

# Primjer izbora matematičkog modela za sile rezanja kod tokarenja

---

**Vladić, Leon**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2010**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:873288>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-21**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Voditelj rada:  
Doc.dr.sc Stephan Škorić

Leon Vladić

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Leon Vladić

Zagreb, 2010.

# Sadržaj

IZJAVA I ZAHVALA	I
SAŽETAK	II
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	VI
1. UVOD	1
2. OSNOVE OBRADIVOSTI ODVAJANJEM ČESTICA	4
2.1 Definicija obradivosti materijala	4
2.2 Kriteriji, metode i funkcije obradivosti	5
2.2.1 Kriteriji obradivosti	5
2.2.2 Metode i funkcije obradivosti	14
2.3 Matematičko modeliranje funkcija obradivosti	19
2.3.1 Funkcije obradivosti	19
2.3.2 Plan pokusa	20
2.3.3 Matematički modeli	23
2.3.4 Višefaktorski plan pokusa prvog stupnja	24
2.3.5 Višefaktorski plan pokusa drugog stupnja	27
3. OSNOVE SILA REZANJA	29
3.1 Pojave u zoni rezanja	29
3.1.1 Nastajanje odvojene čestice	31
3.1.2 Oblik i vrste odvojenih čestica	34
3.2 Ortogonalno rezanje	35
3.2.1 Kut smične ravnine prema Merchant-u	39
3.3 Koso rezanje	42
3.3.1 Modeli za procjenu sila rezanja	44
3.3.2 Utjecajni faktori na sile rezanja	45
4. EKSPERIMENTALNI DIO	50
4.1 Cilj i metodologija ispitivanja	50
4.2 Planiranje i priprema	52
4.2.1 Stroj	52
4.2.2 Alat	54
4.2.3 Materijal obratka	55
4.2.4 Mjerni instrument	55
4.3 Rezultati	58
4.3.1 Rezultati za veći raspon brzina	58
4.3.1.1 Model prvog stupnja – eksponencijalni model	58
4.3.1.2 Model drugog stupnja	64
4.3.1.3 Analiza	69
4.3.2 Rezultati za manji raspon brzina	70

---

4.3.2.1	Model prvog stupnja – eksponencijalni model	70
4.3.2.2	Model drugog stupnja	76
4.3.2.3	analiza	82
4.3.3	Analiza modela za mali i veliki raspon brzina	83
5.	ZAKLJUČAK	84
	LITERATURA	85

## Sažetak

U ovom radu sistematizirane su dosadašnje spoznaje o obradivosti materijala i utjecaji različitih parametara obrade, s posebnim naglaskom na brzinu rezanja, na glavnu silu rezanja kod procesa tokarenja. Sve to vršilo se u svrhu utvrđivanja najpovoljnijeg matematičkog modela za utvrđivanje obradivosti materijala.

U drugom poglavlju objašnjena je, na temelju dosadašnjih spoznaja, definicija obradivosti materijala. Također su objašnjeni kriteriji, metode i funkcije obradivosti kao i matematički modeli za opisivanje obradivosti.

U trećem poglavlju opisuju se pojave u zoni rezanja, princip nastajanja, oblik i vrste odvojenih čestica. Poseban naglasak, u ovom poglavlju, dat je na sile rezanja kod procesa tokarenja. Radi boljeg objašnjenja sila koje se javljaju prilikom ovog procesa prikazani su i objašnjeni postupci kosog i ortogonalnog rezanja. Također su objašnjeni svi utjecajni faktori na sile rezanja.

U zadnjem poglavlju prikazana su eksperimentalna istraživanja. Koristeći opremu raspoloživu u Laboratoriju za alatne strojeve izvršena su eksperimentalna istraživanja obradivosti na legiranom čeliku za poboljšavanje  $34CrNiMo6$  (Č5431). Ispitivanja su vršena na tokarskom obradnom centru Trens SBL – 500. Pošto se kao funkcija za utvrđivanje obradivosti koristila glavna sila rezanja mjerenja su izvršena pomoću trokomponentnom mjerača sila švicarskog proizvođača Kistler-a. Nakon izvršenih mjerenja glavne sile rezanja u ovisnosti o parametrima obrade (brzine rezanja, posmaka i dubine obrade) napravljena je statistička obrada pomoću koje je dobiven matematički model kojim se opisuje djelovanje ulaznih veličina (parametara obrade) na glavnu silu rezanja. Na kraju se izvela međusobna usporedba dobivenih rezultata pomoću matematičkog modela drugog stupnja i eksponencijalnog matematičkog modela. Dobiveni rezultati oba dva modela prikazani su tabelarno i grafički.

## Izjava i zahvala

Izjavljujem da sam rad radio samostalno služeći se znanjem stečenim za vrijeme studija i navedenom literaturom.

Zahvaljujem se svome mentoru na stručnoj pomoći, savjetima, utrošenom vremenu i nadasve razumijevanju tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem znanstvenom novaku Hrvoju Cajneru na pruženoj pomoći prilikom izrade 4.poglavlja ovoga rada.

Ovom prilikom bih se najviše zahvalio svojim roditeljima, seki, bakama i teti Mimi koji su uvijek bili uz mene i uvijek me vraćali na pravi put, put završetka studija. Želio bih se zahvaliti svojoj zaručnici koja je učinila ove duge godine studija najljepšima u mome životu i bez koje bi ovaj rad ostao samo neostvareni san.

Zahvaljujem se svim svojim kolegama i prijateljima koji su mi na bilo koji način pomogli za vrijeme studiranja.

Leon Vladić

## Popis slika

- Slika 2.1. Log-log dijagram postojanosti alata u zavisnosti od brzine rezanja [2]  
Slika 2.2. Prikaz vrsti trošenja u zoni rezanja [1]  
Slika 2.3. Prikaz utjecaja temperature na trošenje prilikom obrade [1].  
Slika 2.4. Trošenje na stražnjoj površini alata [7]  
Slika 2.5. Tipska krivulja trošenja [1]  
Slika 2.6. Trošenje na prednjoj površini alata [7]  
Slika 2.7. Krzanje rezne oštrice [7]  
Slika 2.8. Deformacija rezne oštrice [7]  
Slika 2.9. Komponente sile rezanja kod kosog rezanja [9]  
Slika 2.10. Osnovni oblici odvojenih čestica [1]  
Slika 2.11. Shematski prikaz procesa obrade odvajanjem čestica [1]  
Slika 2.12. Blok shema protokola eksperimentalnog istraživanja [12]  
Slika 2.13. Raspored eksperimentalnih točaka u planu pokusa " $2^2+2$ " [12]  
Slika 2.14. Raspored eksperimentalnih točaka u planu pokusa " $2^2+2 \cdot 2+5$ " [12]  
Slika 3.1 Sustav obrade odvajanjem čestica [1]  
Slika 3.2. Zone rezanja [1]  
Slika 3.3. Model nastajanja odvojene čestice sabijanjem trapeznih elemenata [3]  
Slika 3.4. Odnos debljine reznog sloja i odvojene čestice [1]  
Slika 3.5. Oblici odvojene čestice [13]  
    a) Kontinuirana odvojena čestica  
    b) Elementarna odvojena čestica  
Slika 3.6. Ovisnost oblika odvojene čestice o posmaku i dubini obrade [1]  
Slika 3.7 Merchant-ov model ortogonalnog rezanja [1]  
Slika 3.8. Dijagram brzina [1]  
Slika 3.9. Ovisnost glavne sile rezanja i natražne sile o brzini rezanja kod ortogonalnog rezanja [5]  
Slika 3.10. Ovisnost glavne sile rezanja i natražne sile o posmaku i dubini rezanja kod ortogonalnog rezanja [5]  
Slika 3.11. Ovisnost specifične sile  $k_c$  o debljini odvojene čestice  $h$  [8]  
Slika 3.12. Ovisnost specifične sile  $k_c$  i brzini rezanja  $v_c$  [9]  
Slika 3.13. Utjecaj kuta  $\kappa_r$  na sile rezanja [15]  
Slika 3.14. Utjecaj brzine rezanja na silu rezanja kod različitih prednjih kutova  $\gamma$  [15]  
Slika 3.15. Utjecaj kuta  $\gamma$  na sile rezanja [15]  
Slika 3.16. Utjecaj kuta  $\lambda$  na sile rezanja [15]  
Slika 3.17. Utjecaj zaobljenja vrha alata  $r_e$  na sile rezanja [15]  
Slika 3.18. Utjecaj presjeka  $A$  i odnosa  $a_p/f$  na silu  $F_c$  [15]



- Slika 4.1 Dijagram ovisnosti glavne sile rezanja  $F_c$  o glavnoj brzini rezanja  $v_c$
- Slika 4.2 Tokarski obradni centar Trens SBL-500 [16]
- Slika 4.3. Držač i rezna pločica proizvođača *Seco Tools* [7]
- Slika 4.4. Geometrija rezne pločice marke *Seco Tools* [7]
- Slika 4.5. Prikaz uređaja za mjerenje sila [17]
- Slika 4.6 Obradak i mjerni uređaj u radnom prostoru stroja
- Slika 4.7. Pretvornik signala i korisničko sučelje
- Slika 4.8. Korisničko sučelje
- Slika 4.9 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(a, v_c)$  za  $f = 0,2$  mm
- Slika 4.10 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, v_c)$  za  $a = 1,75$  mm
- Slika 4.11 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, a)$  za  $v_c = 3,08$
- Slika 4.12 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(a, v_c)$  za  $f = 0,2$  mm
- Slika 4.13. Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, a)$  za  $v_c = 3,08$  m/s
- Slika 4.14 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, v_c)$  za  $a = 1,75$  mm
- Slika 4.15. Grafički prikaz vrijednost sume kvadrata ostatka kod većeg raspona brzina rezanja  $v_c$
- Slika 4.16. Dijagram ovisnosti  $F_c = f(a, v_c)$  za  $f = 0,2$  m/s
- Slika 4.17. Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, v_c)$  za  $a = 1,75$  mm
- Slika 4.18. Dijagram ovisnosti  $F_c = f(a, f)$  za  $v_c = 3,7$
- Slika 4.19 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(a, v_c)$  za  $f = 0,2$  mm/s
- Slika 4.20 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, v_c)$  za  $a = 1,75$  mm
- Slika 4.21 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, a)$  za  $v_c = 3,7$  m/s
- Slika 4.22 Grafički prikaz vrijednosti sume kvadrata ostatka za eksponencijalni model i model 2. stupnja kod malih raspona brzine rezanja  $v_c$
- Slika 4.23. Usporedba vrijednosti eksponencijalnog modela i modela 2. stupnja kod malih i velikih raspona brzina rezanja

## Popis tablica

- Tablica 2.1. Matrica plana pokusa " $2^k$ " (bez podataka za centar plana) [12]
- Tablica 2.2. Matrica plan pokusa " $2^2+2$ " [12]
- Tablica 2.3. Matrica plan pokusa " $2^2+2 \cdot 2+5$ " [12]
- Tablica 4.1. Kemijski sastav materijala 34CrNiMo6 (Č 5431) i tvrdoća nakon poboljšanja
- Tablica 4.2. Razine variranja faktora za matematički model eksponencijalnog oblika " $2^3 + 4$ "
- Tablica 4.3. Matrica plana pokusa " $2^3 + 4$ "
- Tablica 4.4. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja  $F_c$  kod velikog raspona brzina rezanja  $v_c$
- Tablica 4.5. Analiza varijance za eksponencijalni model
- Tablica 4.6. Eksperimentalni rezultati, rezultati modela i ostatak
- Tablica 4.7. Nepotpuna matrica plana pokusa " $2^3 + 2 \cdot 3 + 6$ "
- Tablica 4.8. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja  $F_c$  kod velikog raspona brzina rezanja  $v_c$
- Tablica 4.9. Analiza varijanci za polinom 2. stupnja
- Tablica 4.10. Eksperimentalni rezultati, rezultati modela i ostatak
- Tablica 4.11. Razine variranja faktora i pripadajući kodovi za manji raspon brzina rezanja
- Tablica 4.12. Matrica plana pokusa „ $2^3 + 4$ “ za manji raspon brzina rezanja
- Tablica 4.13. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja  $F_c$  kod malog raspona brzina rezanja  $v_c$
- Tablica 4.14. Analiza varijanci za eksponencijalni model
- Tablica 4.15. Eksperimentalni rezultati, rezultati modela i ostatak
- Tablica 4.16. Razine variranja faktora i pripadajući kodovi za manji raspon brzina rezanja
- Tablica 4.17. Nepotpuna matrica plana pokusa " $2^3 + 2 \cdot 3 + 6$ "
- Tablica 4.18. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja  $F_c$  kod velikog raspona brzina rezanja  $v_c$
- Tablica 4.19. Analiza varijanci za model 2. stupnja
- Tablica 4.20. Eksperimentalni rezultati, rezultati modela i ostatak

## Popis oznaka i mjernih jedinica

Oznaka	Jedinica	Značenje
D	mm	Promjer obradka
d	mm	Promjer obrađenog dijela obradka
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
$F_{sh}$	N	Sila micanja u ravnini smicanja
$F_{shN}$	N	Normalna sila u ravnini smicanja
$F_Y$	N	Tangencijalna sila na prednjoj površini alata
$F_{YN}$	N	Normalna sila na prednjoj površini alata
$h_1$	mm	Dubina obrade
h	mm	Širina nedeformirane odvojene čestice
KB	mm	Širina kratera
KM	mm	Udaljenost od središta kratera do vrha oštrice
KT	mm	Dubina kratera
k		Broj faktora pokusa
$k_c$	$N/mm^2$	Specifična sila rezanja
$K_{\gamma 0}$		Koeficijent utjecaja prednjega kuta
$K_v$		Koeficijent utjecaja brzine
$K_{sch}$		Koeficijent utjecaja materijala obratka
$K_{VB}$		Koeficijent utjecaja vijeka trajanja alata
n	$min^{-1}$	Frekvencija vrtnje
$R_e$	$N/mm^2$	Granica razvlačenja
$R_m$	$N/mm^2$	Vlačna čvrstoća
$R_z$	$\mu m$	Visina neravnina profila hrapavosti u deset točaka
$R_x$		Funkcija kvalitete obrađene površine
$S_k$		Koeficijent volumena
t	min	Vrijeme
T	min	Vrijednost postojanosti alata
T		Funkcija postojanosti alata
Tt	$^{\circ}C$	Talište
$r_{\epsilon}$	mm	Radius vrha alata

VB		Istršenost stražnje površine alata
$v_c$	m/min	Brzina rezanja
$v_e$	m/min	Rezultirajuća brzina rezanja
$v_f$	m/min	Brzina posmičnog gibanja
$v_{sh}$	m/min	Brzina smicanja
$v_\gamma$	m/min	Brzina odvojene čestice
$v_o$	m/min	Ekonomična brzina rezanja
$v_z$	m/min	Brzina kada nastupa zatupljenje
$\alpha$	°	Stražnji kut
$\alpha_n$	°	Stražnji kut: mjeri se između $A_\alpha$ i $P_r$ u ravnini $P_n$
$\alpha_f$	°	Stražnji kut: mjeri se između $A_\alpha$ i $P_r$ u ravnini $P_f$
$\alpha_p$	°	Stražnji kut: mjeri se između $A_\alpha$ i $P_r$ u ravnini $P_p$
$\alpha_o$	°	Stražnji kut: mjeri se između $A_\alpha$ i $P_r$ u ravnini $P_o$
$\beta_n$	°	Kut klina: mjeri se između $A_\alpha$ i $A_r$ u ravnini $P_n$
$\beta_f$	°	Kut klina: mjeri se između $A_\alpha$ i $A_r$ u ravnini $P_f$
$\beta_p$	°	Kut klina: mjeri se između $A_\alpha$ i $A_r$ u ravnini $P_p$
$\beta_o$	°	Kut klina: mjeri se između $A_\alpha$ i $A_r$ u ravnini $P_o$
$\varepsilon$	°	Kut vrha alata
$\Phi$	°	Kut smicanja
$\phi$	°	Kut posmičnog gibanja
$\gamma$	°	Kut prednje površine alata
$\gamma_n$	°	Prednji kut: mjeri se između $A_r$ i $P_r$ u ravnini $P_n$
$\gamma_f$	°	Prednji kut: mjeri se između $A_r$ i $P_r$ u ravnini $P_f$

# 1. Uvod

Proizvodnja oduvijek prati ljude. Ljudi su oduvijek tražili načine da što jednostavnije obave poslove i zadatke s kojima se suočavaju, a to su mogli postići samo proizvodnjom novoga, suvremenijeg, alata. Upravo zbog svoga nastojanja da što lakše obave neke poslove, odnosno da osmisle, proizvedu i iskoriste proizvedene alate, ljudi su napredovali i kroz povijest izgradili neke od svjetskih čuda kojima se i danas divimo.

Iz toga možemo zaključiti da je proizvodnja ta koja omogućuje cjelokupnu reprodukciju društva[1].

Proizvodnja u užem smislu je proces pretvorbe priprema u koristan proizvod, uz primjenu odgovarajućih proizvodnih tehnika. Jedna od najvažnijih proizvodnih tehnika je i obrada odvajanjem čestica.

Postupci obrade odvajanjem čestica se prema DIN dijele na:[1]

- Ručne postupke
  - Ručnim alatima
  - Piljenje
  - Bušenje
  - Glodanje..
- Strojne postupke
  - Rezni alati s oštricom
  - Rezni alati bez oštrice

Obrada reznim alatom s oštricom se dijeli na:

- Obrada s geometrijski definiranom oštricom
  - tokarenje
  - glodanje
  - bušenje
  - blanjanje
  - piljenje
  - provlačenje

- Obrada s geometrijski nedefiniranom oštricom
  - brušenje,
  - superfinaš,
  - honanje,
  - lepanje.

Dok se obrada reznim alatom bez oštrice dijeli na:

- Elektroerozija
- Elektrokemijska obrada
- Obrada laserom
- Obrada vodenim mlazom, itd

Tehnologija obrade odvajanjem čestica je najzastupljenija u proizvodnom strojarstvu prije svega zbog svojih prednosti nad drugim tehnologijama, a te prednosti su [1]:

- Omogućava postizanje velike točnosti, uskih tolerancija i dobre kvalitete obrađene površine, često bez potrebe za naknadnim završnim obradama
- Najbolji (jedini) način da se formiraju oštri rubovi, ravne površine, te unutarnji i vanjski profili
- Mogu se primjeniti kod obrade gotovo svih poznatih materijala
- Najbolji način oblikovanja otvrdnutih (kaljenih) i krhkih materijala
- Moguće je obrađivati i najsloženije oblike površina
- Moguće su obrade u širokom rasponu dimenzija
- Uzrokuju vrlo male promjene u materijalu obradka
- "Jednostavno" se može automatizirati
- Omogućuju ekonomičnost i produktivnost kod maloserijske i pojedinačne proizvodnje (jeftinija i brža proizvodnja)

Kao i svaka druga tehnologija tako i ova ima svoje nedostatke, a to su:

- Generiranje odvojenih čestica
- Za formiranje jednog elementa obradka ponekad je potrebno primjeniti više različitih postupaka obrade i više različitih alatnih strojeva
- Neki dijelovi zahtijevaju pri izradi primjenu numerički upravljanih alatnih strojeva i njihovo složeno programiranje

- Alatni strojevi i potreba za rukovanjem alatima i obradcima zahtijevaju veliki radni prostor
- Mikroklima je pod jakim utjecajem obradnih procesa (toplina, uka, rashladne tekućine, ulja....)

