

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Izidor Demeter

Zagreb, 2012

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. Stephan Škorić, dipl.ing.

Student:

Izidor Demeter

Zagreb, 2012

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci koju mi je pružala tijekom školovanja, prijateljima, kolegama i kolegicama, te svim profesorima, a posebno mentoru prof. dr. sc. Stephanu Škoriću na stručnoj pomoći, vremenu i trudu uloženom tijekom izrade ovoga rada.

Izidor Demeter



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Izidor Demeter

Mat. br.: 0035167555

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**UTJECAJ MATERIJALA OBRADKA NA HRAPAVOST
OBRADENE POVRŠINE KOD TOKARENJA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**INFLUENCE OF WORKPIECE MATERIAL ON THE SURFACE
ROUGHNESS BY TURNING**

Opis zadatka:

Obradivost materijala je vrlo složen pojam, a opisuje se kao osnovna tehnološka karakteristika kojom se izražava podobnost obrade nekog materijala i ocjenjuje se skupom kriterija ili funkcija obradivosti. S obzirom na vrlo intenzivan razvoj reznih alata i obradnih strojeva istraživanje obradivosti je kontinuirani proces.

U prvom dijelu rada potrebno je, koristeći se dostupnom literaturom, najprije sistematizirati pojam, kriterije i metode obradivosti. Potom je potrebno sažeto sistematizirati utjecajne faktore na obradivost i u skladu s tim opisati obradivost najčešće korištenih čelika u strojogradnji.

U drugom dijelu rada potrebno je eksperimentalno ispitati funkcije hrapavosti obradene površine konkretnog čelika za cementiranje i čelika za poboljšavanje. Potrebno je diskutirati i analizirati utjecajne faktore na dobivene funkcije obradivosti.

Zadatak zadan:

13. rujna 2012.

Rok predaje rada:

15. studenog 2012.

Predvideni datum obrane:

21. i 22. studenog 2012.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Stephan Škorić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Čajner

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
2. ALATI ZA OBRADU ODVAJANJEM.....	2
2.1. TOKARSKI NOŽEVI.....	2
2.2. GLODALA.....	3
2.3. SVRDLA.....	4
3. OSNOVE OBRADIVOSTI.....	5
3.1. DEFINICIJA OBRADIVOSTI MATERIJALA.....	5
3.2. KRITERIJI OBRADIVOSTI.....	6
3.2.1. POSTOJANOST ALATA.....	7
3.2.2. SILE REZANJA.....	14
3.2.3. KVALITETA OBRADENE POVRŠINE.....	16
3.2.4. OBLIK ODVOJENE ČESTICE.....	18
3.3. METODE ZA ISTRAŽIVANJE OBRADIVOSTI I FUNKCIJE OBRADIVOSTI.....	22
2.3.1. KOMPARATIVNE METODE ISTRAŽIVANJA OBRADIVOSTI.....	22
2.3.2. KOMPLEKSNE METODE ISTRAŽIVANJA OBRADIVOSTI (FUNKCIJE OBRADIVOSTI).....	25
4. OBRADIVOST ČELIKA.....	26
4.1. UTJECAJNI FAKTORI NA OBRADIVOST ČELIKA.....	26
4.1.1. MIKROSTRUKTURA.....	27
4.1.2. KEMIJSKI SASTAV.....	31
4.1.3. TOPLINSKA OBRADA.....	38

4.2.	OBRADIVOST ČESTO KORIŠTENIH VRSTA ČELIKA	43
4.2.1.	ČELICI ZA OBRADU NA AUTOMATIMA	44
4.2.2.	ČELICI ZA CEMENTIRANJE	46
4.2.3.	ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE	48
4.2.4.	ČELICI ZA NITRIRANJE.....	49
4.2.5.	NEHRĐAJUĆI ČELICI.....	50
4.2.6.	ALATNI ČELICI	53
5.	EKSPERIMENTALNI DIO	55
5.1.	CILJ I METODOLOGIJA ISPITIVANJA.....	55
5.2.	OPĆE KARAKTERISTIKE VIŠEFAKTORSKIH PLANOVA POKUSA	56
5.3.	PRIPREMA I PLANIRANJE EKSPERIMENTA	60
5.3.1.	KARAKTERISTIKE STROJA.....	60
5.3.2.	ALAT	62
5.3.3.	MATERIJAL OBRATKA	63
5.3.4.	MJERNI INSTRUMENT.....	64
5.3.5.	IZBOR MATEMATIČKOG MODELA I PLANIRANJE ISTRAŽIVANJA	66
5.4.	REZULTATI POKUSA	71
5.4.1.	REZULTATI POKUSA ZA PARAMETAR HRAPAVOSTI R_a	72
5.4.2.	REZULTATI POKUSA ZA PARAMETAR HRAPAVOSTI R_z	75
6.	ZAKLJUČAK.....	78
	LITERATURA.....	79

POPIS SLIKA

Slika 1. Jednodjelni tokarski nož i nož sa izmjenjivim reznim pločicama [1].....	2
Slika 2. Jednodjelno glodalo i s glodalo s izmjenjivim reznim oštricama [1]	3
Slika 3. Jednodjelno svrdlo i svrdlo s izmjenjivim reznim oštricama [2].....	4
Slika 4. Primjer podjele utjecajnih faktora na obradivost materijala [4]	6
Slika 5. Udjeli pojedinih faza trošenja u ovisnosti o temperaturi [5].....	8
Slika 6. Raspored trošenja na površini reznog klina [5]	8
Slika 7. Tipska krivulja trošenja [1].....	9
Slika 8. Trošenje na stražnjoj površini alata [5].....	10
Slika 9. Krater na reznoj pločici [5]	11
Slika 10. Krzanje oštrice [5].....	12
Slika 11. Zarezo trošenje [5]	12
Slika 12. Plastična deformacija oštrice [5].....	13
Slika 13. Lom rezne oštrice [5].....	13
Slika 14. Komponente sila i brzina rezanja pri postupku tokarenja [1]	15
Slika 15. Razlučivanje P, W i R karakteristika profila [3].....	16
Slika 16. Teorijska hrapavost obrađene površine kod obrade alatom pri $r_e = 0$ [5]	17
Slika 17. Teorijska hrapavost obrađene površine kod obrade alatom pri $r_e > 0$ [5].....	17
Slika 18. Oblici odvojene čestice [1]	18
Slika 19. Oblik odvojene čestice u ovisnosti o dubini rezanja (a_p) i posmaka (f) [5].....	20
Slika 20. Ferit (M 500:1) [3].....	28
Slika 21. Lamelarni perlit (M 500:1) [3].....	29
Slika 22. Austenit (M 500:1) [3].....	30
Slika 23. Igličasti bainit [3].....	30
Slika 24. Martenzit (M 500:1) [3].....	31
Slika 25. Fe – C metastabilni dijagram stanja [11]	32

Slika 26. Ovisnost obradivosti o sadržaju ugljika kod nelegiranih čelika i za obradu odvajanjem odgovarajuće strukture: (a) Widmannstättenova struktura; (b) grubozrnata struktura [3].....	33
Slika 27. Dijagram Fe – C s područjima toplinske obrade [13].....	39
Slika 28. Struktura čelika C45E pri različitim toplinskim obradama [3].....	42
Slika 29. Fazni dijagram Cr-Ni čelila s prikazom mikrostrukturnih konstituenata ovisno u udjelu željeza, kroma i nikla [3].....	51
Slika 30. Kibernetički pristup modeliranja objekta istraživanja [1].....	58
Slika 31. Blok shema izvođenja pokusa [1].....	59
Slika 32. Tokarski obradni centar HACO TUR 580 MN.....	60
Slika 33. Prikaz obratka u steznoj čeljusti.....	61
Slika 34. Držač i rezna pločica proizvođača Seco Tools [16].....	62
Slika 35. Geometrija rezne pločica marke Seco Tools [16].....	62
Slika 36. Korištena rezna pločica.....	62
Slika 37. Primjer obradka (16MnCr5).....	63
Slika 38. Uređaj za mjerenje parametara hrapavosti površine Mitutoyo SP-201.....	65
Slika 39. Zahvat ticala mjernog uređaja i obratka.....	65
Slika 40. Raspored eksperimentalnih točaka [1].....	69
Slika 40. Dijagram ovisnosti $R_a=f(v_c, f)$ za čelik 16MnCr5.....	73
Slika 41. Dijagram ovisnosti $R_a=f(v_c, f)$ za čelik 34CrNiMo6.....	74
Slika 42. Dijagram ovisnosti $R_z=f(a_p, f)$ za čelik 16MnCr5.....	76
Slika 43. Dijagram ovisnosti $R_z=f(v_c, f)$ za čelik 34CrNiMo6.....	77

POPIS TABLICA

Tablica 1. Ovisnost Taylorovog eksponenta m o vrsti materijala [6]	9
Tablica 2. Rješavanje problema trošenja stražnje površine [7].....	11
Tablica 3. Rješavanje problema kraterskog trošenja [7].....	11
Tablica 4. Rješavanje problema zareznog trošenja [7]	12
Tablica 5. Rješavanje problema deformacije rezne oštrice [7]	13
Tablica 6. Rješavanje problema loma rezne oštrice [7]	14
Tablica 7. Utjecaj uvjeta obrade i geometrije alata na odvojenu česticu [7]	20
Tablica 8. Različiti oblici odvojene čestice [7].....	21
Tablica 9. Mehanička svojstva pojedinih oblika mikrostrukture čelika [3].....	27
Tablica 10. Obradivost u ovisnosti o provedenoj toplinskoj obradi [7].....	39
Tablica 11. Obradivost različitih čeličnih materijala [7].....	43
Tablica 12. Kem sastav i tvrdoća nakon normalizacije čelika 16MnCr5 i 34CrNiMo6.....	63
Tablica 13. Razina variranja faktora za centralno kompozitni plan pokusa drugog reda " 2^3+6+6 " uz korištenje dodatnih osnovnih točaka umjesto koeficijenta " α "	69
Tablica 14. Matrica plana pokusa " 2^3+6+6 "	70
Tablica 15. Rezultati mjerenja parametara hrapavosti čelika za cementiranje 16MnCr5 (Č4320)	71
Tablica 16. Rezultati mjerenja parametara hrapavosti čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431).....	72
Tablica 17. Vrijednosti parametara matematičkog modela za parametar hrapavosti R_a čelika za cementiranje 16MnCr5 (Č4320)	73
Tablica 18. Vrijednosti parametara matematičkog modela za parametar hrapavosti R_a poboljšanog čelika 34CrNiMo6 (Č5431).....	74
Tablica 19. Vrijednosti parametara matematičkog modela za parametar hrapavosti R_z čelika za cementiranje 16MnCr5 (Č4320)	75

Tablica 20. Vrijednosti parametara matematičkog modela za parametar hrapavosti R_z čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431).....	76
---	----

POPIS OZNAKA

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
A	mm ²	Poprečni presjek odvojene čestice
a _p	mm	Dubina obrade
C _t		Taylorova konstanta
f	mm	Posmak
F _c	N	Glavna sila rezanja
F _f	N	Posmična sila rezanja
F _p	N	Natražna sila rezanja
F _r	N	Rezultantna sila rezanja
HB		Tvrdoća po Brinellu
HRC		Tvrdoća po Rockwellu
HV		Tvrdoća po Vickersu
I ₀		Indeks obradivosti
K _{0 EM}		Kriterij obradivosti etalon materijala
K _{0 IM}		Kriterij obradivosti ispitivanog materijala
k		Broj utjecajnih faktora
L _B	mm	Dužina bušenja
m		Taylorova konstanta
N		Ukupan broj eksperimentalnih točaka
n ₀		Broj pokusa u središnjoj točki plana
P	kW	Snaga
R _a	μm	Srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti
R _e	N/mm ²	Granica elastičnosti
R _{p0,2}	N/mm ²	Konvencionalna granica razvlačenja
R _t	μm	Ukupna visina profila
R _z	μm	Visina neravnina profila hrapavosti u deset točaka
r _ε	mm	Radius vrha alata

r		Koeficijent korelacije
S_k		Koeficijent volumena
T	min	Trajnost oštice
v_c	$m \min^{-1}$	Glavna brzina rezanja
v_f	$m \min^{-1}$	Posmična brzina rezanja
v_e	$m \min^{-1}$	Rezultantna brzina rezanja
VB	mm	Istrošenost stražnje površine
v_l	$m \min^{-1}$	Brzina rezanja u trenutku zatupljenja alata na dužini l
V_m	m^3	Volumen materijala obradka
V_{st}	m^3	Volumen odvojene čestice
Z		Vrijednost konačnog suženja presjeka
α_0	°	Stražnji kut alata
β_0	°	Kut klina
γ_0	°	Prednji kut alata
λ_s	°	Kut nagiba oštice
χ_r	°	Napadni kut

SAŽETAK

U ovom je diplomskom radu istražen utjecaj materijala obradka na hrapavost obrađene površine kod postupka tokarenja.

Prvi dio rada sistematizira dosadašnje spoznaje o obradivosti materijala. Nakon pregleda najčešće korištenih vrsta alata za obradu odvajanjem čestica, slijedi uvod u tematiku obradivosti te osnovne definicije sa posebnom razradom svakog pojedinog kriterija obradivosti. Također su objašnjene i metode istraživanja te funkcije obradivosti. Poseban naglasak stavljen je na obradivost čelika, s obzirom na činjenicu da se radi o najčešće korištenom tehničkom materijalu u svijetu. Prikazane su spoznaje iz literature o različitim utjecajnim faktorima na obradivost čelika pri čemu dominantna uloga pripada mikrostrukturi, kemijskom sastavu te provedenoj toplinskoj obradi. Posebno je opisana obradivost najčešće korištenih vrsta čelika u strojogradnji.

Eksperimentalnim je dijelom prikazan utjecaj parametara obrade bez upotrebe sredstva za hlađenje, podmazivanje i ispiranje, na hrapavost obrađene površine kod postupka tokarenja. Koristeći opremu i strojeve tvrtke DMB d.o.o. izvršena su eksperimentalna istraživanja na čeliku za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431) i čeliku za cementiranje 16MnCr5 (Č4320). Ispitivan je utjecaj parametara obrade (posmak, dubina obrade, brzina rezanja) na vrijednosti hrapavosti obrađene površine. Statističkom je obradom opisan utjecaj ulaznih veličina (parametara obrade) na hrapavost obrađene površine. Dobiveni su rezultati zatim uspoređeni te prikazani tablično i grafički.

1. UVOD

Prijelomni koraci u racionalizaciji proizvodnje kroz povijest bili su uvjetovani trenutnim društvenim odnosima i dostignutim stupnjem tehnološkog razvoja. S obzirom na današnju krizu i recesiju koja je zahvatila cijeli svijet, te veliku konkurenciju na svim područjima djelatnosti, a pogotovo u proizvodnji, poduzeća su primorana koristiti se različitim sredstvima i metodama kako bi osigurala opstanak vlastite proizvodnje. S ciljem očuvanja konkurentnosti, poduzeće ne smije dovesti u pitanje kvalitetu proizvoda, što znači da smanjenje troškova proizvodnje predstavlja veliki izazov. Uloga obradivosti također spada u jednu od kategorija koje treba razmatrati ukoliko se teži ostvarivanju efikasne i ekonomične proizvodnje. Pod pojmom obradivosti podrazumijeva se skup svih karakteristika obrađivanog materijala, alata te alatnog stroja koji ima utjecaj na proces obrade. Utvrđivanjem obradivosti određenog materijala, koja se uvijek promatra u kontekstu sa metodom obrade koja se primjenjuje, obrađivanog materijala te uvjeta obrade, moguće je ostvariti utjecaj na smanjenje ukupnog vremena obrade te problema trošenja alata i time ostvariti značajan utjecaj na smanjenje troškova te povećanje produktivnosti. U nastavku se opisuju vrste alata za obradu odvajanjem, kriteriji obradivosti, te utjecajni faktori na obradivost s posebnim naglaskom na obradivost čelika.

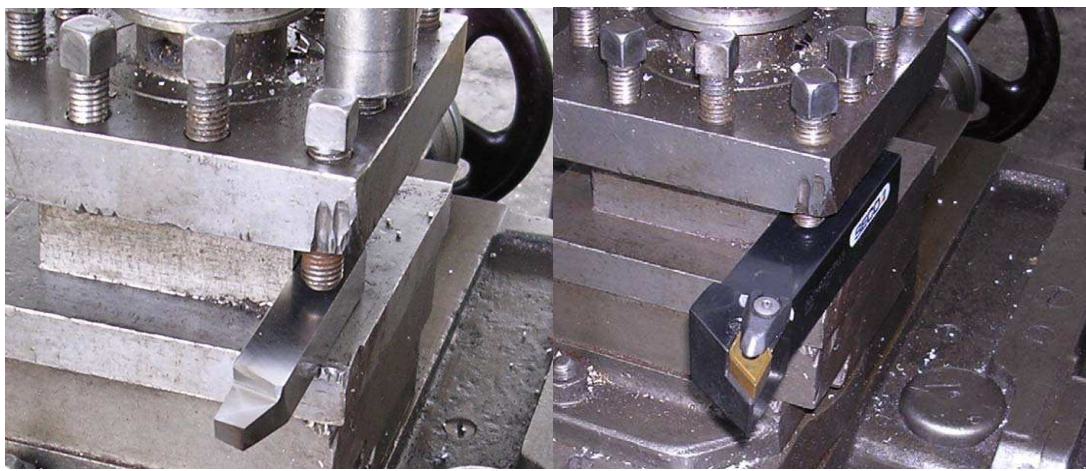
2. ALATI ZA OBRADU ODVAJANJEM

Na početku se navode i objašnjavaju najčešći alati za obradu odvajanjem s geometrijski definiranom oštricom. Mogu biti izrađeni kao jednodjelni alat (alati od brzoreznog čelika), ili kao alati sa izmjenjivim pločicama kod kojih se primjenjuju rezne pločice od različitih materijala (kompozitni materijali, keramika, dijamant, CBN itd.), od kojih su najčešće korišteni tokarski noževi, glodala i svrdla, čiji kratak opis, podjela i pregled materijala od kojih se izrađuju slijedi u nastavku.

2.1. TOKARSKI NOŽEVI

Alat za tokarenje je tokarski nož definirane geometrije reznog dijela, s jednom glavnom reznom oštricom. Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica za izradu pretežno rotacijskih (simetričnih i nesimetričnih te okruglih i neokruglih) predmeta. Izvodi se na alatnim strojevima, tokarilicama i tokarskim obradnim centrima, pri čemu je glavno (režno) gibanje kružno kontinuirano i izvodi ga obradak. Posmično gibanje je kontinuirano pravocrtno gibanje u ravnini okomitoj na pravac brzine glavnog gibanja i izvodi ga alat [1]. Os glavnog gibanja ne mijenja svoj položaj prema obradku bez obzira na smjer brzine posmičnog gibanja. Glavna brzina rezanja se označava sa v_c , posmična sa v_f , dok je v_e rezultatna brzina rezanja. Glavna sila rezanja se označava sa F_c , posmična sa F_f te natražna sa F_p dok je F_r prostorna rezultanta.

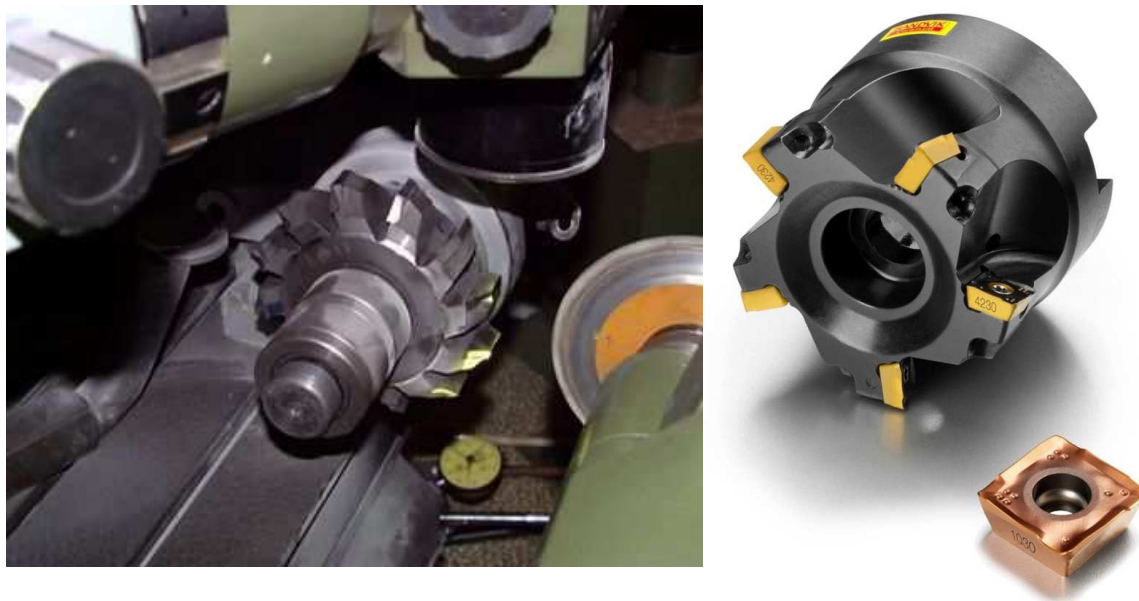
Postoje dvije izvedbe tokarskog noža, prva je nož izrađen od jednog dijela (uglavnom od brzoreznog čelika, te nož s izmjenjivim reznim pločicama (nosač pločica – uglavnom od nekog konstrukcijskog čelika, te izmjenjive pločice – tvrdi metal, cernet, keremika...).



Slika 1. Jednodjelni tokarski nož i nož sa izmjenjivim reznim pločicama [1]

2.2. GLODALA

Alat za glodanje je glodalo definirane geometrije reznog dijela, s više glavnih reznih oštrica koje se nalaze na zubima glodala i mogu biti smještene ili na obodnoj ili na obodnoj i čeonj plohi glodala. Zubi glodala periodično ulaze u zahvat s obratkom i izlaze iz njega tako da je dinamičko opterećenje jedno od osnovnih obilježja glodala. Istodobno je u zahvatu s obratkom samo nekoliko zuba glodala. Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica koje se koristi za dobivanje širokog spektra površina proizvoljnih oblika. Izvodi se na alatnim strojevima, glodalicama i glodačim obradnim centrima, pri čemu je glavno (režno) gibanje kružno kontinuirano i izvodi ga alat. Posmično gibanje je kontinuirano, proizvoljnog oblika i smjera i najčešće ga izvodi obradak. Os okretanja glavnog gibanja ne mijenja svoj položaj prema alatu bez obzira na smjer brzine posmičnog gibanja [1]. Glodalo također može biti izvedeno, kao i tokarski nož, na 2 načina – jednostjelno, ili glodalo sa izmjenjivim reznim pločicama (slika 2).



Slika 2. Jednodjelno glodalo i s glodalo s izmjenjivim reznim oštricama [1]

2.3. SVRDLA

Alat za bušenje rupa i provrta je svrdlo definirane geometrije reznog dijela, s dvije glavne rezne oštrice i jednom poprečnom oštricom koja otežava obradu ali mora postojati. Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica koji se upotrebljava za bušenje provrta manjih promjera ili proširivanje istih na veće promjere. Izvodi se na alatnim strojevima, najčešće na bušilicama, pri čemu je glavno gibanje kružno kontinuirano, a posmično gibanje kontinuirano pravocrtno i potrebno ga je izvoditi istodobno kad i glavno gibanje da bi se zadržao kontinuitet obrade. Ako se obrada izvodi na bušilicama sva gibanja izvodi alat. Neke od karakteristika obrade bušenjem su mala krutost sustava, otežano odvođenje odvojene čestice i dovođenje sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP), promjenjiva brzina te promjenjivi kutevi rezanja duž glavne rezne oštrice [1]. Kao i tokarski nož i glodalo, svrdla također mogu biti jednodjelna ili sa izmjenjivim reznim oštricama (slika 3.).



