



Dražen Bajić*

ISSN (0469-6255)

(37-45)

PRILOG POBOLJŠANJU OBRADIVOSTI KOD KRATKOHODNOG HONOVANJA CONTRIBUTION TO MACHINABILITY IMPROVEMENT DURING THE SUPERFINISHING PROCESS

UDK 621.9.011;620.179.118;621.923.5;519.87;519.863

Izvorni znanstveni članak

Original scientific paper

Sažetak

Jedan od najznačajnijih pokazatelja obradivosti je hrapavost obrađene površine. U okviru ovog rada ispitivana je ovisnost hrapavosti obrađene površine o sljedećim utjecajnim čimbenicima: obodna komponenta brzine rezanja, tlak zraka kojim brusna letva tlači obradak, vrijeme obrade, hrapavost obrađene površine dobivena predobradom pri obradi kratkohodnim honovanjem.

Detaljna ispitivanja provedena po faktorskom planu pokusa i obrađena regresijskom analizom dala su proširene izraze za proračun srednjeg aritmetičkog odstupanja profila kao opće najprihvatljivijeg pokazatelja hrapavosti obrađene površine. U radu je određena i ovisnost najveće visine neravnina i srednje visine neravnina o srednjoj aritmetičkoj hrapavosti. U cilju dobivanja minimalne vrijednosti hrapavosti obrađene površine obavljeno je optimiranje matematičkog modela dobivenog regresijskom analizom te su određene optimalne vrijednosti ispitivanih čimbenika.

Rezultati do kojih se došlo u ovom radu vrijede za područje ispitivanja prema planu pokusa te za materijal Č1331 (DIN Ck22) i Č5431 (DIN 34CrNiMo6). Vjerojatno će se rezultati ovih pokusa moći primijeniti i na druge materijale što u svakom konkretnom slučaju treba dokazati.

Ključne riječi: obradivost, hrapavost obrađene površine, kratkohodno honovanje, matematičko modeliranje, optimiranje

Summary

One of the most important indicator of machinability is surface roughness. The objective of this study was to investigate the influence of impact factors: tangential velocity, stone contact pressure, machining time, initial roughness on the surface roughness, during the superfinishing process.

Detailed experiments according to the factors test plan and regression analysis, gave the extended equations for mean arithmetical roughness, as one of the most useful signs of the surface roughness. In this work dependence of the roughness depth and average roughness depth on the mean arithmetical roughness are also given. In order to get minimum values of the surface roughness, optimisation of the mathematical model is done by using regression analysis and optimal values of the examined factors are determined.

The obtained results are, according to the experiment plan, valid for the testing of materials: steel Č1331 (DIN Ck 22) and steel Č5431 (DIN 34CrNiMo6). The test results are to be probably applied to other materials, however each separate case should be proved.

Key words: machinability, surface roughness, superfinishing, mathematical modelling, optimisation

1. Uvod Introduction

Obradivost je svojstvo materijala da bude što lakše i ekonomičnije obrađivan metodom odvajanja čestica. Ona se ne može jednostavno i jednoznačno odrediti i kvantificirati, već je splet utjecaja različitih

Dr. sc. Dražen Bajić, viši asistent
Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva
i brodogradnje u Splitu, Split

fizikalnih pojava koje se odnose na alat, pretvorbu energije, stvaranje čestica i na svojstva obrađene površine. Dakle riječ je o složenoj pojavi utjecaja mnoštva čimbenika i njihovim interakcijama. Veoma je teško ili nemoguće svesti sve od navedenih čimbenika na pozitivniji ili povoljniji utjecaj, pa se može reći da je obradivost to bolja što je više utjecajnih čimbenika postiglo što veći pozitivni utjecaj.

Za ocjenu obradivosti nekog tehničkog materijala vrlo važan kriterij je kakvoća obrađene površine. Ona također ima velik utjecaj na eksploatacijske karakteristike strojnih dijelova, kao što su: koeficijent trenja, korozivna postojanost, otpornost na trošenje, dinamička čvrstoća, optičke osobine površine i mnoge druge. Kakvoća obrađene površine je određena hrapavošću i fizikalno-mehaničkim svojstvima. Zahtjevi za određene fizikalno-mehaničke osobine površinskog sloja strojnih elemenata postavljaju se u ovisnosti od funkcionalne namjene te eksploatacijskih uvjeta samih radnih površina.

Idealno ravna i glatka površina ne postoji. Njoj se moguće približiti različitim postupcima završne obrade. Kod površina dosjedanja gdje se pojedini dijelovi stalno ili povremeno spajaju sa drugim dijelovima (klipovi i cilindri, ležajevi i rukavci, vodilice, spojke itd.), te dijelova kod kojih je izraženo površinsko opterećenje, potrebna je ravna i optimalno glatka površina. Kod prvih se nastoji smanjiti trenje među dijelovima, a kod drugih izbjegava pojava zareznog djelovanja koje smanjuje čvrstoću dinamički opterećenih strojnih dijelova. Zbog navedenog dolazi do ubrzanog razvoja postupaka fine završne obrade koji jamče kakvoću površine nakon provedenog postupka obrade.

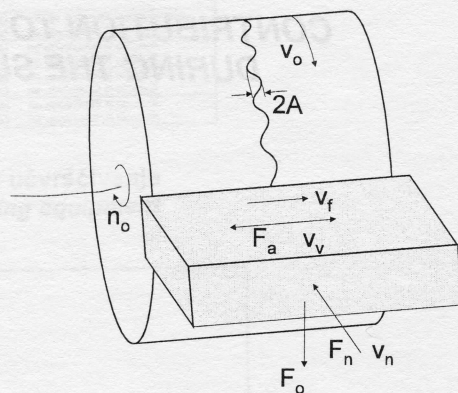
Kratkohodnim honovanjem obavlja se završna obrada rotacijskih, konusnih, kuglastih, pa čak i ravnih površina strojnih dijelova koji trebaju imati visoku otpornost trošenju te mali koeficijent trenja. Osnovne značajke postupka su: mala obodna brzina obratka, srednje visok tlak, mala razvijena toplina, veliko područje dodira obratka i rezne površine brusne letve, kratko vrijeme obrade, te tiha obrada [1].