Pošto se nalazimo u vremenu u kojemu su ograničeni resursi i ako želimo opstati na tržištu moramo pažljivo raspolagati s istima. Kod obrade odvajanjem čestica najvažnijim se smatra pravilnim odabirom parametara. Pravilni odabir parametara predstavlja adekvatno iskorištenje resursa u smislu trošenja alata, trošenja energije i materijala kojega obrađujemo. Jedna od najvažnijih stavki kod odabira parametara obrade je poznavanje materijala i njegove obradivosti.

## 2. Osnove obradivosti odvajanjem čestica

### 2.1 Definicija obradivosti materijala

Ne postoji univerzalna definicija obradivosti materijala. Postoji toliko definicija obradivosti materijala koliko i testova kojima se ona određuje. Tako postoje testovi koji se baziraju na silama rezanja, na utrošenoj energiji prilikom obrade, na kvaliteti obrađene površine, postojanosti alata itd [2].

Obradivost se teško definira iz razloga što je određena s mnogo utjecajnih faktora, a ogleda se kao rezultat različitih djelovanja sljedećih faktora procesa rezanja[3]:

- Materijal i geometrija alata
- Materijal i geometrija obradka i
- Sredstva za hlađenje i podmazivanje (SHIP)

i to u međusobnom odnosu s parametrima obrade.

Najčešće navedene definicije obradivosti u literaturi su[3]:

- Obradivost se može uzeti kao mjera poteškoća koje nastaju pri obradi rezanjem određenog materijala
- Obradivost predstavlja lakoću obrađivanja danog materijala obradka
- Obradivost je skup većeg broja osobina materijala obradka koje pokazuju s kakvim se uspjehom može obrađivati određeni materijal
- Obradivost je karakteristika obrađivanog materijala koja pokazuje efekt proizvodnosti i kvalitete proizvoda
- Obradivost je jedan od osnovnih pokazatelja tehnoločnosti materijala o odlikuje se nizom parametara koji određuju proizvodnost proces rezanja i kvalitetu obrađene površine obradka
- Obradivost materijala nije jedinstvena unutrašnja osobina materijala i može se samo djeomično izraziti preko sljedeća tri odvojena aspekta:
  1. s aspekta alata – izražava se preko odnosa količine skinutog materijala i postojanosti alata,
  2. s aspekta stroja – izražava se silama rezanja
  3. s aspekta kvalitete obrađene površine

Moguća najprikladnija definicija obradivosti bi bila ona po kojoj je najbolje obradiv materijal onaj koji dozvoljava najbrže odnošenje najveće količine materijala s zadovoljavajućom kvalitetom obrađene površine[3].



Poštujući sve do sada navedene definicije u literaturi može se zaključiti da je obradivost materijala osnovna tehnološka karakteristika kojom se izražava podobnost obrade nekog materijala, a ocjenjuje se skupom kriterija ili funkcija obradivosti "F<sub>0</sub>", koristeći se pri tom skupom metoda za ispitivanje obradivosti[4].

## 2.2 Kriteriji, metode i funkcije obradivosti

### 2.2.1 Kriteriji obradivosti

Obradivost različitih materijala opisuje se s četiri osnovna kriterija[3,4]:

1. Postojanost alata,
2. Sile rezanja,
3. Kvaliteta obrađene površine i
4. Oblik odvojene čestice

#### Postojanost alata

S pogleda postojanosti alata kao kriterija obradivosti materijala, materijali koji se mogu lako obrađivati bez pretjeranog tošenja alata smatraju se lako obradivim materijalima i njihova obradivost je veća od obradivosti materijala koji uzrokuju veće trošenje materijal prilikom svoje obrade[2].

Kod upotrebe postojanosti alata kao kriterija obradivosti materijala pojavljuje se jedan problem. Indeks obradivosti dobiven prilikom obrade materijala pomoću alata izrađenog od jednog materijala (npr. HSS) ne može se upotrijebiti kao odgovarajući prilikom obrade materijala pomoću reznog alata izrađenog od nekog drugog materijala (npr. prevučeni tvrdi metal). Iz razloga što prevučeni tvrdi metal ima veću otpornost prema trošenju od brzoreznog čelika[2].

Postojanost alata predstavlja vrijeme efikasnog rada alata. Ova definicija se može smatrati direktnom izvedenom definicijom iz Taylor-ovog modela mjerenja postojanosti alata koji je postojanost alata izražavao kroz vrijeme koje je alat proveo u radu. Taylor je otkrio da vrijeme koje alat provede u radu ovisi o brzini rezanja i da se ta ovisnost može prikazati preko sljedeće jednadžbe[2]:

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

Gdje je

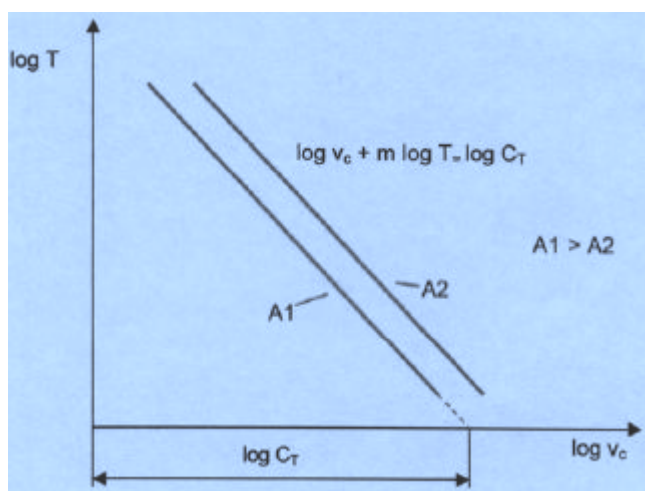
- brzina rezanja

T- postojanost alata

m - eksponent Taylor-ove jednadžbe

$C_T$  – Taylor-ova konstanta

Prema Taylor-ovoj jednadžbi u log-log dijagramu vidljivo je da postoji linearna ovisnost vijeka trajanja alata i brzine rezanja.



Slika 2.1. Log-log dijagram postojanosti alata u zavisnosti od brzine rezanja[2]

U praksi se danas sve više koriste vrijednosti za mjerenje postojanosti alata kao što su [1]:

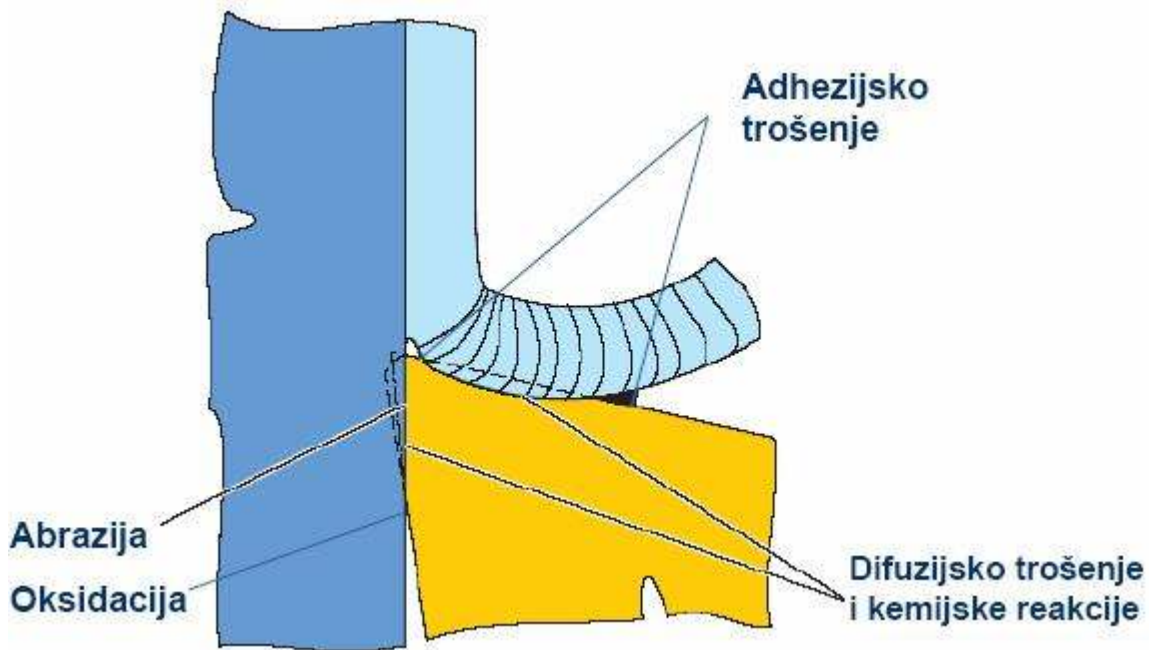
- duljina puta u smjeru posmičnog gibanja
- duljina puta u smjeru glavnog gibanja i
- broj obradaka

Uzroci trošenja su naprezanja kojima je alat izložen tijekom obrade, a u osnovi su mehaničke ili fizikalno-kemijske prirode.

Trošenje alata ovisi o vrsti materijala alata, materijalu obradka, geometriji alata, parametrima obrade, sredstvu za hlađenje i podmazivanje, temperaturi obrade itd.

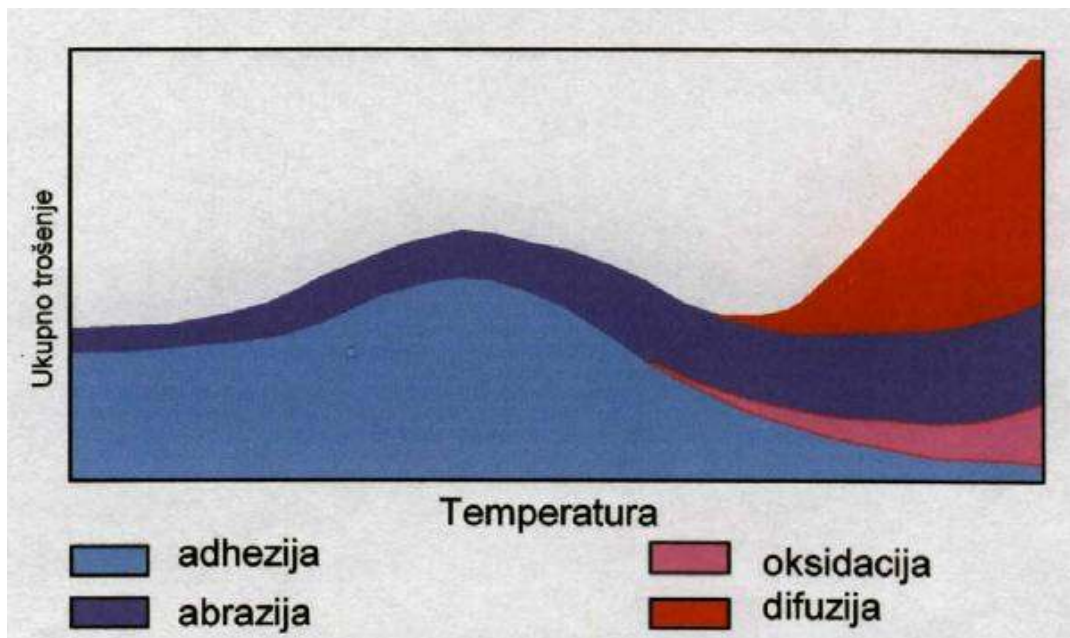
Procesi trošenja mogu se podijeliti u dvije skupine[1]:

- procesi koji su posljedica mehaničkog djelovanja (abrazija i adhezija) i
- procesi koji su posljedica fizikalno-kemijskog djelovanja između alata i obradka (oksidacija i difuzija)



Slika 2.2. Prikaz vrsti trošenja u zoni rezanja[1]

Prva skupina trošenja prisutna je uvijek, a dominira pri nižim temperaturama obrade, dok je druga skupina procesa trošenja karakteristična za povišene temperature obrade.

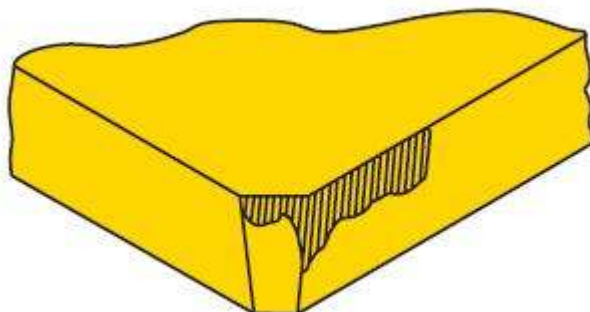


Slika 2.3. Prikaz utjecaja temperature na trošenje prilikom obrade [1].

Oblici trošenja su[1, 5, 6]:

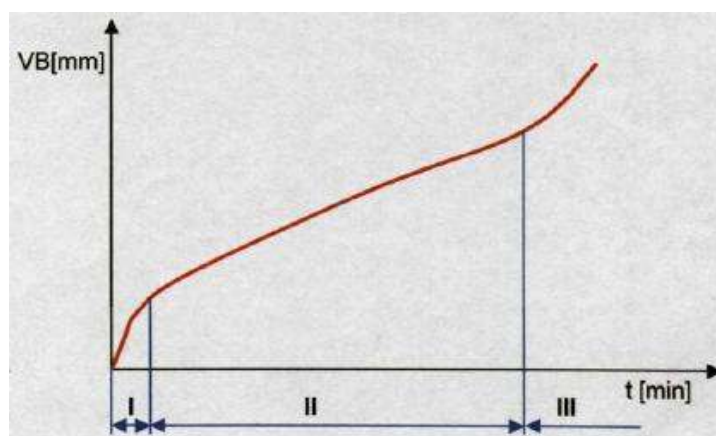
- trošenje na stražnjoj površini alata
- trošenje na prednjoj površini alata
- krzanje oštrice
- plastična deformacija oštrice alata

Trošenje na stražnjoj površini alata prisutno je uvijek. Pod tim trošenjem smatra se trošenje koje je nastalo na stražnjoj površini alata ispod rezne oštrice, a mjeri se kao udaljenost od vrha rezne oštrice do donjnjeg ruba istrošene stražnje površine alata (VB). Uzroci ovog trošenja najčešće su prevelika brzina obrade i premala otpornost alata prema trošenju. (Slika 4)



Slika 2.4. Trošenje na stražnjoj površini alata[7]

Trošenje stražnje površine alata u ovisnosti o vremenu može se prikazati tipskom krivuljom trošenja reznog alata, slika 4.

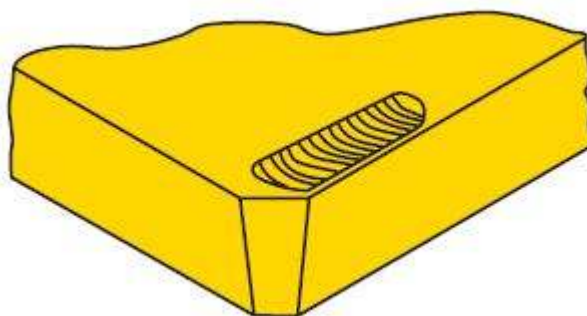


Slika 2.5. Tipska krivulja trošenja[1]

Na slici je vidljivo da se vrijeme može podijeliti na tri perioda. Prvi period predstavlja period uhadavanja prilikom kojeg dolazi do intenzivnog trošenja alata ali malih razmjera. Nakon perioda uhadavanja slijedi period normalnog trošenja u kojem postoji pravocrtna promjena trošenja o

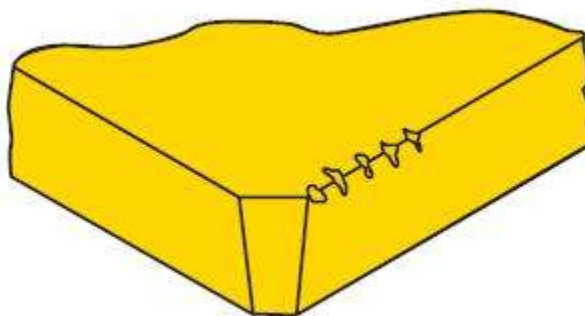
vremenu. Zadnji period je period ubrzanog trošenja odnosno period kraja vijeka trajanja alata [1, 8].

Trošenje na prednjoj površini alata očituje se pojavom kratera (udubljenja) blizu prednje oštrice alata tako da između kratera ruba oštrice ostane mala površina. Ta je površina ponekad prekrita s naljepkom (BUE). Prednja površina se troši pri velikim brzinama rezanja, a najčešći uzroci su previsoke temperature zoni rezanja i previsoki pritisci na prednjoj površini alata[2].



Slika 2.6. Trošenje na prednjoj površini alata [7]

Trošenje se ponekad javlja i u obliku krzanja rezne oštrice. Ta pojava najčešće nastaje zbog toga što je rezna oštrica prekruta i zbog stvaranja naljepka na prednjoj površini alata.



Slika 2.7. Krzanje rezne oštrice[7]

Deformacija rezne oštrice nastaje pri velikim naprezanjima rezne oštrice kada imamo velike posmične brzine i velike sile rezanja. Povećano naprezanje rezultira povišenjem temperature u zoni rezanja koju prima rezna oštrica, a pošto je ista izložena velikom pritisku dolazi do deformiranja.

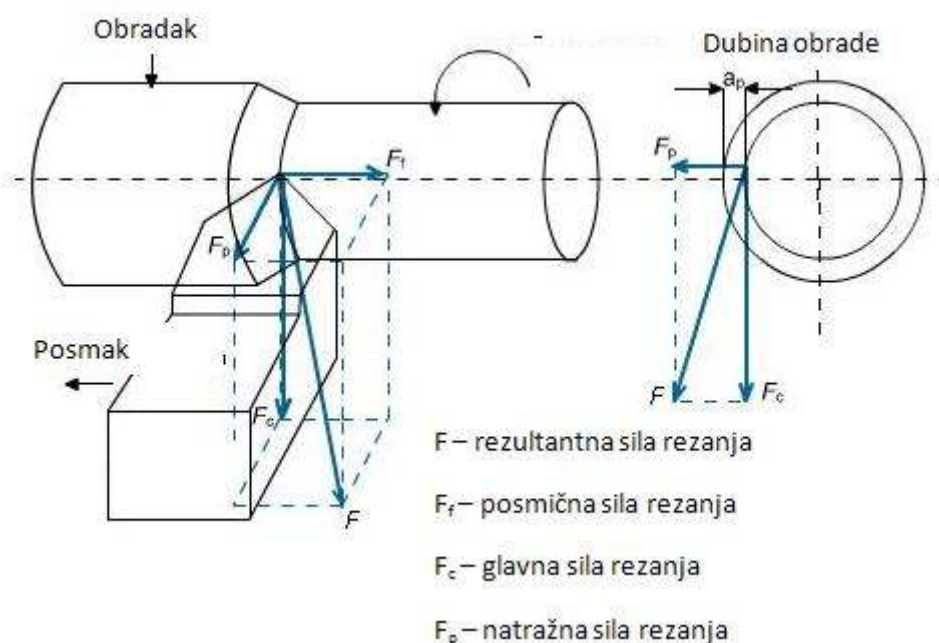


Slika 2.8. Deformacija rezne oštrice [7]

### Sile rezanja

Dva su razloga zašto se kao kriterij obradivosti koriste sile rezanja. Prvi proizlazi iz definicije obradivosti koja glasi da je obradivost lakoća obrade nekog materijala što implicira da materijal kroz koji alat lakše prodire ima bolju obradivost. Drugi razlog je povezan s cijenom obrade nekog materijala. Pošto su sile rezanja direktno povezane s snagom, a samim tim i potrošnjom energije, bolje obradivim materijalom smatra se onaj za čiju obradu se potroši manje energije.