Slika 3. Jednodjelno svrdlo i svrdlo s izmjenjivim reznim oštricama [2]

3. OSNOVE OBRADIVOSTI

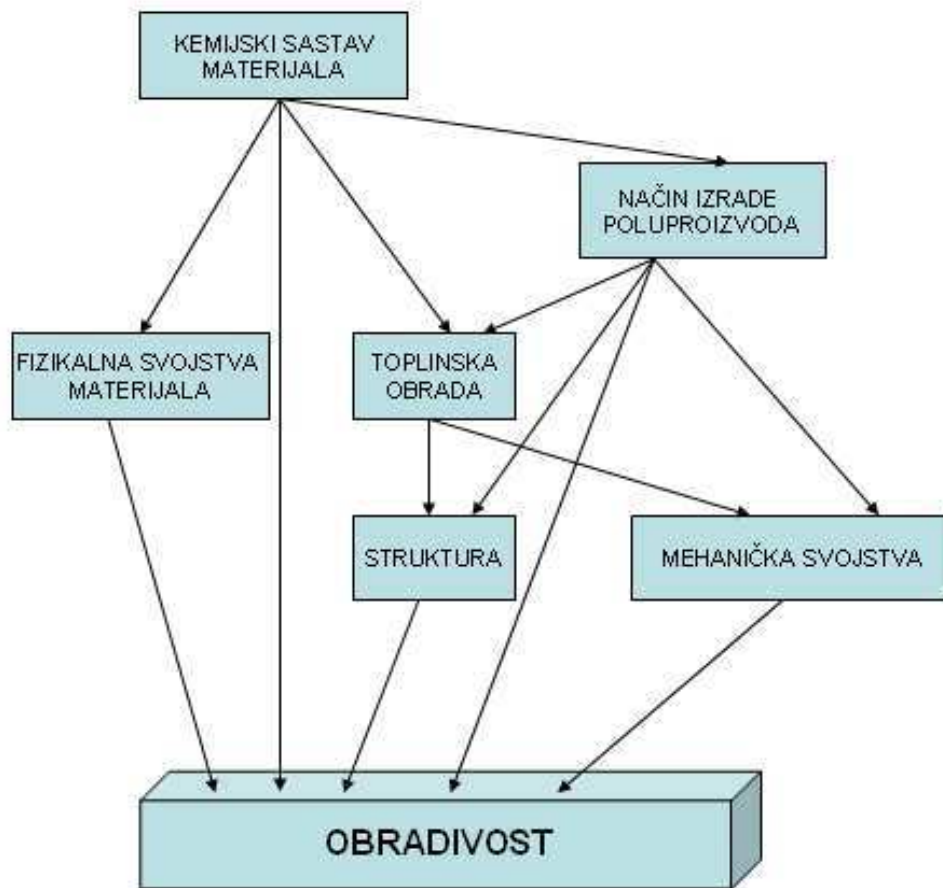
3.1. DEFINICIJA OBRADIVOSTI MATERIJALA

Pojam obradivosti materijala u obradi odvajanjem čestica predstavlja pojam koji je vrlo teško jednoznačno odrediti. Postoje mnoge definicije obradivosti, a najprikladnija glasi – obradivost je osnovna tehnološka karakteristika materijala kojom se izražava njegova pogodnost za obradu, a ocjenjuje se skupom kriterija ili funkcija obradivosti, koristeći se pri tome skupom metoda za ispitivanje obradivosti [10].

Najbolje obradiv je onaj materijal koji omogućuje najbrže odnošenje najveće količine materijala sa zadovoljavajućom kvalitetom obrađene površine. Može se reći kako obradivost ogleda kao rezultat više različitih djelovanja faktora procesa rezanja, i to u međudnosu sa režimima rezanja (brzina, posmak i dubina rezanja) [3]:

- materijal i geometrija obradka
- materijal i geometrija alata
- sredstvo za hlađenje i podmazivanje (SHIP)
- krutost stroja

Obradivost će općenito biti bolja što je veći broj kriterija (funkcija) obradivosti postiglo veći pozitivni utjecaj. Postoji također i mogućnost oprečnih rezultata, npr. u slučaju da jedan materijal po kriteriju postojanosti oštrice alata ima dobru obradivost, a istovremeno zbog sklonosti stvaranju naljepaka po kriteriju kvalitete nema zadovoljavajuću obradivost. Shematski prikaz utjecajni faktora na obradivost prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 4. Primjer podjele utjecajnih faktora na obradivost materijala [4]

3.2. KRITERIJI OBRADIVOSTI

Obradivost materijala u tehnologijama obrade odvajanjem čestica opisuje se sa četiri osnovna kriterija [5]:

- postojanost alata
- sile rezanja
- kvaliteta obrađene površine
- oblik odvojene čestice

Navedeni kriteriji nemaju jednaki značaj u različitim proizvodnim uvjetima i tehnološkim tokovima procesa obrade, stoga je potrebno rangirati utjecajne faktore za pojedine slučajeve.

3.2.1. POSTOJANOST ALATA

Troškovi proizvodnje i vrijeme izrade zavise od postojanosti alata, pa se može reći da je određeni materijal bolje obradiv ako je postojanost alata veća. Postojanost alata predstavlja vrijeme rezanja u toku kojeg alat vrši rezanje do svog zatpućenja tj. do unaprijed definiranog stupnja istrošenosti nakon kojeg daljnja upotreba istog alata nije preporučena. Najčešće se izražava u vremenskim jedinicama, iako jedinice postojanosti mogu biti i neki drugi pokazatelj (npr. broj obrađenih komada).

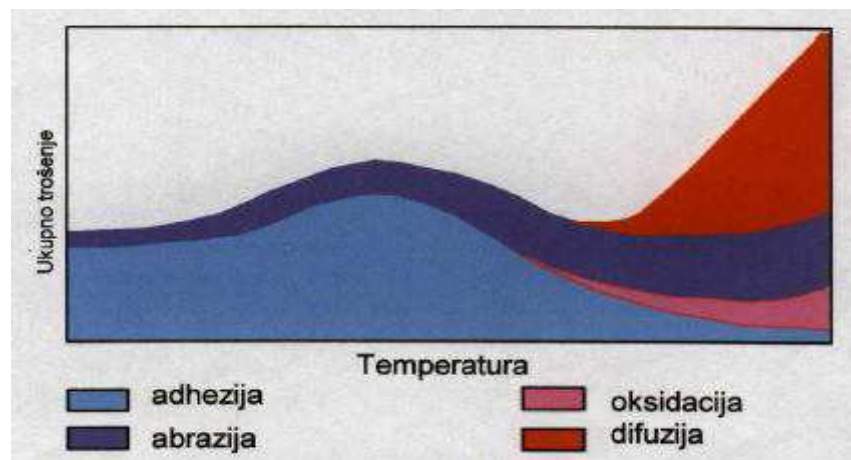
Procesi (mehanizmi) trošenja nastaju kao rezultat opterećenja kojima je alat izložen tijekom obrade, a mogu se podijeliti u dvije skupine [5]:

- Procesi koji su posljedica mehaničkog djelovanja
- Procesi koji su posljedica fizikalno–kemijskog djelovanja između alata, obratka te okoline.

Glavni mehanizmi trošenja koji se pojavljuju kao rezultat navedenih procesa pri obradi rezanjem na mjestu interakcije između alata i obratka su [5]:

- Abrazijsko trošenje
- Difuzijsko trošenje
- Oksidacijsko trošenje
- Adhezijsko trošenje

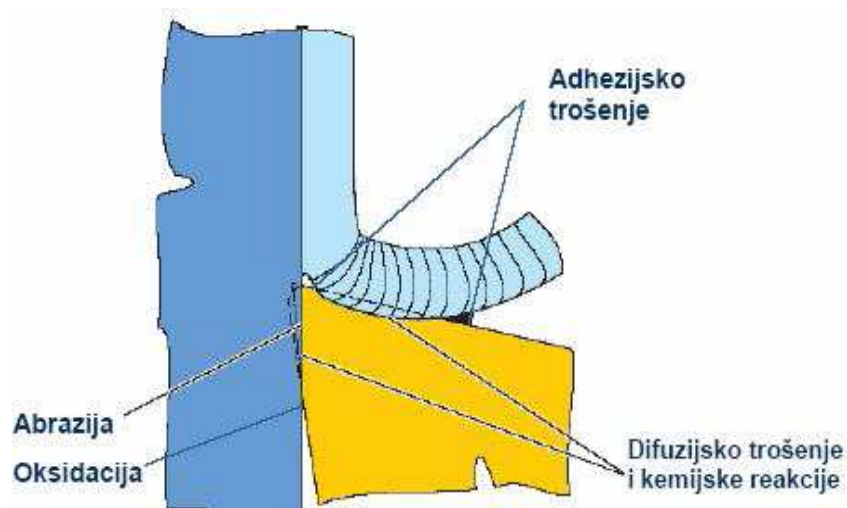
Veličina i udio pojedinih mehanizama u konkretnom slučaju ovisi svojstvima obratka, svojstvima alata te o parametrima i uvjetima obrade, ali općenito gledajući, udio pojedinih mehanizama trošenja najviše ovisi o temperaturi koja se razvija na mjestu interakcije alata i obratka za vrijeme rezanja kao što je prikazano na slici 5.



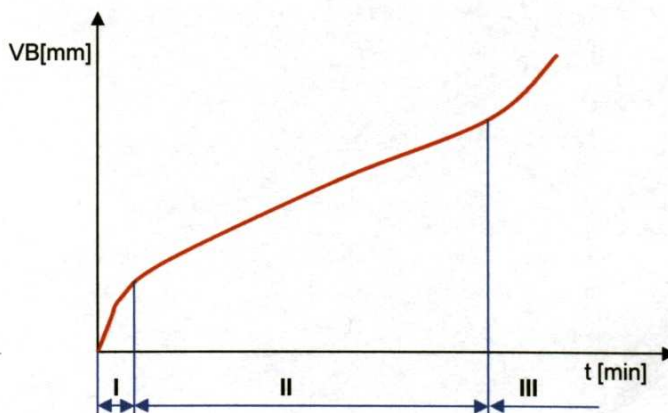
Slika 5. Udjeli pojedinih faza trošenja u ovisnosti o temperaturi [5]

Prema slici 5 može se zaključiti da su abrazijsko i adhezijsko trošenje zastupljeni pri svim temperaturama što znači da je neophodna njihova redukcija i prilikom obrade odvajanjem manjim brzinama, dok nema razvijanja visokih temperatura, kako bi se omogućilo da alat provede dovoljni vremenski period prije nego dođe do dozvoljene istrošenosti oštrice. Visoke temperature intenziviraju i preostala dva tipa trošenja rezne oštrice – difuziju i oksidaciju. S obzirom da je glavni cilj osigurati duži vijek trajanja alata, potrebno je odabrati alat koji će pokazati što veću otpornost na prisutne mehanizme trošenja. To će ovisiti o parametrima obrade i tipove trošenja koji će se pri takvim uvjetima javljati.

Na slici 6 prikazano je na kojim dijelovima površine reznog klina dolazi do pojedinih mehanizama trošenja.



Slika 6. Raspored trošenja na površini reznog klina [5]



Slika 7. Tipska krivulja trošenja [1]

Na slici 7 prikazan je primjer tipske krivulje trošenja, primjećuju se 3 različite faze prema vremenu obrade: I. se odnosi na period uhodavanja, II. na period „normalnog trošenja“, a posljednja III. faza označava period naglog trošenja te u konačnici tzv. „smrt“ alata. Oblik krivulje je približno isti za sve vrste materijala reznih alata, razlike su naravno u iznosima trošenja i ukupnog vremena nakon kojeg dolazi do perioda naglog trošenja. Tipska krivulja vrijedi za određenu kombinaciju alat-obradak i pri sljedećim uvjetima obrade: $A=ap \cdot f = konst.$, $v_c = konst.$

S obzirom da je temperatura tijekom rezanja najvažnija varijabla pri procjeni vijeka trajanja alata, postoje određeni modeli kojima se može izračunati približni vijek trajanja alata, a jedan od njih je i opći oblik Taylorovog modela koji prikazuje trošenje ovisno o glavnoj brzini rezanja [5]:

$$v_c \times T^m = C_t$$

u kojem se v_c odnosi na glavnu brzinu rezanja, T na trajnost oštrice, dok C_t predstavlja Taylorovu konstantu, a m Taylorov eksponent. Vrijednosti Taylorovog eksponenta variraju s obzirom na vrstu materijala koji se primjenjuje pri obradi, neke od vrijednosti prikazane su u sljedećoj tablici.

Tablica 1. Ovisnost Taylorovog eksponenta m o vrsti materijala [6]

Vrsta materijala:	m
Brzorezni čelik	0,1
Tvrđi metal	0,2
Keramika	0,4

Može se utvrditi kako vrijednost Taylorovog eksponenta m raste s obzirom na otpornost koju materijal pokazuje prema padu tvrdoće na povišenim temperaturama. Važno je napomenuti kako se za Taylorov proračun pretpostavlja konstantan presjek odvojene čestice ($a_p \times f$) te konstanta brzina rezanja. Uglavnom se kao parametar trošenja uzima trošenje na stražnjoj površini alata (VB), koje je prikazano na slici 8.

Oblici trošenja su [5]:

- Trošenje na stražnjoj površini alata
- Trošenje na prednjoj površini alata
- Krzanje oštrice
- Zarezno trošenje
- Plastična deformacija oštrice alata
- Lom oštrice

Spomenuto trošenje stražnje površine prisutno je uvijek. Pod ovim oblikom trošenja smatra se trošenje na stražnjoj površini alata, ispod rezne oštrice, a mjeri se kao udaljenost vrha rezne oštrice do donjnjeg ruba istrošene stražnje površine alata (VB). Uzroci ovog trošenja su najčešće prevelika brzina obrade te smanjena otpornost alata na trošenje. Posljedice su porast sila rezanja, povećane vibracije, rast temperature u zoni rezanja, pad kvalitete obrađene površine te dimenzijske netočnosti na obradku.



Slika 8. Trošenje na stražnjoj površini alata [5]

Tablica 2. Rješavanje problema trošenja stražnje površine [7]

Uzrok	Rješenje
Previsoka brzina rezanja	Smanjenje brzine rezanja
Alat s nedovoljnom otpornošću na trošenje	Odabir alata s boljom otpornošću na trošenje, poželjno s određenom prevlakom
Neodgovarajući posmak (preмали posmak)	Prilagoditi posmak u odnosu sa brzinom i dubinom rezanja (povećati posmak)

Trošenje na prednjoj površini alata očituje se pojavom kratera (udubljenja) blizu prednje oštice alata tako da između kratera i ruba oštice ostane mala površina (slika 9). Ta je površina ponekad prekrivena naljepkom (BUE). Prednja površina alata se troši pri povećanim brzinama rezanja, a najčešći su uzroci previsoke temperatura u zoni rezanja te previsoki pritisci na prednjoj površini alata [5].



Slika 9. Krater na reznoj pločici [5]

Tablica 3. Rješavanje problema kraterskog trošenja [7]

Uzrok	Rješenje
Previsoka brzina rezanja i/ili posmak	Smanjenje brzine rezanja i posmaka
Premali prednji kut alata	Korištenje držača i pločice s pozitivnim prednjim kutem
Loš odabir SHIP-a	Povećati dotok ili tlak SHIP-a
Alat s nedovoljnom otpornosti na trošenje	Odabir otpornijeg alata na stvaranje kratera te korištenje prevučenih alata

Trošenje u obliku krzanja rezne oštice najčešće nastaje zbog prekrute rezne oštice te zbog stvaranja naljepaka na prednjoj površini alata. Primjer krzanjem istrošene rezne oštice prikazan je na slici 10 [5].



Slika 10. Krzanje oštrice [5]

Zarežno trošenje može se pojaviti na glavnoj, ali i na pomoćnoj reznjoj oštrici. Uzrokuje lošu kvalitetu obrađene površine, te povećava rizik od loma oštrice. Zarežno trošenje glavne oštrice uglavnom je uzrok mehaničkih opterećenja, dok je zarežno trošenje sekundarne oštrice posljedica adhezivne, a vrlo često i oksidacijske komponente trošenja, a o tom je slučaju koncentrirano na mjesto gdje zrak ima pristup zoni rezanja [5].



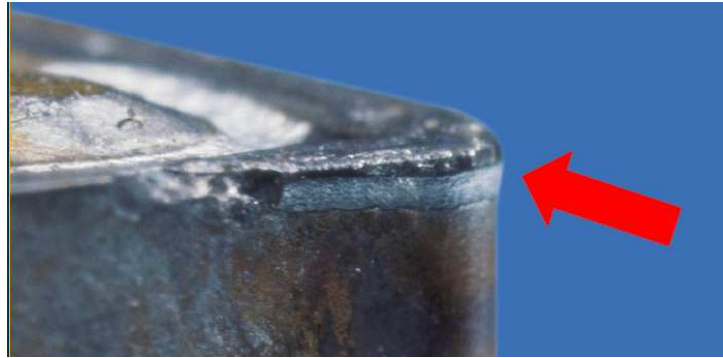
Slika 11. Zarežno trošenje [5]

Tablica 4. Rješavanje problema zareznog trošenja [7]

Uzrok	Rješenje
Oksidacija	Odabir alata s odgovarajućom prevlakom
Abrazija	Smanjenje brzina rezanja, ali pri obradi tvrdih materijala s keramičkim reznim pločicama – povećati brzinu rezanja

Deformacija rezne oštrice nastaje pri velikim naprezanjima rezne oštrice prilikom obrade visokim posmičnim brzinama te visokim silama rezanja. Povećano naprezanje rezultira povišenjem temperature u zoni rezanja koja se prenosi na reznju oštricu, a pošto je istodobno

izložena visokim opterećenjima, dolazi do deformiranja. Smanjenjem posmaka i dubine rezanja, kao i izbor odgovarajuće geometrije alata moguće je riješiti problem ovog oblika trošenja [5].



Slika 12. Plastična deformacija oštrice [5]

Tablica 5. Rješavanje problema deformacije rezne oštrice [7]

Uzrok	Rješenje
Previsoka temperatura	Smanjiti brzine rezanja Upotreba alata otpornijeg na trošenje Smanjiti kapacitet rezanja (posebno posmaka) Upotreba pločice odgovarajućeg radijusa Smanjiti upadni kut SHIP
Oštećenje prevlake	Smanjenje brzina rezanja, ali pri obradi tvrdih materijala s keramičkim reznim pločicama – povećati brzinu rezanja

Lom rezne oštrice događa se kada zbog previsokih mehaničkih opterećenja nema razvoja uniformnog oblika trošenja nego vrlo brzo dolazi do loma. Primjer loma rezne oštrice prikazan je na slici 13.



Slika 13. Lom rezne oštrice [5]

Tablica 6. Rješavanje problema loma rezne oštrice [7]

Uzrok	Rješenje
Prekrhki materijal alata	Primjena žilavijeg materijala alata odgovarajuće pripremljene rezne oštrice
Vibracije	Pozitivni prednji kut alata te pozitivni kut nagiba oštrice, manji radijus oštrice, manji prepust držača alata, veći kut prednamještanja, izbjegavati zonu stvaranja naljepka
Slaba rezna geometrija	Izabrati bolju geometriju alata s odgovarajuće pripremljenom reznom oštricom
Naljepak	Povećati brzinu obrade, odabir pravilne geometrije
Prevelik posmak ili dubina rezanja	Smanjiti posmak i/ili brzinu rezanja, upotreba žilavijeg alata, odabir pravilne geometrije alata, priprema rezne oštrice
Prekomjerno opterećenje na reznoj oštrici, isprekidani rez	Prilagoditi brzinu rezanja i posmak, upotreba žilavijeg materijala, primijeniti alat negativne geometrije, odgovarajuća priprema rezne oštrice

3.2.2. SILE REZANJA

Trošenje reznog alata, kao i utrošak energije pri rezanju determiniran je silama rezanja, ukoliko su pri obradi određenog materijala manje sile rezanja onda je isti bolje obradiv. Odvajanje površinskih slojeva materijala s reznim alatom moguće je ako se na alat narine sila F_R koja je jednaka čvrstoći i silama trenja. Najčešće se vektor rezultatne sile rezanja rastavlja na komponente sile rezanja kao što je prikazano na slici 14. Tako se kod kosog rezanja definiraju tri komponente sile rezanja [1]:

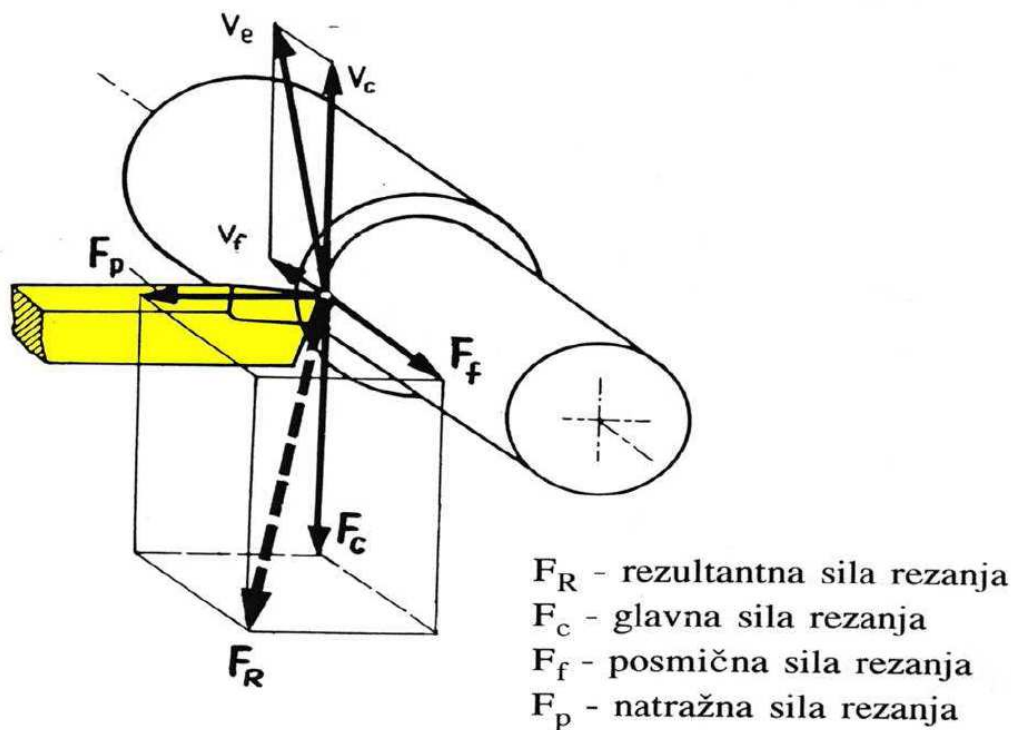
- F_c - glavna sila rezanja koja se poklapa s pravcem vektora glavne brzine rezanja;
- F_f - posmična sila rezanja koja djeluje u pravcu posmičnog gibanja alata;
- F_p - natražna sila rezanja koja djeluje u smjeru okomitom na sile F_c i F_f .

Rezultantna se sila računa prema izrazu:

$$F_R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$$

Odnosi pojedinih komponenti značajno se mijenjaju promjenom dubine i posmaka, geometrije alata, istrošenjem alata i mehaničkim svojstvima alata, no dominantnu vrijednost

uvijek ima glavna sila rezanja. Mjerenje sila drugi je najčešći način procjene obradivosti, posebno ako su testovi postojanosti alata iz nekog razloga (vremenski uvjetovani, nedovoljne zalihe alata) ograničeni [9].



Slika 14. Komponente sila i brzina rezanja pri postupku tokarenja [1]

Procjene sila rezanja su također vrlo značajne pri procjeni potrebne snage alatnog stroja, te opterećenja ležajeva. Za određeni materijal, sile rezanja ovise ponajprije o vrijednosti posmaka te širini reza. Smanjenje sila rezanja moguće je ostvariti upotrebom alata sa većim prednjim kutem, te upotrebom lomača čestica. Iz konteksta ovisnosti o trošenju, glavna i natražna sila rezanja povećavaju se sa većim stupnjem istrošenja stražnje površine alata. Promjene brzine rezanja za većinu materijala i uvjeta obrade nemaju značajan utjecaj na promjenu sila rezanja. Iznimka su titanove legure te neke specijalne vrste čelika koje karakterizira osjetljivost na visoke temperature, gdje se pri promjeni brzina rezanja uočavaju značajnije varijacije u silama rezanja. Utjecaj je također izražen pri obradi mekih materijala niskim brzinama rezanja (aluminijske legure), gdje se s obzirom na mogućnost stvaranja naljepka, povećava prednji kut alata, a time i promjenama sila rezanja. Mjerenje sila rezanja obavlja se specijalno konstruiranim dinamometrima, a mjerenja su prilično precizna [9].

3.2.3. KVALITETA OBRADENE POVRŠINE

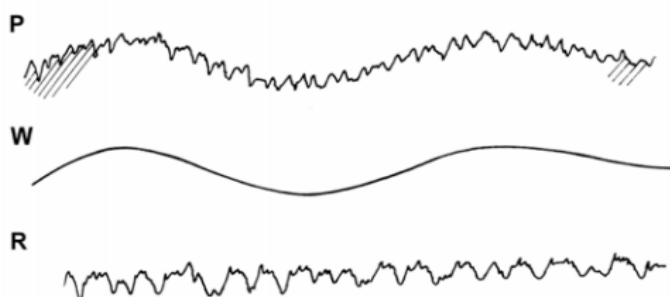
Dvije grupe pokazatelja kvalitete obrađenih površina su [8]:

- geometrijske (odstupanje oblika, valovitost i hrapavost) i
- fizikalno-mehaničke karakteristike površinskog sloja (struktura, mikrotvrdoća, zaostala naprezanja).