Kratkohodno honovanje je postupak završne obrade koji do sada nije prema dostupnim radovima, u dovoljnoj mjeri opisan u literaturi, ni istražen, a na ovim prostorima ni zastupljen u praksi. Stoga će se u ovom radu uz pomoć pokusa hrapavost obrađene površine pokušati opisati matematički definiranom zakonitošću koju je moguće optimirati.

2. Utjecajni čimbenici na obradu kratkohodnim honovanjem *Influencing factors of superfinishing process*

Pri obradi kratkohodnim honovanjem glavno gibanje je složeno gibanje nastalo rotacijom obratka

s obodnom brzinom v_o i vibriranjem brusne letve paralelno s osi obratka u oba smjera brzinom v_v , slika 1. Posmična brzina v_f je također paralelna s osi obratka, tako da se posmično gibanje i vibriranje sastavljaju. Rezna površina brusa tlači na obradnu površinu silom F_n , pa se između obratka i rezne površine brusa javlja tlak određene veličine koji omogućava proces odvajanja čestica. Rezultat takvog gibanja je sinusoidalna krivulja, koja se u obliku zavojnice pojavljuje na površini obratka. Zbog ovakvih gibanja jedno abrazivno zrno rijetko prijeđe isti put, čime se smanjuje hrapavost bez nastanka novih brazda.



Slika 1. Rezna površina brusne letve u dodiru s obratkom [3]

Figure 1. Superfinishing stone cutting surface in contact with workpiece [3]

Na rezultat obrade kratkohodnim honovanjem (hrapavost obrađene površine, odstupanje od cilindričnosti i kružnosti, istrošenje rezne površine brusne letve, volumen odvojenih čestica, itd.), utječe dvije skupine čimbenika, slika 2.:

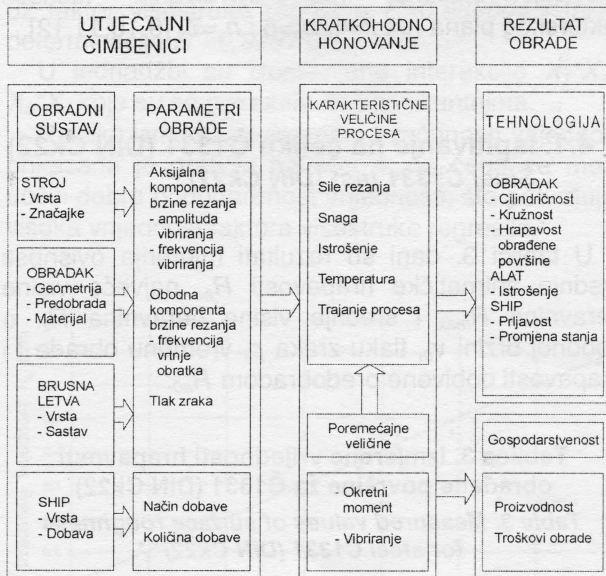
1. Obradni sustav
2. Parametri obrade

Obradni sustav određuje one utjecajne čimbenike koji se tijekom samog postupka obrade ne mijenjaju, a čine ga:

- Stroj (radni učin, snaga, krutost, dinamičke značajke),
- Obradak (geometrija, vrsta materijala, kakvoća predobrade),
- Alat (geometrija, vrsta abraziva, veličina zrna, tvrdoća, poroznost, vezivo, kakvoća izrade, točnost, učin),
- SHIP (vrsta, viskozitet, koncentracija, količina, način dovoda, tlak).

Parametri obrade (amplituda i frekvencija vibriranja brusne letve, frekvencija vrtnje obratka, tlak zraka kojim brusna letva tlači obradak) su promjenjive veličine koje određuju aksijalnu i obodnu komponentu brzine rezanja te specifično opterećenje brusne letve, a mogu se mijenjati u okvirima konstrukcijskih mogućnosti obradnog sustava.

3. Opis ispitivanja Description of investigation



Slika 2. Utjecajni čimbenici procesa kratkohodnog honovanja [4]

Figure 2. Influencing factors of superfinishing process [4]

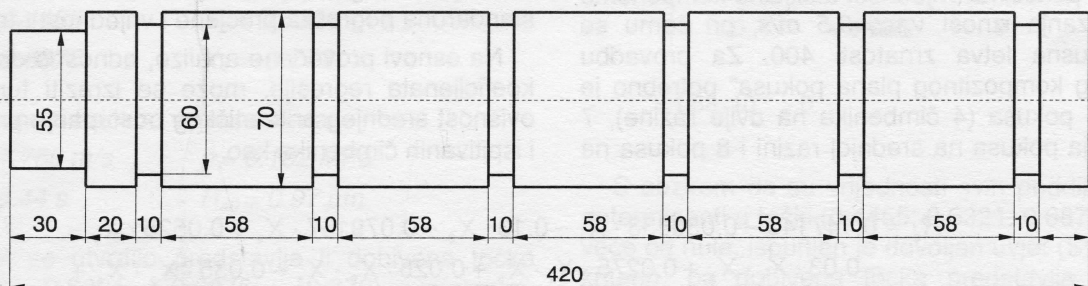
Za provedbu ispitivanja korištena je univerzalna tokarilica, tip D420/1500, proizvođača "Prvomajska" iz Raše, godina proizvodnje 1988. Na univerzalnoj tokarilici pripremljeni su uzorci kako bi se uklonio utjecajni sloj, hrđa, brazde i oštećenja na materijalu, te primjese stranih čestica u površini materijala, dobio uzorak točno određenih dimenzija te postigla vrijednost faktora prethodne hrapavosti R_{a0} . Uređaj za kratkohodno honovanje je učvršćen u držač alata na suportu tokarilice, te je na taj način tokarilica korištena i za provedbu postupka kratkohodnog honovanja. Za pripremu uzoraka tokarenjem korišteni su držač pločice *PTG NR 20 20 K 16* i pločice *TNMG 16 04 08 - PF* firme SANDVIK Coromant [5]. Alat za obradu kratkohodnim honovanjem koji se koristio u istraživanjima je brusna letva s abrazivnim zrcima od silicijevog karbida granulacije 400, 500 i 600 [6]. Materijali obratka koji su se koristili u ovom radu su ugljični čelici za poboljšavanje Č1331 (DIN Ck22) i Č5431 (DIN 34CrNiMo6). Kemijski sastav i vrijednosti mehaničkih svojstava navedenih materijala prikazuju tablice 1. i 2.