Iako se kao kriterij obradivosti može uzeti i posmična sila rezanja najčešće se uzima glavna sila rezanja jer ona omogućava prodiranje alata u materijal i samim tim određuje potrošnju energije.



Slika 2.9. Komponente sile rezanja kod kosog rezanja[9]

Kao što je vidljivo na slici 9. vektor rezultatne sile rezanja se rastavlja na tri komponente sile rezanja[8]:

- $F_c$  – 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  $F_c$  i  $F_f$

Rezultantna sila rezanja računa se preko izraza:

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

### Kvaliteta obrađene površine

Kvaliteta obrađene površine određuje se nizom geometrijskih, fizičko-mehaničkih i kemijskih pokazatelja koji se mogu uspoređivati kod određivanja obradivosti nekog materijala. [10]

Jedna od karakteristika površine kojom se ocjenjuje njena kvaliteta nakon obrade naziva se hrapavost. Nijedan proces obrade odvajanjem čestica ne ostavlja idealno glatku površinu nego uslijed kontakta, relativnog kretanja i međusobnog opterećenja alata i obradka u toku procesa rezanja, nastaje hrapava površina geometrijski definirana neravninama.[3]

Kvaliteta obrađene površine ovisi o [9]:

- Parametrima obrade (posmak, brzina rezanja)
- Geometrije alata
- Materijala obradka i materijala alata
- Krutosti sustava stroj-alat-obradak



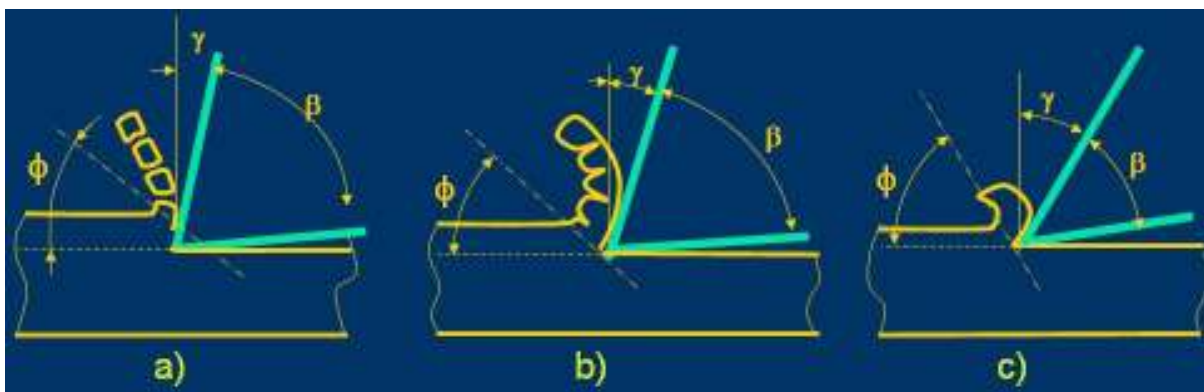
## Oblik odvojene čestice

Obradivost materijala može se definirati i prema tome kako se odvodi odvojena čestica prilikom obrade tj. prema tome dali se prilikom obrade stvara isprekidana odvojena čestica ili dolazi do stvaranja kontinuirane odvojene čestice koja se teško odvodi iz zone rezanja. Kod upotrebe oblika odvojene čestice kao kriterija obradivosti najveći indeks obradivosti dobiti će onaj materijal kod kojeg ,prilikom obrade, nastaje isprekidana odvojena čestica [2].

Pošto oblik odvojene čestice ne ovisi samo o materijalu obradka nego je funkcija i drugih parametara kao što su geometrija alata, parametri obrade itd. Indeks obradivosti dobiven na ovaj način može se povećati ili smanjiti promjenom tih parametara[2].

Osnovni oblici odvojene čestice su[1]:

- a) Isprekidana odvojena čestica
- b) Lamelarna odvojena čestica
- c) Kontinuirana odvojena čestica



Slika 2.10. Osnovni oblici odvojenih čestica[1]

Važno je istaknuti da navedeni kriteriji nemaju jednaki značaj u različitim proizvodnim uvjetima i tehnološkim tokovima procesa obrade nekog materijala. To znači da je potrebno rangirati utjecajne faktore za svaki slučaj.

Važnost pojedinih kriterija obradivosti, dakle nije isti, tako da je za obradu odvajanjem čestica poredak kriterija po važnosti sljedeći [3]

- Gruba obrada: postojanost alata, sile rezanja, oblik odvojene čestice, kvaliteta obrađene površine
- Fina obrada: kvaliteta obrađene površine, postojanost alata, oblik odvojene čestice, sile rezanja



- Obrada na automatima: oblik odvojene čestice, kvaliteta obrađene površine, postojanost alata, sile rezanja.

Kao što se vidi, kod grube obrade, postojanost alata i sile rezanja su među prvim rangiranim utjecajnim faktorima zato što se za osnovni kriterij optimizacije uzima maksimalna proizvodnost procesa uz minimalni utrošak snage.

Kod fine obrade kriterij optimizacije je ekonomičnost procesa, definirana ekonomičnom postojanošću alata, uz visoke zahtjeve o kvaliteti obrađene površine.[4]

## 2.2.2 Metode i funkcije obradivosti

Skup metoda za istraživanje obradivosti može se svrstati u dvije osnovne grupe [11]:

- A. Indeksne metode (komparativne metode) ili metode relativne obradivosti, kojima je osnovni cilj dobivanje indeksa (koeficijenta) obradivosti, a kojim se uspoređuju isti kriteriji obradivosti dva različita materijala
- B. Kompleksne metode kojima je osnovni cilj dobivanje funkcija obradivosti.

### A. Indeksne (komparativne) metode

Osnovna karakteristika komparativnih metoda za istraživanje obradivosti je relativno ocjenjivanje obradivosti ispitivanog materijala u odnosu na usvojeni, referentni, materijal. Za referentni materijal se najčešće odabire materijal s dobrom obradivosti za promatrani kriterij obradivosti.

Indeks ili koeficijent obradivosti je veličina definirana izrazom [4]:

$$I_O = \frac{K_{oIM}}{K_{oEM}}$$

$K_{oIM}$  – kriterij obradivosti ispitivanog materijala

$K_{oEM}$  – kriterij obradivosti etalon materijala

Za etalon materijal koristi se konstrukcijski materijal koji se često koristi u tehnološkoj proizvodnoj praksi.

Značaj rezultata komparativnog ispitivanja obradivosti je dvojako[11]:

1. Ovom metodom i rezultatima kontrolira se nivo i kvaliteta danog materijala u toku ili poslije njegove proizvodnje, a prije procesa obrade
2. Na osnovi dobivene vrijednosti  $I_O$  za neki materijal može se utvrditi optimalni režimi obrade u datim operacijama tehnološkog procesa. Tako npr. kada se poznaje vrijednost ekonomične brzine rezanja  $v_{01}$  i vrijednost indeks obradivosti  $I_{O1}$  jednog materijala, tada se vrijednost ekonomične brzine rezanja  $v_{02}$  drugog materijala (pošto znamo  $I_{O2}$ ) dobije iz jednadžbe:

$$v_{02} = \frac{I_{O2}}{I_{O1}} v_{01}$$

Za dobivanje indeksa obradivosti koriste se sljedeće metode [3, 4, 11]:

- Metoda varijabilnih brzina rezanja
- Metoda konstantnog puta rezanja
- Metoda konstantnih sila rezanja
- Metoda radioaktivnih izotopa
- Metoda poprečne obrade
- Indirektne metode
- Metoda ispitivanja oblika odvojenih čestica

### Metoda varijabilnih brzina rezanja

Koristi se pri uzdužnoj obradi odvajanjem čestica. Kod ove metode početna brzina rezanja  $v_p = v_1$  se stupnjevito povećava poslije određenih isti dužina obrade. Brzina rezanja se povećava po zakonosti

$$v_{i+1} = 1,12v_i, \quad i = 1,2,3 \dots$$

Sve do trenutka zatupljenja alata, a tu brzinu označavamo sa  $v_k = v_{kIM}$ . Vrijednost indeksa obradivosti ispitivanog materijala određuje se izrazom

$$I_0 = \frac{v_{kIM}}{v_{kEM}}$$

Gdje je  $v_{kEM}$  brzina rezanja u trenutku zatupljenja alata pri obradi etalon materijala.

Preporučuje se da se biraju takvi uslovi ispitivanja koji dovode do zatupljenja u šestom, sedmom i osmom stupnju. [11]

### Metoda konstantnog puta rezanja

U ovoj metodi, kao kriterij za definiranje indeksa obradivosti materijala, koristi se ona vrijednost brzine rezanja  $v_L$  pri kojoj nastupe prvi znakovi zatupljenja alata na unaprijed definiranoj dužini puta rezanja. Kod ove metode primjenjuje se iterativna eksperimentalna procedura, jer se samo pomoću nje može utvrditi tražena vrijednost brzine rezanja  $v_k$

Kao usvojenu dužinu rezanja najčešće uzimamo  $L = 100$  m. Kada se utvrde vrijednosti brzine rezanja  $v_L$  pri obradi ispitivanog materijala ( $v_{LIM}$ ) i etalon materijala  $v_{LEM}$  možemo izračunati indeks obradivosti prema izrazu[11]:

$$I_0 = \frac{v_{LIM}}{v_{LEM}}$$

### Metoda konstantnih sila rezanja

Ovom metodom se postiže visoka točnost ispitivanja obradivosti. Glavno obilježje ove metode je bušenje obradka pri konstantnoj aksijalnoj sili. U ispitivanom materijalu potrebno je prethodno izbušiti mali otvor koji omogućuje dovođenje sredstva za hlađenje i podmazivanje i lakše odvođenje odvojene čestice pri procesu ispitivanja. Konstantna sila bušenja se ostvaruje djelovanjem utega na vreteno na kojem se nalazi svrdlo.

Ispitivanje se izvodi pri konstantnoj brzini rezanja, a potrebni indeks obradivosti  $I_0$  dobije se omjerom dubine rezanja ispitivanog materijala  $L_{kIM}$  i dubine rezanja etalon materijala  $L_{kEM}$ . [11]

$$I_0 = \frac{L_{kIM}}{L_{kEM}}$$

### Metoda radioaktivnih izotopa

Ova metoda zasniva se na mjerenju trošenja alata praćenjem promjene radioaktivnosti prethodno bombardirane stražnje površine alata.

Osim komparativnog ispitivanja obradivosti ova se metoda može koristiti i kao ekspresni način za utvrđivanje funkcija obradivosti (funkcija postojanosti 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. [3, 11]

### Metoda poprečne obrade

Ova metoda zasniva se na linearnoj promjeni brzine rezanja  $v$  od neke početne vrijednosti  $v_0$  do krajnje brzine  $v_z$  kada nastupa zatupljenje alata. Na disku promjera 300 – 350 mm prethodno se izbuši prolazni provrt i takav disk se 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 zbog povećanja promjera povećava brzina rezanja čime trošenje alata postaje intenzivnije. Brzina koju se, u procesu ispitivanja, postigla u trenutku potpunog zatupljenja alata koristi se za računanje indeksa obradivosti [11]

$$I_0 = \frac{v_{zA}}{v_{zB}} = \frac{D_{zA}}{D_{zB}}$$

### Indirektne metode

Sve dosada navedene metode, za dokazivanje obradivosti, bazirale su se na procesu rezanja dok indirektna metoda do obradivosti nekog materijala dolazi bez procesa rezanja tj. indirektnim putem. Ova metoda dovodi u vezu fizikalna, mehanička, mikrostrukturna i metaloruška svojstva s obradivosti. Općenito je poznato da na obradivost utječu slijedeće karakteristike materijala:

- tvrdoća,
- čvrstoća,
- žilavost,
- toplinska vodljivost,
- mikrostruktura,
- kemijski sastav itd.

Najčešće se pri tome obradivost definira preko brzine rezanja  $v_T$ , koja odgovara izabranoj vrijednosti postojanosti alata. Tako se na bazi eksperimentalnih ispitivanja može uspostaviti ovisnost obradivosti  $v_T$  nekog materijala o tvrdoći  $H_B$  i granici razvlačenja  $R_e$  prema izrazu

$$v_{60} = \frac{C}{H_B^{1,63} \times R_e^{1,01}}$$

Gdje je  $C$  – veličina zavisna od dubine rezanja, posmaku i vrsti alatnog materijala[11]

### Metoda ispitivanja oblika odvojene čestice

Kod ove metode kao indeks obradivosti koristi se koeficijent volumena  $S_K$ . Koeficijent volumena dobiva se omjerom volumena odvojene čestice  $V_{st}$  i volumena materijala obradka koji je pretvoren u odvojenu česticu  $V_m$ .  $V_m$  se računa prema izrazu

$$V_m = \frac{1000 \times G}{\rho}$$

Gdje je  $G$  težina odvojene čestice, a  $\rho$  gustoća obradka [3]

### **B. Kompleksne metode istraživanja obradivosti**

Svrha kompleksnih metoda je dobivanje matematičkih modela procesa obrade odnosno dobivanje funkcija obradivosti. Funkcije obradivosti su matematički modeli kojima se opisuje uzajamna ovisnost ulaznih i izlaznih parametara procesa obrade i predstavljaju aproksimaciju stvarnog oblik funkcije procesa [1].

## 2.3 Matematičko modeliranje funkcija obradivosti

### 2.3.1 Funkcije obradivosti

Funkcije obradivosti upotrebljavaju se u svrhu [12]:

- spoznaje fizikalnih zakona obradnog procesa,
- 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 čine:

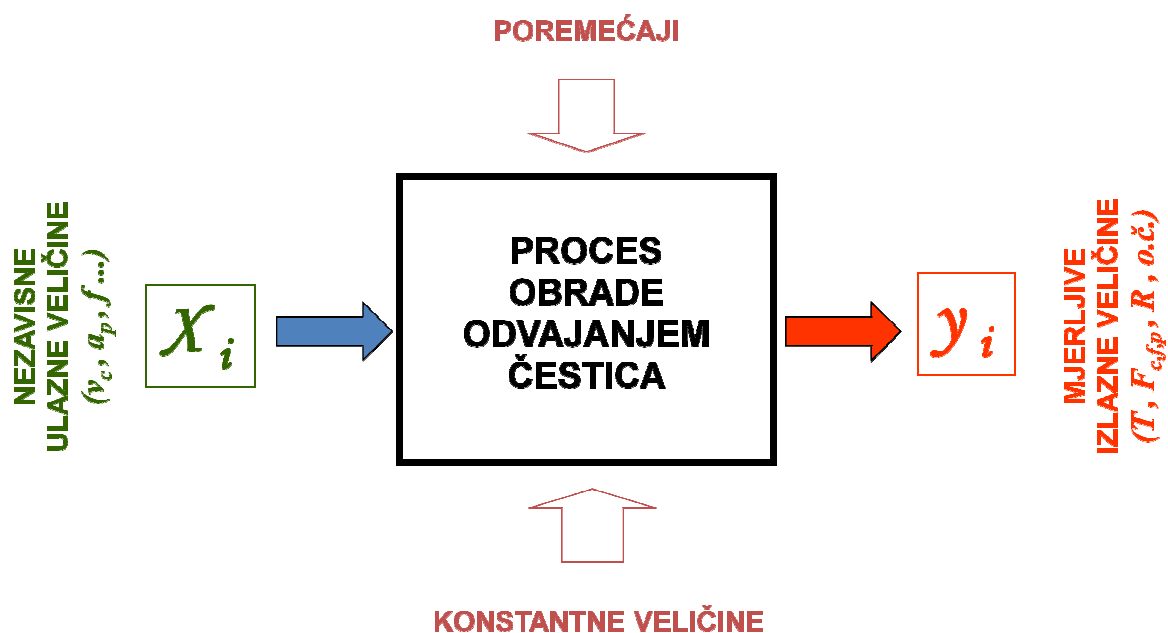
- funkcija postojanosti alata,  $T = T(x_i)$
- funkcija sile rezanja,  $F_x = F_x(x_i)$
- funkcija kvalitete obrađene površine,  $R_x = (x_i)$
- funkcija oblika odvojene čestice,  $O_c = O_c(x_i)$

Gdje su  $x_i$  - parametri i uvjeti obrade.

Iako su u navedenim funkcijama obuhvaćeni svi bitni faktori procesa obrade odvajanjem čestica, ipak neki autori proširuju navedeni skup dopunskim funkcijama obradivosti:

- funkcija temperature rezanja,  $\theta = \theta(x_i)$
- funkcija snage rezanja,  $P = P(x_i)$
- funkcija proizvodnosti,  $V = V(x_i)$

Metode za dobivanje funkcija obradivosti su različiti eksperimentalni statistički višefaktorski planovi. Krajnji rezultat su matematički modeli kojima se opisuje uzajamna ovisnost ulaznih i izlaznih parametara procesa obrade i koji predstavljaju aproksimaciju stvarnog, nepoznatog, analitičkog oblika funkcije procesa.



Slika 2.11. Shematski prikaz procesa obrade odvajanjem čestica[12]

### 2.3.2 Plan pokusa

Plan pokusa predstavlja način definiranja protokola za iznalaženje funkcionalnih ovisnosti između ulaza i izlaza procesa prikazanog na slici 12.

Planove pokusa možemo podijeliti u dvije grupe[12]:

1. Jednofaktorni planovi pokusa
2. Višefaktorni planovi pokusa

U procesu obrade odvajanjem čestica koristimo višefaktorne planove pokusa zbog toga što sam proces obrade odvajanjem čestica ima statistički karakter i označen je mnogobrojnim utjecajnim faktorima, koji djeluju direktno, međusobno i po jačini različito na tijek i ishod pokusa.

Višefaktorni plan pokusa, u odnosu na jednofaktorni, odlikuje se slijedećim značajkama:

- U tijeku eksperimenta varira se više utjecajnih faktora istodobno,
- Poseban raspored eksperimentalnih točaka u prostoru,
- Minimalan broj eksperimentalnih točaka u odnosu na količinu dobivenih informacija o zakonitosti procesa. Posljedica ovoga su višestruko smanjeni troškovi i vrijeme trajanja eksperimentalnih ispitivanja procesa.
- Relativno jednostavna matematička obrada rezultata,



- Daje uvid u ovisnostima među faktorima (interakcije).

Postoji više kriterija za podjelu višefaktorskih planova pokusa, a najvažniji su: broj faktora u planu, broj stupnja plana, cilj plana i drugi. Proizlazeći iz toga višefaktorne planove pokusa dijelimo na:

1) Prema broju faktora na:

- Jednofaktorne planove,
- Dvofaktorne planove,
- Trofaktorne planove
- Višefaktorne planove

2) Prema stupnju modela na:

- Planove prvog stupnja
- Planove drugog stupnja
- Planove višeg stupnja.