Geometrijski parametri podrazumijevaju odstupanja od geometrijski pravilne makro i mikro razine. Fizikalno-kemijsko stanje površinskog sloja ocjenjuje se parametrima koji karakteriziraju strukturu, fazni i kemijski sastav, deformacije, naprezanja i sl. [8]

Bolja kvaliteta obrađene površinom samim time i niža hrapavost rezultira kvalitetnijim proizvodom, pa se za materijala kod kojih se pri obradi ostvaruje bolja kvaliteta obrađene površine može reći da su bolje obradivi. Kvaliteta obrađene površine je važan kriterij za ocjenu obradivosti nekog materijala. Isto tako ona ima veliki utjecaj na eksploatacijske karakteristike strojnih elemenata: otpornost na trošenje, koeficijent trenja itd. Ovisi o materijalu obradka, toplinskoj obradi i tehnološkom procesu obrade.

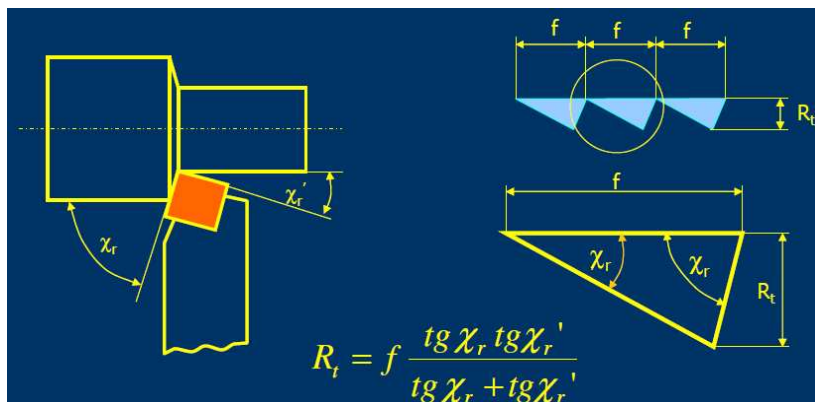
Površinska hrapavost prema normi ISO 4287 definirana je kao sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta (koje su mnogo puta manje od površine samog predmeta), a prouzrokovane su postupkom obrade ili nekim drugim utjecajima. Postoji 3 primarna filtra koja se rabe u instrumentima za mjerenje hrapavosti – hrapavost (R), valovitost (W) i primarni profil (P). Profil hrapavosti (R) osnova je za mjerenje parametara hrapavosti profila, pri čemu je R_a faktor najzastupljeniji pri monitoringu konzistencije procesa obrade, a predstavlja vrijednost srednjeg aritmetičkog odstupanja mjenenog profila. R_a faktor osjetljiv je na trošenje alata te parametre i uvjete obrade (SHIP, obradak) [3].



Slika 15. Razlučivanje P, W i R karakteristika profila [3]

Za procese obrade tokaranjem i bušenjem hrapavost se može procjeniti preko kuteva alata te posmaka. Pri tokarenju sa alatima s radijusom oštice $r_e = 0$ prema sljedećoj slici ostvaruju se teorijska hrapavost prema izrazu [5]:

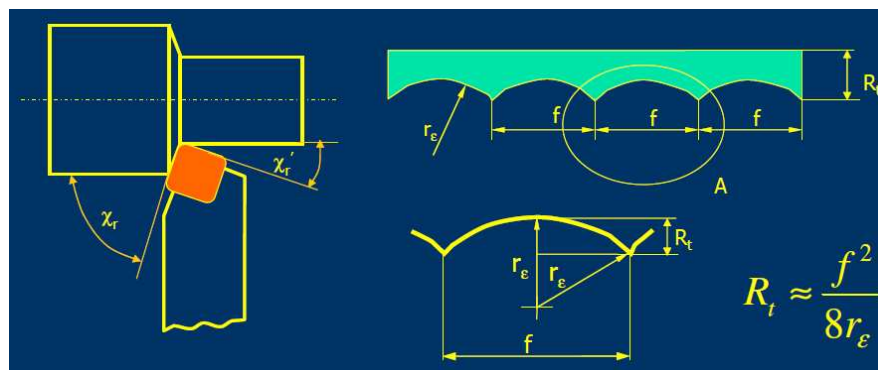
$$R_t = f \frac{\operatorname{tg} \chi_r \operatorname{tg} \chi_{r'}}{\operatorname{tg} \chi_r + \operatorname{tg} \chi_{r'}}$$



Slika 16. Teorijska hrapavost obrađene površine kod obrade alatom pri $r_e = 0$ [5]

U slučaju obrade alatima sa $r_e > 0$ kod kojih je posmak uglavnom manji od radijusa zaobljenosti oštice alata, posebno u završnoj obradi tokaranjem ili bušenjem, kada je teorijska hrapavost neovisna o kutevima χ_r i $\chi_{r'}$, vrijedi izraz [5]:

$$R_t \approx \frac{f^2}{8r_e}$$



Slika 17. Teorijska hrapavost obrađene površine kod obrade alatom pri $r_e > 0$ [5]

Ostvarena hrapavost površine rezultat je djelovanja trošenja alata, odstupanja u strojnim gibanjima, nehomogenosti obrađivanog materijala, diskontinuiranosti odvojene čestice te

vibracijama u sustavu, te je uglavnom različita od teorijski dobivenih vrijednosti. U slučaju kontinuirane odvojene čestice te vibracija i trošenja unutar dopuštenih granica, vrijednosti teorijske i ostvarene hrapavosti su slične [9].

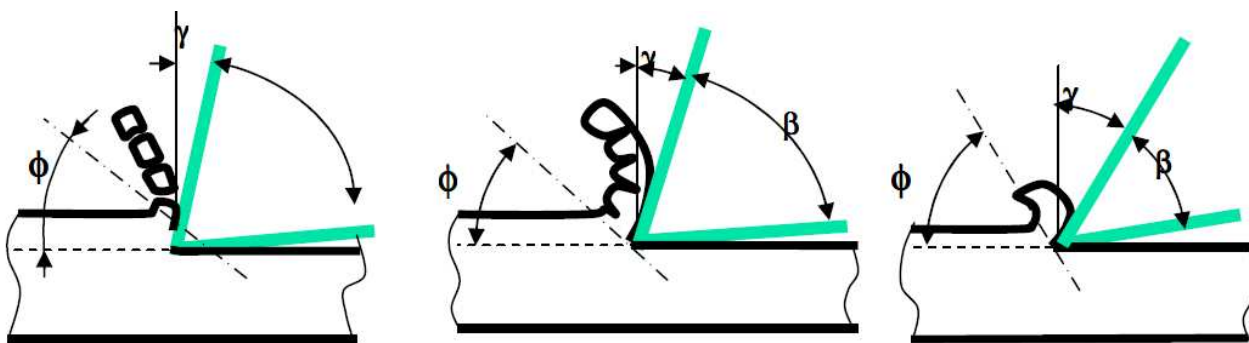
Ostvarenu se hrapavost može smanjiti obradom većim brzinama rezanja, što posebno dolazi do izražaja pri obradi mekših materijala (niskouglični, feritni čelici) sklonih stvaranju naljepaka. Poliranje rezne oštrice u nekim slučajevima omogućuje ostvarivanje bolje hrapavosti, posebno u slučaju obrade materijala sklonih formiranju naljepaka. Također odabirom alata s većim prednjim kutem te odgovarajućeg SHIP-a, moguće je dobivanje povoljnijih vrijednosti hrapavosti [9].

3.2.4. OBLIK ODVOJENE ČESTICE

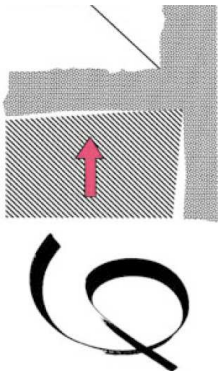
Odvojena čestica sama po sebi predstavlja neželjeni produkt obrade odvajanjem čestica koje je potrebno efikasno ukloniti iz radnog prostora u što kraćem vremenu. Povoljniji su oni oblici odvojene čestice koji se lakše odvoje iz zone rezanja, pa se za one materijala koji daju povoljne oblike odvojene čestice može reći kako su bolje obradivi.

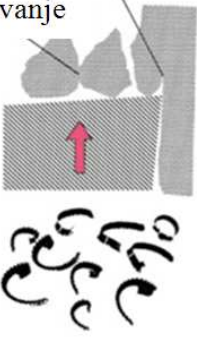
Osnovni oblici odvojene čestice (slika 18.) su:

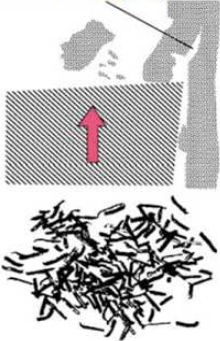
- a) lomljena (elementarna) odvojena čestica
- b) nasječena (lamelarna) odvojena čestica (više lamela zajedno)
- c) tekuća (kontinuirana) odvojena čestica.



Slika 18. Oblici odvojene čestice [1]

<p style="text-align: center;">Kontinuirana</p> 	<p>Osobine:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kontinuiranost - Različite površine - Stražnja površina najčešće glatka <p>Formacija:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kontinuirani tok kroz materijal <p>Uvjeti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Duktilni materijali pri povoljnim parametrima obrade - Veće brzine rezanja, veći prednji kut alata
---	--

<p style="text-align: center;">Sječenje</p> <p>Zavarivanje</p> 	<p>Osobine:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jednodjelna, nema kontinuiranog toka - Površina vrlo oštra <p>Formacija:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Lamelle u smičnoj zoni samo lagano deformirane, odvojene jedna od druge no kraju ipak zavarene <p>Uvjeti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nehomogenosti u materijali, vibracije, premali prednji kut alata, velika dubina rezanja
---	---

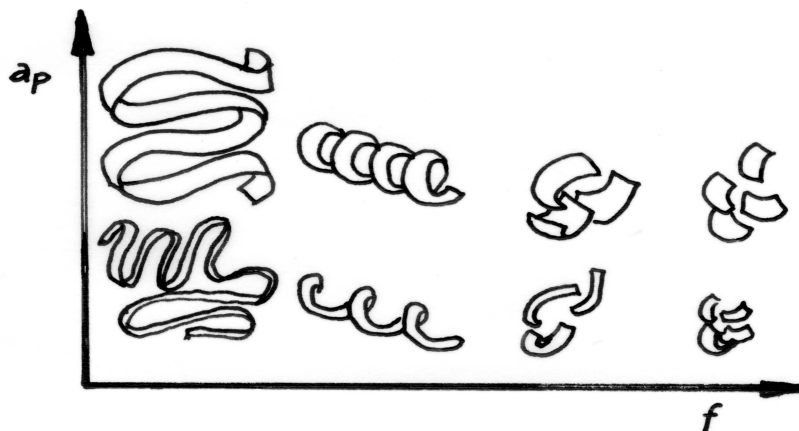
<p style="text-align: center;">Lomljenje</p> 	<p>Osobine:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pojedinačne, nema spojenih elemenata - Gruba površina kao posljedica loma <p>Formacija:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kod krhkih materijala nakon lagane deformacije u smičnoj zoni (lijevana bronca, mjed...) <p>Uvjeti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kod materijala niske žilavosti - Nepovoljni uvjeti obrade
--	---

Teži se ostvariti lomljenu odvojenu česticu jer je njeno odvođenje iz zone rezanja najjednostavnije. Kontrola odvojene čestice posebno je važna kod materijala koji su skloni stvaranju kontinuirane lomljene čestice, što se posebno odnosi na duktilne materijale (aluminijeve legure, niskouglični čelici...). Pod kontrolom se uglavnom podrazumijevaju dva

glavna zadatak: lomljenje čestice, te njezino odnošenje iz prostora zahvata obradka i alata tj. radnog prostora. Kod tokarenja, lomljenje čestice se ostvaruje njenim usmjeravanjem u prepreku pod čijim će se utjecajem ista savinuti u dovoljnoj mjeri da se ostvari njeno pucanje, tj. iznad maksimalnog naprezanja na savijanje. Lomači odvojene čestice u tom su slučaju od velike koriste, ali i sama konstrukcija rezne pločice čiji reljef prednje površine također pozitivno utječe na ostvarivanje zadovoljavajućeg oblika odvojene čestice. Nakon loma, odvojena se čestice mora što prije i što efikasnije odstraniti iz radnog prostora, jer s obzirom na njihove visoke temperature, u slučaju da nisu odstranjene iz radnog prostora, mogu prouzročiti termalne distorzije koje će kasnije biti posljedica eventualnim dimenzijskim netočnostima izradka. Iz tog razloga uporaba SHIP-a je vrlo važna, a posebnu se pozornost treba obratiti pri obradi alatima sklonima toplinskim šokovima (SiN keramika, neke oksidne prevlake...), kada je poželjna upotreba SHIP-a u obliku zraka pod visokim tlakom kako bi se spriječile eventualne posljedice toplinskog šoka odnosno uništenja alata [9].








Tablica 7. Utjecaj uvjeta obrade i geometrije alata na odvojenu česticu [7]

<i>Uvjeti obrade</i>	<i>Utjecaj na oblik odvojene čestice</i>
Brzina obrade	S povećanjem brzine obrade lošiji je oblik odvojene čestice ovisno o materijalu obradka
Posmak	Povećanje posmaka poboljšava lom čestice; no istodobno je lošija kvaliteta obrađene površine
Dubina rezanja	Nema direktnog utjecaja
Prednji kut alata	Negativan prednji kut alata pozitivno utječe na lom čestice; istodobno negativno utječe na kvalitetu obrađene površine
Kut namještanja alata	Što je veći, lom čestice će biti bolji
Lomači čestice	Posebno pospješuju lom čestice (poželjna optimizacija procesa)



Slika 19. Oblik odvojene čestice u ovisnosti o dubini rezanja (a_p) i posmaka (f) [5]

Tablica 8. Različiti oblici odvojene čestice [7]

Vrsta	Oblik odvojene čestice		Ocijena
1	Kontinuirana ravna		Nepoželjna ☹️
2	Kontinuirana zapletena		
3	Vijčana		Zadovoljavajuća 😊
4	Lomljena vijčana		Povoljna 😊
5	Lomljena spiralna		
6	Kratka spiralna lomljena		
7	Fragmentirana		Zadovoljavajuća
8	Djelomično zavarena		😊

3.3. METODE ZA ISTRAŽIVANJE OBRADIVOSTI I FUNKCIJE OBRADIVOSTI

Skup metoda za istraživanje obradivosti može se svrstati u dvije osnovne grupe [8]:

1. Komparativne metode, ili metode relativne obradivosti, kojima je osnovni cilj dobivanje indeksa (koeficijenta) obradivosti.
2. Kompleksne metode kojima je osnovni cilj dobivanje funkcija obradivosti.

Indeks obradivosti

Indeks ili koeficijent obradivosti je veličina definirana izrazom [8]:

$$I_0 = \frac{K_{0IM}}{K_{0EM}}$$

K_{0IM} – kriterij obradivosti ispitivanog materijala

K_{0EM} – kriterij obradivosti etalon materijala

Kao kriterij obradivosti uzima se onaj kriterij koji prema utvrđenom rangu za određeni proces pokazuje obradivost materijala. Kriterij obradivosti koji se najčešće koristi je brzina rezanja v_c koja odgovara nekoj vrijednosti postojanosti alata T (npr. v_{60} za T=60 min). Ako dani materijal dozvoljava veću vrijednost brzine rezanja uz identične ostale uvjete i parametre obrade, tada taj materijal ima bolju obradivost u odnosu na neki drugi i obrnuto.

2.3.1. KOMPARATIVNE METODE ISTRAŽIVANJA OBRADIVOSTI

Osnovna karakteristika komparativnih metoda je relativno ocjenjivanje obradivosti tj. određivanje indeksa obradivosti ispitivanog materijala obratka u odnosu na usvojeni, referentni materijal. Za referentni materijal najčešće se odabire materijal sa dobrom obradivosti za promatrani kriterij obradivosti.

Za dobivanje indeksa obradivosti koriste se sljedeće metode [8]:

- Metoda varijabilnih brzina rezanja

- Metoda konstantnog puta rezanja
- Metoda konstantnih sila rezanja
- Metoda radioaktivnih izotopa
- Metoda poprečne obrade
- Indirektne metode (kemijski sastav, mehaničke karakteristike, mikrostruktura itd.)
- Metoda ispitivanja odvojene čestice

Metoda varijabilnih brzina rezanja – koristi se pri uzdužnoj obradi odvajanja čestica. Brzina rezanja se stupnjevito povećava poslije određenih istih dužina obrade sve do brzine pri kojoj dolazi do zatupljenja alata. Ova brzina služi za računanje indeksa obradivosti [8].

Metoda konstantnog puta rezanja – koristi se pri uzdužnoj obradi odvajanjem čestica. Za odabranu referentnu dužinu rezanja se pri konstantnom posmaku i dubini rezanja vrše ponovljena ispitivanja sa različitim brzinama rezanja pri čemu se prati trošenje alata. Ispitivanje se ponavlja sve dok se ne nađe brzina kod koje dolazi do zatupljenja upravo na referentnoj dužini rezanja. Ako se zna brzina rezanja v_{Lr} pri kojoj dolazi do zatupljenja alata na dužini L za referentni materijal i ako se dobije brzina rezanja za ispitivani materijal v_{Li} onda je indeks obradivosti ispitivanog materijala [8]:

$$I = \frac{v_{Li}}{v_{Lr}}$$

Metoda konstantnih sila rezanja – najčešće se primjenjuje kod bušenja. U materijalu čija se obradivost ispituje, prethodno se izbuši manji otvor koji osigurava dovođenje SHIP-a i lakše odvođenje odvojene čestice pri ispitivanju. Konstantna sila bušenja se ostvaruje djelovanjem utega na vreteno na kojem se nalazi svrdlo. Tijekom bušenja svrdlo se troši pri čemu se povećava čvrstoća. U trenutku kada otpor rezanja savlada silu utega doći će do zaustavljanja prodiranja svrdla u materijal što se registrira mjerenjem dužine bušenja L_B . Ova dužina se koristi kao mjera za računanje obradivosti [8].

Metoda radioaktivnih izotopa – zasniva se na mjerenju trošenja alata praćenjem promjene radioaktivnosti prethodno, teškim česticama, bombardirane stražnje površine alata. Dobivena otpornost na trošenje izmjerena na ovaj način koristi se za računanje indeksa obradivosti na temelju izraza:

$$I_0 = \frac{v_{BIM}}{v_{BEM}}$$

gdje je v_{BIM} brzina trošenja alata pri obradi ispitivanog materijala, a v_{BEM} pri obradi etalon materijala [8].

Metoda poprečne obrade – sastoji se od intenziviranja trošenja alata i to na sljedeći način. Na disku od ispitivanog materijala promjera od obično 300 do 350 mm prethodno se izbuši prolazni otvor i takav disk pričvrsti u čeljustima. Poprečna obrada se vrši posmičnim kretanjem alata od centra prema rubu konstantnom dubinom rezanja, posmakom i pri konstantnom broju okretaja diska. Pri pomicanju alata prema rubu se na račun povećanja promjera povećava brzina rezanja čime se intenzivira trošenje alata. Trenutak potpunog zatupljenja alata odgovara nekoj brzini rezanja koja se koristi za računanje indeksa obradivosti [8].

Indirektne metode – obuhvaćaju relativno ocjenjivanje obradivosti prema eksperimentalno istraženim vezama između obradivosti nekog materijala i njegovih fizičko-mehaničkih i metalurško-mikrostrukturnih karakteristika. Karakteristike koje se najčešće dovode u vezu sa obradivošću su: tvrdoća, čvrstoća, žilavost, toplinska vodljivost, mikrostruktura, kemijski sastav itd [8].

Metoda ispitivanja oblika odvojene čestice – sastoji se u kvantitativnom izražavanju oblika odvojene čestice pomoću tzv. koeficijenta zapremnine:

$$S_K = \frac{V_{st}}{V_m}$$

gdje je V_{st} zapremnina odvojene čestice izmjerena stavljanjem odvojene čestice u određenu posudu, ali bez pritiska, samo djelovanjem sile teže i V_m , zapremnine materijala obratka koja je pretvorena u odvojenu česticu [8].

2.3.2. **KOMPLEKSNE METODE ISTRAŽIVANJA OBRADIVOSTI (FUNKCIJE OBRADIVOSTI)**

Kompleksne metode dobile su naziv po tome što su zasnovane na eksperimentalnom istraživanju prema potpunim višefaktorskim planovima eksperimenta. S obzirom da ovdje eksperimenti traju do zadnjeg kriterija istrošenosti alata, dakle dosta dugo, ove metode se nazivaju dugotrajnima. Bez obzira radi li se o istraživanju obradivosti s obzirom na postojanost alata ili neki drugi kriterij metoda ispitivanja je ista: planiranje eksperimenta, izvođenje eksperimenta i obrada rezultata.

Dakle, svrha kompleksnih meoda je dobivanje matematičkih modela procesa obrade odnosno funkcija obradivosti. Funkcije obradivosti su matematički modeli kojima se opisuje uzajamna ovisnost ulaznih i izlaznih parametara procesa obrade i predstavljaju aproksimaciju stvarnog oblika funkcije procesa. Upotrebljavaju se u svrhu [8]:

- Definiranja i optimiranja procesa obrade
- Predviđanja intenziteta utjecaja pojedinih utjecajnih faktora u fazi projektiranja i simuliranja procesa obrade
- Sigurnog vođenja i nadzora procesa obrade

Skup osnovnih funkcija obradivosti u obradi odvajanjem čestica prema [10] [5] čine:

1. Funkcija postojanosti alata, $T = T(x_i)$
2. Funkcija sila rezanja, $F_x = F_x(x_i)$
3. Funkcija kvalitete obrađene površine, $R_x = R_x(x_i)$
4. Funkcija oblika odvojene čestice, $O_{\check{c}} = O_{\check{c}}(x_i)$

(x_i – parametri i uvjeti obrade)

Metode za dobivanje funkcija obradivosti su različiti višefaktorski planovi pokusa. Krajnji rezultat su matematički modeli koji predstavljaju aproksimaciju stvarnog, nepoznatog, analitičkog oblika funkcije pojava, te međuovisnosti ulaznih i izlaznih veličina procesa obrade odvajanjem.

4. OBRADIVOST ČELIKA

U osnovi je čelik metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika s manje od 2 % ugljika uz prisutne prateće elemente (silicij, mangan) te nečistoće (sumpor, fosfor i dr.) uz eventualni dodatak dodatnih legiranih elemenata. Podjela čelika može se izvršiti prema količini legiranih elemenata, strukturi te mehaničkim karakteristikama u različite grupe. Takva podjela omogućava pomoć pri odabiru čeličnog materijala s obzirom na zahtjevana svojstva koja su definirana eksploatacijskim uvjetima za koje je isti predodređen.

4.1. UTJECAJNI FAKTORI NA OBRADIVOST ČELIKA

Generalno gledajući, utjecajni faktori obradivosti svih metalnih materijala vrlo su slični, a njihov odnos prikazan je na slici 4 – primjer podjele utjecajnih faktora na obradivost materijala. Čelici jako variraju u kemijskom sastavu i mikrostrukturi, te će prema tome u nastavku biti razmotrena obradivost za različite vrste čelika. Obradivost čelika s obzirom na karakteristike materijala ovisi o [3]:

- mikrostrukturi,
- kemijskom sastavu
- tvrdoći i duktilnosti,
- toplinskoj obradi,
- veličini zrna,
- postupku proizvodnje,
- prethodnoj obradi,
- stanju površine,
- sklonosti otvrdnjavanju tijekom obrade.

Kao kod većine materijala, obradivost se smanjuje sa povećanjem tvrdoće jer ista utječe na povećanje sila rezanja, temperatura i naprezanja na glavnoj oštrici. Mehaničko stanje materijala, posebno razina prethodne deformacije u hladnom stanju također utječe na sile rezanja te karakteristike odvojene čestice. Žareni čelici prilikom obrade odvajanjem čestica imaju manje

temperature i sile rezanja, ali zbog povećane kovkosti može doći do problema sa lomljenjem odvojene čestice.