SASTAV I%I				
C	Mn	Cr	Mo	dr.
0,22	0,45	-	-	
MEHANIČKA SVOJSTVA				
Tvrdoća HB	Granica plastičnosti IN/mm ² I	Vlačna čvrstoća IN/mm ² I	Relativno produljenje I%I	Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće 5 točaka pri sili F=10 N
156	300	500	22	168 HV

Tablica 1. Kemijski sastav i vrijednosti mehaničkih svojstava materijala Č1331 (DIN Ck 22)
Table 1. Chemical composition and mechanical properties for steel Č1331 (DIN Ck 22)

SASTAV I%I				
C	Mn	Cr	Mo	dr.
0,34	0,55	1,55	0,22	1,55 Ni
MEHANIČKA SVOJSTVA				
Tvrdoća HB	Granica plastičnosti IN/mm ² I	Vlačna čvrstoća IN/mm ² I	Relativno produljenje I%I	Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće 5 točaka pri sili F=30 N
235	900	1100	10	240 HV

Tablica 2. Kemijski sastav i vrijednosti mehaničkih svojstava materijala 5431 (DIN 34 CrNiMo 6)
Table 2. Chemical composition and mechanical properties for steel Č5431 (DIN 34 CrNiMo 6)



Slika 3. Nacrt obratka
Figure 3. Workpiece

Korišteni materijali su predobrađeni u osovine kojima su zabašeni središnji uvrtači i istokareni kanali tako da je dobiveno pet površina za provedbu ispitivanja. Slika 3. prikazuje nacrt obratka.

Za obradu kratkohodnim honovanjem korišten je uređaj "Supfina SE-40" koji je bio učvršćen u držač alata na suportu tokarilice D420/1500. Mjerenja hrapavosti su obavljena pomoću uređaja "SURTRONIC 3+" proizvođača Rank Taylor Hobson [8]. Osim samog uređaja za mjerenje, korišten je i Modul za obradu podataka, koji se s uređajem izravno spaja preko RS 232 kabela. Modul za obradu podataka posjeduje integralni termički pisac za trajni ispis izgleda profila i izmjerenih vrijednosti. Za sredstvo hlađenja, ispiranja i podmazivanja u istraživanjima je korištena smjesa mineralnog ulja i petroleja u omjeru 60/40 %, a podmazivano je ručno.

4. Rezultati ispitivanja Results of investigation

Probnim ispitivanjima istražen je utjecaj obodne i aksijalne komponente brzine rezanja, tlaka zraka kojim brusna letva tlači obradak, vremena obrade, hrapavosti obratka dobivene predobradom te zrnatosti brusne letve na hrapavost obrađene površine kratkohodnim honovanjem. Na osnovi tih prethodnih ispitivanja može se zaključiti da hrapavost obrađene površine značajnije ovisi o obodnoj nego o aksijalnoj komponenti brzine rezanja, te da promjena zrnatosti brusne letve u području promatranja (400-600) ne utječe značajnije na smanjenje hrapavosti tijekom vremena ni na konačnu postignutu hrapavost [1]. Zbog ograničavajućeg broja čimbenika koji se mogu analizirati primjenom "pokretnog kompozitnog plana pokusa", a na osnovi gore iznesenog, u cilju pronalazjenja matematičkog modela koji bi opisao ovisnost hrapavosti obrađene površine, u ovom radu su odabrani sljedeći čimbenici:

- obodna brzina obratka, v_o
- tlak zraka, p
- vrijeme obrade kratkohodnim honovanjem, t
- prethodna hrapavost, tj. hrapavost dobivena predobradom, R_{a0}

U svim pokusima vrijednost aksijalne komponente brzine rezanja iznosi $v_{amax}=0,5$ m/s, pri čemu se koristi brusna letva zrnatosti 400. Za provedbu "pokretnog kompozitnog plana pokusa" potrebno je izvesti 16 pokusa (4 čimbenika na dvije razine), 7 ponavljanja pokusa na srednjoj razini i 8 pokusa na

središnjim osima, radi utvrđivanja točnosti faktorskog plana (uz $k=4$, $n_\alpha=8$ i $n_o=7$) [9,10,11,12].

4.1. Ispitivanje na čeliku Č1331 (DIN Ck22) Steel Č1331 test (DIN Ck22)

U tablici 3. dani su rezultati mjerenja ovisnosti srednje aritmetičke hrapavosti R_a , najveće visine neravnina R_{max} i srednje visine neravnina R_z , o obodnoj brzini v_o , tlaku zraka p , vremenu obrade t i hrapavosti dobivene predobradom R_{a0} .

Tablica 3. Izmjerene vrijednosti hrapavosti obrađene površine za Č1331 (DIN Ck22)
Table 3. Measured values of surface roughness for steel Č1331 (DIN Ck22)

