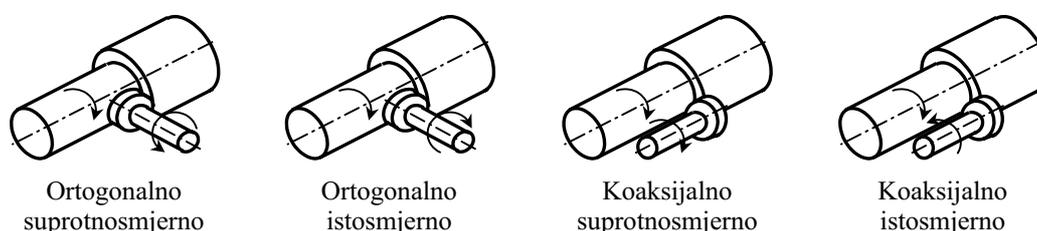
- povećanje iskorištenosti alatne mašine,
- poboljšanje kvaliteta obrađene površine sa manjim greškama i manjom dubinom prostiranja grešaka u površinskom sloju materijala obratka što je veoma važno s aspekta integriteta obrađene površine,
- smanjenje vremena obrade,
- smanjenje pomoćnih vremena,
- smanjenje sila rezanja što je veoma važno pri obradi tankostjenih radnih komada,
- smanjenje neophodne količine sredstva za hlađenje i podmazivanje,
- smanjenje učešća ljudskog rada i
- smanjenje troškova proizvodnje.

Međutim, valja naglasiti da visokobrzinske obrade imaju i izvjesne nedostatke [5]:

- povećanje pogonske snage mašine,
- veća investiciona ulaganja (specijalne konstrukcije alatnih mašina).

2. VISOKOBRZINSKO STRUGANJE-GLODANJE

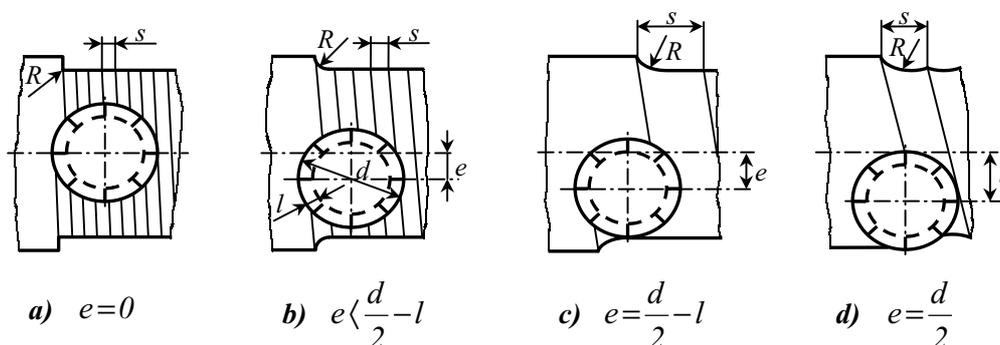
Mogućnosti konvencionalnog struganja ograničene su veličinom centrifugalnih sila koje se javljaju u samom radnom komadu i u steznim glavama struga, dok je konvencionalno glodanje limitirano centrifugalnim silama koje djeluju na glodalo. Struganje-glodanje (ili strugarsko glodanje, ili struganje glodanjem) kao kombinacija ova dva postupka obrade, a naročito ukoliko se obavlja velikim brzinama, pruža široke mogućnosti upotrebe. Na slici 2 prikazane su različite metode ostvarivanja struganja-glodanja. Ortogonalno struganje-glodanje može se koristiti samo pri obradi vanjskih površina, dok se koaksijalnim mogu obrađivati i unutrašnje površine. Generalno, struganje-glodanje se može, pored ravnih i cilindričnih površina, koristiti i za obradu mnogo komplikovanijih oblika, na primjer, ekscentričnih dijelova, zavojnica i t.d.



SLIKA 2. METODE STRUGANJA-GLODANJA.