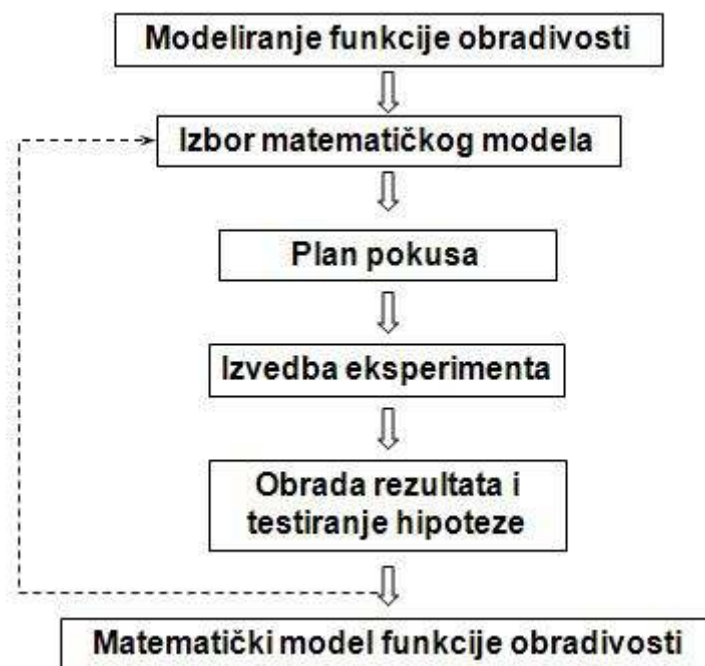
3) Prema cilju koji se postiže planom odnosno eksperimentalnim ispitivanjem na:

- Planovi za selekciju i rangiranje skupa ulaznih faktora,
- Planovi za otkrivanje i proučavanje zakonitosti danih pojava i procesa,
- Planovi za optimizaciju i optimalno upravljanje danim pojavama, procesima, sustavima i sl.

U praksi se, a ponegdje i u literaturi, često pod pojmom plana pokusa kriju dva pojma:

- Plan pokusa u širem smislu i
- Plan pusa u užem smislu.

Plan pokusa u širem smislu označava eksperimentalno istraživanje za dobivanje funkcija obradivosti, a koje se odvija po točno određenom protokolu, prikazanom blok shemom na slici 2.13.



Slika 2.12. Blok shema protokola eksperimentalnog istraživanja[12]

Kako je vidljivo na shemi, eksperimentalno istraživanje počinje izborom matematičkog modela za kojega se predstavlja da će biti dovoljno točna aproksimacija stvarnog, nepoznatog, analitičkog oblika funkcije odziva. Definirati matematički model ne znači samo odrediti njegov stupanj, već i načiniti izbor nezavisnih utjecajnih parametara koji su u tom trenutku od interesa istraživača i koji ulaze u model. Svi ostali potencijalni faktori moraju biti konstantni. To zapravo označava postavljanje hipoteze. Nakon provedbe eksperimenta i obrade rezultata hipoteza se testira. Međutim ako se dokaže da matematički model ne odgovara stvarnom modelu, postupak započinje ispočetka postavljanjem novog matematičkog modela, ili izborom drugačijeg intervala variranja faktora modela. [12]

Plan pokusa u užem smislu znači odrediti, za definirani matematički model [12]:

- Broj točaka pokusa,
- interval variranja faktora,
- način ponavljanja,
- broj ponavljanja i
- plan matricu pokusa.

### 2.3.3 Matematički modeli

Matematički model, ako je adekvatan, predstavlja povoljno točnu aproksimaciju stvarnog, nepoznatog, analitičkog oblika funkcije odziva.

Ako se 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:

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

Funkcija  $\eta$  je hipotetična veličina. U matematičkom modelu koji se dobije nakon eksperimentalnog ispitivanja prisutna je i greška eksperimenta ( $\varepsilon$ ) pa vrijedi sljedeći model:

$$\eta = \varnothing(x_1, x_2, x_3 \dots \dots x_k) + \varepsilon$$

Ako se očekivani odziv označi sa  $E(y) = \eta$  onda se površina prikazana sa  $\eta$  naziva odzivna površina.

Matematički model može biti polinom prvog, drugog ili višeg stupnja. U većini eksperimentalnih istraživanja procesa obrade odvajanjem čestica kao matematički modeli zadovoljavaju modeli prvog stupnja:

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

Gdje su:  $x_i$  nezavisni utjecajni faktori;  $i = 1, k$ .

Iz praktičnih razloga u obradi odvajanjem čestica često se koristi matematički model zapisan u eksponencijalnom obliku:

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

Ovaj model pripada u grupu modela polinoma prvoga stupnja jer se jednostavno pretvara u njega matematičkom operacijom logaritmiranja.

U istraživanjima u kojima se očekuje funkcija odziva s ekstremom koriste se matematički modeli kao polinomi drugog stupnja:

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

$x_i$  = nezavisni utjecajni faktori;  $i = 1, k$ .

### 2.3.4 Višefaktorski plan pokusa prvog stupnja

Plan pokusa prvog stupnja se koristi pri statističkoj indentifikaciji modela prvog stupnja kojim se matematički opisuje cilj istraživanja u jedno, dvo ili višedimenzijalnom prostoru. Planovi prvoga stupnja ne mogu se koristiti za modele drugog ili višeg stupnja, ali su planovi drugog stupnja primjenjivi za proces indentifikacije modela prvog stupnja. [12]

Stupanj višefaktorskog plana pokusa direktno je povezan sa stupnjem matematičkog modela, odnosno višefaktorski plan pokusa prvog stupnja primjenjuje se onda kada je za polazni matematički model izabran model prvog stupnja. Istodobno istraživač određuje koje nezavisne ulazne veličine procesa( $x$ ) proglašava važnim za konkretno istraživanje. U matematičkom modelu se te nezavisne ulazne veličine procesa zovu nezavisni utjecajni faktori ( $x$ ). [12]

Nakon što se definiraju ulazne veličine procesa, odnosno nezavisni utjecajni faktori, potrebno je odrediti razine variranja faktora. Najviše se primjenjuju ortogonalni planovi s variranjem faktora na dvije razine, što se označava[12]:

$$x_{i,min}$$

$$x_{i,max}$$

Planovi čiji se faktori variraju na dvije razine nazivaju se planovi tipa " $2^k$ " gdje je " $k$ " broj faktora, odnosno nezavisnih varijabli.

Slijedeći korak je određivanje u kojoj točki plana i kako će se izvoditi ponavljanje. Najčešće se primjenjuje centralni plan eksperimenta koji podrazumjeva da se ponavljanje eksperimentalnih točaka izvodi samo u centralnoj točki višefaktorskog ortogonalnog plana. Ponavljanje se izvodi kako bi se mogla odrediti greška eksperimenta i testiranje hipoteze. [12]

Zbog toga će se morati odrediti i srednje razine faktora prema izrazu:

$$x_{i,sr} = \frac{x_{imin} + x_{imax}}{2}$$

Vrlo često vrijednosti faktora se prikazuju u kodiranom obliku, a iz razloga jednostavnijeg i preglednijeg prikaza. Kodiranje se izvodi na način:

$$x_{min} \rightarrow kod = +1$$

$$x_{sr} \rightarrow kod = 0$$

$$x_{max} \rightarrow kod = -1$$

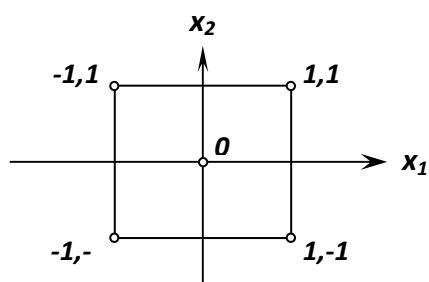
Ukupni broj eksperimentalnih točkaka (N) računa se prema formuli:

$$N = 2^k + n$$

Sve do sada definirane veličine faktora (razine variranja) potrebno je upisati u za to odgovarajuću tablicu. Na kraju planiranja pokusa izrađuje se matrica plana pokusa po kojoj će biti izveden eksperiment.

Tablica 2.1. Matrica plana pokusa " $2^k$ " (bez podataka za centar plana) [12]

		kod faktora			
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$2^2$	1	-1	-1	-1	-1
	2	+1	-1	-1	-1
	3	-1	+1	-1	-1
	4	+1	+1	-1	-1
$2^3$	5	-1	-1	+1	-1
	6	+1	-1	+1	-1
	7	-1	+1	+1	-1
	8	+1	+1	+1	-1
$2^4$	9	-1	-1	-1	+1
	10	+1	-1	-1	+1
	11	-1	+1	-1	+1
	12	+1	+1	-1	+1
	13	-1	-1	+1	+1
	14	+1	-1	+1	+1
	15	-1	+1	+1	+1
	16	+1	+1	+1	+1

Slika 2.13. Raspored eksperimentalnih točaka u planu pokusa " $2^2+2$ " [12]Tablica 2.2. Matrica plan pokusa " $2^2+2$ " [12]

		kod faktora	
		$x_1$	$x_2$
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	+1
4	+1	+1	+1
5	0	0	0
6	0	0	0

### 2.3.5 Višefaktorski plan pokusa drugog stupnja

Višefaktorski plan pokusa drugog stupnja primjenjuje se onda kada je za polazni matematički model izabran model drugog stupnja. [12]

Kao i kod modela prvog stupnja istraživač utvrđuje koje nezavisne ulazne veličine procesa proglašava važnim za konkretno istraživanje. Te nezavisne ulazne veličine procesa ulaze u matematički model, u kojima se sada zovu nezavisni utjecajni faktori.

U daljnjem koraku potrebno je odrediti razine variranja faktora. Centralno kompozitni planovi drugog reda polaze od naročitog geometrijskog rasporeda eksperimentalnih točaka u eksperimentalnom prostoru, tako da su sve točke jednako udaljene od centra u kojem je također nekoliko točaka. Pošto se ovdje radi o paraboličkom modelu za njegovo određivanje potrebne su barem tri točke. Protokol za određivanje razina maksimalne i minimalne vrijednosti faktora, te onih u centru plana pokusa je:

$$x_{i,min}$$

$$x_{i,max}$$

$$x_{i,sr} = \frac{x_{imin} + x_{imax}}{2}$$

Matrica plana pokusa kod višefaktornog plana pokusa drugog stupnja, za razliku od matrice plana pokusa prvog stupnja, ima još dodane točke. Te dodatne točke, u planu pokusa su, razine faktora " $\pm x_{i\alpha}$ " i sa vrijednostima faktora u centru plana čine tri neophodne točke koje služe za definiciju parabolične funkcije. One se postavljaju na središnje koordinatne osi, odnosno koordinate osi koje prolaze kroz centar plana, i računaju se prema:

$$I_i = \frac{x_{i,max} - x_{i,sr}}{2}$$

$$\pm x_{i,\alpha} = x_{i,sr} \pm \alpha I_i$$

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

Kod višefaktorskog plana pokusa drugog stupnja ukupni broj eksperimentalnih točaka ( $N$ ) računa se prema formuli:

$$N = 2^k + 2k + n$$

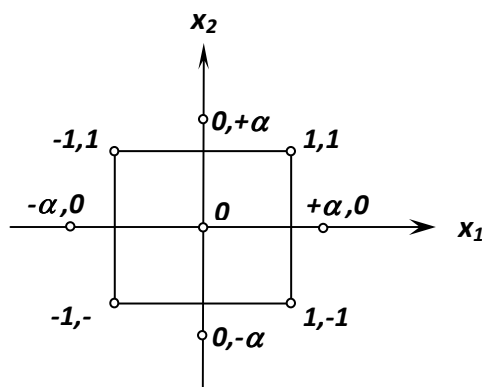
Broj točaka u centru plana pokusa je za:

$$k = 2 - n = 5$$

$$k = 3 - n = 6$$

$$k = 4 - n = 7$$

Sve do sada definirane veličine faktora (razine variranja) potrebno je upisati u za to predviđenu tablicu.



Slika 2.14. Raspored eksperimentalnih točaka u planu pokusa " $2^2+2 \cdot 2+5$ " [12]

Tablica 2.3. Matrica plan pokusa " $2^2+2 \cdot 2+5$ " [12]

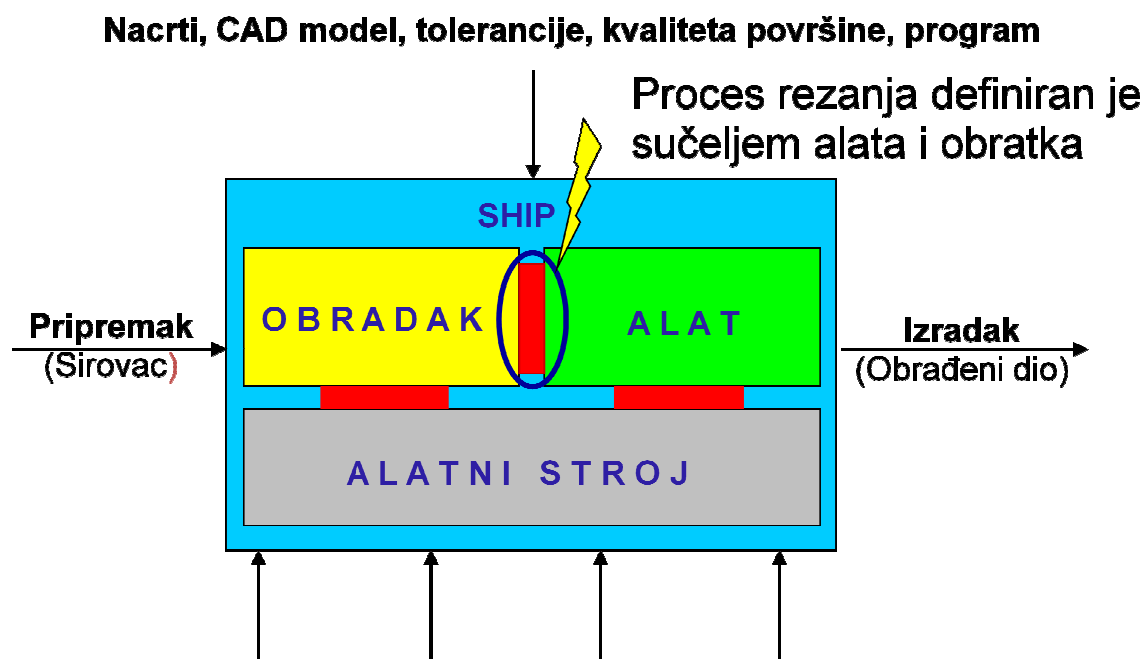
	kod faktora	
	$x_1$	$x_2$
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	$-\alpha$	0
11	$+\alpha$	0
12	0	$-\alpha$
13	0	$+\alpha$



## 3.0 Osnove sila rezanja

### 3.1 Pojave u zoni rezanja

Obrada odvajanjem čestica kao sustav se sastoji od alatnog stroja, obratka, alata, sučelja obradak – alatni stroj, sučelja alat – alatni stroj. Proces rezanja definiran je sučeljem alata i obradka uz sredstva za hlađenje i podmazivanje. Prije same obrade imamo pripremak koji se na kraju procesa definira kao izradak[1].



Slika 3.1 Sustav obrade odvajanjem čestica[1]

Za razumijevanje procesa rezanja, neophodno je potpuno razjasniti slijedeće fenomene i mehanizme[3].

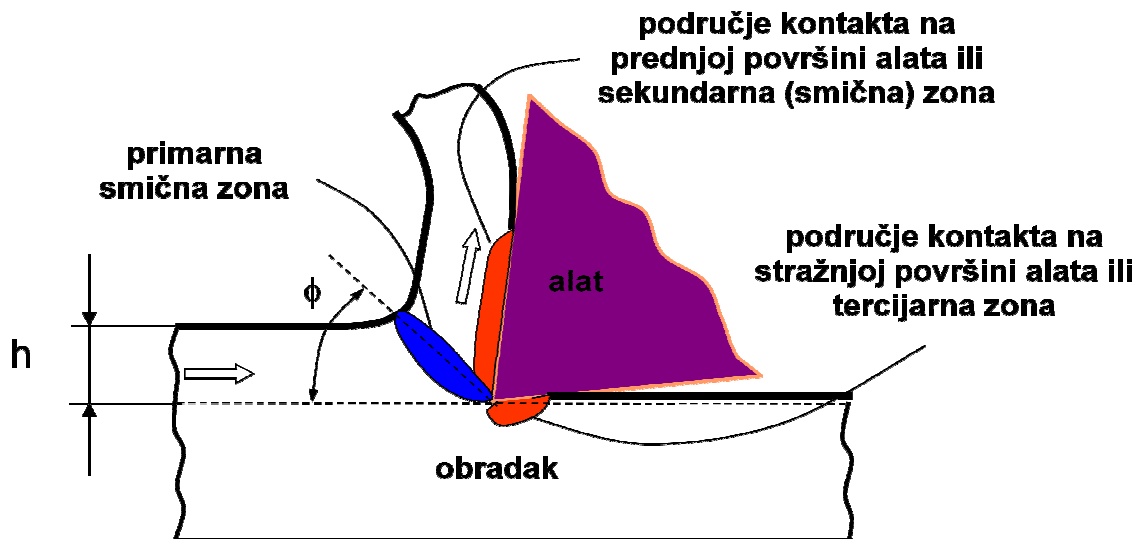
- Uvjete zajedničkog djelovanja između alata i obradka,
- Plastično tečenje metala, naročito u karakterističnim zonama,
- Stvaranje naljepka i utjecaj brzine rezanja,
- Granične uvjete deformacija u zoni deformiranja,
- Sile trenja i osobina materijala obradka i alata na visokim temperaturama

Zona rezanja je dio reznog sloja u kojem se vrši proces lokalizirane plastične deformacije u toku rezanja (stvaranje odvojene čestice). Zbog izrazito složenih pojava u zoni rezanja, nije moguće postavljanje pouzdanog jednostavnog i sveobuhvatnog matematičkog modela naprezanja i

deformacijskog stanja kojem bi se objasnila suština i mehanizam stvaranja odvojene čestice[3].

Izuzetna složenost procesa rezanja je osnovni razlog zašto se isti ne može opisati čistim analitičkim metodama. Iz tog razloga i ne postoji pouzdan matematički model procesa rezanja kojim bi se moglo pouzdano predvidjeti tok i promjena mehaničkih, termodinamičkih, kenjskih, triboloških i dinamičkih pojava pri rezanju. Stoga se za proučavanje pojedinih pojava koje se događaju u toku rezanja koriste razne eksperimentalne metode. Najvažnije su: mikroskopska metoda, fotografska metoda, metalografska metoda, metoda mikrotvrdoće, polarizacijsko – optička metoda[3].

Praktični značaj poznavanja zakonosti ovih pojava izuzetno je velik. One direktno utječu na glavne izlazne efekte procesa rezanja, odnosno na ekonomičnost, proizvodnost i kvalitetu.