ČIMBENIK		v_o [m/s]	p [MPa]	t [s]	R_{a0} [μ m]		
KODNA OZNAKA ČIMBENIKA		X_1	X_2	X_3	X_4		
OSNOVNA RAZINA	(0)	1.5375	0.15	15	1.21		
GORNJA RAZINA	(+1)	2.050	0.2	20	1.52		
DONJA RAZINA	(-1)	1.025	0.1	10	0.89		
DONJA RAZINA SREDIŠNJE OSI	(-2)	0.513	0.05	5	0.58		
GORNJA RAZINA SREDIŠNJE OSI	(+2)	2.560	0.25	25	1.84		
R.B.	X_1	X_2	X_3	X_4	R_a [μ m]	R_{max} [μ m]	R_z [μ m]
1	-1	-1	-1	-1	0.52	3.41	2.87
2	+1	-1	-1	-1	0.47	3.32	2.75
3	-1	+1	-1	-1	0.31	2.86	2.17
4	+1	+	-1	-1	0.15	1.82	1.24
5	-1	-1	+1	-1	0.23	2.33	1.77
6	+1	-1	+1	-1	0.28	2.91	2.23
7	-1	+1	+1	-1	0.17	2.01	1.42
8	+1	+1	+1	-1	0.10	1.34	0.91
9	-1	-1	-1	+1	0.68	4.50	3.62
10	+1	-1	-1	+1	0.60	4.19	3.43
11	-1	+1	-1	+1	0.37	3.01	2.67
12	+1	+1	-1	+1	0.19	2.25	1.59
13	-1	-1	+1	+1	0.42	3.24	2.71
14	+1	-1	+1	+1	0.49	3.15	2.80
15	-1	+1	+1	+1	0.19	2.21	1.58
16	+1	+1	+1	+1	0.11	1.43	1.03
17	-2	0	0	0	0.32	2.96	2.22
18	+2	0	0	0	0.20	2.27	1.62
19	0	-2	0	0	0.69	4.52	3.65
20	0	+2	0	0	0.18	2.21	1.56
21	0	0	-2	0	0.42	3.30	2.68
22	0	0	+2	0	0.12	1.41	1.01
23	0	0	0	-2	0.09	1.07	0.78
24	0	0	0	+2	0.31	2.82	2.15
25	0	0	0	0	0.15	1.85	1.20
26	0	0	0	0	0.15	1.80	1.26
27	0	0	0	0	0.14	1.60	1.11
28	0	0	0	0	0.15	1.81	1.25
29	0	0	0	0	0.15	1.83	1.18
30	0	0	0	0	0.14	1.63	1.15
31	0	0	0	0	0.15	1.79	1.23

Višestrukom regresijskom analizom određeni su koeficijenti regresije, faktor višestruke regresije, standardna pogreška procjene i vrijednost t-testa.

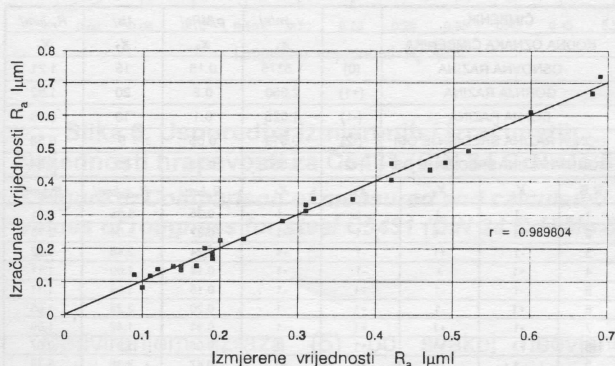
Na osnovi provedene analize, odnosno dobivenih koeficijenata regresije, može se izraziti funkcijska ovisnost srednjeg aritmetičkog odstupanja profila R_a i ispitivanih čimbenika kao:

$$R_a = 0.147143 - 0.030833 \cdot X_1 - 0.13 \cdot X_2 - 0.079167 \cdot X_3 + 0.0525 \cdot X_4 - 0.03 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.0275 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0.025 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.035 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0.034673 \cdot X_1^2 + 0.078423 \cdot X_2^2 + 0.037173 \cdot X_3^2 + 0.019673 \cdot X_4^2 \quad (1)$$

uz faktor višestruke regresije $R=0.989804$ i faktor determinacije $R^2=0.979712$.

U jednadžbi su izostavljene interakcije $X_1 \cdot X_4$ i $X_3 \cdot X_4$ koje su se pokazale nesignifikantnima.

Razlika između izmjerenih i izračunatih vrijednosti prikazana je grafički na slici 4., iz čega se može uočiti dobra podudarenost vrijednosti, što potvrđuje i visoka vrijednost faktora višestruke regresije.



Slika 4. Usporedba izmjerenih i izračunatih vrijednosti hrapavosti za Č1331 (DIN Ck 22)

Figure 4. Comparison of measured and calculated values of roughness for steel Č1331 (DIN Ck 22)

Do vrijednosti ispitivanih čimbenika koje daju minimalnu vrijednost hrapavosti obrađivane površine može se doći analitičkim putem. Nužan uvjet postojanja ekstrema je da parcijalna derivacija izraza (1) po svakoj neovisnoj varijabli bude jednaka nuli, tj:

$$\frac{\partial R_a}{\partial X_1} = 0, \quad \frac{\partial R_a}{\partial X_2} = 0, \quad \frac{\partial R_a}{\partial X_3} = 0, \quad \frac{\partial R_a}{\partial X_4} = 0 \quad (2)$$

čime se dobiva sustav linearnih jednadžbi:

$$\begin{aligned} 6.9346 \cdot X_1 - 3 \cdot X_2 + 2.75 \cdot X_3 - 3.0833 &= 0 \\ -3 \cdot X_1 + 15.6846 \cdot X_2 + 2.5 \cdot X_3 - 3.5 \cdot X_4 - 13 &= 0 \\ 2.75 \cdot X_1 + 2.5 \cdot X_2 + 7.4346 \cdot X_3 - 7.9167 &= 0 \\ 3.5 \cdot X_2 - 3.9346 \cdot X_4 - 5.25 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Rješavanjem sustava jednadžbi (3) dobivaju se kodirane vrijednosti čimbenika koje daju ekstremnu vrijednost hrapavosti obrađene površine:

$$\begin{aligned} X_1 &= 0.4455 & X_2 &= 0.6321 \\ X_3 &= 0.6875 & X_4 &= -0.772 \end{aligned}$$

odnosno u fizičkim vrijednostima:

$$\begin{aligned} v_o &= 1.766 \text{ m/s} & p &= 0.182 \text{ MPa} \\ t &= 18.44 \text{ s} & R_{a0} &= 0.97 \text{ µm} \end{aligned}$$

Da bi se utvrdilo predstavlja li dobivena točka (0.4455; 0.6321; 0.6875; -0.772) minimum, maksimum ili tzv. "sedlastu točku", potrebno je odrediti vrijednost dijagonalnih poddeterminanti determinante Δ (4) u toj točki.