S aspekta mogućnosti postizanja visokog kvaliteta obrađene površine, kao i mogućnosti obrade otvrdnutih (kaljenih) čelika i drugih veoma tvrdih materijala, najznačajnije je visokobrzinsko ortogonalno struganje-glodanje [6],[7],[8]. Glodalo se u odnosu na obradak može postaviti centrično, slika 3.a, ili ekscentrično, slika 3.b,c i d. Optimalna vrijednost ekscentriciteta s aspekta kvaliteta obrađene površine je [6],[7]:

$$e = \frac{d}{2} - l, \quad (1)$$



SLIKA 3. MOGUĆI POLOŽAJI GLODALA I OBRATKA KOD ORTOGONALNOG STRUGANJA-GLODANJA.

gdje je: d , mm, promjer glodala i l , mm, dužina pomoćne rezne ivice.

Ekscentricitet direktno utiče na geometrijsko-kinematske veličine kontakta glodalo-obradak u toku rezanja iz čega proizilaze i teoretske postavke hrapavosti obrađene površine pri struganju-glodanju. Tako je za ekscentricitet $e < \frac{d}{2} - l$, slika 3.b, vrijednost najvećeg mogućeg posmaka jednaka dužini projekcije pomoćne rezne ivice na obradak, kada se pri daljem povećanju posmaka gubi cilindričnost komada. I kod ekscentriciteta $e = \frac{d}{2}$, slika 3.d se prekoračenjem maksimalno dozvoljenog posmaka također gubi cilindričnost komada. Slučaj kada je ekscentricitet $e = \frac{d}{2} - l$, slika 3.c je najpovoljniji zato što je u tom slučaju dužina kontakta između ose komada i pomoćne rezne ivice maksimalna [7].

Uticaj veličina glavnog napadnog κ i pomoćnog napadnog ugla κ_i na teoretsku hrapavost obrađene površine obrazložen je u [7], a kao zaključak se može reći da se najbolji kvalitet obrade dobija za vijednosti navedenih uglova od 0° .

U Laboratoriji za obradu rezanjem i alatne mašine LORAM, Mašinskog fakulteta u Zenici formirana je glodačka jedinica sa kontinuiranom promjenom broja obrtaja do maksimalno 25000 o/min koja se može postaviti na univerzalni strug. Na taj način su obezbjeđeni uslovi za vršenje prvih istraživanja struganja-glodanja, a s obzirom na maksimalan broj obrtaja glodala i maksimalni promjer glodala i uslovi za obezbjeđenje visokobrzinskog struganja-glodanja sa brzinama rezanja do 3300 m/min.

U ovom radu se saopštavaju rezultati prvih istraživanja koja se odnose na uticaj posmaka i brzine rezanja na parametre hrapavosti obrađene površine Ra , Rz , $Rmax$ i procenta nošenja profila p_n pri obradi čelika Č.4131.

3. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Obradak je cilindrični komad promjera 100 mm, dužine 600 mm od čelika Č.4131 čiji je hemijski sastav naveden u tabeli 1. Prosječna tvrdoća materijala obratka je 244 HB.

TABELA 1. HEMIJSKI SASTAV OBRADIVANOG ČELIKA

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
%	0,39	0,30	0,73	0,018	0,016	0,06	1,38

Ekspерiment je vršen visokobrzinskim ortogonalnim struganjem-glodanjem sa centričnim položajem glodala i obratka ($e = 0$, slika 3.a). Cilj eksperimenta je da se odrede modeli koji predstavljaju veze između parametara hrapavosti Ra , Rz , $Rmax$ i p_n i posmaka s i brzine rezanja v . Pri tome se polazi od modela:

$$(Ra, Rz, Rmax, p_n) = A_i \cdot s^{a_i} \cdot v^{b_i}, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (2)$$

gdje se konstante A_i i eksponenti a_i i b_i odrede nakon provedenog eksperimenta i odgovarajuće obrade rezultata.