Slika 3.2. Zone rezanja [1]

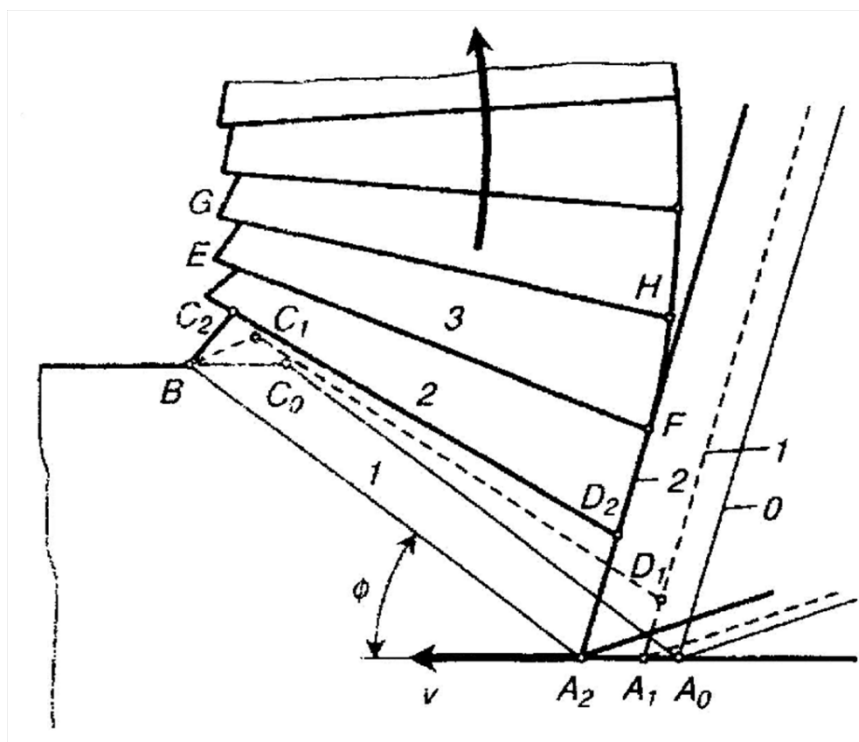
### 3.1.1 Nastajanje odvojene čestice

Ukoliko je materijal obradka donekle plastičan pri tome dolazi do deformacije odvojene čestice. Događaji u zoni rezanja vezani su uz nastanak odvojene čestice, mogu se objasniti pomoću više modela, a jedan od njih je teorija elementarnih lamelica.

Osnova ovog modela, koju je postavio Brix, sastoji se od dvije činjenice [3]:

- Elementarna lamela se u toku procesa rezanja neprekidno nalazi u stanju plastičnog deformiranja, sabijanja i klizanja (slika 3.3). U ovom stanju materijal se nalazi sve dok traje dodir s prednjom površinom alata,
- poprečni presjek elementa postupno prelazi iz paralelogramskog u sve izrazitiji trapezni oblik sa sve uočljivijim klinastim oblikom trapeza.

Za položaj  $A_0$ , početni paralelogramski oblik lamele  $A_0A_2BC_0$  uslijed velikog sabijanja materijala u okolini točke  $A_0$  se deformira. Zbog ovog sabijanja čestica materijala se kreće u pravcu ravnine smicanja i u pravcu prednje površine alata, te početni oblik lamele  $A_0A_2BC_0$  poprima oblik  $A_1A_2BC_1D_1$ . Daljnjim gibanjem vrha alata od položaja 1 do položaja 2, lamela se konačno deformira u oblik klinastog trapeza  $A_2BC_2D_2$ . [3]

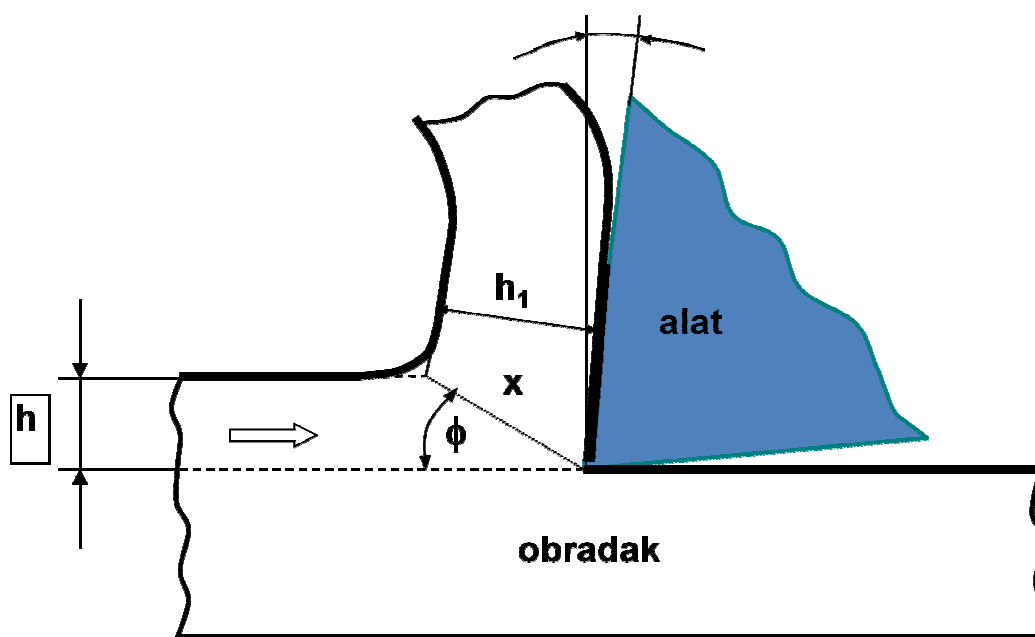


Slika 3.3. Model nastajanja odvojene čestice sabijanjem trapeznih elemenata [3]

Istraživanja zone odvajanja čestica uspjela su napraviti fizičku sliku procesa odvajanja čestica. U prvoj fazi, kod kretanja alata u smjeru brzine rezanja, alat zadire u materijal obradka i najprije zahvati komadić materijala u vidu paralelograma i postepeno ga deformira. Lamela zahvaćenog materijala plastično se deformira, pa se zahvaćeni materijal oblika paralelograma pretvara u trapez. Ova promjena oblika je uzrok uvijanja odvojene čestice materijala.

Druga faza se sastoji od smicanja tog sloja u ravnini smicanja. Kada naprezanje u materijalu obradka dosegne granicu loma, nastaje pukotina ispred oštrice alata. Smicanje nastaje u momentu kada sile na prednjoj površini alata postanu jednake čvrstoći materijala kojeg obrađujemo.

U trećoj fazi materijal odvojene čestice teži da se kreće u smjeru okomitom na ravninu smicanja. Pri tome dio odvojene čestice, koji se odvaja s obratkom, sabija se i istovremeno klizi duž ravnine smicanja i duž prednje površine alata. Kut smicanja ovisi o plastičnosti materijala koji se obrađuje, kuta prednje površine alata i djelomično o brzini rezanja  $v_c$ . [8]



Slika 3.4. Odnos debljine reznog sloja i odvojene čestice [1]

Zbog deformacije u smičnoj zoni početna debljina rezanja povećava se na debljinu  $h_1$ . Odnos tih dviju debljina označava se kao koeficijent deformacije odvojene čestice materijala obradka, te se označava sa  $\theta$ :

$$\theta = \frac{h_1}{h_p}$$

Koeficijent deformacije odvojene čestice lako se može odrediti mjerenjem debljine rezanja i debljine odvojene čestice. On je doista važan i ukazuje na obradivost. Smatra se da je veliki koeficijent deformacije čestice nepovoljan, jer kod materijala iste čvrstoće to znači veću potrošnju snage zbog većih deformacija. Poznato je da najveći koeficijent deformacije ima bakar, oko 7, pa se isti teško obrađuje. Daljnjim izračunom možemo izraziti koeficijent deformacije odvojene čestice u ovisnosti o kutu prednje površine alata i kutu smicanja [1, 8]

$$\theta = \frac{h_1}{h_p} = \frac{x \cdot \left(\frac{\pi}{2} + \gamma + \phi\right)}{x \cdot \sin\phi} = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\sin\phi} = \frac{\cos\gamma}{\operatorname{tg}\phi} + \sin\gamma$$

Sam proces formiranja odvojene čestice odvija se u smičnoj ravnini koja predstavlja razdjelnicu deformiranog i nedeformiranog dijela obradka.

Elementi koji značajno utječu na taj proces formiranja odvojene čestice su: [3]

- materijal obradka,
- parametri obrade, a posebno dubina i posmak, te njihov omjer. Važan je i utjecaj brzine rezanja
- geometrija alata (kut namještanja, polumjer vrha alata, kut prednje površine)
- geometrija obradka,
- SHIP.

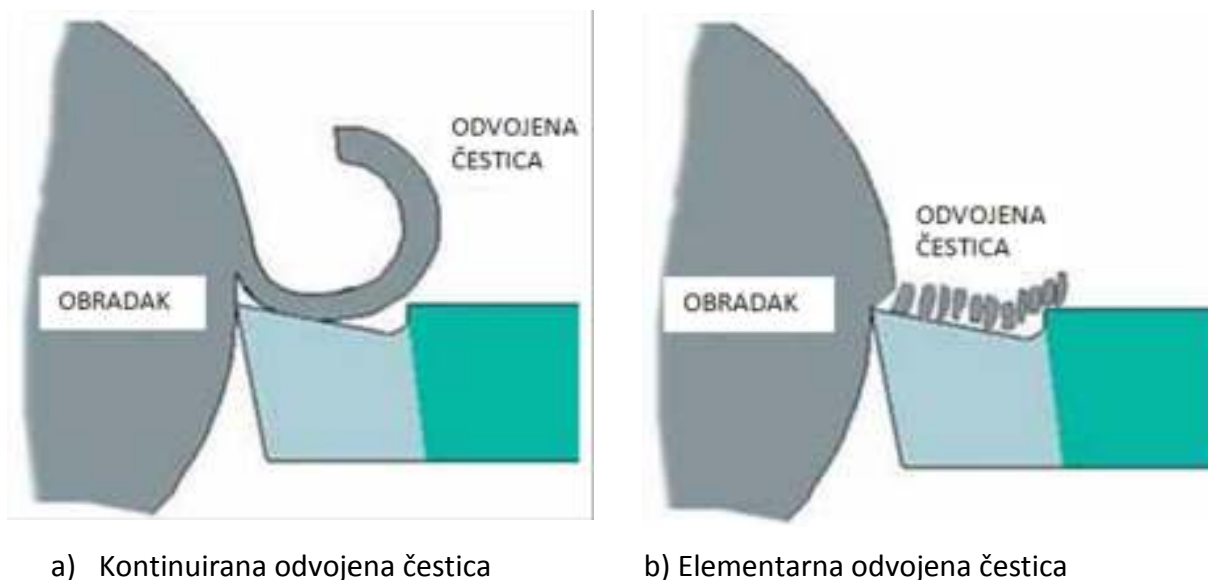
Za definiranje i objašnjenje ovih fenomena i mehanizama stvaranja odvojenih čestica ne postoji jedinstven i sveobuhvatan matematičko – teorijski model, prije svega iz razloga složenosti djelovanja svih procesa koji se odvijaju u zoni rezanja i koji uzrokuju nastajanje odvojene čestice. Tih modela ima više, ali se može prema [3] izdvojiti šest karakterističnih:

- Model nastajanja odvojene čestice u jednoj ravnini smicanja;
- Model nastajanja odvojene čestice sukcesivnim smicanjem elemenata – lamela;
- Model nastajanja odvojene čestice deformiranjem elemenata (lamela);
- Model nastajanja odvojene čestice sabijanjem trapeznih elemenata – lamela;
- Model nastajanja odvojene čestice u klinastoj zoni smicanja;
- Model nastajanja odvojene čestice u širokoj krivolinijskoj zoni smicanja

### 3.1.2 Oblik i vrsta odvojenih čestica

Po vanjskom izgledu odvojene čestice, nastale u procesu obrade plastičnih metala možemo svrstati prema obliku u tri osnovne grupe:

1. Lomljena (elementarna) odvojena čestica. Nastaje pri obradi plastičnih materijala sa malim brzinama rezanja, s velikim debljinama rezanja i ako istovremeno upotrebljavamo mali kut prednje površine alata.
2. Nasječena (lamelarna) odvojena čestica. One odvojene čestice koje su kod odvajanja od osnovnog materijala obradka, kao elementi ostali međusobno povezani. Nastaju pri nešto većem kutu prednje površine alata nego u gornjem slučaju. Pukotina oštrice alata postaje manja. Odvojena čestica je duža i kvaliteta obrađene površine je bolja nego kod obrade pri kojoj nastaje lomljena odvojena čestica.
3. Tekuća (kontinuirana) odvojena čestica. Onaj oblik koji nema primjetnih tragova ravnine smicanja. Postiže se velikim kutem prednje površine alata, velikim brzinama rezanja te velikim omjerom  $b/h$  odnosno  $a_p/f$ . Pukotina ispred oštrice alata je minimalna pa se postiže vrlo visoka kvaliteta obrađene površine. [8]

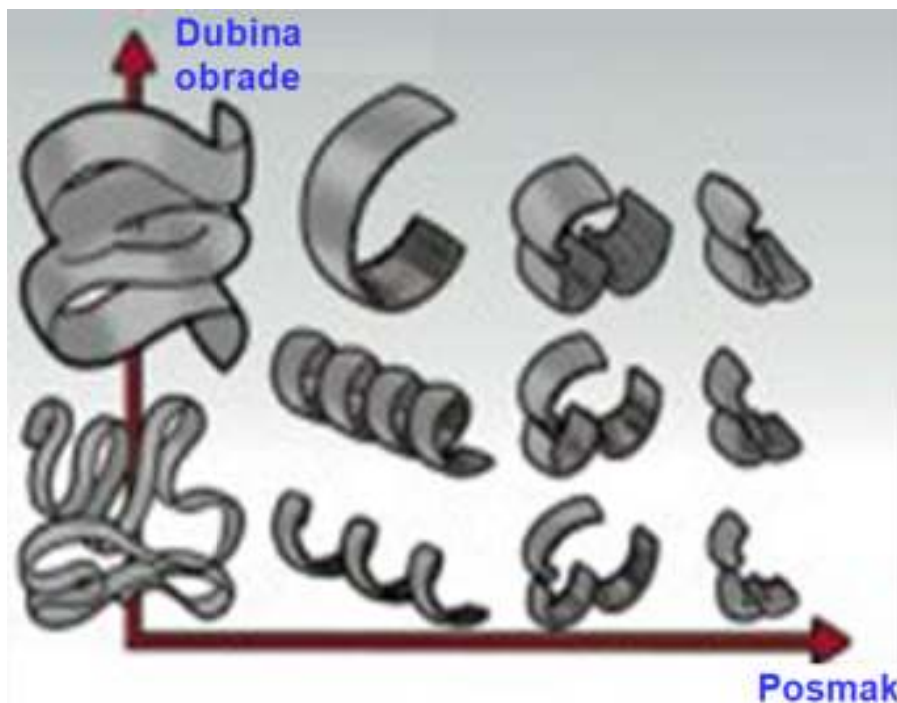


Slika 3.5. Oblici odvojene čestice [13]

Utjecajni parametri na oblik odvojene čestice su[1]:

- Materijal obradka,
- Parametri obrade, a posebno dubina i posmak te njihov omjer,

- Geometrija alata (postavni kut, polumjer vrha alata, kut prednje površine, "reljef" prednje površine),
- Geometrija obradka
- SHIP



Slika 3.6. Ovisnost oblika odvojene čestice o posmaku i dubini obrade [1]

### 3.2 Ortogonalno rezanje

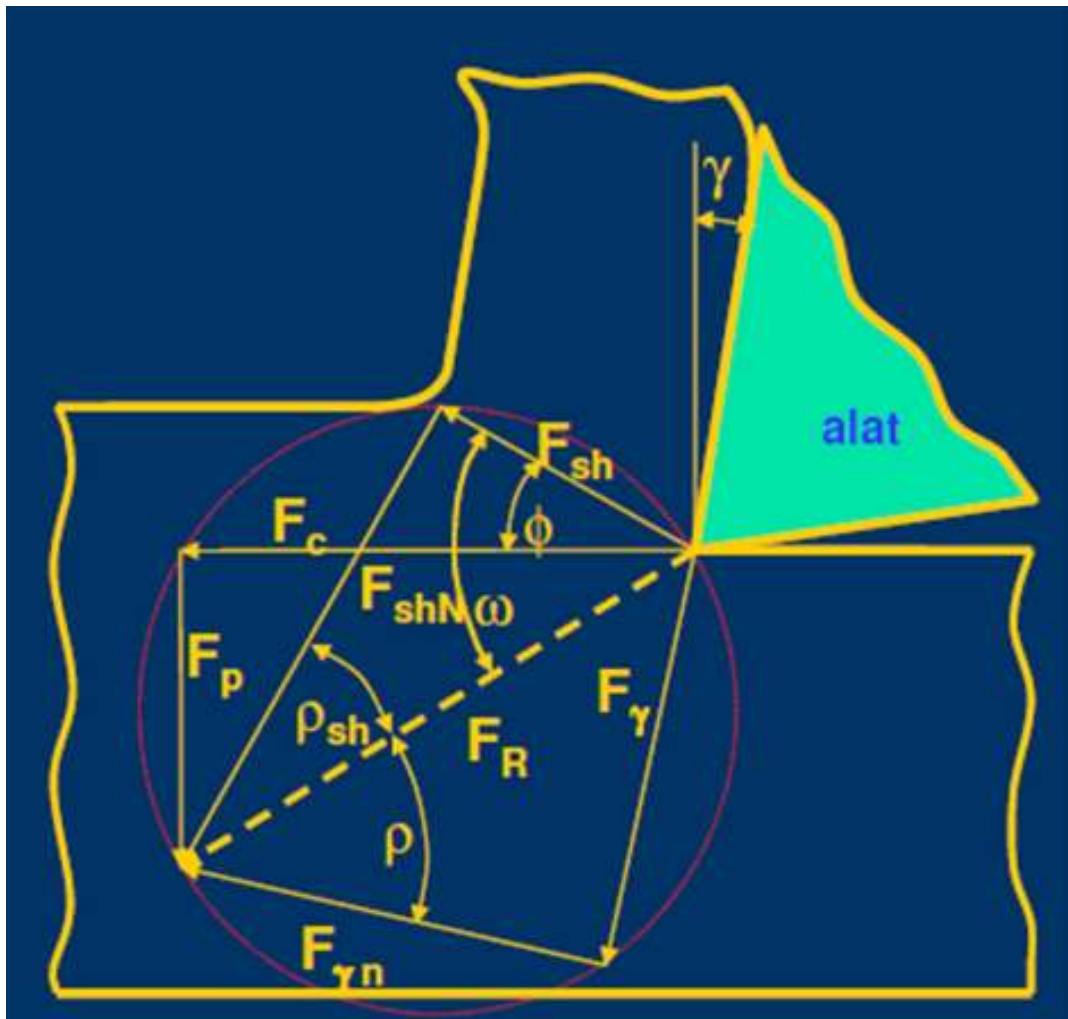
Najjednostavniji prikaz mehanizma formiranja odvojene čestice je slučaj ortogonalnog rezanja, kojim se sve sile mogu prikazati u jednoj ravnini, te ako pretpostavimo da sve sile djeluju na vrhu oštrice alata, možemo dobiti najvažniju rezultatnu silu  $F_R$ . Silu  $F_R$  nazivamo silom rezanja i njome treba pritiskivati alat da bi mogao zadirati u materijal obratka[8].