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_3} & \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_4} \\ \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_3} & \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_4} \\ \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_3} & \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_4} \\ \frac{\partial R_a}{\partial X_4 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_4 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_4 \partial X_3} & \frac{\partial R_a}{\partial X_4 \partial X_4} \end{vmatrix} \quad (4)$$

odnosno:

$$\Delta_1 = \left| \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_1} \right| = \left| 6.9346 \cdot 10^{-2} \right| > 0$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_2} \\ \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 6.9346 \cdot 10^{-2} & -0.03 \\ -0.03 & 0.15685 \end{vmatrix} = 9.9769 \cdot 10^{-3} > 0$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_3} \\ \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_3} \\ \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_3} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 6.9346 \cdot 10^{-2} & -0.03 & 0.0275 \\ -0.03 & 0.15685 & 0.025 \\ 0.0275 & 0.025 & 7.4346 \cdot 10^{-2} \end{vmatrix} = 5.3854 \cdot 10^{-4} > 0$$

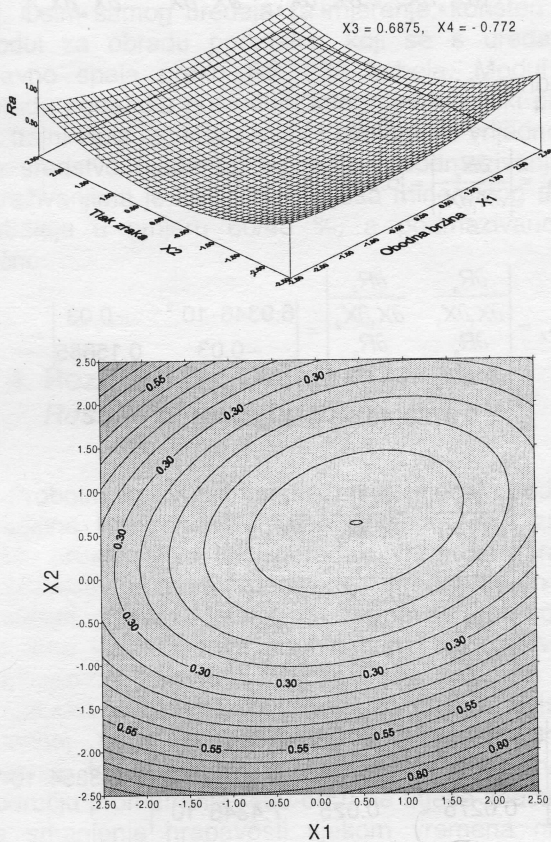
$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_3} & \frac{\partial R_a}{\partial X_1 \partial X_4} \\ \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_3} & \frac{\partial R_a}{\partial X_2 \partial X_4} \\ \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_3} & \frac{\partial R_a}{\partial X_3 \partial X_4} \\ \frac{\partial R_a}{\partial X_4 \partial X_1} & \frac{\partial R_a}{\partial X_4 \partial X_2} & \frac{\partial R_a}{\partial X_4 \partial X_3} & \frac{\partial R_a}{\partial X_4 \partial X_4} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 6.9346 \cdot 10^{-2} & -0.03 & 0.0275 & 0 \\ -0.03 & 0.15685 & 0.025 & -0.035 \\ 0.0275 & 0.025 & 7.4346 \cdot 10^{-2} & 0 \\ 0 & -0.035 & 0 & 3.9346 \cdot 10^{-2} \end{vmatrix} = 1.58 \cdot 10^{-5} > 0$$

S obzirom da su vrijednosti svih poddijagonalnih determinanti u točki (0.4455; 0.6321; 0.6875; -0.772) veće od nule, ispunjen je dovoljan uvjet (Sylvesterov kriterij), pa dobivena točka predstavlja minimum funkcije (1).

Na slici 5 prikazana je funkcijska ovisnost hrapavosti obrađene površine koja je dobivena

pomoću jednadžbe regresije (1) za optimalne vrijednosti kodiranih čimbenika $X_3 = 0.6875$ i $X_4 = -0.772$, koja potvrđuje dobiveni rezultat o postojanju minimalne vrijednosti srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine za navedene vrijednosti čimbenika.



Slika 5. Ovisnost hrapavosti obrađene površine o tlaku zraka i obodnoj brzini kod optimalnih vrijednosti vremena obrade i hrapavosti dobivene predobradom za Č1331

Figure 5. Dependence of surface roughness upon the stone pressure and tangential velocity for optimal values of machining time and initial roughness for steel Č1331 (DIN Ck22)

4.2. Ispitivanje na čeliku Č5431 (DIN 34 CrNiMo6) Steel 5431 test (DIN 34 CrNiMo6)

U tablici 4. dani su rezultati mjerenja hrapavosti obrađene površine (R_a , R_{max} , R_z) o ispitivanim utjecajnim čimbenicima (v_o , p , t , R_{a0}).

Višestrukom regresijskom analizom određeni su koeficijenti regresije, faktor višestruke regresije, standardna pogreška procjene i vrijednost t-testa.

Kao i za čelik Č1331 (DIN Ck 22), interakcije $X_1 \cdot X_4$ i $X_3 \cdot X_4$ su se pokazale nesignifikantnima.