Obrada je vršena sa variranjem posmaka i brzine rezanja prema potpunom ortogonalnom dvofaktornom planu eksperimenta. U tabeli 2 prikazani su nivoi faktora (posmak i brzina rezanja), a u tabelama 3 do 6, plan matrica eksperimenta sa rezultatima mjerenja parametara hrapavosti obrađene površine Ra , Rz , $Rmax$ i procenta nošenja profila p_n . Pri obradi je korišteno vretenasto glodalo promjera $d = 16$ mm sa dvije izmjenjive rezne pločice tip R390-11 T3 04MPM 4040 P40. Parametri hrapavosti su mjereni pathometrom tip M3A Carl Mahr. Na slici 4 prikazan je snimak profila obrađene površine za eksperimentalnu tačku 1 (tabele 3 do 6, I mjerenje) sa izmjerenim vrijednostima: $Ra = 2,33 \mu\text{m}$, $Rz = 11,71 \mu\text{m}$, $Rmax = 16,48 \mu\text{m}$ i $p_n = 34,19\%$.

TABELA 2. PRIRODNE I KODIRANE VRIJEDNOSTI FAKTORA MODELA.

Faktori modela		Donji nivo	Osnovni nivo	Gornji nivo
Posmak, s , mm/o	Prirodne vrijednosti, s	0,856	0,988	1,142
	Kodirane vrijednosti, x_1	-1	0	+1
Brzina rezanja, v , m/min	Prirodne vrijednosti, v	628	753	1000
	Kodirane vrijednosti, x_2	-1	0	+1

TABELA 3. PLAN-MATRICA I REZULTATI MJERENJA R_a .

Redni broj eksper.	Plan-matrica			Eksperimentalni rezultati			Modelski rezultati
	x_0	x_1	x_2	I mjerenje R_{a1} , μm	II mjerenje R_{a2} , μm	Prosjek \bar{R}_a , μm	\hat{R}_a , μm
1	+1	-1	-1	2,33	2,05	2,19	1,89
2	+1	+1	-1	2,36	2,45	2,41	2,59
3	+1	-1	+1	1,57	1,68	1,63	1,77
4	+1	+1	+1	2,77	2,75	2,76	2,42
5	+1	0	0	2,57	1,61	2,09	2,15
6	+1	0	0	2,04	2,25	2,15	2,15
7	+1	0	0	2,17	1,77	1,97	2,15

TABELA 4. PLAN-MATRICA I REZULTATI MJERENJA R_z .

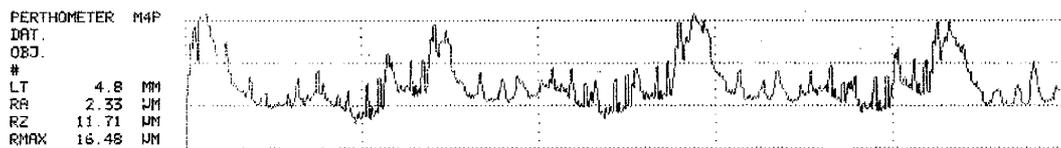
Redni broj eksper.	Plan-matrica			Eksperimentalni rezultati			Modelski rezultati
	x_0	x_1	x_2	I mjerenje R_{z1} , μm	II mjerenje R_{z2} , μm	Prosjek \bar{R}_z , μm	\hat{R}_z , μm
1	+1	-1	-1	11,71	10,97	11,34	10,40
2	+1	+1	-1	11,05	11,61	11,33	11,39
3	+1	-1	+1	9,07	9,98	9,53	9,72
4	+1	+1	+1	11,84	11,02	11,42	10,63
5	+1	0	0	11,61	7,95	9,78	10,60
6	+1	0	0	12,54	10,56	11,55	10,60
7	+1	0	0	10,25	8,19	9,22	10,60

TABELA 5. PLAN-MATRICA I REZULTATI MJERENJA R_{max} .