Osnovne pretpostavke ortogonalnog rezanja su[1]:

- Brzina rezanja okomita je na glavnu oštricu i na posmičnu brzinu rezanja,
- Parametri obrade su konstantni,
- Nema trenja na stražnjoj površini alata,
- Smicanje se događa u ravnini,
- Jednolika raspodjela naprezanja,
- Glavna oštrica šira je od širine obrade

Merchantov model koristi pretpostavku da se radi o ortogonalnom rezanju. Osim ove pretpostavke Merchantov model stvaranja odvojene čestice zasniva se i na sljedećim pretpostavkama:

- Vrh alata je apsolutno oštar, pri čemu nema klizanja između alata i obratka,
- Deformacija materijala se odvija u ravnini, nema bočnog klizanja,
- Naprezanja u ravnini smicanja su ravnomjerno raspoređena.



Slika 3.7. Merchant-ov model ortogonalnog rezanja [1]

Gdje je:

$F_c$  – glavna sila rezanja

$F_p$  – natražna sila rezanja



$F_\gamma$  – tangencijalna sila na prednjoj površini alata

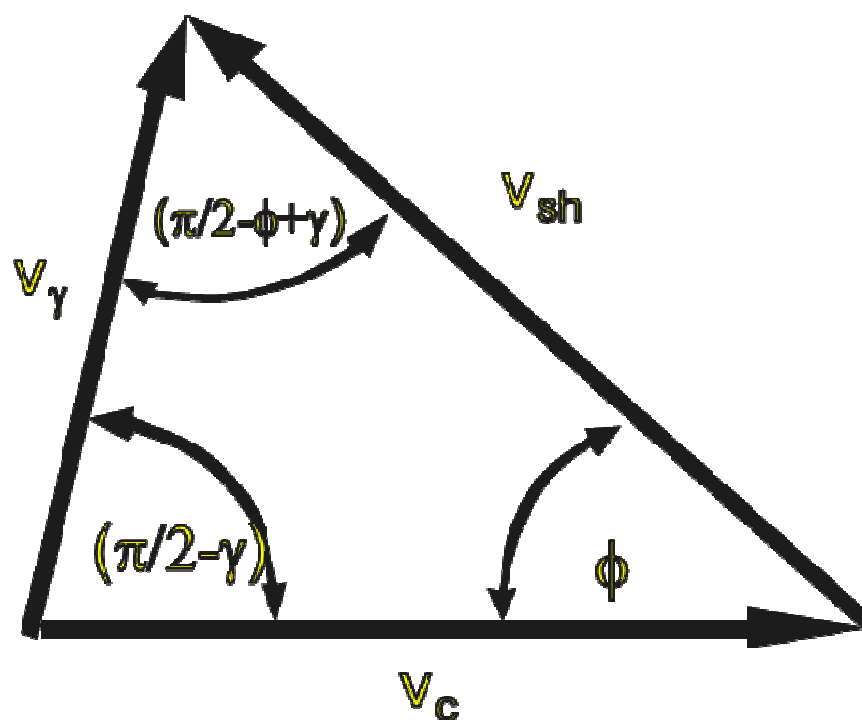
$F_{\gamma N}$  – normalna sila na prednjoj površini alata

$F_{sh}$  – tangencijalna sila u ravnini smicanja

$F_{shN}$  – normalna sila u ravnini smicanja

$\mu = \operatorname{tg} \rho = F_\gamma / F_{\gamma N} \rightarrow$  koeficijent trenja na prednjoj površini alata.

$\mu_{sh} = \operatorname{tg} \rho_{sh} = F_{sh} / F_{shN} \rightarrow$  koeficijent trenja u ravnini smicanja.



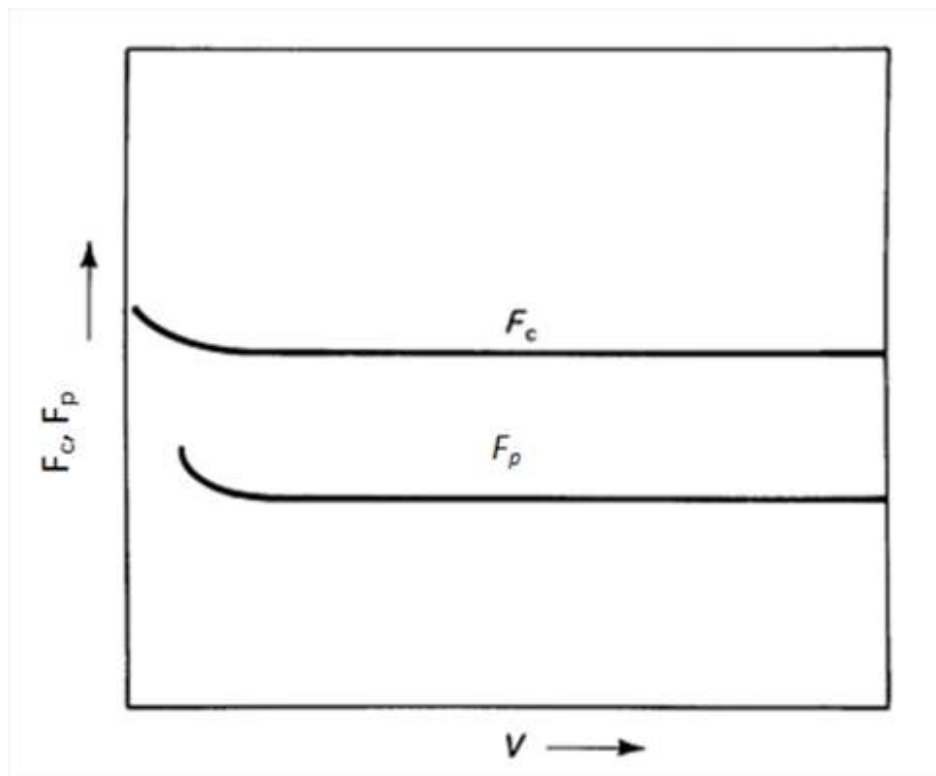
Slika 3.8. dijagram brzina [1]

Radovi Merchanta sadrže temeljne analize problematike mehanike rezanja zasnovane na modelu jedne ravnine smicanja. U osnovama ove analize sadržan je i kut smicanja kao najvažniji element ovog modela.

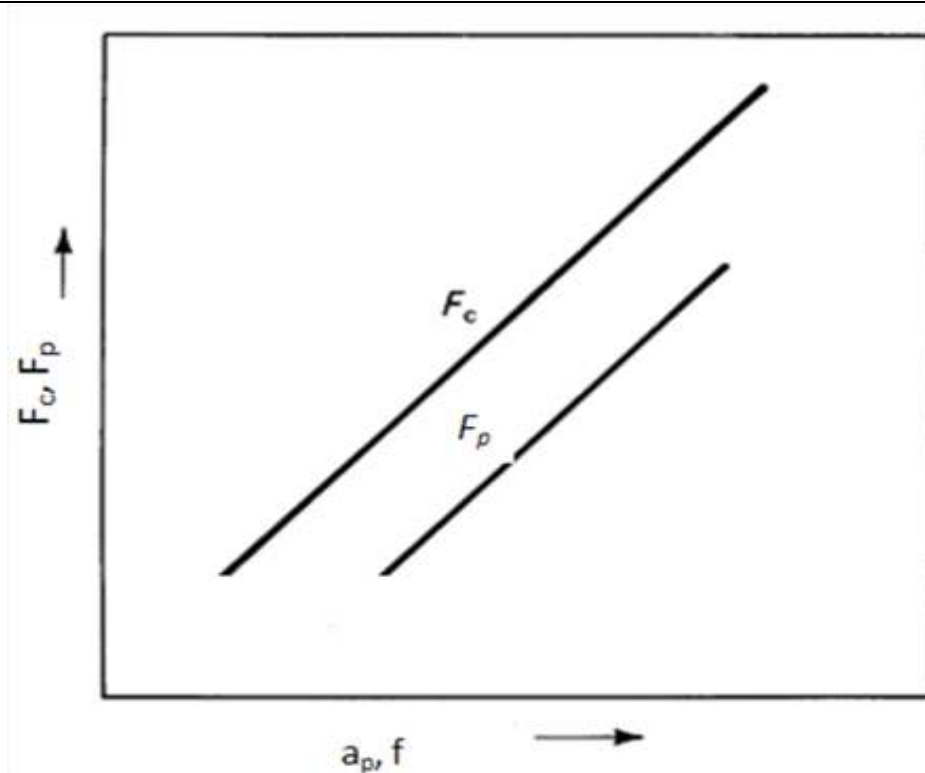
Značaj kuta smicanja od velike je važnosti u teoriji obradivosti. On predstavlja osnovnu karakteristiku procesa rezanja, jer se njime definira pravac plastične deformacije u zoni rezanja. On se, pored ostalog, koristi i kao kriterij za ocjenu stupnja obradivosti nekog materijala: pri većim

vrijednostima kuta smicanja postiže se veća kvaliteta obrađene površine, manje sile rezanja i trakasti oblik odvojene čestice.[11]

Slike 3.9 i 3.10 prikazuju općenitu ovisnost glavne sile rezanja i natražne sile rezanja o brzini rezanja, posmaku i dubini obrade kod ortogonalnog rezanja[5].



Slika 3.9. Ovisnost glavne sile rezanja i natražne sile o brzini rezanja kod ortogonalnog rezanja[5]



Slika 3.10 ovisnost glavne sile rezanja i natražne sile o posmaku i dubini rezanja kod ortogonalnog rezanja [5]

### 3.2.1 Kut smične ravnine prema Merchant-u

U uvjetima kada nema vanjskih ograničenja (to je jedna od pretpostavki ortogonalnog rezanja), smična ravnina će se postaviti tako da potreban smična sila bude najmanja. [1, 3]

Uzimajući u obzir odnose između sila rezanja (kod ortogonalnog rezanja) kako je to prikazano na slici 3.7, te označavajući kut između rezultantne sile  $F_R$  i tangencijalne sile u ravnini smicanja  $F_{sh}$  kao  $\omega$ , može se napisati jednačba:

$$F_{sh} = F_R \cdot \cos \omega$$

Relacije između kuteva omogućuju da se kut između sila  $F_R$  i  $F_{sh}$  izrazi kao funkcija kuta ravnine smicanja i tzv. Kuta trenja na prednjoj površini alata.

$$\omega = \phi + (\rho - \gamma)$$

Smična naprezanja u ravnini smicanja računaju se prema:

$$\tau_{sh} = \frac{F_{sh}}{A_{sh}}$$

Gdje je  $A_{sh}$  površina ravnine smicanja i računa se prema:

$$A_{sh} = \frac{a_p \cdot f}{\sin \varnothing} = \frac{A}{\sin \varnothing}$$

Uvrštavanjem gornjih izraza za  $F_{sh}$  i  $A_{sh}$  u izraz:

$$\tau_{sh} = \frac{F_{sh}}{A_{sh}}$$

dobije se izraz prema kojem se računa smično naprezanje u ravnini smicanja:

$$\tau_{sh} = \frac{F_R \cdot \cos[\varnothing + (\rho - \gamma)]}{\frac{A}{\sin \varnothing}} = \frac{F_R}{A} \cdot \cos[\varnothing + (\rho - \gamma)] \cdot \sin \varnothing$$

Daljnijim deriviranjem po kutu smicanja dobije se jednadžba:

$$\frac{d\tau_{sh}}{d\varnothing} = \frac{F_R}{A} \cdot \cos[\varnothing + (\rho - \gamma)] = \frac{F_R}{A} \cdot \cos[2\varnothing + (\rho - \gamma)]$$

Daljnijim izjednačavanjem te jednadžbe s nulom dobiva se rješenje za kut ravnine smicanja pri kojem je potrebna smična sila najmanja.

$$\begin{aligned} \frac{d\tau_{sh}}{d\varnothing} = 0 &\rightarrow \frac{F_R}{A} \cdot \cos[2\varnothing + (\rho - \gamma)] = 0, \\ \cos[2\varnothing + (\rho - \gamma)] = 0 &\rightarrow 2\varnothing + \rho - \gamma = \frac{\pi}{2}, \end{aligned}$$

te je konačno rješenje za kut ravnine smicanja:

$$\varnothing = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} - \frac{\rho}{2}$$

Prvi dio izraza za računanje kuta ravnine smicanja pri kojem je potrebna smična sila najmanja  $\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2}$  isti je kao i kod optimiranja tog kuta u kinematičkim i geometrijskim razmatranjima tj, predstavlja simetrali između

prednje površine alata i pravca relativnog gibanja, odnosno  $\frac{\pi+\gamma}{2}$ . Drugi dio izraza  $\frac{\rho}{2}$  pokazuje u kojoj mjeri dinamičke pojave utječu na promjene, smanjenje, optimalne vrijednosti kuta ravnine smicanja.

Obzirom da je riječ o kutu trenja (u Merchant-ovim razmatranjima se pojave na prednjoj površini alata objašnjavaju isključivo trenjem) na prednjoj površini alata, jasno je da je smanjenje optimalne vrijednosti kuta ravnine smicanja posljedica pojava na prednjoj površini alata. Smanjenje kuta ravnine smicanja je negativna pojava, jer se povećava presjek smicanja,  $A_{sh}$ , pa se time i sila potrebna da se ostvari smicanje matreijala povećava.

Kolike su vrijednosti kuta trenja, najlakše je utvrditi mjerenjima za slučaj da je kut prednje površine jednak nula stupnjeva,  $\gamma = 0^\circ$ . Uz takvu geometriju alata tangencijalna sila na prednjoj površini alata jednaka je pasivnoj sili  $F_\gamma = F_p$ , a normalna sila na prednjoj površini alata jednaka je glavnoj sili rezanja,  $F_{\gamma N} = F_c$ . Kut trenja iznosi  $\rho = \arctg \frac{F_\gamma}{F_{\gamma N}}$ , odnosno pri  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\rho = \arctg \frac{F_p}{F_c}$ .

Ako se pretpostavi da je glavna sila rezanja nekoliko puta veća od pasivne sile, može se zaključiti da je red veličina kuta trenja  $10^\circ - 16^\circ$ , odnosno da trenje na prednjoj površini alatasmanjuje optimalnu vrijednost kuta ravnine smicanja za  $5^\circ - 8^\circ$ . [3, 11]

### 3.3 Koso rezanje

Sile rezanja i njezini momenti imaju veliki značaj u tehnologiji obrade odvajanjem čestica. Njima se iskazuje jedna od osnovnih karakteristika stanja i ponašanja procesa rezanja materijala. Kada se na neki način odrede funkcije sile rezanja i njihovim momenata, tada ove funkcije omogućuju da se [11]:

- Proračuna snaga koja se troši u zahvatu ili operaciji i odabere odgovarajući motor stroja;
- Izaberu i proračunaju sistemi glavnih i pomoćnih prijenosnih mehanizama od izvora snage, tj. motora, do reznog alata (zone rezanja);
- Izvrši proračun čvrstoće i da se dimenzioniraju elementi i dijelovi alatnog stroja;
- Odrede dimenzije i izvrši odgovarajući proračun pomoćnih dijelova u tehnologiji obrade;
- Odaberu tipovi i dimenzije reznog alata, i provjeri stabilnost alata u cjelini;
- Odrede parametri režima obrade pri projektiranju ekonomičnih i produktivnih varijanti tehnološkog procesa obrade;
- Izvrši proračun točnosti i provjeri mogućnost obrade nekog strojnog dijela sa stajališta propisane kontrole kvalitete;
- Izvrši nadzor trošenja alata.

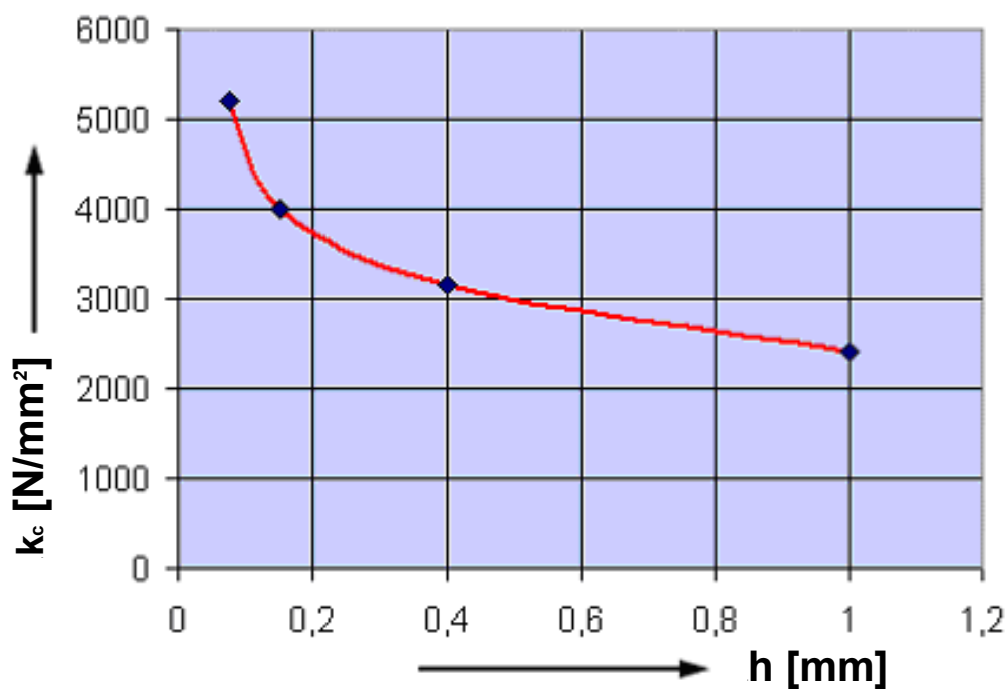
Na ovaj način se u proizvodnim uvjetima, na osnovu poznavanja i korištenja funkcija sila i momenata rezanja, omogućava racionalna konstrukcija i ekonomična eksploatacija proizvodnih sredstava, optimizacija procesa obrade, kao i razvoj određenog koncepta adaptivno upravljanih obradnih sustava sa mogućnošću regulacije.

Nadalje, sile rezanja i njihovi momenti stoje u direktnoj ili indirektnoj vezi sa nizom značajnih fenomena koji prate proces rezanja, kao što su, npr. temperatura u zoni rezanja i njenoj okolini, trošenje reznih elemenata alata itd. [11].

Specifična sila rezanja  $k_c$ , za koju pojedini autori navode različite jednadžbe, može se u većini slučajeva pisati kao [14]:

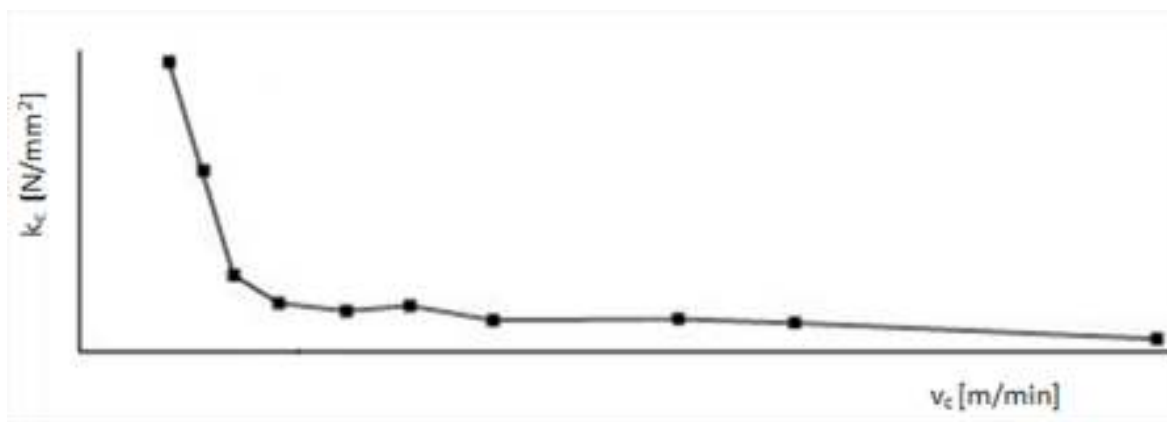
$$k_c = \frac{F_c}{A} \neq konst$$

Vrijednost specifične sile rezanja nije konstantna već se ona mijenja sa debljinom rezanja  $h$  i brzinom rezanja  $v_c$ . Na slici 3.11. je prikazana ovisnost specifične sile rezanja u zavisnosti od različitih debljina rezanja  $h$  za materijal obrade Č0750 te dobivena krivulja ima oblik hiperbole [14].