Tablica 4. Izmjerene vrijednosti hrapavosti obrađene površine za Č5431 (DIN 34 CrNiMo 6) Table 4. Measured values of surface roughness for steel Č5431 (DIN Ck22)

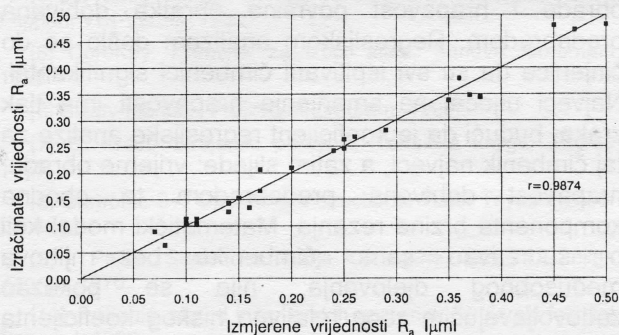
ČIMBENIK		v_o /m/s	p /MPa	t /s	$R_{a0}/\mu\text{m}$		
KODNA OZNAKA ČIMBENIKA		X_1	X_2	X_3	X_4		
OSNOVNA RAZINA		(0)	1.5375	0.15	15	1.21	
GORNJA RAZINA		(+1)	2.050	0.2	20	1.52	
DONJA RAZINA		(-1)	1.025	0.1	10	0.89	
DONJA RAZINA SREDIŠNJE OSI		(-2)	0.513	0.05	5	0.58	
GORNJA RAZINA SREDIŠNJE OSI		(+2)	2.560	0.25	25	1.84	
R.B.	X_1	X_2	X_3	X_4	$R_a/\mu\text{m}$	$R_{max}/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$
1	-1	-1	-1	-1	0.35	3.05	2.71
2	+1	-1	-1	-1	0.37	3.04	2.73
3	-1	+1	-1	-1	0.24	2.46	1.92
4	+1	+	-1	-1	0.14	1.60	1.11
5	-1	-1	+1	-1	0.16	1.94	1.31
6	+1	-1	+1	-1	0.20	2.25	1.65
7	-1	+1	+1	-1	0.11	1.42	1.03
8	+1	+1	+1	-1	0.08	1.01	0.67
9	-1	-1	-1	+1	0.47	3.35	2.78
10	+1	-1	-1	+1	0.50	3.40	2.85
11	-1	+1	-1	+1	0.29	2.76	1.98
12	+1	+1	-1	+1	0.17	2.03	1.47
13	-1	-1	+1	+1	0.26	2.67	2.11
14	+1	-1	+1	+1	0.38	3.13	2.76
15	-1	+1	+1	+1	0.15	1.80	1.32
16	+1	+1	+1	+1	0.11	1.43	1.06
17	-2	0	0	0	0.25	2.53	1.90
18	+2	0	0	0	0.17	2.01	1.42
19	0	-2	0	0	0.45	3.13	2.77
20	0	+2	0	0	0.14	1.63	1.15
21	0	0	-2	0	0.36	3.09	2.71
22	0	0	+2	0	0.10	1.34	0.95
23	0	0	0	-2	0.07	0.98	0.63
24	0	0	0	+2	0.25	2.54	2.08
25	0	0	0	0	0.11	1.41	1.05
26	0	0	0	0	0.10	1.34	0.91
27	0	0	0	0	0.11	1.39	1.03
28	0	0	0	0	0.10	1.30	0.88
29	0	0	0	0	0.10	1.32	0.89
30	0	0	0	0	0.11	1.40	1.05
31	0	0	0	0	0.11	1.40	1.07

Na osnovi provedene analize, odnosno dobivenih koeficijenata regresije, može se izraziti funkcijska ovisnost srednjeg aritmetičkog odstupanja profila R_a i ispitivanih čimbenika kao:

$$\begin{aligned}
 R_a = & 0.105714 - 0.01 \cdot X_1 - 0.084167 \cdot X_2 - \\
 & - 0.066667 \cdot X_3 + 0.043333 \cdot X_4 - \\
 & - 0.03125 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.01625 \cdot X_1 \cdot X_3 + \\
 & + 0.01875 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.02375 \cdot X_2 \cdot X_4 + \\
 & + 0.030238 \cdot X_1^2 + 0.051488 \cdot X_2^2 + \\
 & + 0.035238 \cdot X_3^2 + 0.017738 \cdot X_4^2
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

uz faktor višestruke regresije $R=0.9874$ i faktor determinacije $R^2=0.9749$.

Razlika između izmjerenih i izračunatih vrijednosti prikazana je grafički na slici 6., iz čega se može uočiti dobra podudarenost vrijednosti što potvrđuje i visoka vrijednost faktora višestruke regresije.



Slika 6. Usporedba izmjerenih i izračunatih vrijednosti hrapavosti za Č5431 (DIN 34 CrNiMo 6)

Figure 6. Comparison of measured and calculated values of roughness for steel Č5431 (DIN 34 CrNiMo 6)

Deriviranjem izraza (5) po svakoj neovisnoj varijabli, dobiva se sustav linearnih jednadžbi:

$$\begin{aligned} 6.0476 \cdot X_1 - 3.125 \cdot X_2 + 1.625 \cdot X_3 - 1 &= 0 \\ -3.125 \cdot X_1 + 10.2976 \cdot X_2 + 1.875 \cdot X_3 - \\ -2.375 \cdot X_4 - 8.4167 &= 0 \\ 1.875 \cdot X_2 + 7.0476 \cdot X_3 - 6.6667 &= 0 \\ -2.375 \cdot X_2 + 3.5476 \cdot X_4 + 4.3333 &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Rješavanjem sustava jednadžbi (6) dobivaju se optimalne vrijednosti čimbenika u kodiranim vrijednostima:

$$\begin{aligned} X_1 &= 0.26247 & X_2 &= 0.56958 \\ X_3 &= 0.73339 & X_4 &= -0.84016 \end{aligned}$$

odnosno u fizičkim vrijednostima:

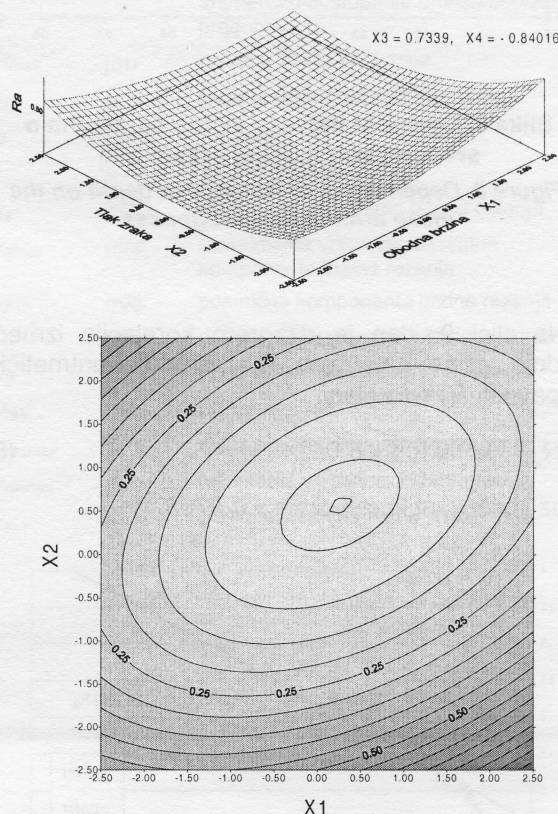
$$\begin{aligned} v_o &= 1.672 \text{ m/s} & p &= 0.178 \text{ MPa} \\ t &= 18.67 \text{ s} & R_{a0} &= 0.95 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