Redni broj eksper.	Plan-matrica			Eksperimentalni rezultati			Modelski rezultati
	x_0	x_1	x_2	I mjerenje R_{max1} , μm	II mjerenje R_{max2} , μm	Prosjek \bar{R}_{max} , μm	\hat{R}_{max} , μm
1	+1	-1	-1	16,48	14,56	15,52	14,58
2	+1	+1	-1	14,24	13,12	13,68	14,68
3	+1	-1	+1	12,24	14,32	13,28	14,23
4	+1	+1	+1	16,32	14,24	15,28	14,33
5	+1	0	0	19,68	9,76	14,72	14,49
6	+1	0	0	16,80	17,28	17,04	14,49
7	+1	0	0	12,88	11,68	12,28	14,49

TABELA 6. PLAN-MATRICA I REZULTATI MJERENJA p_n .

Redni broj eksper.	Plan-matrica			Eksperimentalni rezultati			Modelski rezultati
	x_0	x_1	x_2	I mjerenje p_w , %	II mjerenje p_w , %	Prosjek \bar{p}_n , %	\hat{p}_n , %
1	+1	-1	-1	34,19	38,29	36,24	41,61
2	+1	+1	-1	54,48	52,71	53,60	56,37
3	+1	-1	+1	48,30	44,92	46,61	47,42
4	+1	+1	+1	57,71	58,13	57,92	64,23
5	+1	0	0	47,17	64,79	55,98	50,92
6	+1	0	0	56,90	51,04	53,97	50,92
7	+1	0	0	54,51	64,56	59,54	50,92



SLIKA 4. SNIMAK PROFILA OBRADENE POVRŠINE ZA EKSPERIMENTALNU TAČKU 1.

Obradom rezultata eksperimenta dobiveni su konkretni modeli:

$$Ra = \frac{5,619 \cdot s^{1,081}}{v^{0,143}}, \mu\text{m}, \quad (3)$$

$$Rz = \frac{28,16 \cdot s^{0,313}}{v^{0,147}}, \mu\text{m}, \quad (4)$$

$$Rmax = \frac{20,397 \cdot s^{0,024}}{v^{0,052}}, \mu\text{m} \text{ i} \quad (5)$$

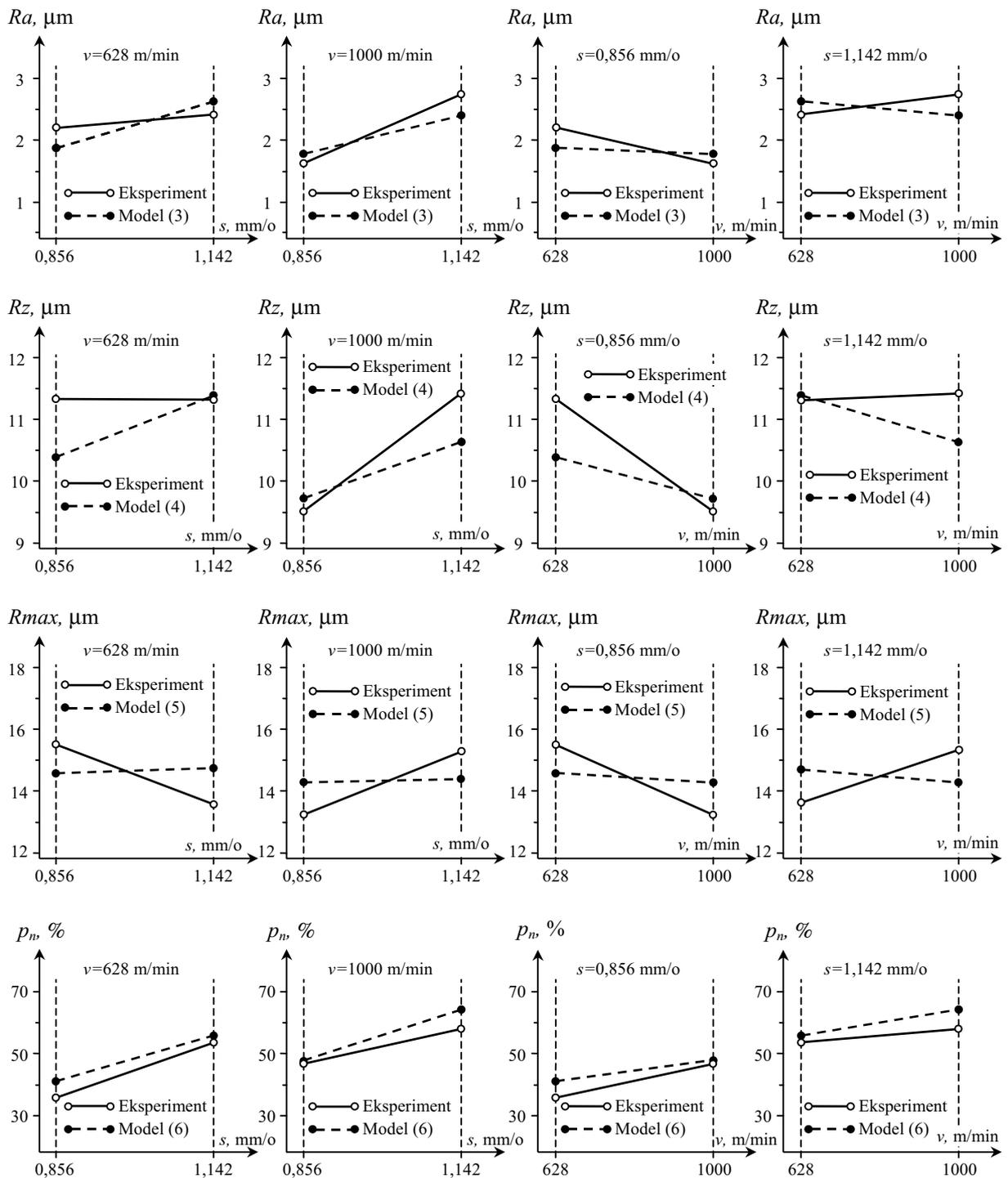
$$p_n = 8,027 \cdot s^{1,053} \cdot v^{0,281}, \% \quad (6)$$