4.1.1. MIKROSTRUKTURA

Obradivost čelika u velikoj je mjeri rezultat njegove mikrostrukture. Osnovni tipovi mikrostrukture čelika su sljedeći:

- Ferit
- Cementit
- Perlit
- Austenit
- Bainit
- Martenzit

Tablica 9. Mehanička svojstva pojedinih oblika mikrostrukture čelika [3]

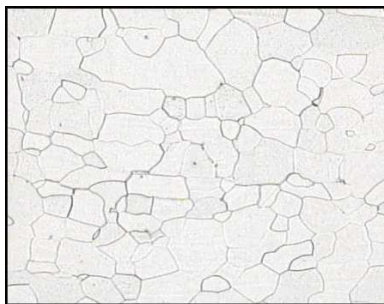
	Tvrdoća / HV 10	R_m / (N/mm ²)	$R_{p0.2}$ / (N/mm ²)	Z / %
Ferit	80-90	200-300	90-170	70-80
Cementit	>1100	-	-	-
Perlit	210	700	300-500	48
Austenit	180	530-750	300-400	50
Bainit	300-600	800-1100	-	-
Martenzit	900	1380-3000	-	-

Ovisno o udjelu ugljika, udjelu legiranih elemenata te prethodno provedenoj toplinskoj obradi, jedna ili više od navedenih mikrostrukturnih komponenti prevladava te time određuje mehaničke karakteristike (tablica 9.) i samu obradivost određene vrste čelika.

Ferit (α -ferit, BCC-rešetka, maksimalna apsorpcija ugljika od 0,2%) je oblik mikrostrukture čelika karakteriziran relativno malom čvrstoćom i tvrdoćom, ali i visokom sposobnosti preoblikovanja. Iz aspekta obradivosti, ferit izaziva sljedeće poteškoće [3]:

- Visoka tendencija adheziji u pogledu stvaranja naljepaka (BUE)
- Tendencija stvaranju nepoželjne ravne ili zapletene kontinuirane odvojene čestice kao rezultat svoje visoke deformabilnosti

- Loša kvaliteta obrađene površine te sklonost stvaranju srha



Slika 20. Ferit (M 500:1) [3]

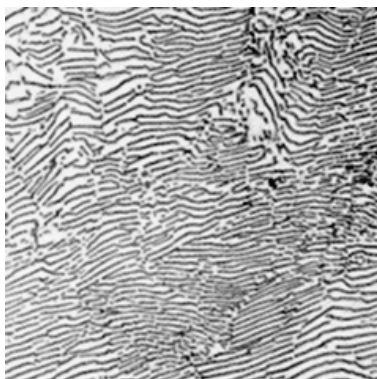
Cementit (Fe_3C) tvrda je i krhka faza koja se praktički ne može obrađivati. U ovisnosti o udjelu ugljika i brzini hlađenja u procesu toplinske obrade kaljenja, može se pojaviti kao slobodni cementit ili otopljen u perlitu ili bainitu.

Perlit je eutektoidna mješavina ferita i cementita ($P = \alpha^{\text{id}} + \text{Fe}_3\text{C}^{\text{id}}$). Eutektoidna točka nalazi se na 723°C i udjelu ugljika od 0,83%. Perlit se u željeznim legurama pojavljuje pri udjelima ugljika između 0,02% do 6,67%. Do 2,06% ugljika javlja se kao samostalna faza, dok se iznad toga pojavljuje kao komponenta ledeburita. Za eutektoidne čelike (0,8% C) karakteristična je cjelovita perlitna mikrostruktura, podeutektoidni (< 0,8% C) imaju feritno-perlitnu mikrostrukturu, dok se nadeutektoidni (> 0,8% C) sastoje od perlita i cementita. Uglavnom je lamelarne mikrostrukture, gdje su lamele zapravo cementit otopljen u perlitu. Što je veći razmak među lamelama, perlit je mekaniji. Odgovarajućom se toplinskom obradom lamelarna struktura može promjeniti u globularnu ili sferoidiziranu. Iz aspekta obradivosti, perlit, s obzirom na njegovu povećanu tvrdoću i manju sposobnost deformacije, karakteriziraju s jedne strane uzrokuje [3]:

- povećanu komponentu abrazivnog trošenja,
- povećanu silu rezanja,

ali također i:

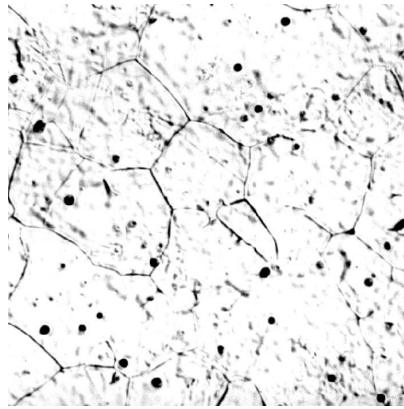
- manju sklonost stvaranju naljepaka
- stvaranje povoljnog oblika odvojene čestice
- manje tendencija stvaranju srha na obradku
- poboljšava kvalitetu obrađene površine



Slika 21. Lamelarni perlit (M 500:1) [3]

Austenit predstavlja γ -kristale mješance željeznih legura. Ima plošno centriranu kubičnu rešetku (FCC). Maksimalna topivost ugljika u austenitu jest 2,03%. Karakterizira ga relativno niska tvrdoća, dok se čvrstoća lako povećava hladnom deformacijom. Austenit je vrlo čest oblik mikrostrukture mnogih nehrđajućih čelika, i nije magnetičan. Kod nelegiranih čelika pri temperaturi od 723°C rastvara se na perlit te u ovisnosti o udjelu ugljika, ferit i cementit. Pri sobnoj temperaturi pojavljuje se jedino u čelicima legiranim niklom (Ni), manganom (Ma) i dušikom (N). S obzirom na obradivost glavne osobine austenita su sljedeće [3]:

- Zbog visoke žilavosti i oblikovljivosti za koju je zaslužna visoka plastična deformabilnost FCC kristalne rešetke proizlazi tendencija austenitnih čelika stvaranju BUE formacija te problem stvaranja kontinuirane i zapletene odvojene čestice
- Tendencija adheziji također je karakteristika FCC kristalne rešetke za razliku od preostala dva oblika kristalne rešetke koje čelici stvaraju (BCC i HCP), tako da je potreban pažljiv izbor alata s manjom sklonosti stvaranju adhezivnog para s austenitom kako bi se smanjila ova komponenta trošenja.
- Zbog sklonosti očvrnuću plastičnom deformacijom, mogući je problem otvrdnuća površine što posebno neugodno može biti prilikom obrade u više prolaza gdje se u svakom idućem prolazu alata izrazito mijenjaju uvjeti obrade i opterećenja alata.
- S obzirom na manju toplinsku vodljivost u odnosu na nelegirane čelike (do 1/3), odvođenje topline preko odvojene čestice je otežano što izaziva visoka toplinska opterećenja u zoni rezanja.

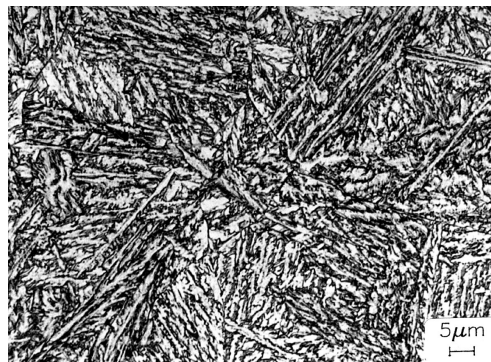


Slika 22. Austenit (M 500:1) [3]

Bainit se formira u zonama temperatura između perlita i martenzita. Razlikuju se dva osnovna oblika bainita [3]:

- Igličasti bainit – nastaje prilikom kontinuiranog hlađenja i izotermne transformacije.
- Zrnati (granularni) bainit – nastaje samo kontinuiranim hlađenjem.

Bez obzira na vrstu, bainit se sastoji od prezasićenog ferita u kojem je ugljik dijelom izlučen u obliku karbida (npr. Fe_3C) čija je veličina ovisna o temperaturama transformacije. Kod igličastog se bainita, ovisno o temperaturama transformacije, mogu pojaviti 2 oblika – donji bainit (vrlo sličan martenzitu), te gornji bainit (sličan perlitu). Obradivost je nemoguće kategorično definirati za bainitnu mikrostrukturu s obzirom na moguće varijacije u samoj strukturi, ali se može reći kako je općenito granularni bainit lakše obradiv, dok se kod igličastog za njegove dvije različite forme, obradivost definira prema onoj mikrostrukturi kojoj je oblik bainita sličniji (perlit ili martenzit) [3].



Slika 23. Igličasti bainit [3]

Martenzit nastaje isključivo brzim ohlađivanjem čelika sa sadržajem ugljika većim od 0,2%, iz područja gdje se nalazi austenit ispod temperature martenzit-start. Naglim hlađenjem ugljik ostaje zarobljen unutar rešetke kristala mješanca austenita. Iz FCC rešetke austenita nastaje nova, distordirana, BCT tetragonalna rešetka karakteristična za martenzit.

Martenzit je plemenita mikrostruktura vrlo visoke tvrdoće i krhkosti, koja se vrlo teško obrađuje obradom odvajanjem čestica. Utjecaj martenzita na obradivost jest [3]:

- vrlo izražena abrazivna komponenta trošenja,
- visoko mehaničko i toplinsko opterećenje alata.



Slika 24. Martenzit (M 500:1) [3]

4.1.2. KEMIJSKI SASTAV

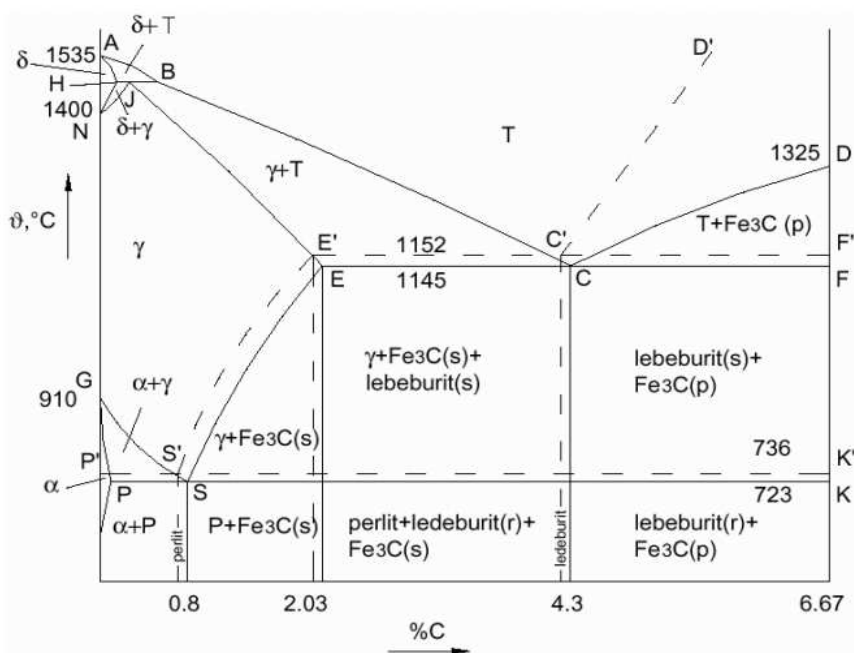
Kemijski sastav vrlo je bitan utjecajni faktor obradivosti čelika. Vrlo je teško definirati prioritetni čimbenik između mikrostrukture i kemijskog sastava koji su u osnovi dva ključna faktora gledano iz aspekta obradivosti. Iako kemijski sastav u principu definira mikrostrukturu, s obzirom da se njome relativno lako upravlja procesom toplinske obrade, u radu je ipak prvo mjesto pripalo mikrostrukтури.

S obzirom na sam kemijski sastav, moguće je definirati dva ključna aspekta na obradivost [3]:

- utjecaj ugljika;
- utjecaj legirnih elemenata te pratioaca i nečistoća

UTJECAJ UGLJIKA NA OBRADIVOST

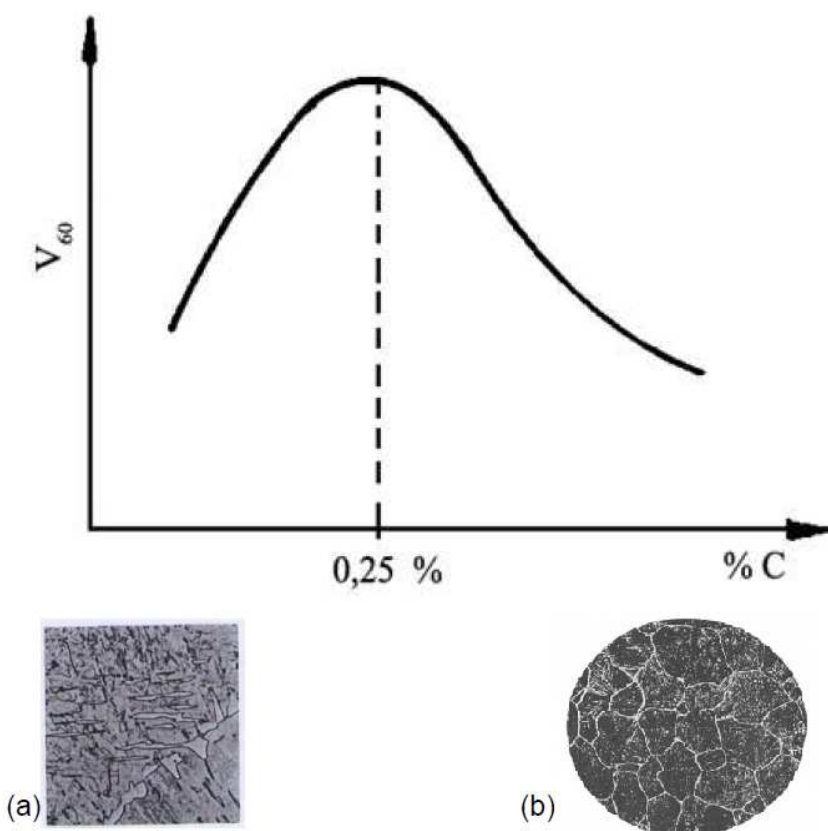
Na svojstva čelika utječe ponajprije maseni udio ugljika. Ugljik je osnovni i najutjecajniji element u čelicima i samim time ima najveći utjecaj na obradivost. Niskougljični čelici sadrže do 0.3% ugljika, a visokougljični od 0.9% pa na više. O masenom udjelu ugljika ovisi mikrostruktura čelika, a samim time i njegova svojstva. Udio mikrostrukture ovisno o masenom udjelu ugljika prikazan je Fe – C (Fe – Fe₃C) dijagramom stanja, prikazanom na slici 25. Čelici s udjelom ugljika do 0,8% dugotrajnim hlađenjem iz austenitnog područja izlučuju ferit, a zaostali se austenit ispod 723°C rastvara u perlit. Pri udjelu od 0,8% ugljika, izlučuje se isključivo perlit (eutektoidna mješavina ferita i cementita). Čelike s više od 0,8% ugljika karakterizira perlit i sekundarni cementit, koji se iz austenita izlučuje na granicama zrna [3].



Slika 25. Fe – C metastabilni dijagram stanja [11]

Obradivost čelika s udjelom ugljika do 0,25%, uglavnom karakteriziraju svojstva slobodnog ferita. S obzirom na njegov visok kapacitet deformacije, veća hrapavost površine česti je slučaj nakon obrade odvajanjem čestica. Visoka sklonost adheziji također je ranije navedena kao osobina feritne mikrostrukture, što utječe na formiranje naljepaka na prednjoj oštrici alata pri nižim brzinama rezanja. Trošenje alata i temperature u smičnoj zoni ne povećavaju se značajno sa povećanjem glavne brzine rezanja te se preporučuje korištenje gornjih dozvoljenih brzina rezanja pri obradi takvih čelika (preko $v_c > 100$ m/min, uglavnom oko 200 m/min), te posmaci

oko vrijednosti $f=0,15$ mm/okr. Zbog niske čvrstoće ferita, poželjna je upotreba alata sa što većim pozitivnim prednjim kutem (pri tokarenju $\gamma_0 > 6^\circ$). Smanjenje sklonosti adheziji te poboljšanje kvalitete obrađene površine moguće je ostvariti upotrebom odgovarajućeg SHIP-a pri čijem odabiru prvenstveno treba obratiti pozornost na njegova svojstva podmazivanja, s obzirom da karakteristike hlađenja nisu značajne jer nema pojave previsokih temperatura u zoni rezanja. Posebno su česte poteškoće s obradom čelika s manje od 0,25% C proizvodnim postupcima bušenja, razvrtavanja i urezivanja navoja, gdje se zbog prethodno navedenih razloga (visoka duktilnost) očituje loša kvaliteta obrađene površine, te sklonost stvaranju srha pri nižim brzinama rezanja [3].



Slika 26. Ovisnost obradivosti o sadržaju ugljika kod nelegiranih čelika i za obradu odvajanjem povoljne strukture: (a) Widmannstättenova struktura; (b) grubozrnata struktura [3]

Porastom udjela ugljika (0,25-0,4%), raste i udio perlita unutar mikrostrukture. S time raste utjecaj karakteristika perlitne mikrostrukture na obradivost. Čvrstoća je u porastu, a sposobnost deformacije u padu te s time slijedi [3]:

- manja sklonost adheziji te time i stvaranju naljepaka pri nižim brzinama rezanja;

- pojačano trošenje alata te više temperature unutar zone rezanja kao posljedica veće čvrstoće obratka
- značajniji udio abrazijskog trošenja
- poboljšanje kvalitete obrađene površine te oblika odvojene čestice

Pozitivan utjecaj na obradivost ostvaruje se žarenjem na grubo zrno za čelike s nižim udjelom ugljika, te normalizacijskim žarenjem za čelike s više od 0,35% C. Poželjna je upotreba alata s pozitivnim prednjim kutem. Hladna deformacija također pozitivno utječe na obradivost posebno iz konteksta oblika odvojene čestice, stoga je poželjno obradu odvajanjem čestica napraviti nakon prethodno provedene hladne deformacije. Čelici s udjelom ugljika između 0,1 – 0,35% pokazuju sklonost stvaranju *Widmannstättenove strukture* (slika 26.) koja se dobiva dugačkim držanjem na temperaturama višim od temperature austenitizacije te ubrzanim ohlađivanjem. Karakteriziraju je igličasti ferit s fino raspoređenim lamelarnim cementitom, a odlika joj je vrlo dobra mogućnost obrade odvajanjem čestica, ali i loša mehanička svojstva [3].

Daljnijim porastom udjela ugljika (0,4-0,8%), udio ferita nastavlja padati u korist perlita, sve do udjela ugljika od 0,83% kada perlit čini cjelokupnu mikrostrukturu. Čvrstoća čelika također je u porastu te se zahvaljujući tome prilikom obrade odvajanjem i na nešto nižim brzinama stvaraju visoke temperature u zoni rezanja. Posljedica povećanje temperature te povećanog naprezanja u zoni kontakta oštrice i obradka je lakše stvaranje kratera pri povećanim brzinama rezanja odnosno pojačano trošenje alata. Problemi s karakteristikama odvojene čestice nisu toliko česti. Generalno gledajući, ova se kategorija čelika smatra dobro obradivima. Kvaliteta obrađene površine i oblik odvojene čestice su dobri uz pretpostavku primjene odgovarajućeg alata te režima obrade. Povaćano trošenje alata kontrolira se eventualnim smanjenjem glavne brzine rezanja te upotrebom SHIP-a i odgovarajućom prethodnom toplinskom obradom [3].

Pri sporom hlađenju nadeutektoidnih čelika ($C > 0,8\%$) na zraku, nastaju perlit i cementit. Posljedica ovakve mikrostrukture, tj. povećanje udjela tvrdih faza posebno se učituje na trošenje alata. Temperature i naprezanja koja se razvijaju u zoni kontakta značajno rastu. Abrazivna komponenta trošenja posebno raste s obzirom na prisutnost tvrdih i krhkih čestica. Već i pri nižim brzinama rezanja (60 – 80 m/min) primjetno je trošenje prednje i zadnje površine alata.

Izbor alata treba provesti pažljivo, a najčešće su korišteni današnji materijali alata za obradu ovih čelika tvrdi metal skupine P i cermet. S obzirom na sklonost trošenju alata poželjno je nadeutektoidne čelike obrađivati nižim brzinama s većim presjecima odvojene čestice kako bi se očuvao integritet alata. Pri tokarenju poželjna je upotreba alata s pozitivnim prednjim kutem, do $\gamma_0=6^\circ$ i lagano negativnim kutem nagiba oštrice $\lambda_s=-4^\circ$.

Toplinskom se obradom obradivost može poboljšati žarenjem za dobivanje grubog zrna, kojim se cementit nastoji objediniti u veće čestice. Sferoidna mikrostruktura također poboljšava karakteristike obrade jer se slaganjem karbida u sferoide poboljšava rezanje i smanjuje trošenje alata. Problemi sa oblikom odvojene čestice nisu česti niti postoji sklonost stvaranju naljepaka [3].

UTJECAJ LEGIRNIH ELEMENATA, PRATIOCA I NEČISTOĆA NA OBRADIVOST

Legirni i prateći elementi utječu na obradivost u smislu promjene mikrostrukture ili formiranjem podmazujućih, ali i abrazivnih uključina. U nastavku se navode najčešći legirni elementi, pratioци te njihove karakteristike koje utječu na samu obradivost.

MANGAN

Mangan povećava tvrdoću i čvrstoću čelika (oko 100 N/mm^2 za svakih dodanih 1%). S obzirom na jak afinitet prema sumporu, u kombinaciji stvara sulfide. Do 1,5% udjela mangana, vrši pozitivan utjecaj na obradivost čelika s niskim sadržajem ugljika posebno u kontekstu stvaranja pozitivnog oblika odvojene čestice. Kod čelika s većim udjelom ugljika, utjecaj mangana na obradivost je negativan zbog izraženog trošenja alata [3].

KROM, MOLIBDEN, VOLFRAM

Krom i molibden povećavaju tvrdoću te stoga utječu na obradivost preko mikrostrukture i povećanja čvrstoće posebno kod čelika za cementiranje i poboljšavanje. Kod čelika s povišenim udjelom ugljika, isto kao i kod jače legiranih čelika, u kombinaciji s volframom stvaraju specijalne i mješane karbide koji izuzetno negativno utječu na obradivost iz konteksta jakog trošenja alata [3].

NIKAL

Nikal pripada skupini tzv. gamagenih elemenata čija je karakteristika širenje γ -područja. Stoga čelici legirani takvim elementima mogu na sobnoj temperaturi imati austenitnu mikrostrukturu. Dodavanjem nikla povećava se čvrstoća čelika, ali također vrši utjecaj na povišenje žilavosti, pogotovo pri nižim temperaturama. Sve to loše utječe na obradivost, te se iz tog konteksta čelici legirani niklom smatraju loše obradivima, posebno austenitni nehrđajući čelici s visokim masenim udjelom nikla [3].

SILICIJ

Silicij utječe na povećanje čvrstoće feritne faze kod niskougličnih čelika. Sa kisikom tvori silicijev oksid (SiO_2) koji povećava tvrdoću, elastičnost i krhkost što rezultira pojačanim trošenjem alata te se stoga njegov utjecaj na obradivost smatra negativnim [3].

FOSFOR

Općenito gledajući, fosfor je nepoželjna primjesa, te je njegov maseni udio poželjno držati što nižim radi očuvanja dobrih mehaničkih karakteristika čelika. Iz konteksta obradivosti, važan je utjecaj na otvrdnuće ferita, a poznato je da tvrdi čelici formiraju bolju odvojenu česticu te imaju veću kvalitetu obrađene površine. Stoga se do udjela od 0,1% fosfor smatra pozitivnim elementom iz konteksta obradivosti, dok iznad toga povećava trošenje alata [3].

TITAN, VANADIJ

Već u malim količinama, titan i vanadij utječu na porast čvrstoće i tvrdoće koji je rezultat njihovog djelovanja na stvaranje sitnih, fino dispergiranih karbida. To dovodi do značajnog usitnjavanja zrna, što je iz aspekta mehaničkih karakteristika vrlo pozitivno, no s obzirom na visoko mehaničko opterećenje te sklonost nepovoljnim oblicima odvojene čestice, na samu obradivost djeluju negativno [3].

SUMPOR

Sumpor predstavlja nepoželjnu primjesu, bez obzira na vrlo slabu topivost u željezu. Naime, sa ostalim legirnim elementima i primjesama može stvoriti različite sulfide. Željezov sulfid predstavlja vrlo nepoželjan spoj kojeg karakterizira nisko talište te se uglavnom izlučuje na granicama zrna što negativno utječe na mehaničke karakteristike te povećava od tzv. crvenog

loma. U drugu ruku, manganov sulfid (MnS) poželjna je primjesa s daleko većom temperaturom taljenja. Pozitivni utjecaj MnS na obradivost očituje se stvaranjem povoljnih oblika odvojene čestice, boljom kvalitetom obrađene površine te manjoj sklonosti stvaranju naljepaka na prednjoj površini alata. Iz aspekta mehaničkih karakteristika, o MnS se govori u negativnom kontekstu, posebno u većim količinama, zbog negativnog utjecaja na čvrstoću, istežljivost i udarnu radnju loma. Posebnim se dodacima (npr. selen, telurij) negativan utjecaj MnS može efikasno smanjiti [3] [14].