Slika 3.11. Ovisnost specifične sile  $k_c$  o debljini odvojene čestice  $h$  [8]

Na slici 3.12 prikazana je ovisnost specifične sile rezanja  $k_c$  o brzini rezanja  $v_c$ .



Slika 3.12. Ovisnost specifične sile  $k_c$  i brzini rezanja  $v_c$  [9]

### 3.3.1 Modeli za procjenu sila rezanja

#### Kienzle-ov model za procjenu sila rezanja

Opće prihvaćeni i najčešće primjenjivani model za izračunavanje sila rezanja je Kienzle-ov model pri čemu je [14]:

$$F_c = k_c \cdot A$$

$$k_c = k_{c1x1} \cdot h^{-z}$$

$$F_c = k_{c1x1} \cdot b \cdot h^{1-z}$$

gdje je:

- $b$ , mm – širina rezanja;  $b = a_p / \sin \kappa_r$
- $h$ , mm – debljina rezanja;  $h = f \cdot \sin \kappa_r$
- $1-z$  – eksponent ovisan o materijalu obratka;  $k_{c1x1}$
- $k_{c1x1}$  – specifična jedinična sila rezanja kod presjeka rezanja
- $A = 1 \text{ mm}^2$  ( debljina odvojene čestice  $h=1\text{mm}$ , širina odvojene čestice  $b=1\text{mm}$ ).

Sama specifična jedinična sila rezanja je konstantna, a njezin iznos je različit za različite materijale i različite komponente sile (glavna, posmična ili natražna). Tijekom vremena došlo se do saznanja da i mnogi drugi faktori utječu na veličinu sile rezanja, tako da je Kienzle-ova jednadžba proširena s raznim korekcijskim faktorima. Prema [14], taj prošireni model ima slijedeći oblik :

$$F_c = b \cdot h^{1-m} \cdot k_{c1x1} \cdot K_{\gamma_0} \cdot K_v \cdot K_{sch} \cdot K_{VB}$$

gdje je:

- $b$ , mm – širina odvojene čestice,
- $h$ , mm – debljina odvojene čestice,
- $K_{\gamma_0}$  – koeficijent utjecaja prednjeg kuta,
- $K_v$  – koeficijent utjecaja brzine,
- $K_{sch}$  – koeficijent utjecaja materijala i geometrije alata,
- $K_{VB}$  – koeficijent utjecaja vijeka trajanja alata.

Prošireni oblik Kienzle-ove jednadžbe također pokazuje ovisnost porasta sila rezanja s porastom trošenja alata. Obzirom da za trošenje ne postoji jednoznačna definicija, fizikalno objašnjenje, pa ni matematički model, jasno je da ni za spregu između trošenja i sila rezanja ne postoji jasno



definiran matematički model koji bi prikazivao ovisnost sile rezanja o trošenju [14].

### 3.3.2 Utjecajni faktori na sile rezanja

Postoji puno faktora koji utječu na promjenu vrijednosti sile rezanja, a neki od njih su prema [3]:

- materijal obratka,
- brzina rezanja,
- posmak,
- dubina rezanja,
- geometrija alata,
- sredstvo za hlađenje i podmazivanje (SHIP),
- materijal alata,
- istrošenje alata.

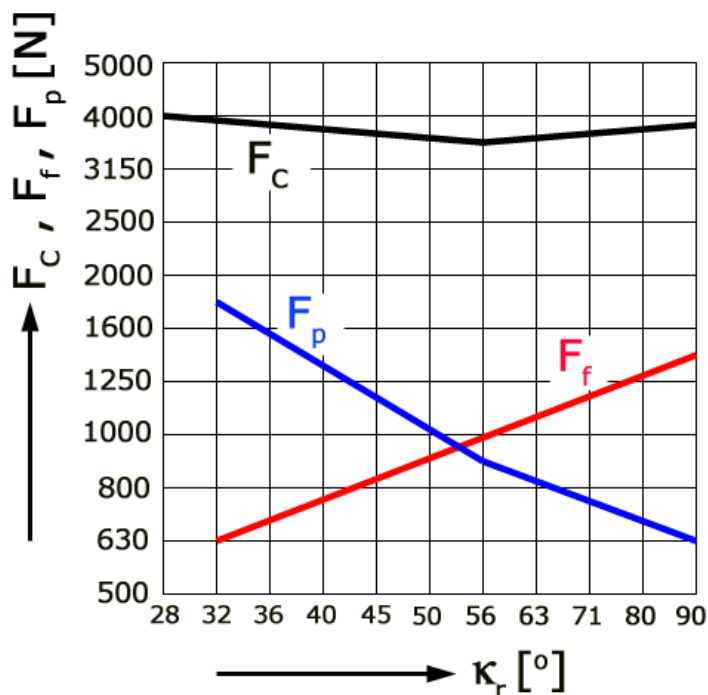
Kod utjecaja materijala obratka, skoro uvijek zapažamo da su sile rezanja veće kod materijala sa većom čvrstoćom, ali to povećanje nije proporcionalno povećanju čvrstoće. Uzrok te pojave je u tome, da se povećanjem tvrdoće materijala smanjuje njegova plastičnost, pa je zato i sabijanje manje. Faktor sabijanja smanjuje se kada se povećava kut prednje površine, ali različito za različite materijale [15].

Utjecaj brzine rezanja. Kod tokarenja čelika možemo zapaziti da se, kod povećanja brzine rezanja do približno 0.83 m/s sile rezanja nešto malo povećaju. Ovo povećanje ovisno je i o prednjem kutu  $\gamma$  (slika 3.13.), ali i o brzini rezanja (slika 3.14.). Kod daljnjeg povećanja brzine glavna sila rezanja pada sve do brzine rezanja od oko 0.33 m/s, ali je različita za različite vrijednosti kuta  $\gamma$  [15].

Utjecaj sredstva za hlađenje i podmazivanje. Sredstva za hlađenje i podmazivanje smanjuju vrijednosti sila rezanja u ovisnosti od svog fizičko - kemijskog sastava [15].

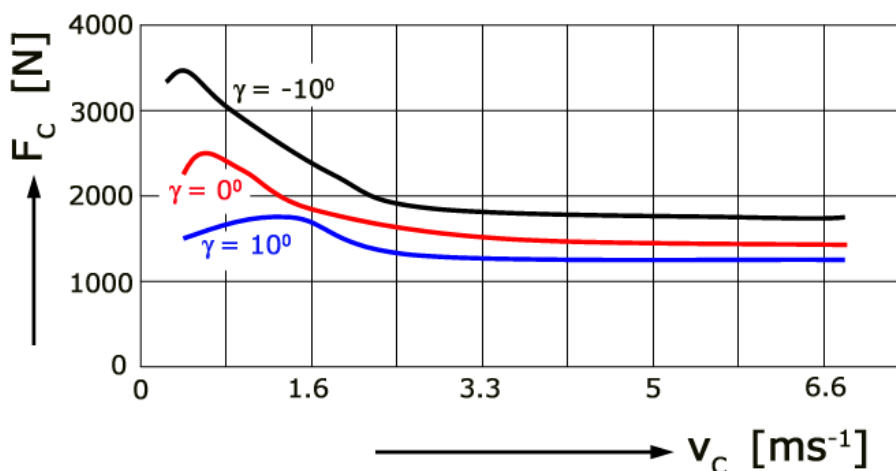
Utjecaj kuta namještanja  $\kappa_r$  (slika 3.13.) je takav da se glavna sila rezanja  $F_c$  smanjuje s povećanjem tog kuta, teoretski sve do  $\kappa_r = 90^\circ$ , Pokusi su pokazali da se sila  $F_c$  smanjuje samo do  $\kappa_r = 60^\circ$ , a kod daljnjeg povećanja kuta opet malo raste. Utjecaj kuta namještanja je također značajan za posmičnu i odzivnu silu ( $F_f$  i  $F_p$ ). Pokusima je pokazano da kod

povećanja kuta  $\kappa_r$  posmična sila  $F_f$  raste, dok se odzivna sila  $F_p$  smanjuje [15].

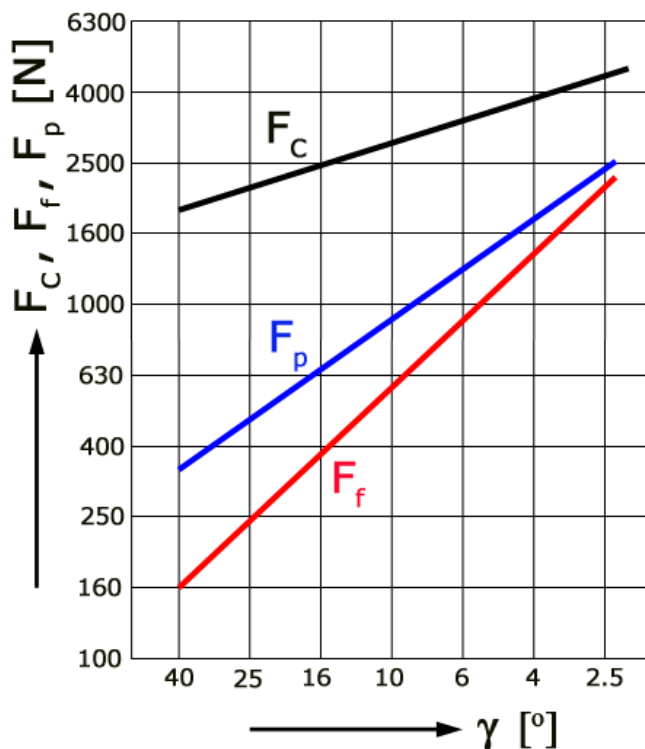


Slika 3.13. Utjecaj kuta  $\kappa_r$  na sile rezanja [15]

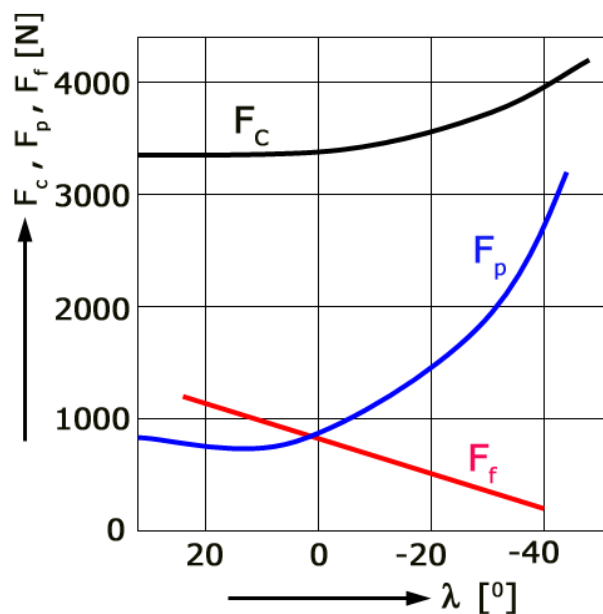
Utjecaj prednjeg kuta  $\gamma$  na sile može se vidjeti na slici 3.15. Što je veći prednji kut  $\gamma$  to se više smanjuju sile rezanja. Međutim, utjecaj prednjeg kuta zavisi istovremeno i od brzine rezanja  $v_c$ . Njihovo zajedničko djelovanje na sile rezanja prikazano je na slici 3.14. Kod većih brzina utjecaj kuta  $\gamma$  je sve manji. [15]



Slika 3.14. Utjecaj brzine rezanja na silu rezanja kod različitih prednjih kutova  $\gamma$  [15]

Slika 3.15. Utjecaj kuta  $\gamma$  na sile rezanja [15]

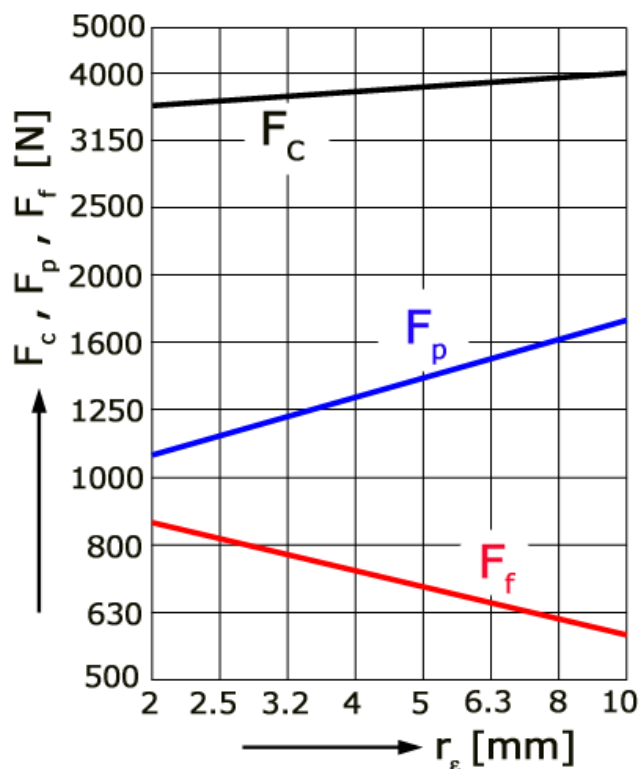
Utjecaj kuta nagiba oštice  $\lambda$  na sile rezanja je primjetan tek kod velikih nagiba, a nema praktički nikakvog utjecaja u rasponu ( $-10^\circ$  do  $+10^\circ$ ). Iz slike 3.16. proizlazi da se pri velikom negativnom kutu osjetno povećava odzivna sila  $F_p$  [15].

Slika 3.16. Utjecaj kuta  $\lambda$  na sile rezanja [15]

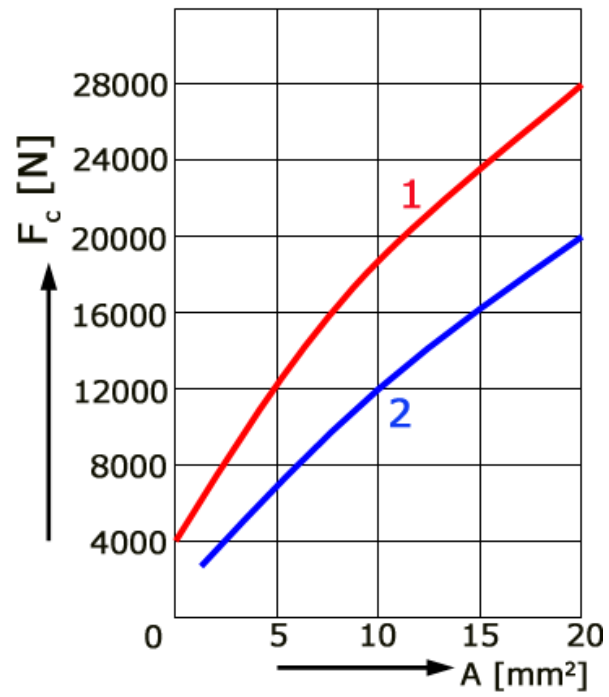
Utjecaj stražnjeg kuta  $\alpha$  na sile rezanja je minimalan, jedino u slučaju da je tako mali da dolazi do jakog trenja između stražnje površine i obratka. Jako veliki stražnji kut je opasan jer smanjuje čvrstoću klina alata. [15]

Utjecaj zaobljenja vrha alata  $r_e$  na sile rezanja može se vidjeti na slici 30. Glavna sila rezanja  $F_c$  povećava se u manjem omjeru, dok povećanje zaobljenja vrha alata  $r_e$  ima nešto veći utjecaj na povećanje odrivne sile  $F_p$ , te smanjenje posmične sile  $F_f$ . [15]

Utjecaj presjeka rezanja. Kod većeg presjeka odvojene čestice  $A$  veća je i sila rezanja. Ispitivanja su pokazala, da se sile rezanja ne povećavaju razmjerno povećanju presjeka odvojene čestice. Slika 3.18. prikazuje utjecaj presjeka odvojene čestice  $A$  na veličinu sile  $F_c$  i to: krivulja 1 za odnos  $a_p/f = 20 : 1$ , a krivulja 2 za odnos  $a_p/f = 2 : 1$ . [15]



Slika 3.17. Utjecaj zaobljenja vrha alata  $r_e$  na sile rezanja [15]



Slika 3.18. Utjecaj presjeka  $A$  i odnosa  $a_p/f$  na silu  $F_c$  [15]

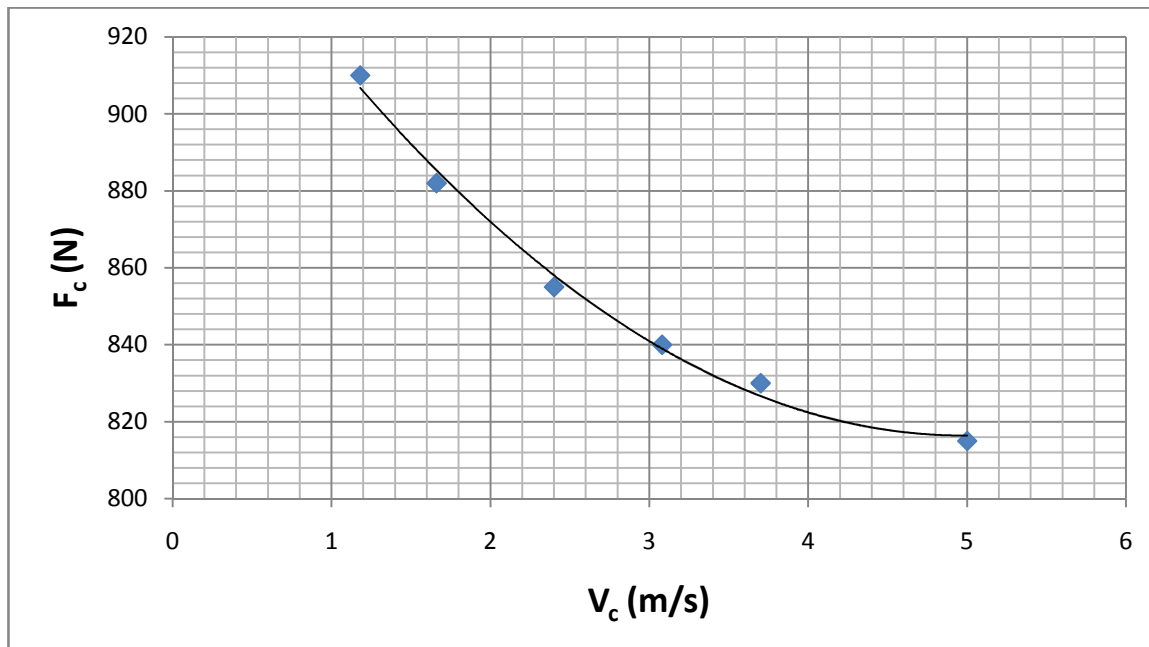
## 4. Eksperimentalni dio

### 4.1 Cilj i metodologija ispitivanja

U ovom eksperimentu analizira se utjecaj parametara režima obrade (dubine rezanja, posmak i brzina rezanja) na glavnu silu rezanja  $F_c$  kod uzdužnog tokarenja.