Vrijednosti dijagonalnih poddeterminanti determinante Δ (4) iznose:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 6.0476 \cdot 10^{-2} \\ \Delta_2 &= 5.2513 \cdot 10^{-3} \\ \Delta_3 &= 3.0259 \cdot 10^{-4} \\ \Delta_4 &= 8.4795 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

S obzirom da su vrijednosti svih dijagonalnih poddeterminanti determinante Δ (4) veće od nule, ispunjen je nužan i dovoljan uvjet po Sylvesterovom kriteriju da jednadžba (6) ima ekstremnu minimalnu vrijednost u točki (0.26247, 0.56958, 0.73339, -0.840169).

Na slici 7. prikazana je funkcijska ovisnost hrapavosti obrađene površine koja je dobivena pomoću jednadžbe regresije (5) za optimalne vrijednosti kodiranih čimbenika $X_3 = 0.73339$ i $X_4 = -0.84016$, koja potvrđuje dobiveni rezultat o postojanju minimalne vrijednosti srednje aritmetičke hrapavosti obrađene površine za navedene vrijednosti čimbenika.



Slika 7. Ovisnost hrapavosti obrađene površine o tlaku zraka i obodnoj brzini kod optimalnih vrijednosti vremena obrade i hrapavosti dobivene predobradom za Č5431 (DIN 34 CrNiMo 6)

Figure 7. Dependence of surface roughness upon the stone pressure and tangential velocity for optimal values of machining time and initial roughness for steel Č5431 (DIN 34 CrNiMo 6)

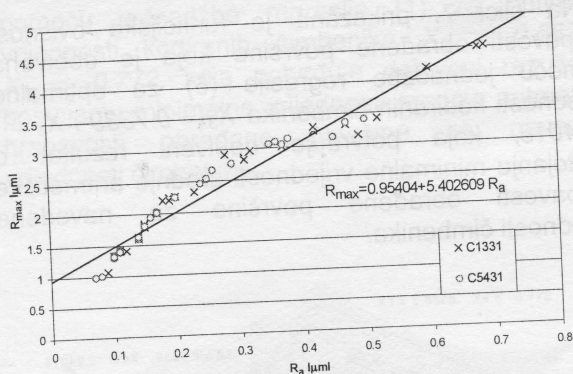
4.3. Ovisnost najveće i srednje visine neravnina o srednjoj aritmetičkoj hrapavosti

Dependence of roughness depth and average roughness on the mean arithmetical roughness

Na slici 8. dan je dijagram korelacije između najveće visine neravnina R_{max} i srednje aritmetičke hrapavosti R_a na kojoj se vidi korelacijska veza i linearna zakonitost ovisnosti koja glasi:

$$R_{max} = 0.95404 + 5.402609 \cdot R_a \quad (7)$$

uz koeficijent korelacije $r = 0.9719$.



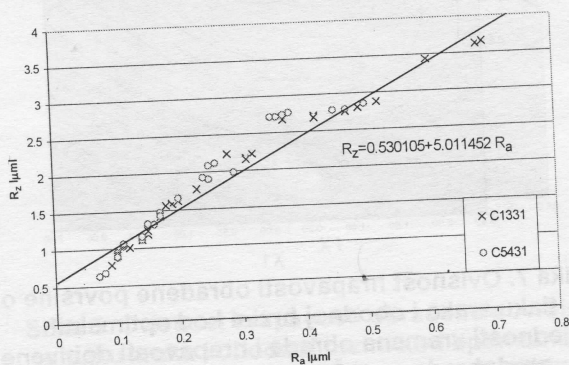
Slika 8. Ovisnost najveće visine neravnina o srednjoj aritmetičkoj hrapavosti

Figure 8. Dependence of roughness depth on the mean arithmetical roughness

Na slici 9. dan je dijagram korelacije između srednje visine neravnina R_z i srednje aritmetičke hrapavosti R_a koja glasi:

$$R_z = 0.530105 + 5.011452 \cdot R_a \quad (8)$$

uz koeficijent korelacije $r = 0.9766$.



Slika 9. Ovisnost srednje visine neravnina o srednjoj aritmetičkoj hrapavosti

Figure 9. Dependence of roughness depth on the mean arithmetical roughness

5. Zaključak Conclusion

Na temelju istraživanja u ovom radu, a koja se odnose na ispitivanje ovisnosti hrapavosti obrađene površine o utjecajnim čimbenicima materijala Č1331 (DIN Ck22) i Č5431 (DIN 34CrNiMo6) može se zaključiti sljedeće:

- Zbog nemogućnosti istodobne analize većeg broja utjecajnih čimbenika, a u cilju pronalazjenja matematičkog modela koji bi opisao ovisnost hrapavosti obrađene površine, odabrani su sljedeći čimbenici: obodna komponenta brzine rezanja, tlak zraka kojim brusna letva tlači obradak, vrijeme

obrade i hrapavost površine obratka dobivena predobradom. Regresijskom analizom došlo se do činjenice da su svi ispitivani čimbenici signifikantni. Najveći utjecaj na smanjenje hrapavosti ima tlak zraka, budući da je koeficijent regresijske analize za taj čimbenik najveći, a zatim slijede: vrijeme obrade, hrapavost dobivena predobradom te obodna komponenta brzine rezanja. Matematički model koji bi sadržavao samo čimbenike bez njihova međusobnog djelovanja, nije se pokazao zadovoljavajućim zbog relativno niskog koeficijenta regresijske analize, tako da je bilo potrebno uključiti i interakcije među čimbenicima. Najveći utjecaj na smanjenje hrapavosti obrađene površine ima interakcija tlaka zraka i prethodne hrapavosti te tlaka zraka i vremena obrade. Interakcije obodne komponente brzine rezanja i hrapavosti dobivene predobradom te vremena obrade i hrapavosti dobivene predobradom nisu se pokazale signifikantnima, tako da su izostavljene iz matematičkog modela.