OLOVO

Olovo nije topivo u željezu te se u njemu pojavljuje u obliku submikroskopskih uključina. S obzirom na njegovo nisko talište, prilikom obrade odvajanjem stvara tzv. zaštitni film između alata i obradka, što pozitivno utječe na trošenje alata. Mehaničko opterećenje alata moguće je na taj način smanjiti i do 50%, a također izražen je i pozitivni utjecaj na nastanak lomljenje odvojene čestice. Ove prednosti su posebno izražene kod čelika namjenjenih za obradu na automatima koji su vrlo često legirani upravo olovom [3].

NEMETALNE UKLJUČINE

Neki elementi (Al, Si, Mn, Ca) u procesu deoksidacije čelika vežu, prilikom solidifikacije čelika, oslobođeni kisik. Nastali spojevi, kao npr. aluminijev oksid ili silicijev oksid, čine skup tvrdih, nedeformabilnih uključina koje loše utječu na obradivost, pogotovo ako se kisik oslobađa u povećanim količinama. Odabirom odgovarajućih deoksidatora moguće je ostvariti pozitivan utjecaj na obradivost. Tako primjerice Ca-Si ili Fe-Si spojevi prilikom određenih uvjeta obrade, tvore oksidne i sulfidne slojeve na površini alata što usporava proces trošenja.

Poboljšanje obradivosti čelika deoksidiranih aluminijem, često se ostvaruje dodavanjem kalcija pri procesu proizvodnje čelika. Time se prilikom proizvodnje čelika, veliki dio nastalog aluminijevog oksida transformira u globularni, lako oblikovljivi kalcijev aluminat. Nastali spoj djeluje slično kao manganov sulfid kod čelika za obradu na automatima, odnosno prilikom određenih uvjeta rezanja, omogućuje smanjenje procesa trošenja alata stvaranjem zaštitnih slojeva u kontaktnoj zoni, čime se ostvaruje pozitivan utjecaj na samu obradivost iz aspekta smanjenja trošenja alata.

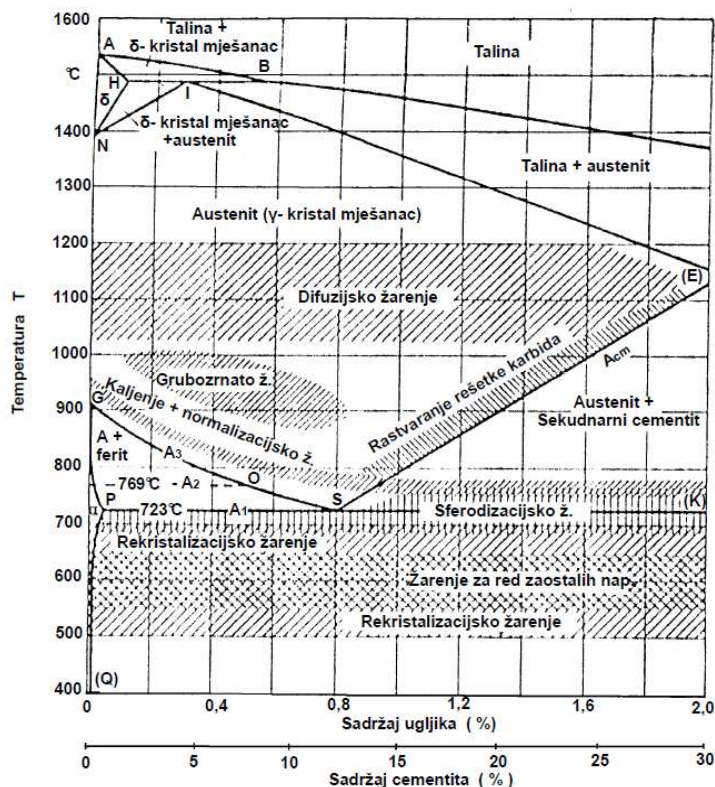
4.1.3. TOPLINSKA OBRADA

Pravilno proveden postupak toplinske obrade utječe na promjenu mikrostrukture s obzirom na veličinu, oblik i raspored njenih konstituenata. Time se utječe na postizanje određenih željenih mehaničkih svojstava, ali i na samu obradivost. Sama je toplinska obrada prema normi DIN EN 10052 definirana kao: Toplinska je obrada postupak u kojem se predmet namjerno podvrgava temperaturno-vremenskim ciklusima s ciljem postizanja određenih svojstava i/ili određene mikrostrukture. Eventualno se tijekom obrade može promijeniti kemijski sastav (termokemijska obrada) [3].

Pravilno provedenom toplinskom obradom, osim na postizanje željenih mehaničkih svojstava, također je moguće utjecati i na poboljšanje obradivosti čelika. Bez obzira na činjenicu da se čelici vrlo često od strane proizvođača isporučuju u normaliziranom stanju, pogodnom za obradu odvajanjem, u nekim se slučajevima, posebno prilikom obrade većih komada, često prije same obrade provodi i određena toplinska obrada. Pri tome vrlo važnu ulogu čini i sam postupak obrade koji se kasnije primjenjuje jer su određeni procesi kao npr. duboko bušenje i provlačenje, osjetljiviji na određene varijacije u mikrostrukтури, kao što su nemetalne uključine ili trakasta mikrostruktura.

Različiti procesi toplinske obrade, s kojima se, ovisno o kemijskom sastavu čelika, može utjecati na obradivost iz aspekta postizanja odgovarajućeg oblika odvojene čestice ili trošenja alata, imaju značajnu primjenu u praksi. Na sljedećoj su slici prikazane temperaturne vrijednosti pri kojima se provode različite toplinske obrade. U nastavku su opisani najznačajniji oblici toplinske obrade koji jak utjecaj ostvaruju na samu obradivost čelika [3]:

- žarenje na grubo zrno,
- normalizacijsko žarenje,
- sferoidizacijsko (meko) žarenje,
- rekristalizacijsko žarenje
- kaljenje i
- poboljšavanje



Slika 27. Dijagram Fe – C s područjima toplinske obrade [13]

Tablica 10. Obradivost u ovisnosti o provedenoj toplinskoj obradi [7]

Toplinska obrada	Utjecaj na mikrostrukturu	Obradivost
Normalizacijsko žarenje	Jednolična i sitnozrnata mikrostruktura	Ovisno o udjelu ugljika; ferit – loš oblik odvojene čestice; manje trošenje alata perlit – bolji oblik odvojene čestice, veće trošenje alata
Žarenje na grubo zrno	Grubozrnata mikrostruktura, loša mehanička svojstva	Relativno nisko trošenje alata; povoljan oblik odvojene čestice
Sferoidizacijsko žarenje	Perlit s globularnim cementitom (mekan, deformabilan)	Zadovoljavajuće trošenje alata; s povećanim udjelom ferita loš oblik odvojene čestice
Kaljenje	Martenzit	Vrlo jako trošenje, posebno abrazivna komponenta; povoljan oblik odvojene čestice

ŽARENJE NA GRUBO ZRNO

Definicija prema normi DIN EN 10052: Žarenje pri temperaturi znatno iznad A_3 s dovoljno dugačkim držanjem s ciljem postizanja grubozrnate mikrostrukture. Primjenjuje se kod podeutektoidnih čelika sa udjelom ugljika između 0,3% i 0,4% (feritno-perlitni čelici) kako bi se postigla krupnozrnata mikrostruktura sa što je moguće zatvorenijom feritnom mrežom u koju su uključeni perlit ili bainit. Trošenje alata je pri obradi odvajanjem čestica takve strukture povoljno, oblik odvojene čestice je u pravilu dobar. Problemi su mogući s kvalitetom obrađene površine, no u pravilu je i ona zadovoljavajuća. Primjena žarenja na grubo zrno s ciljem poboljšavanja obradivosti je ograničena s obzirom na dobivena loša mehanička svojstva te upitnom ekonomskom isplativosti [3].

NORMALIZACIJSKO ŽARENJE

Definicija prema normi DIN EN 10052: Toplinska obrada sastavljena od ugrijavanja do austenitnog područja s sporim hlađenjem na zraku. Prilikom normalizacijskog žarenja postiže se jednolika, sitnozrnata mikrostruktura, pri čemu obradivost ovisi o masenom udjelu ugljika odnosno o dominantnoj fazi unutar mikrostrukture – tablica 10. Prilikom žarenja dolazi do α/γ fazne pretvorbe. Podeutektoidni se čelici ugrijavaju na temperature iznad A_3 . Nadeutektoidni čelici se ugrijavaju na temperature iznad A_1 , a pri višim udjelima ugljika, ukoliko je potrebno potpuno rastvoriti mrežu karbida, iznad A_3 . Jače mreže karbide, pogotovo kod legiranih čelika, ovim je žarenjem nemoguće potpuno rastvoriti te je trošenje alata i nakon provedenog žarenja vrlo izraženo, dok je kvaliteta obrađene površine odlična [3].

SFEROIDIZACIJSKO (MEKO) ŽARENJE

Definicija prema normi DIN EN 10052: Toplinska obrada s ciljem smanjenja tvrdoće materijal na željenu vrijednost. Primjenjuje se za čelike s mikrostrukturom lamelnog perlita i cementita čija je karakteristika povišena tvrdoća i smanjena sposobnost deformacije. Pri ugrijavanju čelika na temperature oko A_1 , te duljeg držanja na istoj temperaturi i sporog hlađenja utječe se na razlaganje mreže karbide te njihovo prevođenje u kuglasti oblik. Dobivenu strukturu karakterizira niska tvrdoća te visoka sposobnost deformacije. S obzirom na obradivost, ista se povećava s obzirom na smanjenje trošenja alata, ali treba voditi pažnju na opasnost od pojave neželjenih oblika odvojene čestice s obzirom na visoku deformabilnost takve mikrostrukture [3].

REKRISTALIZACIJSKO ŽARENJE

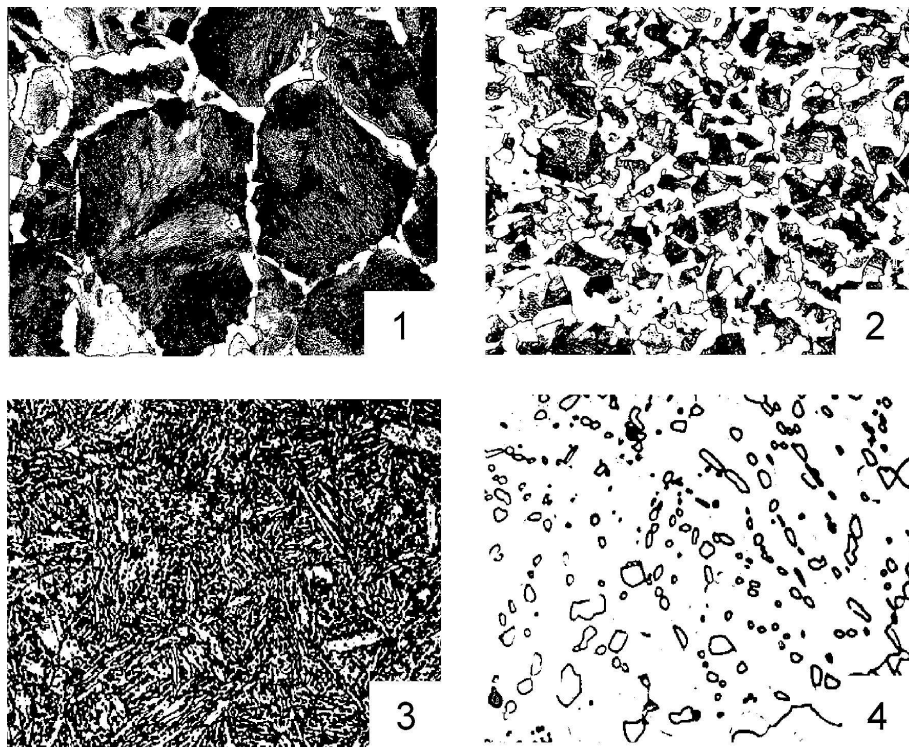
Prema normi DIN EN 10052: Žarenje s ciljem preko nukleacije i rasta kristalnih zrna bez fazne transformacije, utjecati na prevođenje usmjerene teksture materijala nastale hladnim oblikovanjem. Pod rekristalizacijskim se žarenjem podrazumijeva ugrijavanje čelika na temperature od 400-650°C, pri kojima ne dolazi do fazne transformacije te sporog ohlađivanja. Hladnom se obradom kristalna zrna usmjeravaju na način da se izdužuju u jednom smjeru te time dolazi do promjene mehaničkih svojstava čelika koja se bito razlikuju ovisno o smjeru opterećenja ovino kako su kristalna zrna orijentirana. Da bi se postigao prvobitni, poligonalni oblik zrna, provodi se upravo rekristalizacijsko žarenje [3].

KALJENJE

Prema normi DIN EN 10052 – toplinska obrada koja se sastoji od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i hlađenja pri takvim uvjetima koji povećavaju tvrdoću djelomičnom ili potpunom pretvorbom austenita u martenzit (ili bainit u nekim slučajevima). Iz konteksta obradivosti, kaljeni se čelici smatraju vrlo loše obradivima s obzirom na njihovu visoku čvrstoću i tvrdoću posebno s obzirom na utjecaj na intenzivno trošenje reznog alata. Jedini pozitivni utjecaj smatra se dobivanje povoljnog oblika odvojene čestice [3].

Na idućoj su slici prikazana 4 oblika mikrostrukture čelika C45E nakon različitih toplinskih obrada:

1. Žarenje na grubo zrno: grubozrnati perlit s lamelarnim cementitom između zrna feritne mreže.
2. Normalizacijsko žarenje: perlit s lamelarnim cementitom, isti konstituenti kao kod žarenja na grubo zrno, samo sitnozrnati i homogeni.
3. Poboljšavanje: martenzit.
4. Sferoidizacijsko (meko) žarenje: ferit (bijelo), s globularno formiranim cementitom



Slika 28. Struktura čelika C45E pri različitim toplinskim obradama [3]

4.2. OBRADIVOST ČESTO KORIŠTENIH VRSTA ČELIKA

Tablica 11. Obradivost različitih čeličnih materijala [7]

Vrsta čelika	Karakteristike	Obradivost	Efekt
Čelici za obradu na automatima: npr. 9 SMn 28, 9 SMnPb 28, 35 S 20, 45 S 20	Glavni legirni elementi: Pb, P, S, Mn u kombinaciji sa sumporom stvara za obradivost poželjne MnS	Vrijeme trajanja alata pri optimalnoj brzini obrade ovisi najviše o udjelu Pb (50-70% duže); smanjenje sila rezanja do 50%	Kratka odvojena čestica, čista obrađena površina, sklonost stvaranju naljepaka i trošenju alata je minimalna
Čelici za cementiranje: npr. Ck 15, 16 MnCr 5, 20 MoCr 4, 18 CrNi 8	Nelegirani konstrukcijski čelici, nehrđajući čelici s udjelom ugljika < 0,2%	Visoke brzine rezanja zbog sklonosti stvaranju naljepaka, poželjno s alatima od tvrdog metala; smanjiti posmak; izbor pravilne geometrije (pozitivni prednji kut)	Dobra kvaliteta obrađene površine
	Cementirani čelici s tvrdoćom oko 60 HRC	Završna obrada sa stinozrnatim tvrdim metalom, keramikom ili CBN alatima	Povoljan oblik odvojene čestice; odlična kvaliteta obrađene površine
Čelici za poboljšavanje: npr. Ck 45, 42 CrMo 4, 30 CrMoV 9, 36 CrNiMo 4	Udio ugljika od 0,2 - 0,6%; Legirni elementi: krom, molibden, vanadij, nikal, silicij, mangan	Obradivost ovisi o udjelu legirnih elemenata te provedenoj toplinskoj obradi, poboljšavanje se najčešće provodi između grube i završne obrade odvajanjem, niže brzine rezanja za čelike sa manjim udjelom ugljika (perlit)	
		Gruba obrada zbog teže obradivosti uglavnom u normaliziranom stanju	Vrlo dobra obradivost; trošenje alata je sporo
		Završna obrada s nižim brzinama s alatima od tvrdog metala P skupine (HSS jedino za bušenje), CBN ili keremika jedino za tvrdoće iznad 45 HRC	Sporo trošenje alata

Vrsta čelika	Karakteristike	Obradivost	Efekt
Čelici za nitriranje: 34 CrAlNi 7, 31 CrMo 12, 34 CrAlS	Udio ugljika od 0,2 – 0,45%, legirni elementi: Cr, Mo, Al, V; visoka površinska tvrdoća zbog metalnih nitrida	Obrada se zbog kasnije visoke tvrdoće obavlja prije nitriranja	
		Poboljšano stanje – niske brzine rezanja	Zadovoljavajuće trošenje alata
		Nepoboljšano stanje	Otežano odvođenje odvojene čestice, srh
		Udio Ni > 1%	Loša obradivost
		Dodatak sumpora	Dobra obradivost
Alatni čelici: C 45, C 60	Udio ugljika < 0,9% za nelegirane alatne čelike	Primjena tvrdih metala od titana i titankarbida (P 20)	Povećana sklonost adheziji, BUE, relativno loša obradivost, loša kvaliteta obrađene površine
		Alatni čelici u poboljšanom stanju	Bolja obradivost
Nehrdajući i vatrootporni čelici: X5CrNiNb18-10	Udio kroma > 12%	Najčešće feritni čelici	Dobra obradivost
	Dodatni udio nikla od 10-13%	Austenitni čelici: Niske brzine rezanja, relativno visoki posmak kako bi se smanjio broj prolaza	Loše obradivi, sklonost adheziji, BUE, samozakaljivanje

4.2.1. ČELICI ZA OBRADU NA AUTOMATIMA

Ovu skupinu čelika karakterizira posebno dobra obradivost. Osobine su joj stoga povoljan oblik odvojene čestice, odlična kvaliteta obrađene površine kao i minimalno trošenje alata. S lakoćom se mogu obrađivati odvajanjem čestica na različitim obradnim sustavima te je vrlo lako ostvariti serijsku i masovnu proizvodnju. Brzine obrade su vrlo visoke te su često ograničene promjerom obradka (kod tokarenja) i karakteristikama samog alatnog stroja. S obzirom na kemijski sastav te namjenu, čelici za obradu na automatima podliježu toplinskoj obradi cementiranja ili poboljšavanja. Ovakva se povoljna svojstva ove vrste čelika ostvaruju

legiranjem različitim legirnim elementima koji pozitivno utječu na obradivost od kojih su najčešći [3]:

- sumpor
- olovo
- fosfor

Omogućuju smanjenje čvrstoće u smičnoj zoni te se tako ostvaruje povoljan oblik odvojene čestice uz istovremeno nisko trošenje alata što ove čelike stavlja na prvo mjesto gledano iz perspektive obradivosti. Ovi aditivi, koji se često koriste u kombinaciji, dovode do netopljivih uključina u matrici. Uz dodatak sadržaju, veličina, oblik i distribucija uključina utječe na obradivost. Te uključine uzrokuje lakše deformiranje metalne jezgre i olakšavaju širenje pukotina, što dovodi do manjih sila rezanja, lakšeg lomljenja odvojene čestice i bolje kvalitete obrađene površine. Važno je naglasiti kako svi dodaci koji pozitivno utječu na obradivost, imaju negativan utjecaj na mehaničke karakteristike, te se općenito čelik s većim udjelom navedenih elemenata smatra manje kvalitetnim.

Obrada odvajanjem provodi se uglavnom alatima od prevučenog tvrdog metala ili brzoreznog čelika. Nizak maseni udio ugljika utječe na pojavu prvenstveno feritne mikrostrukture uz nizak udio perlita, što rezultira vrlo niskom abrazivnom komponentom trošenja. Problem se javlja jedino pri primjeni niskih brzina rezanja i karakterizira se stvaranjem naljepka na prednjoj površini alata, no s obzirom da su brzine obrade ovih čelika vrlo visoke, vrlo će rijetko stvoriti teškoće. Pri obradi niskougljičnih čelika za obradu na automatima niskim brzinama rezanja ($v_c < 100$ m/min) na površini se stvara sloj MnS ili Pb što utječe na smanjenje trenja te time i trošenja alata. Sile rezanja su što je rezultat pretežno feritne mikrostrukture te legirnih elemenata koji utječu na smanjenje čvrstoće čelika. Kvaliteta obrađene površine ponajviše ovisi o sklonosti obratka adheziji i stvaranju naljepaka pri čemu je bitan pozitivan utjecaj MnS, Pb i P koji značajno smanjuju sklonost adheziji i stvaranju naljepaka što rezultira odličnom kvalitetom obrađene površine.

Ovisno o načinu proizvodnje, fosfor s obzirom na njegov nizak koeficijent difuzije može utjecati na stvaranje segregacija unutar čelika. Ovo se neželjeno svojstvo samo djelomično može izbjeći primjenom odgovarajuće toplinske obrade. Visokotemperaturno difuzijsko žarenje utječe na rastvaranje mikrosegregacija, dok se pojava makrosegregacija na taj način ne može riješiti u

nekom zadovoljavajućem vremenu, dok bi zbog dugotrajnog žarenja moglo doći do naglog porasta zrna. Manje makrosegregacije mogu se postići smirivanjem čelika prije lijevanja. Pozitivan utjecaj fosfora odnosi se na stvaranje povoljnog oblika odvojene čestice, smanjene sklonosti adheziji u zoni rezanja te dobrom kvalitetom obrađene površine. Čelici za obradu na automatima sadrže do 0,1% fosfora.

Sumpor se obično dodaje u obliku manganova sulfida (MnS), krutog maziva koji stvara uključine u jezgri. Tijekom rezanja, MnS premazuje i podmazuje prednju površinu alata, smanjujući trenje, temperature i razinu trošenja alata. Uključine također poboljšavaju lomljenje odvojene čestice. Pretjerana količina MnS uzrokuje negativan utjecaj na mehanička svojstva kao što su otpornost na koroziju, kovkost, čvrstoća, oblikovljivost i zavarljivost.

Bolja se obradivost postiže također i dodatkom do 0,35% olova. Olovo naime nije topivo u α -željezu te se stoga pojavljuje u obliku submikroskopskih čestica. Utjecaj na čvrstoću i žilavost je negativan, posebno u rasponu temperatura od 250-400°C zbog vrlo niske temperature tališta olova. Prilikom obrade odvajanjem, stvara se tanki film olova koji podmazuje zonu rezanja što pozitivno utječe na smanjenje sila rezanja do čak 50%, povoljni oblik odvojene čestice i trošenje alata. Pri brzinama rezanja iznad 100 m/min stvoreni film olova gubi taj utjecaj te trošenje opet postaje intenzivnije [3] [7] [12].

4.2.2. ČELICI ZA CEMENTIRANJE

Čelici za cementiranje kao jedna od najčešćih vrsta čelika u proizvodnji koriste se prvenstveno za uvjete izraženog trošenja i promjenjivog opterećenja (zupčanicima, elementi za prijenos snage i momenta, vretena, vijci itd.). Glavna im je značajka relativno nizak udio ugljika (0,1 – 0,2%). Pošto takva količina ugljika nije dovoljna za stvaranje martenzitne mikrostrukture odgovarajućim postupkom kaljenja, provodi se postupak pougljičavanja pri temperaturama od 800 – 1100°C pri kojima u ugljikom obogaćenoj atmosferi u površinske slojeve difundira dodatna količina ugljika koja omogućuje bolju zakaljivost, te postizanje tvrdoće u površinskom sloju do 62 HRC [3].

Obrada odvajanjem čestica gotovo se uvijek provodi prije toplinske obrade cementiranja, s obzirom da početna struktura od ferita i vrlo malo perlita omogućuje daleko bolju obradivost posebno iz aspekta trošenja alata za razliku od konačne martenzitne mikrostrukture. Poželjno je

korištenje viših brzina rezanja ($v_c > 200$ m/min) s obzirom na sklonost stvaranja naljepaka kod takvih vrsta čelika te potencijalnih problema s kvalitetom obrađene površine u tom slučaju. Bolju kvalitetu obrađene površine moguće je ostvariti upotrebom odgovarajućih SHIP-ova s posebnim naglaskom na podmazujuća svojstva, promjenom geometrije alata – poželjno je koristiti alate s pozitivnim prednjim kutem te smanjenjem posmaka. Sile rezanja su, kao posljedica visokog udjela ferita odnosno niskog udjela perlita, u žarenom stanju niske [3].