gdje je: s , mm/o, posmak i v , m/min, brzina rezanja.

Stepen i karakter uticaja posmaka i brzine rezanja na posmatrane parametre hrapavosti grafički je prikazan na slici 5.

Na osnovu grafičkih prikaza na slici 5, za eksperimentalne rezultate, može se zaključiti sljedeće:

- Za parametar Ra :
 - Pri povećanju posmaka, povećava se Ra , bez obzira da li je brzina rezanja 628 ili 1000 m/min. Veći je stepen uticaja posmaka na Ra u slučaju obrade sa brzinom rezanja od 1000 m/min, nego sa brzinom 628 m/min,
 - Pri posmaku od 0,856 mm/o, s povećanjem brzine rezanja smanjuje se Ra , a pri posmaku od 1,142 mm/o se s povećanjem brzine rezanja, povećava i Ra ,
 - Posmak ima veći stepen uticaja na Ra , nego brzina rezanja,
- Za parametar Rz :
 - Pri brzini rezanja od 628 m/min, promjenom posmaka se Rz ne mijenja, dok se pri brzini rezanja od 1000 m/min s povećanjem posmaka, Rz povećava,
 - Pri posmaku od 0,856 mm/o, povećanjem brzine rezanja se Rz smanjuje, dok se pri posmaku od 1,142 mm/o, s promjenom brzine rezanja, Rz ne mijenja,
 - Posmak ima nešto veći stepen uticaja na Rz , nego brzina rezanja,
- Za parametar $Rmax$:
 - Pri brzini rezanja od 628 m/min, s povećanjem posmaka se $Rmax$ smanjuje, dok se pri brzini rezanja od 1000 m/min, s povećanjem posmaka, $Rmax$ povećava,
 - Pri posmaku od 0,856 mm/o, s povećanjem brzine rezanja se $Rmax$ smanjuje, dok se pri posmaku od 1,142 mm/o, s povećanjem brzine rezanja, $Rmax$ povećava,
 - Stepenski uticaja posmaka i brzine rezanja na $Rmax$ su približno isti,