- Provedena istraživanja ukazuju na nelinearnu ovisnost regresijskih funkcija hrapavosti obrađene površine o ispitivanim čimbenicima, što daje mogućnost njihovog optimiranja. Optimiranje je obavljeno analitičkim putem, parcijalnim deriviranjem i rješavanjem sustava linearnih jednadžbi, s ciljem dobivanja najmanje moguće hrapavosti obrađene površine. Time su određene optimalne vrijednosti ispitivanih čimbenika.

- Ovisnost najveće visine neravnina i srednje visine neravnina o srednjoj aritmetičkoj hrapavosti za postupak kratkohodnog honovanja moguće je opisati linearnom ovisnošću.

Uspoređujući rezultate istraživanja za dva materijala različitog kemijskog sastava i tvrdoće može se zaključiti sljedeće:

- Materijal s većom tvrdoćom (Č5431 (DIN 34 CrNiMo 6)), pokazuje tendenciju bržeg smanjenja hrapavosti, a isto tako je i konačna hrapavost obrađene površine manja, što je posljedica sitnijih odvojenih čestica i većeg istrošenja oštrica brusne letve. Na mekanijim materijalima stvaraju se dulje odvojene čestice, koje se lijepe za oštrice i teže izlaze iz prostora za smještaj odvojenih čestica na reznoj površini brusne letve. Zbog toga dolazi do povećanog trenja u procesu kratkohodnog honovanja i povećane hrapavosti obrađene površine.

Literatura

Bibliography

- [1] R. Cebalo, D. Bajić: Experimental investigation of the superfinishing process, 6th International Scientific Conference on Production Engineering, Lumbarda, 2000. Str. I-019-028.
- [2] D. Bajić: Doprinos poboljšanju obradivosti kod kratkohodnog honovanja (doktorska disertacija), FSB, Zagreb 2000.
- [3] T. Puthanangady, S. Malkin: Experimental investigation of the superfinishing process, Wear, 1995, 185:173-182.

[4] W. König: Fertigungsverfahren, Band 2, Schleifen, Honen, Lappen, VDI-Verlag, 1980.

[5] CoroKey: Priručnik za izbor alata, Sandvik Coromant, 1998.

[6] Swaty-Maribor, Proizvodni program, 1999.

[7] B. Kraut: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1985.

[8] Surtronic 3+: Operating instructions, Rank Taylor Hobson Limited

[9] I. Pavlić: Statistička teorija i primjena, Tehnička knjiga, Zagreb, 1970.

[10] J. Stanić: Metod inženjerskih mjerenja, Strojarski fakultet, Beograd, 1986.

[11] S. Hadživuković: Statistika, Privredni pregled, Beograd, 1989.

[12] N. Šakić: Optimiranje parametara zavarivanja, Skripta za seminar Optimiranje parametara zavarivanja, Društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 1985.

[13] Statgraph V4.2: Uputa za uporabu programa

[14] R. Cebalo: Optimalno područje brušenja u puno vatrootpornih Ni-legura za plinske turbine, doktorska disertacija, FSB Zagreb, 1985.

[15] R. Cebalo: Rječnik strojarskih tehnologija, Zagreb, 1998.

[16] R. Cebalo: Utjecaj načina profiliranja rezne površine brusa na sile brušenja i hrapavost brušene površine, Strojstvo, 29 (1987)5, Str. 237-246.

[17] R. Cebalo: Ovisnost dubine hrapavosti o srednjoj aritmetičkoj hrapavosti brušene površine kod različitih postupaka brušenja, Strojstvo, 35 (1993)5,6, Str. 231-235.

Oznake/Signs

F_a	N	aksijalna komponenta sile rezanja
F_n	N	normalna ili odzivna komponenta sile rezanja
F_o	N	obodna ili tangencijalna komponenta sile rezanja
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje profila
R_{a0}	μm	hrapavost obrađene površine (srednje aritmetičko odstupanje profila) dobivena predobradom
R_{max}	μm	najveća visina neravnina
R_z	μm	srednja vrijednost svih neravnina
p	MPa	tlak zraka
t	s	vrijeme trajanja obrade
V_a	m/s	aksijalna komponenta brzine rezanja
V_{amax}	m/s	maksimalna vrijednost aksijalne komponente brzine rezanja
V_f	m/s	posmična komponenta brzine rezanja
V_n	m/s	dostavna komponenta brzine rezanja
V_o	m/s	obodna komponenta brzine rezanja
V_{res}	m/s	brzina rezanja
V_{resmax}	m/s	maksimalna vrijednost brzine rezanja
V_{resmin}	m/s	minimalna vrijednost brzine rezanja
V_v	m/s	brzina vibriranja brusne letve

Rukopis primljen: 24.5.2001.



MEDITERANSKA PLOVIDBA

KORČULA - HRVATSKA

DIREKCIJA - KORČULA

Telegram: MEDITERANSKA KORČULA d.d.

Telefoni: 020 / 711-156, 020 / 711-155

Telefax: 020 / 711-157

Telex: 27528, MEDKOR HR

e-mail: medplov@du.tel.hr.

Internet: Crew@medplov.hr

**RASPOLAŽE SPECIJALNIM BRODOVIMA HLADNJAČAMA ZA PRIJEVOZ
LAKO POKVARLJIVIH TERETA PO SVIM MORIMA SVIJETA.**

PREVOZI ROBU U SLOBODNOJ PLOVIDBI PO SVIM MORIMA SVIJETA.

SUVREMENIM TRAJEKTOM ODRŽAVA VEZU KORČULA - KOPNO.