Smanjenje sklonosti adheziji moguće je ostvariti prethodnim žarenjem na grubo zrno. Karakteristika čelika za cementiranje također je i sklonost stvaranja trakaste usmjerene mikrostrukture. To može uzrokovati teškoće pri nekim obradama kao npr. provlačenju, razvrtavanju ili bušenju (naročito dubokom bušenju), jer čitave linije mogu biti odrezane i kvaliteta obrađene površine značajno smanjena, te se u tim slučajevima ova vrsta čelika često obrađuje nakon provedene obrade žarenja na grubo zrno. Brzim hlađenjem nakon toplinske obrade stvaranje trakaste mikrostrukture može se djelomično spriječiti, iako nakon sljedećeg ugrijavanja iznad temp. transformacije ponovno nastaje. Potpuna eliminacija trakaste mikrostrukture moguća je jedino difuzijskim žarenjem. Karakteristika ovih čelika je također stvaranje kontinuirane odvojene čestice što je posljedica njihove visoke žilavosti i niskog masenog udjela ugljika, te je poželjna upotreba alata sa lomačem. Poboljšanje loma odvojene čestice moguće je legiranjem sumporom i olovom (npr. 16MnCrS5).

Uvjeti obrade neznatno se razlikuju s obzirom na primjenjenu toplinsku obradu pretpostavljajući upotrebu odgovarajućeg alata (tvrdi metal, cermet) te vlačnom čvrstoćom obradka ispod 650 N/mm². Ako je iz nekog razloga potrebno obrađivati već cementirani čelik koji ima tvrdoću >45 HRC, potrebna je upotreba sitnozrnatog tvrdog metala, cermeta ili PCBN-a. U slučaju obrade takvih čelika, vrlo su visoke sile rezanja, a problem s lomom odvojene čestice je znatno smanjen te se u pravilu postiže odlična kvaliteta obrađene površine. Česti predstavnici čelika za cementiranje su npr. Ck 15, 16MnCr5, 20MoCr4, 18CrNi8 itd [3].

4.2.3. ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE

Ovi se čelici koriste za elemete izložene visokim opterećenjima. Udio ugljika kreće se između 0,2 i 0,6% te ih stoga karakterizira veća čvrstoća u odnosu na prethodnu kategoriju tj. čelike za cementiranje. Najčešće se legiraju silicijem, manganom, kromom, molibdenom, niklom i vanadijem.

Obradivost ovih čelika ponajviše ovisi o mikrostrukturi koja je rezultat prethodno provedene toplinske obrade, te je zato moguć širok spektar varijacija. Općenito je utjecaj mikrostrukture na obradivost čelika za poboljšavanje značajniji od utjecaja legiranih elemenata. Utjecaj trošenja alata uglavnom je određen udjelom ferita i perlita u mikrostrukturi. Kod nelegiranih čelika za poboljšavanje s udjelom ugljika do 0,5%, jednolična feritno-perlitna mikrostruktura pozitivno utječe na obradivost. S porastom udjela perlita ubrzava se i proces trošenja alata, kao i rast sila rezanja, stoga je u tom slučaju poželjno obrađivati nižim brzinama rezanja. Primjenom viših brzina rezanja dolazi do intenziviranja trošenja alata, pogotovo nastajanja kratera što značajno smanjuje vijek trajanja alata, što je posebno izraženo kod legiranih čelika za poboljšavanje. Oblik odvojene čestice, kao i ostali kriteriji obradivosti, ovisi o prethodno provedenoj toplinskoj obradi i mikrostrukturi. Lakše lomljenje odvojene čestice postiže se odabirom pravilne geometrije alata te dodavanjem sumpora i olova, što je ograničeno prema kasnijoj namjeni izradka s obzirom da se time utječe na smanjenje čvrstoće [3].

Čelike za poboljšavanje sa većim udjelom ugljika karakterizira izlučivanje cementita unutar mikrostrukture što za posljedicu donosi povećanje sklonosti abrazivnoj komponenti trošenja. Istovremeno raste i sklonost adheziji, a kvaliteta obrađene površine pada. U takvim se slučajima obrada vrši nakon provedenog mekog žarenja također pri povećanim brzinama rezanja, pošto je obradivost u tom slučaju najbolja. Abrazijsko trošenje te termička opterećenja alata najveći su problem pri obradi takvih čelika, te je u skladu s time potrebno prilagoditi i brzine rezanja. Za grubu obradu koriste najčešće su korišteni alati od prevučenog tvrdog metala, a za završnu cermet, dok se za bušenje i urezivanje navoja često koristi i brzorezni čelik. Također je za obradu odvajanjem čelika s tvrdoćom preko 45 HRC potrebna upotreba postojanih alata kao npr. CBN ili rezna keramika [3].

Dodatak sumpora od 0,06-0,1% pri obradama tokarenjem, glodanjem i bušenjem značajno poboljšava obradivost, no pri većim vrijednostima taj pozitivni utjecaj opada dok istovremeno raste negativan utjecaj na pad čvrstoće [3].

Toplinska se obrada s ciljem postizanja bolje obradivosti vrlo rijetko provodi, nego se primarno provodi s ciljem postizanja željenih mehaničkih karakteristika i kasnijoj namjeni izradka. Za različite je čelike za poboljšavanje obradivosti bila bolja za različite postupke prethodne toplinske obrade, npr. čelik C 60 E4 poželjno je obrađivati nakon provedenog sferoidizacijskog žarenja, dok se njemu srodan C 25 E4 toplinski obrađuje žarenjem na grubo zrno ili u hladno očvrstnutom stanju [3].

Većina ovih čelika obrađuje se u poboljšanom stanju, dakle pri postignutoj odgovarajućoj čvrstoći, te ostalim mehaničkim karakteristikama. Tome je potrebno prilagoditi i režime obrade, tj. obrađivati sa višim brzinama rezanja što sa sobom nosi i veće trošenje alata te je zbog toga potreban pažljiv odabir alata. Najčešće su to alati od tvrdog metala te rezne keramike, dok se pri bušenju i upuštanju koristi i brzorezni čelik [3].

4.2.4. ČELICI ZA NITRIRANJE

Čelici za nitriranje imaju od 0,2 – 0,3% udjela ugljika te im je primjena slična primjeni čelika za cementiranje. Legiraju se kromom i molibdenom radi lakše zakaljivosti te aluminijem i vanadijem koji omogućuju bolju postojanost sloja nitrida. Samo nitriranje provodi se pri temperaturama između 500 i 600°C, dakle ispod temperatura α - γ pretvorbe. Za razliku od čelika za cementiranje koji svoju tvrdoću postiže upravo zahvaljujući faznoj pretvorbi i nastajanju metastabilnog martenzita, kod čelika za nitriranje tvrdoća je isključivo posljedica metalnitridnog sloja nanešenog na površinu. U atmosferi obogaćenoj dušikom, isti difundira u površinske slojeve te spajanjem s legirnim elementima Cr, Mo i Al stvara specijalne nitride čija je distordirana kristalna rešetka zaslužna za visoku površinsku tvrdoću [3].

Obrada odvajanjem čestica ovih čelika provodi se isključivo prije samog postupka nitriranja, u poboljšanom, a često i sferoidizacijski žarenom stanju. Iz razloga što je prije nitriranja poželjno ostvariti mikrostrukturu ravnomjerno raspoređenih karbida i martenzita nakon toplinske obrade, obradivost je vrlo loša. Problemi su najočitiji u nastajanju kontinuirane odvojene čestice te srha koji je mnogo češća pojava nego kod čelika za cementiranje. Brzine rezanja su niže nego kod čelika za cementiranje, a ovisno o mikrostrukturi i jako varijabilne. Posebno izraženi problemi u obradi javljaju se kod čelika sa povišenim površinskim udjelom nikla, a djelomično se mogu ublažiti poboljšavanjem na nešto već čvrstoću (34 CAlNi7).

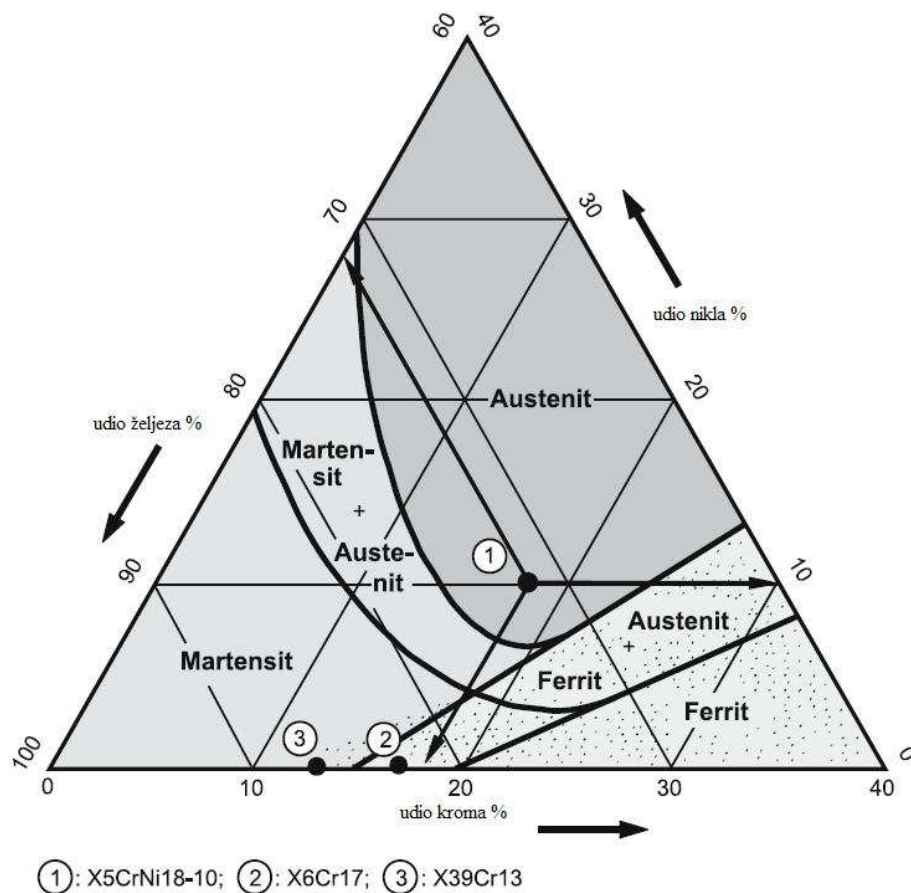
Problemi s obradivošću također pokazuju i čelici s povišenim udjelom Al, te ih je poželjno dodatno legirati sumporom [3].

4.2.5. NEHRĐAJUĆI ČELICI

Osnovna je karakteristika nehrđajućih čelika visoki udio kroma, obično iznad 11%, te udio ugljika do 1,2%. Glavni legirni elementi ove vrste čelike su krom i nikal. Pri udjelu kroma većem od 12%, postiže se korozijska postojanost, jer stvara zaštitni film kromovog oksida na površini. Nikal širi γ -područje te stoga čelici s visokim udjelom kroma i nikla na normalnim temperaturama imaju austenitnu mikrostrukturu. Također značajno smanjuje toplinsku vodljivost [11].

Postoji mnogo podkategorija nehrđajućih čelika, a općenito im je svojstvo visoka otpornost prema koroziji. Dijele se u 3 glavne skupine – austenitni (koji čine 70% ukupne svjetske proizvodnje nehrđajućih čelika), feritni i martenzitni. Na slici 29 prikazane su pojedine skupine koje karakteriziraju različiti udjeli kroma i nikla unutar mikrostrukture, gdje točka 1 odgovara austenitnom čeliku X5CrNi18-10, s 18% kroma i 10% nikla i 72% željeza, točka 2 feritnom čeliku X6Cr17 te točka 3 martenzitnom čeliku X39Cr13 [3].

Uglavnom se teško obrađuju zbog svoje visoke vlačne čvrstoće, visoke kovkosti, velike brzine otvrdnjavanja tijekom obrade, niske toplinske vodljivosti i abrazivnog djelovanja. Takva kombinacija svojstava rezultira visokim silama rezanja, temperaturama i brzinama trošenja alata kao i tendenciji zareznom trošenju alata, formiranju naljepaka, poteškoćama s lomljenjem odvojene čestice te lošom kvalitetom obrađene površine. Najčešći alati koji se upotrebljavaju jesu tvrdi metal, rezna keramika te kubični bor nitrid (CBN) [3].



Slika 29. Fazni dijagram Cr-Ni čelila s prikazom mikrostrukturnih konstituenata ovisno u udjelu željeza, kroma i nikla [3]

FERITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI

Često se nazivaju i „krom-čelici“. Primarno se legiraju kromom, a molibden, titan i/ili niobij dodaju se nekim vrstama da im se poboljša otpornost na koroziju ili zavarljivost. Feritne legure su uglavnom bolje obradive od drugih legura. Koriste se u žarenom ili hladno deformiranom stanju, ali se toplinski ne obrađuju, tako da je njihova čvrstoća usporedivo mala. Obradivost je uglavnom lošija što je sadržaj kroma veći, no svejedno bolja u odnosu na obradivost austenitnih čelika [3].

MARTENZITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI

Povećanje čvrstoće uz dodatak kroma, postiže se i dodavanjem molibdena i nikla. Utjecaj na obradivost martenzitnih nehrđajućih čelika osim tvrdoće i sadržaja ugljika, ima i udio nikla te metalurška mikrostruktura. Ovisno o toplinskoj obradi, struktura se sastoji od martenzita ili

popuštenog martenzita s kromovim karbidima i feritom (poboljšano stanje). Kao i kod veće materijala, povećanje tvrdoće u pravilu smanjuje vijek trajanja alata i obradivost. Udio abrazivnih čestica, posebno kromovih karbida, je veći ukoliko je sadržaj ugljika viši. Metalurški faktor koji najviše utječe na obradivost je udio ferita. Obradivost je uglavnom bolja što je taj udio viši [3].

AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI

Često se nazivaju i „CrNi-čelici“. Uz krom, sadrže i dušik, nikal te mangan. Karakterizira ih visoka čvrstoća i kovkost. Obrađuju se ili u žarenom ili u poboljšanom stanju. Teže su obradivi od feritnih i martenzitnih nehrđajućih čelika. Uzrok tome su njihova visoka žilavost i sposobnost deformacije, sklonost samozakaljivanju te adheziji i do 1/3 manja toplinska vodljivost u odnosu na nelegirane čelike. Specifične poteškoće koje se pojavljuju prilikom obrade austenitnih nehrđajućih čeliku su intenzivno trošenje alata zbog velikih sila rezanja i temperatura, pojava naljepaka, problemi s odvođenjem i oblikom odvojene čestice, loš integritet obrađene površine (otvrdnuće obrađene površine) i sklonost krzanju. Visoka žilavost zahtjeva upotrebu alata sa što je moguće oštrijom oštricom, što se pozitivno ogleda s obzirom na oblik odvojene čestice, smanjenje sile rezanja, smanjenje sklonosti pojave srha te manja plastična deformacija u smičnoj zoni i povećanju kvalitete obrađene površine. Negativna je posljedica izraženo trošenje alata u tom slučaju. Brzine rezanja su reducirane, a kvaliteta obrađene površine loša. Kratki vijek trajanja alata povezan je sa čvrstoćom nakon žarenja koja je veća što je udio nikla viši. Povećani sadržaj ugljika povećava brzinu otvrdnjavanja kod obrade i smanjuje obradivost. Abrazivni spojevi dušika i ugljika utječu na smanjenje vijeka trajanja alata, što se djelomično može spriječiti dodatkom titana ili niobija. Hladno deformiranje u pravilo poboljšava obradivost tako da smanjuje sklonost stvaranja naljepaka i poboljšava kvalitetu i integritet obrađene površine [3] [9].

Obrada odvajanjem austenitnih čelika uglavnom se provodi neprevučanim ili prevučanim WC-Co tvrdim metalom skupine M. Neprevučeni se tvrdi metali uglavnom koriste za niže brzine rezanja zbog sklonosti kraterskom trošenju, dok se za veće brzine rezanja obavezno koriste prevučeni tvrdi metali. S obzirom na visoko termičko opterećenje, brzine rezanja su relativno niske, u ovisnosti o legirajućim elementima kreću se od $v_c = 50$ m/min za čelik X5NiCrTi26-15 do $v_c = 160$ m/min za čelik X6CrNiMoTi17-12-2 [3].

Opće smjernice za obradu nehrđajućih čelika uključuju [9]:

- Koristiti niže brzine rezanja i posmake nego kod ugljičnih čelika
- Koristiti krute obradne sustave i postavke da bi se izbjeglo krzanje
- Držati posmak iznad minimalne razine da se izbjegne loš integritet površine
- Koristi alate koji minimiziraju stvaranje naljepaka
- Prilagoditi sredstva za hlađenje sa dostatnim protokom za otklanjanje topline

4.2.6. ALATNI ČELICI

Alatni čelici namjenjeni su izradi različitih vrsta alata, od raznih štanci namjenjenih za hladni rad sve do kalupa namjenjenih za topli rad. Sadržaj ugljika je varijabilan, a najčešće se kreće između 0,5 do 1,5% C. Dvije osnovne skupine alatnih čelika [3]:

- nelegirani alatni čelici,
- legirani alatni čelici

S obzirom na područje primjene, podjela alatnih čelika je sljedeća:

- čelici za hladni rad,
- čelici za topli rad,
- brzorezni alatni čelici.

Takva je klasifikacija također pogodna za opis obradivosti alatnih čelica.

Nelegirani alatni čelici s udjelom ugljika do 0,9% u mikrostrukturi sadrže lamelarni ferit i perlit, dok se pri višim udjelima ugljika uz lamelarni perlit nalazi i mreža cementita. Pravilno provedenim žarenjem, mreža cementita se neovisno o udjelu ugljika ravnomjerno raspoređuje unutar feritne matrice. Obrada odvajanjem nelegiranih alatnih čelika vrši se nakon provedeng mekog ili normalizacijskog žarenja. Obradivost ovih čelika je relativno loša prvenstveno zbog sklonosti adheziji te stvaranju naljepaka.

Nelegirani alatni čelici s udjelom ugljika od 0,5-1,5% obrađuju se najčešće u meko žarenom stanju. Podeutektoidni se alatni čelici mogu obrađivati također i u normaliziranom stanju. U oba se slučaja obradivost može definirati kao loša, posebno iz konteksta povećane sklonosti adheziji odnosno stvaranju naljepaka na prednjoj površini alata što utječe na smanjenje kvalitete obrađene površine.

Iznos sila rezanja pri obradi alatnih čelika determiniran je ponajviše udjelom i vrstom legiranih elemenata te prethodno provedenoj toplinskoj obradi. Posebno se problem javlja pri obradi legiranih čelika kada stvaranje vrlo tvrdih karbidnih filmova intenzivno utječe na povećanje vrijednosti sila rezanja.

Legirani alatni čelici upotrebljavaju se za visoko opterećene alate, gdje legirni elementi (Cr, Mn, Mo, Ni, V iW) omogućuju ostvarivanje boljih mehaničkih karakteristika nakon provedene toplinske obrade. Veći udio ugljika omogućuje stvaranje karbida otpornih na trošenje te se kod onih alata gdje su postavljeni visoki zahtjevi za trošenje uvijek upotrebljavaju oni čelici s većim udjelom C, i uz to legirani jakim karbidotvorcima (Cr, W...). Taj isti udio ugljika nije od odveć značajne važnosti ako se govori u kontekstu obradivosti tih čelika s obzirom da se oni obrađuju u meko žarenom stanju u kojem je mreža abrazivnih karbida razbijena.

Obradivost im je bez obzira na navedeno, loša. Prvenstveno je tome uzrok sklonost adheziji u žarenom stanju i stvaranju naljepaka, što rezultira lošom kvalitetom obrađene površine. Preporučene su brzine rezanja relativno niske, a rastu sa porastom udjela karbida unutar mikrostrukture. Najčešće upotrebljavani alati su tvrdi metal srednje žilavosti (P-skupina) [3].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. CILJ I METODOLOGIJA ISPITIVANJA

Cilj pokusa jest na osnovi dosad objavljenih istraživanja i teorijskih saznanja pronaći funkciju obradivosti (adekvatni matematički model), koja bi opisivala djelovanje utjecajnih veličina kako bi se stvorila fizikalna slika o njihovom djelovanju. Stoga se u ovom eksperimentu analizira karakter utjecaja parametara režima obrade (dubina rezanja a_p , posmak f i brzina rezanja v_c) na hrapavost obrađene površine kod tokarenja bez upotrebe sredstva za hlađenje i ispiranje.

U ovom je radu postavljen zadatak da se adekvatni matematički model prikaže pomoću višfaktorskog plana pokusa, koji se pokazao optimalnim za istraživanje matematičkih modela koji opisuju zakonitosti u procesu obrade odvajanjem čestica.

Za ulazne mjerljive veličine procesa odabrani su:

- dubina rezanja
- posmak
- brzina rezanja

Za ispitivani slučaj to znači utvrđivanje zakonitosti :

$$R_i = f_i(v_c, a_p, f)$$

Rezultati istraživanja i iz njih proizlazeći modeli, odgovoriti će na pitanja kakva se kvaliteta obrađene površine u datim okolnostima može očekivati. Također će biti dobivena i fizikalna slika o karakteru utjecaja parametara obrade na hrapavost obrađene površine.

5.2. OPĆE KARAKTERISTIKE VIŠEFAKTORSKIH PLANOVA POKUSA

S obzirom na razne kriterije eksperimentalni planovi se dijele [15]:

1. Prema broju faktora na:
 - Jednofaktorske planove;
 - Dvofaktorske planove;
 - Trofaktorske planove;
 - Višefaktorske planove.
2. Prema redu plana (stupnju modela) na:
 - Planove prvog reda;
 - Planove drugog reda;
 - Planove viših redova.
3. Prema cilju plana koji se planom odnosno pokusnim ispitivanjem postiže na:
 - Planove za selekciju i rangiranje (planovi za analizu signifikantnosti ili selekcijske planove) skupa ulaznih faktora;
 - Planove za otkrivanje i proučavanje zakonitosti (mehanizama) danih pojava i procesa;
 - Planove za optimizaciju i optimalno upravljanje.

Primjenom suvremene teorije pokusnih ispitivanja, koja se u suštini sastoji od planova statističke višefaktorske analize (višefaktorski planovi), moguće je riješiti mnoge zadatke iz područja višefaktorskih i difuznih sustava kao npr. [15]:

1. Matematičko modeliranje pojava, složenih procesa i sustava u prostoru i vremenu;

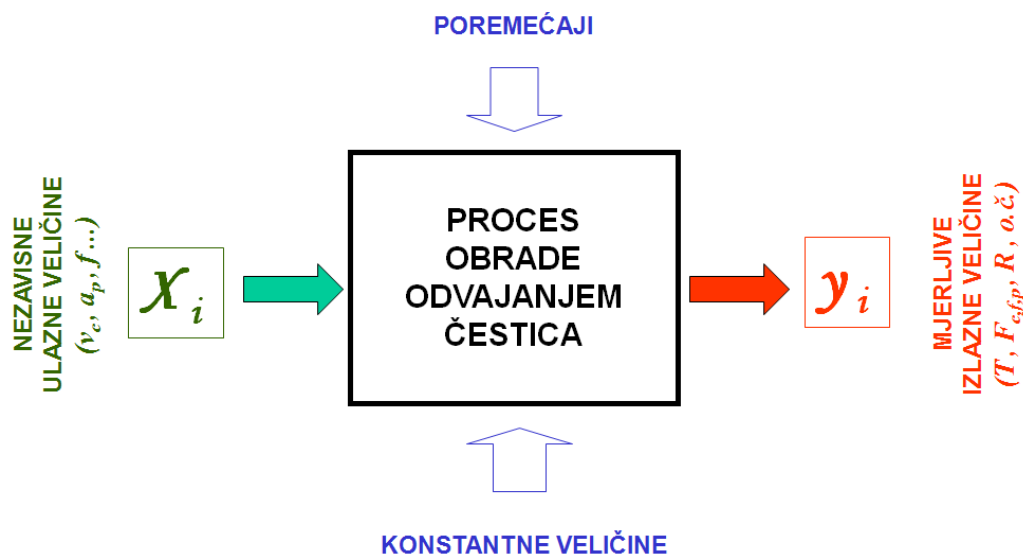
2. Proučavanje prirode unutrašnjih mehanizama pojava i procesa, tj. otkrivanje unutrašnje strukture, interakcija i zakonitosti "crne kutije", koristeći uz to fizikalne analogije i matematičku analizu;
3. Optimiziranje i optimalno upravljanje procesima u tehničkim sustavima.