SLIKA 5. GRAFIČKA INTERPRETACIJA KARAKTERA I STEPENA UTICAJA POSMAKA I BRZINE REZANJA NA R_a , R_z , R_{max} I p_n

- Za parametar p_n :
 - Pri povećanju posmaka se procenat nošenja profila p_n povećava, bez obzira da li je brzina rezanja 628 ili 1000 m/min. Veći stepen uticaja posmaka na p_n je evidentan pri brzini rezanja od 628 m/min,
 - Pri povećanju brzine rezanja se procenat nošenja profila p_n povećava, bez obzira da li je posmak 0,856 ili 1,142 mm/o. Veći stepen uticaja brzine rezanja na p_n je evidentan pri posmaku od 0,856 mm/o
 - Posmak ima veći stepen uticaja na procenat nošenja profila p_n , nego brzina rezanja.

4. ZAKLJUČAK

Jedan od pravaca razvoja proizvodnih tehnologija u budućnosti jeste i razvoj visokobrzinskih obrada. U okviru ovih tehnologija posebno mjesto, a naročito s obzirom na tehnološke mogućnosti, ekonomske efekte i kvalitet obrade, zauzima i visokobrzinsko struganje-glodanje.

U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja obradljivosti čelika Č.4131 s aspekta obrađene površine pri visokobrzinskom ortogonalnom struganju-glodanju sa centričnim položajem glodala i obratka. Za ispitivane intervale posmaka i brzine rezanja može se zaključiti da se najmanje vrijednosti pokazatelja hrapavosti obrađene površine Ra , Rz i $Rmax$ kao i najveće vrijednosti procenta nošenja profila p_n postužu pri najmanjim posmacima i najvećim brzinama rezanja. Za ekscentričan položaj glodala i obratka bi se svakako dobile još povoljnije vrijednosti navedenih pokazatelja. Za optimizaciju procesa obrade navedenog čelika postupkom visokobrzinskog struganja-glodanja mogu se koristiti eksperimentom dobiveni izrazi (3) do (6). Preliminarna uporedna analiza kvaliteta obrađene površine postignutog visokobrzinskim struganjem-glodanjem i klasičnim struganjem ukazuje na mnogostruko veće vrijednosti posmatranih parametara hrapavosti pri klasičnom struganju. Rezultati ovog istraživanja će biti saopšteni veoma brzo.

5. LITERATURA

- [1] Schulz H.: the History of High Speed Machining, Proceedings of the 5th Int. Sc. Conf. on Production Engineering, CIM'99, pp. O-001-O-012, Opatija, 1999,
- [2] Schulz H., Cebalo R., Udiljak T.: With High Speed Machining Towards 21st Century, Proceedings of the 4th Int. Conf. on Production Engineering, CIM'97, pp. 61-71, Opatija, 1997,
- [3] Komaduri R., et al.: On a Methodology for Establishing the Machine Tool System Requirements for High-Speed/High-Troughput Machining, Trans. of the ASME, Journ. for Industry, Vol.107, pp.316-324, 1985,
- [4] Hoch S.: High Speed Cutting (HSC) in Die and Mould Manufacture, Proceedings of the 5th Int. Sc. Conf. on Production Engineering, CIM'99, pp. I-081-I-094, Opatija, 1999,
- [5] Ekinović S., Ekinović E.: High Speed Machining, Mašinstvo, Vol.4, No1, pp. 15-30, 2000,
- [6] Kopač J., Pogačnik M.: Theory and Practice of Achieving Quality Surface in Turn Milling, Int. Journ. of Mach. Tools Manufact., Vol.37, No5, pp.709-715, 1997,
- [7] Schulz H.: High Speed Turn-Milling – A New Precision Manufacturing Technology for the Machining of Rotationally Symmetrical Workpieces, Annals of the CIRP, Vol.39/1, pp. 107-109, 1990,
- [8] Schulz H., Kneisel T.: Turn-Milling of Hardened Steel – an ALternative to Turning, Annals of the CIRP, Vol.43/1, pp. 93-96, 1994.