Pod matematičkim modeliranjem procesa podrazumjeva se matematičko opisivanje fizikalnih, geometrijskih, tehnoloških, ekonomskih i drugih ovisnosti unutar procesa obrade. Definiranje dovoljno točnih i pouzdanih matematičkih modela vrlo je složeno jer utjecajni činitelj procesa osim pojedinačnih utjecaja imaju i uzajamnu interakciju. Stoga je primjena odgovarajućeg plana pokusa i točna obrada eksperimentalnih rezultata najvažniji element točnog definiranja matematičkog modela. Do matematičkog se modela može doći na različite načine, međutim osnovno je pitanje koliko dobiveni model adekvatno opisuje realno stanje procesa.

Višefaktorske eksperimentalne planove, pri npr. matematičkom modeliranju procesa karakteriziraju dva osnovna obilježja [8]:

1. Minimalni skup eksperimentalnih točaka raspoređenih u eksperimentalnom hiperprostoru. Posljedica ovog su višestruko niži troškovi i kraće trajanje često skupih eksperimentalnih ispitivanja procesa i sustava.
2. Maksimalna informacija o efektima matematičkog modela procesa.

Neovisno od toga koji se od tri navedena zadatka istraživanja rješava, sadržan je kibernetički princip "crne kutije". Slika 30. predstavlja jednostavan model realnog složenog difuznog sustava, čija je unutrašnja struktura, mehanizam interakcija i zakonitosti procesa nepoznat ili djelomično poznat.



Slika 30. Kibernetički pristup modeliranja objekta istraživanja [1]

Poremećaje je gotovo nemoguće eliminirati, a to nije ni poželjno budući da se teži istraživati u realnim uvjetima. Njihovom eliminacijom proces bi se odvijao u idealiziranom okolišu. Zbog toga se poremećaji nastoje držati konstantnim ili pak podliježu slučajnim promjenama. Kod interpretacije rezultata pokusa potrebno je navesti u kojim je uvjetima pokus izvođen, te oni ne ulaze u matematički model.

Suvremeni višefaktorski optimalni planovi omogućuju da se istraži "crna kutija", odnosno da se identificiraju pojave i mehanizmi procesa, postavi matematički model procesa (uspostavljanje matematičke ovisnosti između ulaza i izlaza procesa) i optimizira tok procesa na osnovu funkcije cilja. Pri tome su razvijeni pouzdani kriteriji i matematičko-statistički algoritmi za ocjenu adekvatnosti modelskog opisivanja funkcija stanja $y_{Mi}=f_i(x,z,b)$ [8].

Budući da je obrada odvajanjem čestica označena mnoštvom utjecajnih faktora na proces, koji direktno ili međusobno, a po jačini djelovanja različito, djeluju na tijek i ishod pokusa te zbog statističkog karaktera procesa, nužno je da se pokus vodi statističkom višefaktorskom metodom [10].

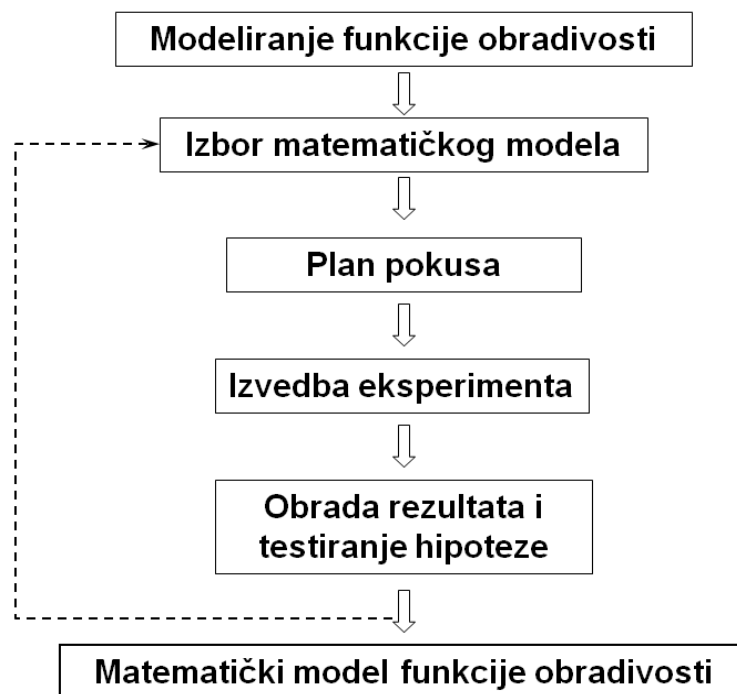
Višefaktorski plan pokusa, u kojem se utjecaj svih izabranih faktora ispituje istodobno, daje uvid u ovisnost među faktorima, a obzirom na klasičnu teoriju pokusa pruža sljedeće prednosti [5]:

- kraće vrijeme ispitivanja,

- velik broj informacija uz niske troškove ispitivanja,
- međuovisnost utjecajnih faktora (interakcije),
- matematički model,
- mogućnost ocjene dobivenih rezultata,
- ocjenu vjerodostojnosti dobivenih rezultata.

Nakon sagledavanja svih mogućih utjecajnih faktora, predviđa se provođenje pokusa sljedećim redoslijedom [5]:

- postavljanje matematičkog modela;
- planiranje pokusa;
- izvedba eksperimenta;
- obrada rezultata regresijskom analizom;
- matematički model funkcije obradivosti.



Slika 31. Blok shema izvođenja pokusa [1]

Pokus počinje polaznim matematičkim modelom za koji se na osnovu ranijih pokusa ili analognih ponašanja modela, pretpostavlja da vodi cilju. Ako se cilj ne postigne izvodi se toliko ciklusa pokusa dok se ne postigne cilj, odnosno dok se ne prouči određeni proces. U ovim pokusima svi zadani faktori mijenjaju se istovremeno, što bitno skraćuje pokus [15].

5.3. PRIPREMA I PLANIRANJE EKSPERIMENTA

5.3.1. KARAKTERISTIKE STROJA

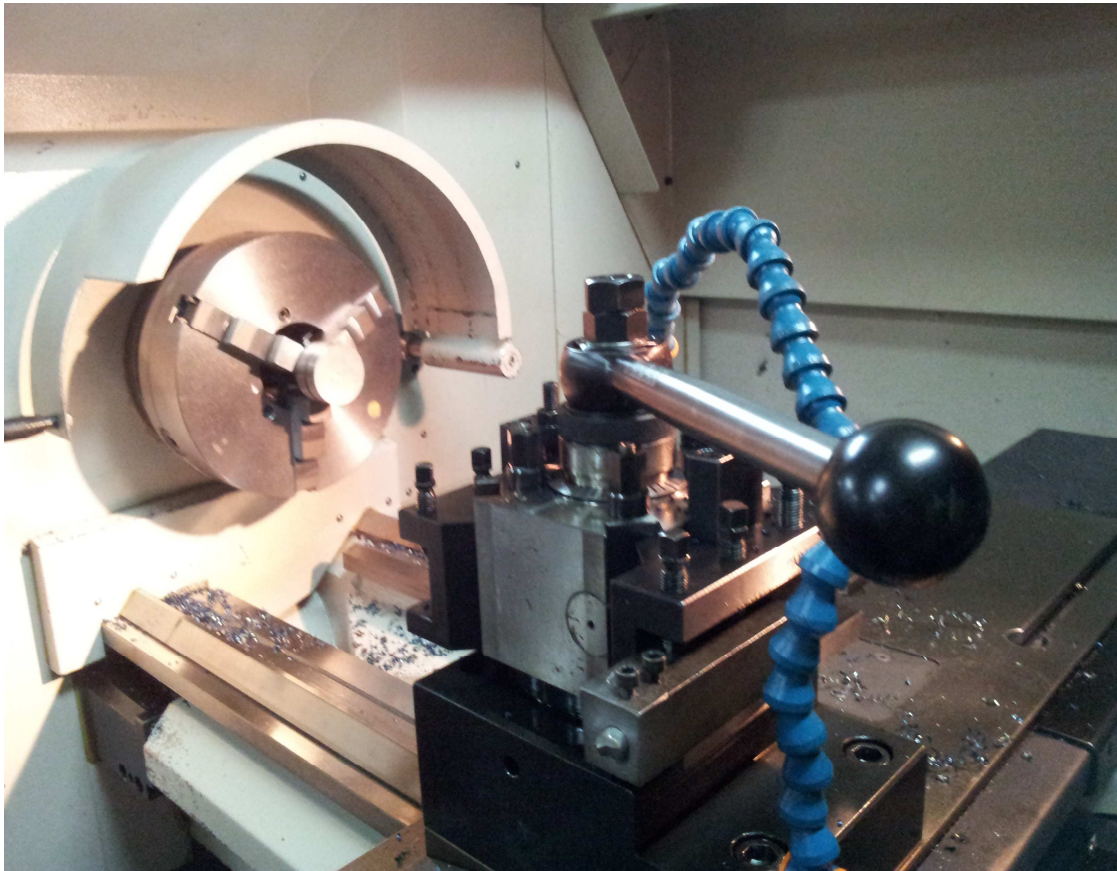


Slika 32. Tokarski obradni centar HACO TUR 580 MN

Tehničke karakteristike tokarskog obradnog centra HACO TUR 580 MN:

- Zemlja proizvodnje: Poljska
- Dimenzije: 4000x1900x1800 mm

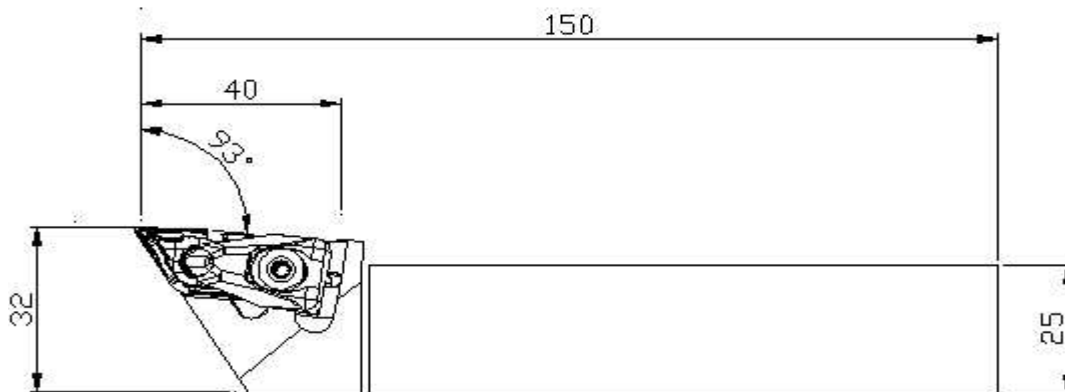
- Radni prostor: najveća duljina tokarenja 2000 mm, najveći promjer tokarenja iznad kliznih staza: 430 mm
- Glavno vreteno: snaga 15 kW, frekvencija vrtnje 2500 min⁻¹
- Upravljanje: Siemens Sinumerik
- Broj alata: 4
- Ciklički stroj (upravljanje CNC, ručna izmjena alata).



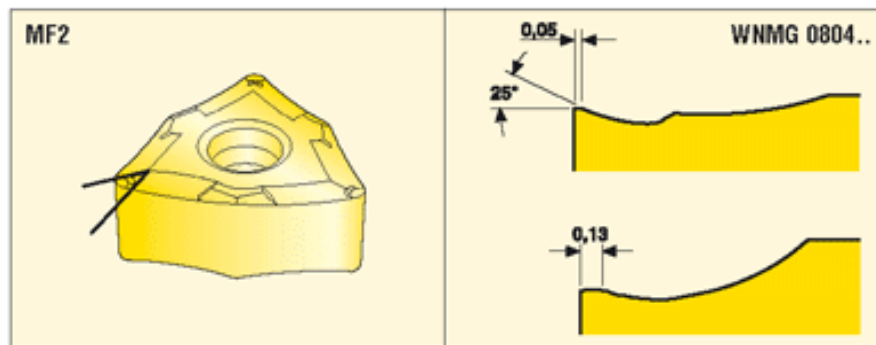
Slika 33. Prikaz obratka u steznoj čeljusti

5.3.2. ALAT

Za ovo eksperimentalno istraživanje korišten je alat tvrtke Seco Tools GmbH. Izabran je držač oznake DDJNL2525M15 (slika 34.) i rezna pločica oznake DNMG150608 – MF2TP2500 (slika 35.).



Slika 34. Držač i rezna pločica proizvođača Seco Tools [16]



Slika 35. Geometrija rezne pločica marke Seco Tools [16]



Slika 36. Korištena rezna pločica

5.3.3. MATERIJAL OBRATKA

Za ispitivanje su korišteni sljedeći materijali:

1. Čelik za cementiranje 16MnCr5 (Č4320).

Tvrdoća materijala 160HB, promjer uzorka $\varnothing 70$ mm

2. Čelik za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431)

Tvrdoća materijala 300HB, promjer uzorka $\varnothing 70$ mm



Slika 37. Primjer obradka (16MnCr5)

Tablica 12. Kem sastav i tvrdoća nakon normalizacije čelika 16MnCr5 i 34CrNiMo6

	C %	Mn %	Cr %	P %	S %	Si %	Cu %	Ni %	Tvrdoća (HB) nakon normalizacije
16MnCr5	0,168	0,125	0,968	0,010	0,026	0,077	0,069	0,031	160
34CrNiMo6	0,390	0,45	1,46	0,010	0,018	0,160	0,130	1,500	300

5.3.4. MJERNI INSTRUMENT

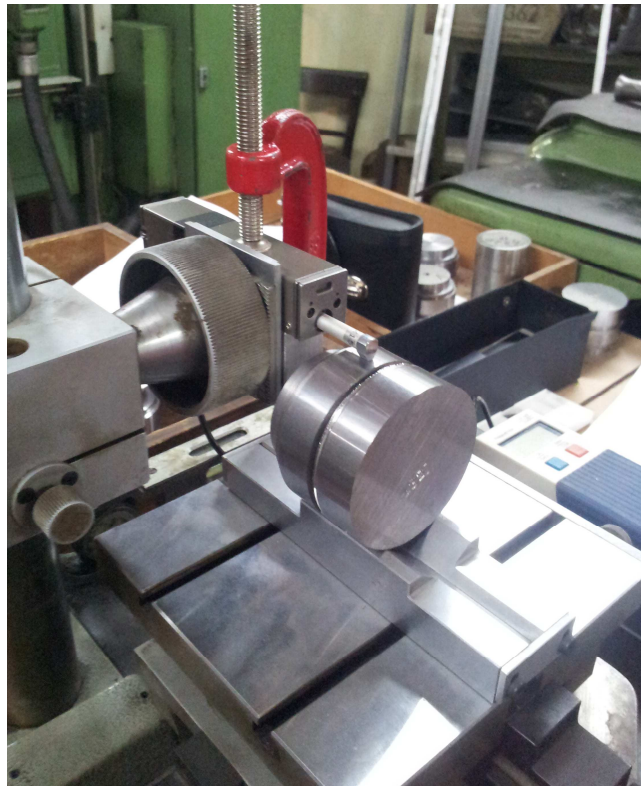
Za mjerenje parametara hrapavosti obrađene površine korišten je mjerni uređaj Mitutoyo SP-201 (slika 38). Rezultati mjerenja vidljivi su na zaslonu uređaja i ne tiskaju se na papiru.

Karakteristike ovog mjernog uređaja su:

- Mjerni profili: R, P, DIN 4776
- Filter: 2CR-75%, PC-75%, PC-50%
- Prikaz veličina: Ra, Ry, Rz, Rq, Sm, S, Pc, R3z, mr, Rt, Rp, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo
- Snaga: 1,5 W
- Standardna duljina mjerenja: 0-12,5 mm
- Standardni put ticala: 0,25; 0,8; 2,5 mm
- Dimenzije mjernog uređaja: 156,5 x 62 x 52 mm
- Dimenzije ticala: 115 x 23 x 26
- Težina mjernog uređaja: 0,3 kg
- Težina ticala: 0,2 kg



Slika 38. Uređaj za mjerenje parametara hrapavosti površine Mitutoyo SP-201



Slika 39. Zahvat ticala mjernog uređaja i obratka

5.3.5. IZBOR MATEMATIČKOG MODELA I PLANIRANJE ISTRAŽIVANJA

Ako su u procesu obrade, čija je stvarna funkcija stanja procesa nepoznata, definirani ulazi ($x_i, i=1,2,3,\dots,k$) onda se matematički model procesa može napisati u obliku:

$$\eta = \theta(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$$

Funkcija η je hipotetička veličina. U eksperimentalnim istraživanjima je prisutna greška eksperimenta (ε) pa vrijedi sljedeći model:

$$y = \theta(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) + \varepsilon$$

Ako se označi očekivani odziv sa $E(y) = \eta$, tada se površina označena sa " η ", naziva odzivna površina. Matematički model može biti polinom 0,1,2,...n-tog stupnja. On predstavlja, ako je adekvatan, dovoljno točnu aproksimaciju stvarnog, nepoznatog, analitičkog oblika funkcije odziva. U pravilu polinom višeg stupnja daje bolju aproksimaciju. U mnogim eksperimentalnim istraživanjima u kojima se očekuje funkcija odziva sa ekstremom od značaja su polinomi drugog reda.

No u većini eksperimentalnih istraživanja procesa obrade odvajanjem čestica kao matematički modeli zadovoljavaju polinomi prvog stupnja [1]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j$$

$x_i = \text{nezavisni utjecajni faktor}; i=1,k$

U obradi odvajanjem čestica se, iz praktičnih razloga, često koristi matematički model zapisan u eksponencijalnom obliku:

$$y = C \prod_{i=1}^k x_i^{p_i}$$

$x_i = \text{nezavisni utjecajni faktor}; i=1,k$

Ovaj model pripada u istu grupu kao i modeli polinoma prvog stupnja jer se jednostavno pretvara u njega matematičkom operacijom logaritmiranja.

Međutim u istraživanjima u kojima se očekuje funkcija odziva s ekstremom od značaja su polinomi drugog stupnja. U ovom eksperimentu istražuje se karakter utjecaja parametara obrade

na hrapavost obrađene površine obrađene uzdužnim tokarenjem i opisuje matematičkim modelom za koji je odabran polinom drugog stupnja.

Kao izlazne mjerljive veličine procesa određuju se parametri hrapavosti obrađene površine:

- R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti
- R_z – visina neravnina profila hrapavosti u deset točaka.

Ulazne mjerljive veličine procesa, parametri obrade, odnosno utjecajni faktori izabiru se na osnovi teorijskih razmatranja i dosadašnjih istraživanja procesa tokarenja. Izabrane ulazne veličine procesa su:

- v_c – brzina rezanja
- a_p – dubina obrade
- f – posmak

Matematički model oblika polinoma drugog stupnja

U eksperimentu u kojem se očekuje funkcija odziva s ekstremom primjenit će se polinom drugog reda. Funkcija odziva kao matematički model polinoma drugog reda prikazana je izrazom:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j b_{ij} x_i x_j$$

$$x_i = \text{nezavisni utjecajni faktori; } i = 1, k$$

U navedenom matematičkom modelu odzivne površine (teorijska jednadžba višestruke regresije) parametri b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} su teorijski koeficijenti regresije. Njihove se vrijednosti na osnovu obavljenog eksperimenta i regresijske analize statistički procjenjuju preko stvarnih koeficijenata regresije p_i, p_{ii}, p_{ij} . Tako se dobije konačni matematički model:

$$R_x = C_0 + \sum_{i=1}^k p_i f_i + \sum_{i=1}^k p_{ii} f_i^2 + \sum_i \sum_j p_{ij} f_i f_j$$

Stvarni analitički oblik funkcije odziva je nepoznat, zato što nije poznat ili je djelomično poznat mehanizam zakonitosti proučavanog višefaktorskog procesa. Matematički model $y=y(x,b)$ predstavlja, ako je adekvatan, dovoljno točnu aproksimaciju nepoznatog stvarnog analitičkog oblika odzivne funkcije drugog reda.

Kako bi se izvršila analiza rasipanja eksperimentalnih ispitivanja (ocjena eksperimentalnih grešaka, provjera adekvatnosti modela) potrebno je po određenom sustavu ponoviti eksperiment n_0 puta u središnjoj točki višefaktorskog ortogonalnog plana.

S obzirom da se kod višefaktorskog plana pokusa drugog reda, za razliku od plana pokusa prvog reda, pojavljuje i koeficijent regresije vezan za kvadratne članove polinoma b_{ii} , potrebno je proširiti matricu plana pokusa prvog reda još nekim vrijednostima fizikalnih faktora odnosno povećati broj eksperimentalnih točaka. To se postiže izborom koeficijenata " α " koji ovisi o broju točaka osnovnog faktorskog plana pokusa:

$$\alpha = (2^k)^{1/4} = 2^{k/4}$$

i za $k=3$ iznosi: $\alpha = 1,682$

No o ovom su eksperimentu, umjesto koeficijenata " α " korištene vrijednosti ulaznih veličina procesa (brzina rezanja, dubina rezanja i posmak) u osnovnim točkama plana pokusa.

Prema tome ukupan broj eksperimentalnih točaka računa se prema izrazu:

$$N = 2^k + n_0 + n_a = 2^3 + 6 + 6 = 20$$

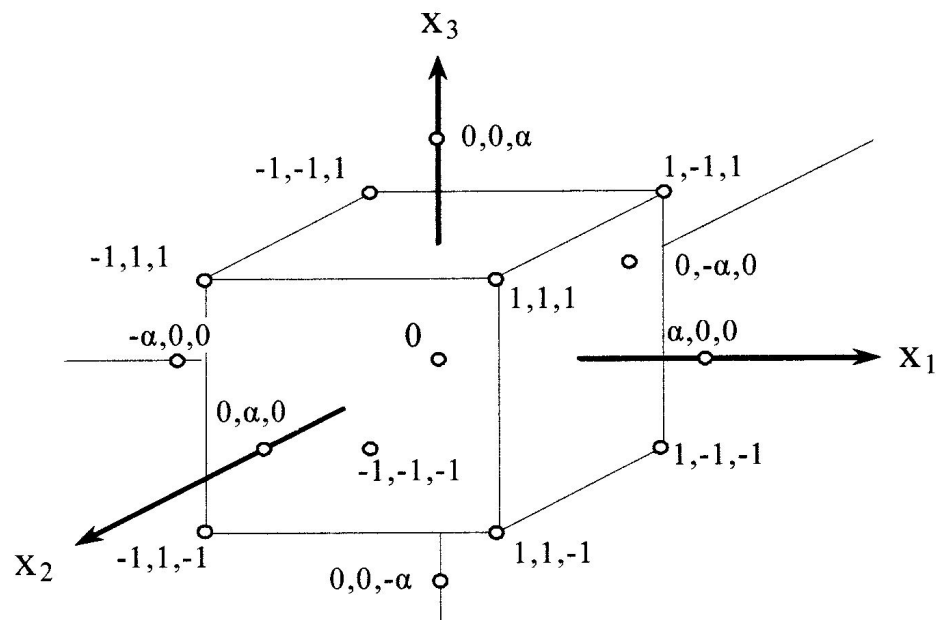
gdje je:

k – broj nezavisnih utjecajnih faktora;

2^k – broj pokusa u osnovnim točkama plana;

n_0 – broj pokusa u središnjoj točki plana;

n_a – broj pokusa na središnjim osima.



Slika 40. Raspored eksperimentalnih točaka [1]

Tablica 13. Razina variranja faktora za centralno kompozitni plan pokusa drugog reda "2³+6+6" uz korištenje dodatnih osnovnih točaka umjesto koeficijenta "α"

Faktori	$f_{i,min}$	$f_{i,sr}$	$f_{i,max}$
v_c [m/s]	3	5	7
a_p [mm]	0,8	1,6	2,4
f [mm]	0,1	0,17	0,24
Kod faktora	-1	0	+1

gdje je:

f_i – fizikalna veličina

$f_{i,sr}$ – srednja vrijednost fizikalne veličine, koja se računa prema:

$$f_{i,sr} = \frac{f_{i,max} + f_{i,min}}{2}$$

Tablica 14. Matrica plana pokusa "2³+6+6"

Redni broj mjerenja	v_c [m/s]	a_p [mm]	f [mm]	X_1	X_2	X_3
1.	3	0,8	0,1	-1	-1	-1
2.	7	0,8	0,1	+1	-1	-1
3.	3	2,4	0,1	-1	+1	-1
4.	7	2,4	0,1	+1	+1	-1
5.	3	0,8	0,24	-1	-1	+1
6.	7	0,8	0,24	+1	-1	+1
7.	3	2,4	0,24	-1	+1	+1
8.	7	2,4	0,24	+1	+1	+1
9.	5	1,6	0,17	0	0	0
10.	5	1,6	0,17	0	0	0
11.	5	1,6	0,17	0	0	0
12.	5	1,6	0,17	0	0	0
13.	5	1,6	0,17	0	0	0
14.	5	1,6	0,17	0	0	0
15.	3	1,6	0,17	-1	0	0
16.	7	1,6	0,17	+1	0	0
17.	5	0,8	0,17	0	-1	0
18.	5	2,4	0,17	0	+1	0
19.	5	1,6	0,1	0	0	-1
20.	5	1,6	0,24	0	0	+1

5.4. REZULTATI POKUSA

Mjerenjem parametara hrapavosti obradka obrađenog na tokarskom obradnom centru HACO TUR 580 MN, normaliziranog čelika za cementiranje 16MnCr5 (Č4320) i čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431), prema planu pokusa drugog reda, dobiveni su rezultati prikazani u sljedećim tablicama (16 i 17). Obrada rezultata izvršena je pomoću programskog paketa Statistica v7.0.

Tablica 15. Rezultati mjerenja parametara hrapavosti čelika za cementiranje 16MnCr5 (Č4320)

Redni broj mjerenja	Ulazni faktori			Rezultati mjerenja	
	v_c [m/s]	a_p [mm]	f [mm]	R_a [μm]	R_z [μm]
1.	3	0,8	0,1	0,4	2,7
2.	7	0,8	0,1	0,37	2,5
3.	3	2,4	0,1	0,43	3,1
4.	7	2,4	0,1	0,43	2,9
5.	3	0,8	0,24	1,62	7,3
6.	7	0,8	0,24	1,55	7,7
7.	3	2,4	0,24	1,7	8,35
8.	7	2,4	0,24	1,61	8
9.	5	1,6	0,17	1,01	5,2
10.	5	1,6	0,17	1,06	5,1
11.	5	1,6	0,17	1,17	5,6
12.	5	1,6	0,17	1,21	5,7
13.	5	1,6	0,17	1,05	5
14.	5	1,6	0,17	1,22	6,1
15.	3	1,6	0,17	1,17	5,6
16.	7	1,6	0,17	1,11	5,4
17.	5	0,8	0,17	1,14	4,8
18.	5	2,4	0,17	1,21	5,9
19.	5	1,6	0,1	0,39	2,8
20.	5	1,6	0,24	1,65	7,6

Tablica 16. Rezultati mjerenja parametara hrapavosti čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431)

Redni broj mjerenja	Ulazni faktori			Rezultati mjerenja	
	v_c [m/s]	a_p [mm]	f [mm]	R_a [μm]	R_z [μm]
1.	3	0,8	0,1	0,81	3,88
2.	7	0,8	0,1	0,75	3,6
3.	3	2,4	0,1	0,81	3,7
4.	7	2,4	0,1	0,8	3,6
5.	3	0,8	0,24	1,9	10,6
6.	7	0,8	0,24	1,92	10,3
7.	3	2,4	0,24	1,92	10,7
8.	7	2,4	0,24	1,83	9,5
9.	5	1,6	0,17	1,29	6,9
10.	5	1,6	0,17	1,23	7,1
11.	5	1,6	0,17	1,25	8,4
12.	5	1,6	0,17	1,27	7,1
13.	5	1,6	0,17	1,47	7,9
14.	5	1,6	0,17	1,3	7,8
15.	3	1,6	0,17	1,25	8,4
16.	7	1,6	0,17	1,27	7,1
17.	5	0,8	0,17	1,29	7,3
18.	5	2,4	0,17	1,31	7,7
19.	5	1,6	0,1	0,78	3,6
20.	5	1,6	0,24	1,78	9,3

5.4.1. REZULTATI POKUSA ZA PARAMETAR HRAPAVOSTI R_a

U nastavku slijede rezultati dobiveni pokusom i potom obrađeni u programskom paketu Statistica v7.0 prikazani u tablici 17. za normalizirani čelik za cementiranje 16MnCr5 (Č4320) odnosno u tablici 18. za čelik za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431), te njima pripadajući matematički model sa uvrštenim dobivenim vrijednostima.

Za čelik 16MnCr5 dobiveni matematički model glasi:

$$R_a = C + p_3 \cdot f + p_{33} \cdot f^2$$

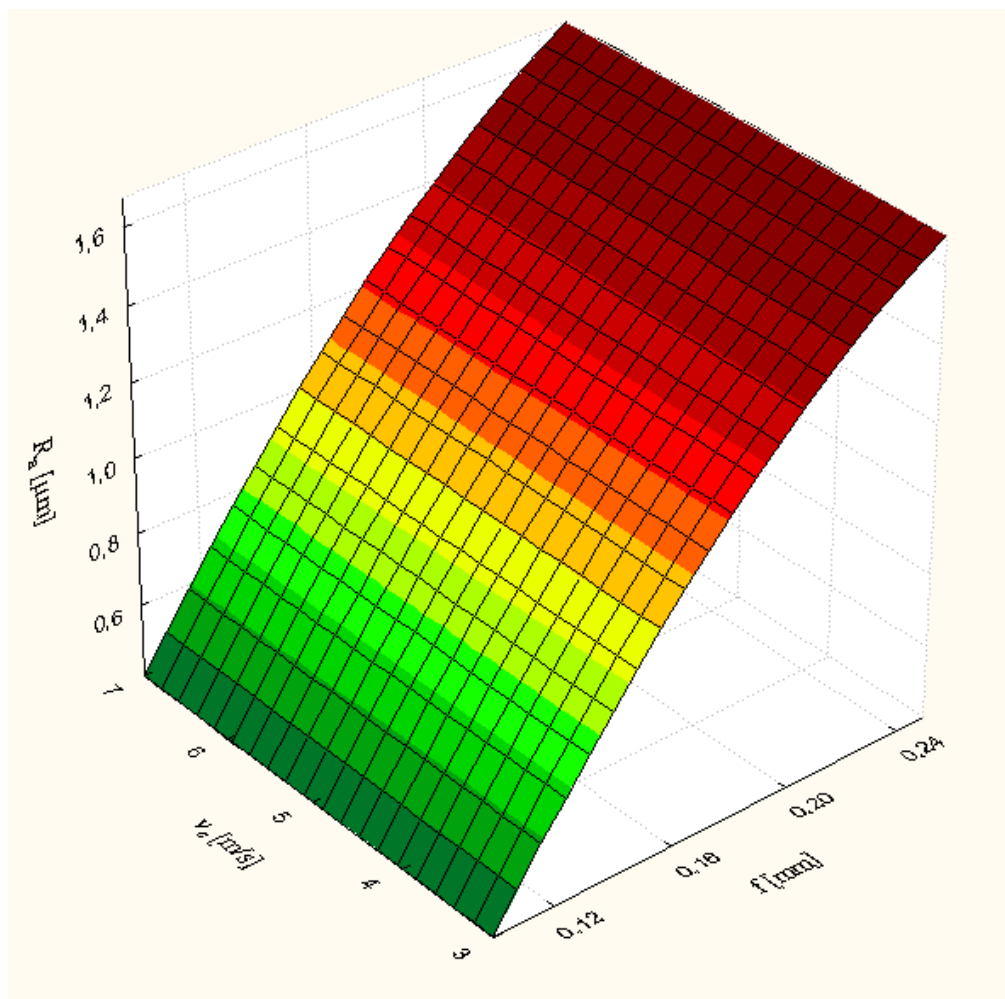
Tablica 17. Vrijednosti parametara matematičkog modela za parametar hrapavosti R_a čelika za cementiranje 16MnCr5 (Č4320)

	Procjena	Standardna greška	t-vrijednost	Razina signifikantnosti
C	-1,0566	0,157119	-6,72491	0,000004
p3	17,0551	1,937387	8,80315	0,000000
p33	-24,4898	5,638757	-4,34312	0,000442

Koeficijent korelacije iznosi: $r=0,991581$

Ako se uvrste dobivene vrijednosti u matematički model, konačni izraz za parametar hrapavosti R_a glasi:

$$R_a = -1,0566 + 17,0551 \cdot f - 24,4898 \cdot f^2$$



Slika 40. Dijagram ovisnosti $R_a=f(v_c, f)$ za čelik 16MnCr5

Za čelik 34CrNiMo, dobiveni matematički model glasi:

$$R_a = p_3 \cdot f$$

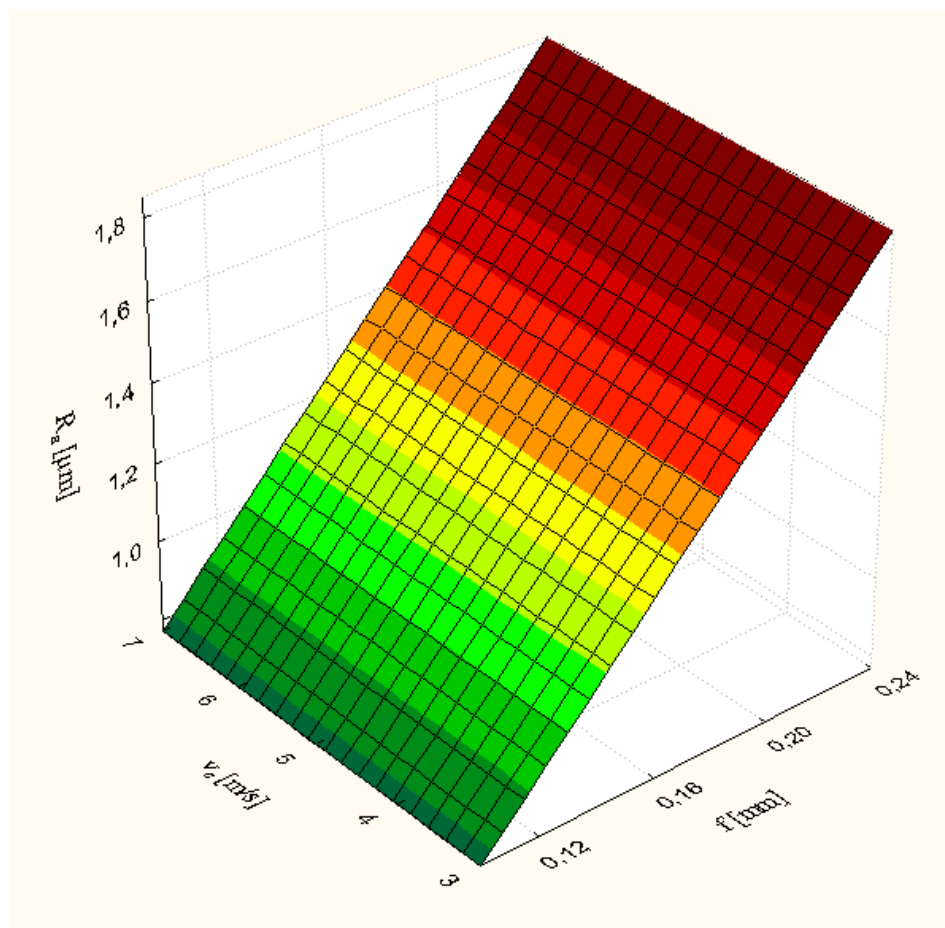
Tablica 18. Vrijednosti parametara matematičkog modela za parametar hrapavosti R_a poboljšanog čelika 34CrNiMo6 (Č5431)

	Procjena	Standardna greška	t-vrijednost	Razina signifikantnosti
p_3	7,714673	0,074124	104,0775	0,00

Koeficijent korelacije iznosi: $r=0,988962$

Ako se uvrste dobivene vrijednosti u matematički model, konačni izraz za parametar hrapavosti R_a glasi:

$$R_a = 7,714673 \cdot f$$



Slika 41. Dijagram ovisnosti $R_a = f(v, f)$ za čelik 34CrNiMo6

5.4.2. REZULTATI POKUSA ZA PARAMETAR HRAPAVOSTI R_z

Kao i u prethodnom slučaju, rezultati dobiveni pokusom obrađeni su u programskom paketu Statistica v7.0 prikazani su u tablici 19. za čelik za cementiranje 16MnCr5 (Č4320) odnosno u tablici 20. za čelik za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431).

Za čelik 16MnCr5 dobiveni matematički model glasi:

$$R_z = C + p_2 \cdot a_p + p_3 \cdot f$$

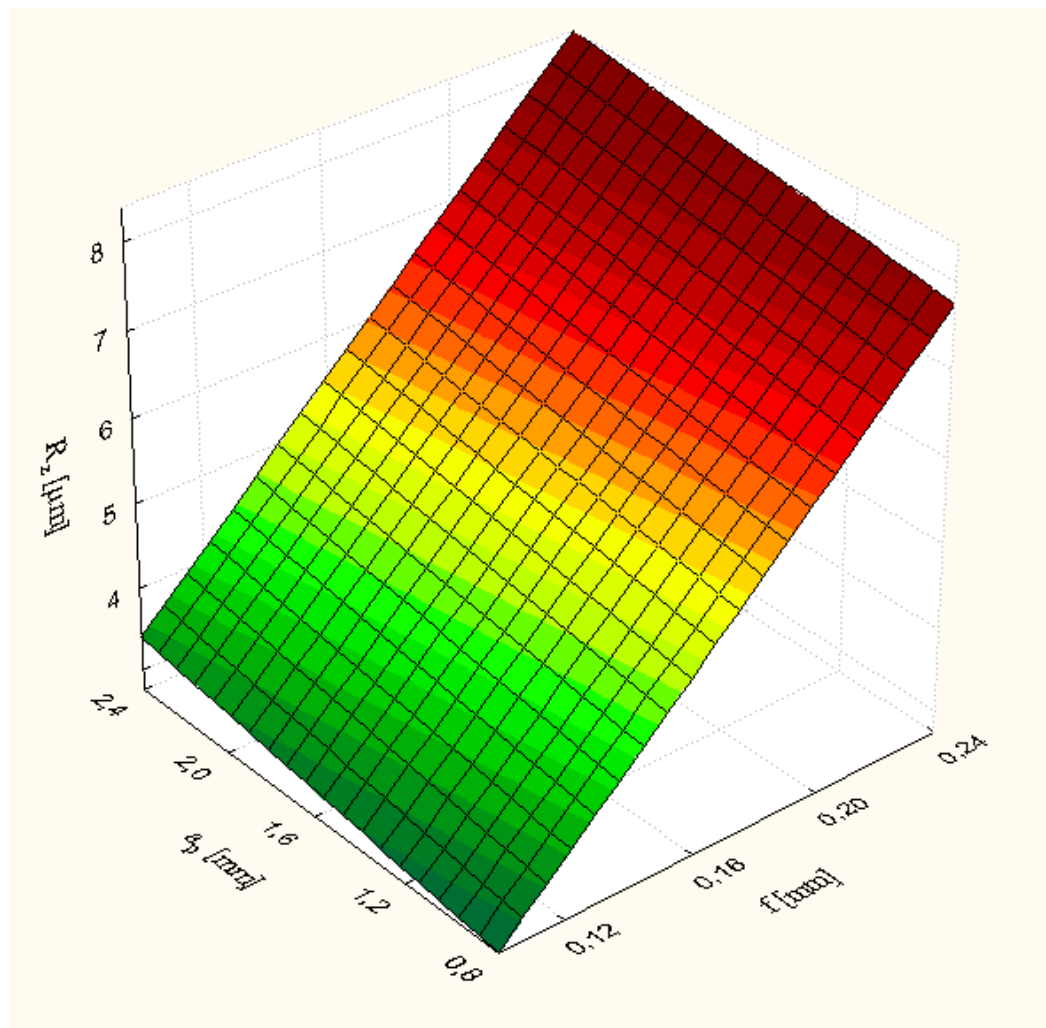
Tablica 19. Vrijednosti parametara matematičkog modela za parametar hrapavosti R_z čelika za cementiranje 16MnCr5 (Č4320)

	Procjena	Standardna greška	t-vrijednost	Razina signifikantnosti
C	-1,34179	0,296249	-4,52925	0,000297
p_2	0,40625	0,114840	3,53754	0,002530
p_3	35,64286	1,312455	27,15739	0,000000

Koeficijent korelacije iznosi: $r=0,988856$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za parametar hrapavosti R_z :

$$R_z = -1,134179 + 0,40625 \cdot a_p + 35,64286 \cdot f$$

Slika 42. Dijagram ovisnosti $R_z=f(a_p, f)$ za čelik 16MnCr5

Za čelik 34CrNiMo6 dobiveni matematički model glasi:

$$R_z = C + p_1 \cdot v_c + p_3 \cdot f + p_{33} \cdot f^2$$

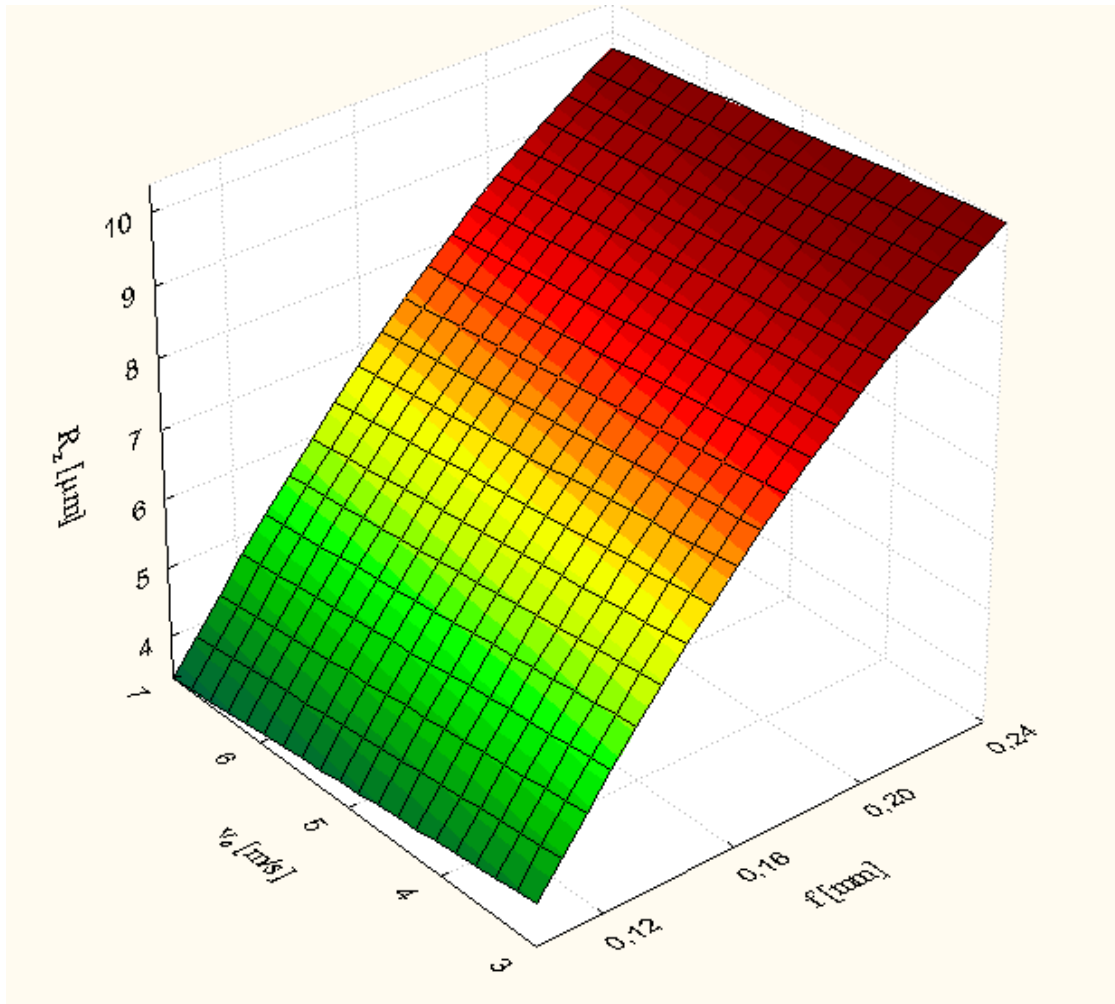
Tablica 20. Vrijednosti parametara matematičkog modela za parametar hrapavosti R_z čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431)

	Procjena	Standardna greška	t-vrijednost	Razina signifikantnosti
C	-3,493	1,23437	-2,82953	0,012082
p_1	-0,159	0,07329	-2,16960	0,045442
p_3	93,759	14,53447	6,45081	0,000008
p_{33}	-141,224	42,30253	-3,33844	0,004168

Koeficijent korelacije iznosi: $r=0,9841607$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za parametar hrapavosti R_z :

$$R_z = -3,493 - 0,159 \cdot v_c + 93,759 \cdot f - 141,224 \cdot f^2$$



Slika 43. Dijagram ovisnosti $R_z=f(v_c, f)$ za čelik 34CrNiMo6

6. ZAKLJUČAK

Jedan od zahtjeva koji je suvremeno tržište nametnulo proizvodnji odnosi se na povećanu produktivnost. Obradivost materijala predstavlja jedno od potencijalnih ograničenja koje utječe na produktivnost, s obzirom da nije uvijek moguće obradu provesti željenim parametrima. Sama obradivost predstavlja vrlo složeni pojam koji se opisuje kao osnovna tehnološka karakteristika kojom se izražava podobnost obrade određenog materijala, a ocjenjuje se skupom kriterija ili funkcija obradivosti. Sistematizacijom najčešće upotrebljivanih čeličnih materijala pokušano je prikazati odnose u obradivosti istih te preporuke i probleme koji se kod pojedinih prilikom obrade manifestiraju, te kako se s istima nositi i njihov negativni utjecaj minimizirati.

Eksperimentalni dio odnosi se na ispitivanje hrapavosti dva različita čelika: čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431) tvrdoće 300 HB, te čelika za cementiranje 16MnCr5 (Č4320) tvrdoće 160 HB. Postupak obrade tokarenjem proveden je na tokarskom obradnom centru, model HACO TUR 580 MN, uz korištenje rezne pločice proizvođača Seco Tools, a ispitivanje hrapavosti provedeno je uređajem za mjerenje hrapavosti Mitutoyo SP-201.

Ispitivanje je provedeno prema višefaktorskom planu pokusa, a odabrani matematički model je polinom drugog reda. U cilju što boljeg opisivanja funkcije hrapavosti, izvršeno je ispitivanje utjecaja parametara obrade (brzina rezanja v_c , posmak f , dubina obrade a_p) na srednje aritmetičko odstupanje profila R_a odnosno visinu neravnina profila mjerena u deset točaka R_z .

Na osnovi dobivenih rezultata i prikazanih grafova zaključeno je da je u slučaju utjecaja parametara obrade na srednje aritmetičko odstupanje R_a , značajni utjecaj pokazao isključivo posmak, dok u slučaju utjecaja parametara obrade na visinu neravnina profila u deset točaka R_z , uz utjecaj posmaka koji je i dalje dominantan, kod čelika za cementiranje 16MnCr5 prisutan je i utjecaj dubine obrade, odnosno u slučaju čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6 utjecaj brzine obrade pri obradi većim posmakom.

LITERATURA

- [1] Škorić, Stephan: Predavanja iz kolegija Obrada odvajanjem čestica, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008., web izvor: <http://www.fsb.unizg.hr/kas/> pristup 20.10.2012.
- [2] web izvor: <http://www.iscar.com> pristup 17.9.2012.
- [3] König, W., Klocke F. : Fertigungsverfahren 1, Band 8, VDI Verlag, Aachen, 2008.
- [4] Cebalo, Roko: Obrada odvajanjem čestica (Podsjetnik za ispit), FSB, Zagreb, 1996.
- [5] Udiljak, T.: Predavanja iz kolegija Postupci obrade odvajanjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010., web izvor: <http://www.fsb.unizg.hr/kas/> pristup 20.10.2012.
- [6] Dow Whitney, E.: Ceramic Cutting Tools; Materials, Development and Performance, Noyes Publications, New Jersey, 1994.
- [7] Skupina autora: GARANT Zerspanungshandbuch, Garant 2004.
- [8] Ekinović S. : Obrada rezanjem, Dom štampe, Zenica 2001.
- [9] Stephenson, David A. : Metal cutting theory and practice, Second edition, CRC Press, Boca Raton, 2006.
- [10] Škorić, Stephan: Istraživanje pogodnosti obrade ortogonalnim okruglim glodanjem, Doktorska disertacija, FSB, 2002
- [11] Filetin T., Kovačićek F., Indof J. : Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [12] Kalpakjian S., Schmid S.R.: Manufacturing, Engineering and Technology, Fourth edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001.
- [13] Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obrade materijala, FSB, Zagreb, 1996.
- [14] Shaw, Milton C.: Metal cutting principles, Oxford University Press, New York, 2005.
- [15] Stanić J., Kalajdžić M., Kovačević R. : Merna tehnika u tehnologiji obrade metala rezanjem, IRO Građevinska knjiga, Beograd 1983.
- [16] web izvor: <http://www.secotools.com/> pristup 24.10.2012.