Na temelju toga u radu je potrebno utvrditi koji matematički model bolje opisuje stvarni proces odnosno eksperiment. Da li je to matematički model prvog stupnja ili matematički model drugog stupnja. U većini eksperimentalnih istraživanja u procesu obrade odvajanjem čestica kao matematički model odgovara model prvoga stupnja osobito zapis u eksponencijalnom obliku. Dok se u, vrlo rijetkim, ispitivanjima u kojima se očekuje ekstrem koristi model drugog stupnja.

Eksperiment je podijeljen na dva dijela: na utjecaj parametara obrade na glavnu silu rezanja kod velikih raspona brzina i na utjecaj istih kod malih raspona brzina rezanja. Na ideju da se eksperiment podjeli na dva dijela došlo se promatrajući dijagram ovisnosti  $F_c$ - $v_c$  (slika 4.1) iz kojeg se vidi da, kod velikih raspona brzina rezanja, linija ima oblik polinoma drugog stupnja.



Slika 4.1 Dijagram ovisnosti glavne sile rezanja  $F_c$  o glavnoj brzini rezanja  $v_c$

Dok kod malih raspon brzina rezanja linija, sve više, poprima oblik polinoma prvog stupnja.

Iz toga se može pretpostaviti da bi model drugog stupnja možda mogao biti prikladniji kod procesa obrade odvajanjem čestica na alatnim strojevima novije generacije (CNC) kod kojim je moguća obrada materijala s velikim rasponom brzina rezanja.

Za dobivanje adekvatnog matematičkog modela koristit će se višefaktorski plan pokusa, koji se pokazao optimalnim za istraživanje matematičkih modela koji opisuju zakonitosti u procesu obrade odvajanjem čestica.

Kao ulazne (nezavisne) veličine procesa uzete su:

- Brzina rezanja
- Posmak  $i$
- Dubina rezanja

Dok ja za izlaznu veličinu uzeta glavna sila rezanja  $F_c$ .

Iz toga slijedi funkcija obradivosti :

$$F_c = f(v_c, a_p, f)$$

## 4.2 Planiranje i priprema

### 4.2.1 Stroj

Mjerenja su izvršena na tokarskom obradnom centru Trens SBL-500, proizvedenom 2004 god.



Slika 4.2 tokarski obradni centar Trens SBL-500 [16]

Tehničke karakteristike tokarskog obradnog centra Trens SBL-500 su: [16]

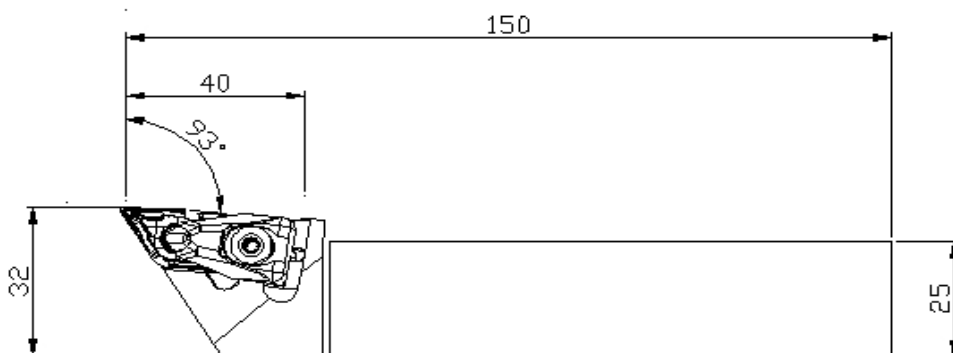
- Dimenzije: 1738 x 1900 mm (širina x visina)
- Težina: 6620 kg
- Radni prostor:
  - najveća duljina tokarenja: 845 mm
  - najveći promjer tokarenja iznad kliznih staza: 405 mm
- Brzina posmičnih gibanja:
  - radna brzina za X os: 1÷10 m/min,
  - radna brzina za Z os: 1÷10 m/min,
  - pozicioniranje za X os: 18 m/min,
  - pozicioniranje za Z os: 24 m/min



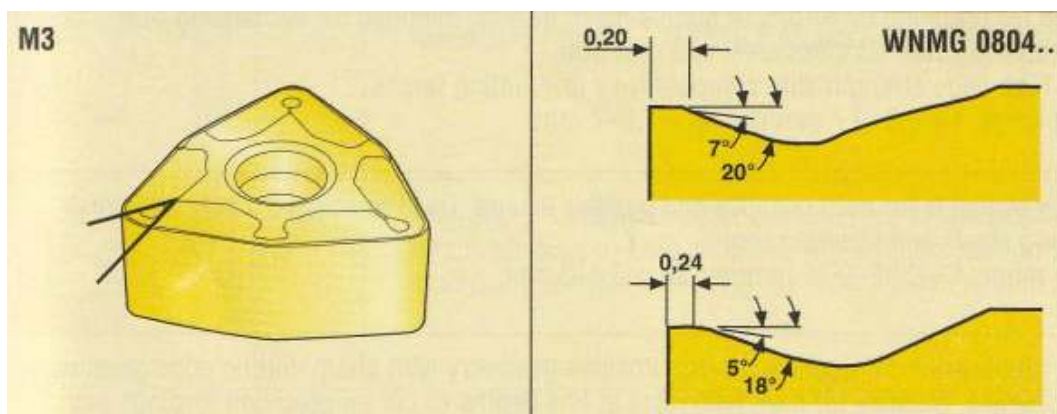
- Glavno vreteno:
  - frekvencija vrtnje: 4200 o/min,
  - snaga: 18,5 KW,
  - "C" os za indeksiranje glavnog vretena
- Magazin alata:
  - broj mjesta u revolverskoj glavi (SAUTER): 12 (6+6)
  - prihvat pogonjenog alata
  - snaga pogonjenih alata: 3,0 kW
  - frekvencija vrtnje: 3500 o/min
- Transporter strugotine za automatski odvoz strugotine
- Upravljanje: SIEMENS 810 D SHOPTURN

## 4.2.2 Alat

Za ovo eksperimentalno istraživanje korišten je alat tvrtke Seco Tools GmbH. Izabran je držač oznake DDJNL2525M15 ( $\lambda = -6^\circ$ ) (slika 4.3) i rezna pločica oznake DNMG150608-M3 TP2000 (slika 4.4).



Slika 4.3. Držač i rezna pločica proizvođača *Seco Tools* [7]



Slika 4.4. Geometrija rezne pločice marke *Seco Tools* [7]

### 4.2.3. Materijal obratka

Obradivani čelik je legirani čelik za poboljšavanje Č5431 (34CrNiMo6), 300 HB, promjera  $D_0 = 112$  mm.

Tablica 4.1. Kemijski sastav materijala 34CrNiMo6 (Č 5431) i tvrdoća nakon poboljšanja

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cu %	Ni %	Cr %	Mo %	Tvrdoća (HB)
0,39	0,16	0,45	0,010	0,018	0,13	1,50	1,46	0,15	300

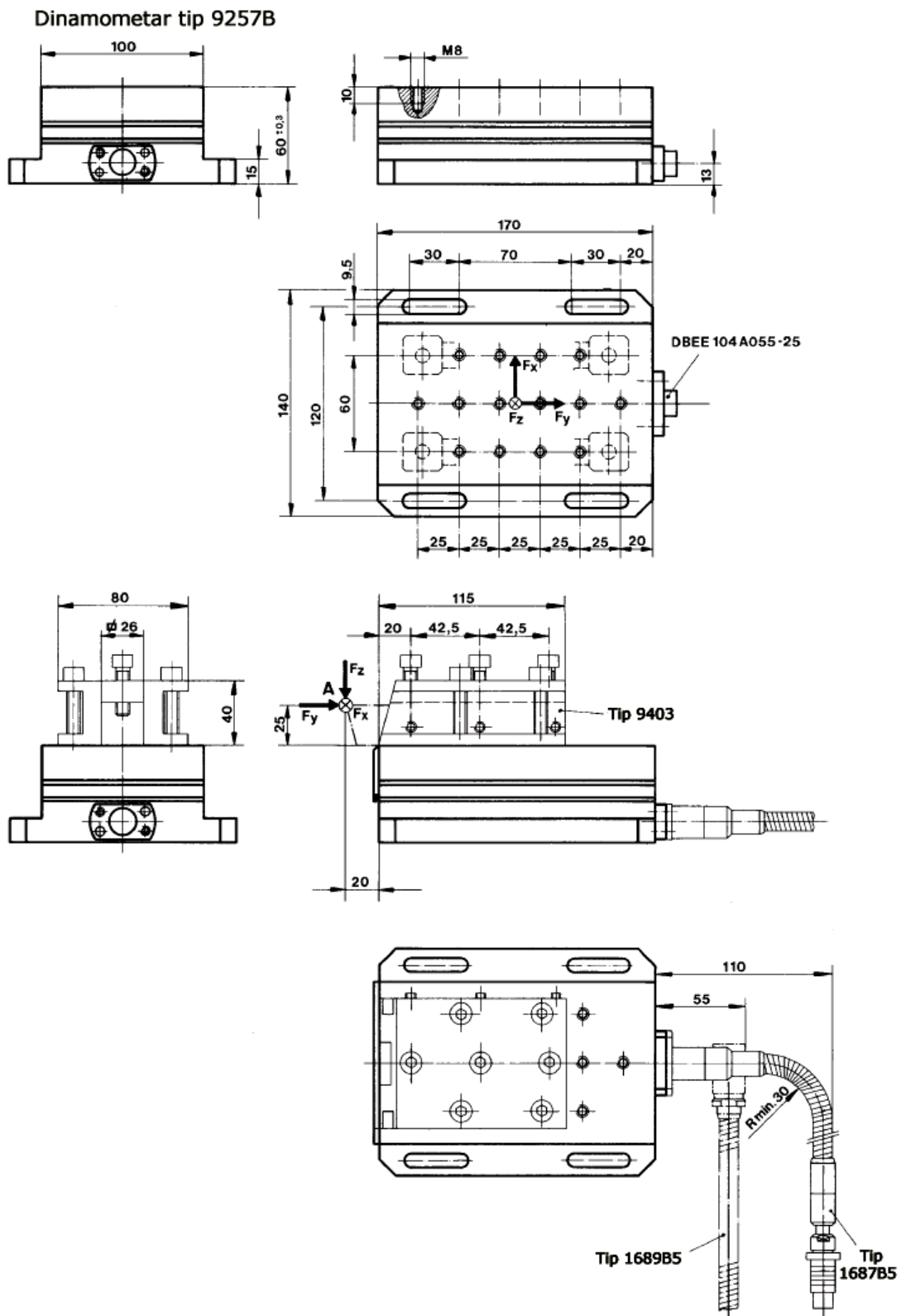
### 4.2.4. Mjerni instrument

Za mjerenje sile rezanja korišten je trokomponentni mjerač sila tipa 9257B, švicarskog proizvođača "KISTLER". Radi se o električnom mjeraču s piezoelektričnim pretvornikom.

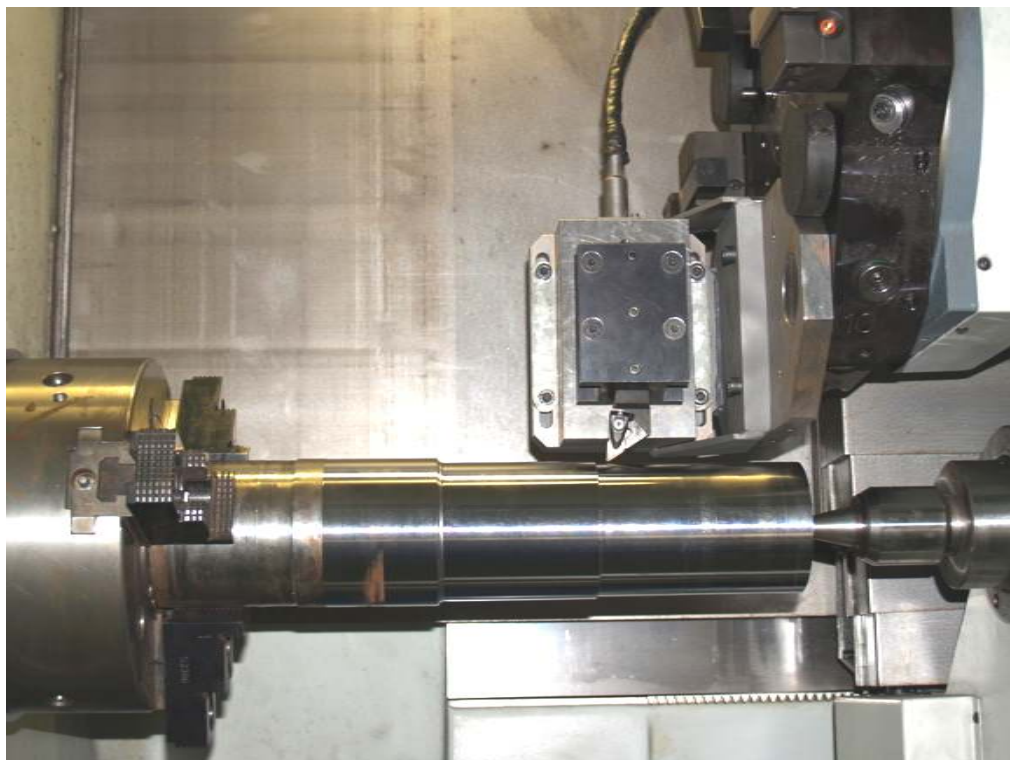
Osnovne karakteristike samog uređaja su:

- područje mjerenja sila:  $\pm 5$  kN
- preopterećenje:  $\pm 7.5$  kN;  $-7.5/15$  kN za  $F_z$
- krutost:  $c_x, c_y > 1$  kN/ $\mu$ m;  $c_z > 2$  kN/ $\mu$ m
- temperaturno područje rada:  $0$  °C –  $70$  °C
- težina: 7.3 kg

Dinamometar se sastoji od četiri senzora za mjerenje tri komponente sile rezanja, a smješteni su između osnovne ploče i gornje ploče. Svaki senzor sadrži tri para kremenih ploča, jednu osjetljivu na pritisak u smjeru osi z, a druge dvije odgovaraju na smik u smjeru x i y osi. Izlazi iz četiri ugrađena senzora sila su povezana izvan dinamometra u smjeru koji dopušta višekomponentna mjerna oprema. Držalac alata koji se montira na mjerni uređaj može prihvatiti alat s maksimalnim dimenzijama drške  $26 \times 26$  mm. Slika 4.5 [17] prikazuje presjek uređaja.



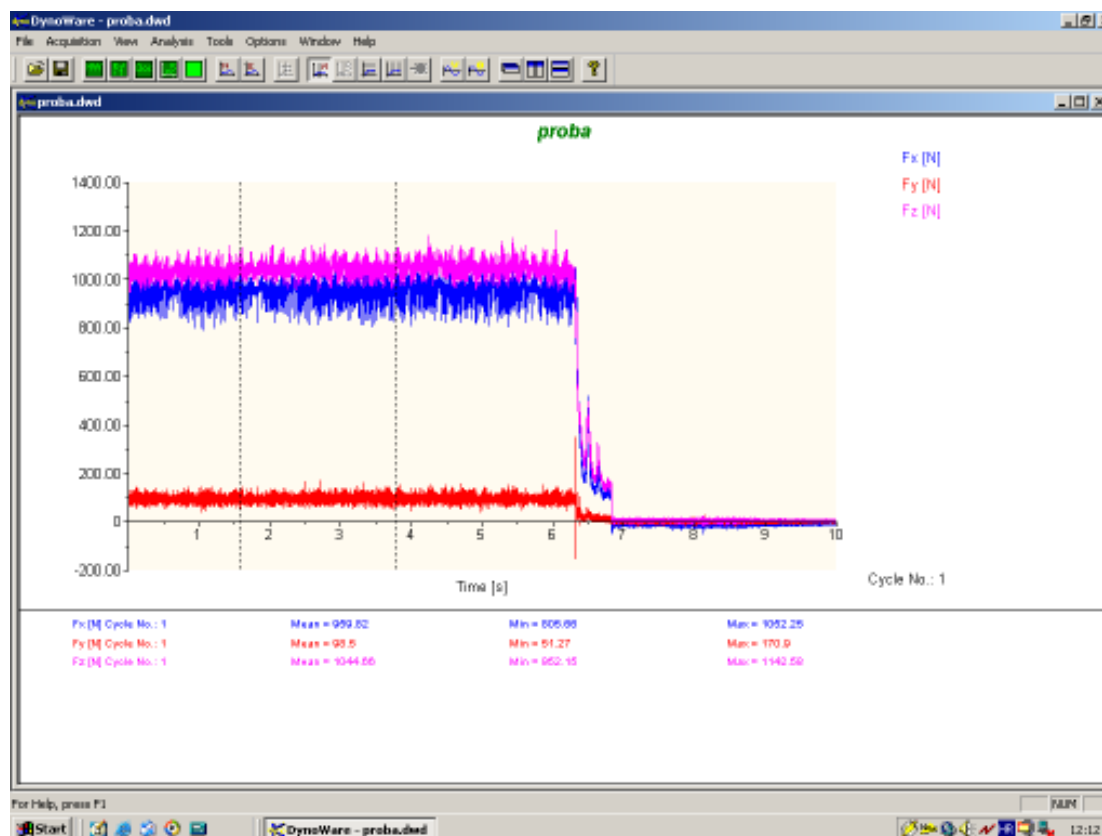
Slika 4.5. Prikaz uređaja za mjerenje sila [17]



Slika 4.6 Obradak i mjerni uređaj u radnom prostoru stroja



Slika 4.7. Pretvornik signala i korisničko sučelje



Slika 4.8. Korisničko sučelje

## 4.3 Rezultati

### 4.3.1 Rezultati za veći raspon brzina

#### 4.3.1.1 Model prvog stupnja - eksponencijalni model

Kao što je objašnjeno u poglavlju 2.3.4 ukupni broj eksperimenata  $N$  računa se preko formule

$$N = 2^k + n = 2^3 + 4 = 12$$

Gdje je  $k$  – broj nezavisnih faktora,  $n$  – broj ponavljanja u središtu.

Prije izvođenja eksperimenata potrebno je načiniti tablicu razine variranja faktora (tablica 2) i tablicu matrice plana pokusa (tablica 3).

Tablica 4.2. Razine variranja faktora za matematički model eksponencijalnog oblika " $2^3 + 4$ "

Faktori	$f_{i,min}$	$f_{i,sr}$	$f_{i,max}$
$v_c$ [m/s]	1,18	3,08	5
$a_p$ [mm]	1	1,75	2,5
$f$ [mm]	0,14	0,2	0,28
Kod faktora	-1	0	1

Tablica 4.3. Matrica plana pokusa " $2^3 + 4$ "

Redni broj mjerenja	Ulazni faktori			Izlazni faktor
	$v$ [m/s]	$a$ [mm]	$f$ [mm]	$F_c$ [N]
1	1,18	1	0,14	440
2	5	1	0,14	395
3	1,18	2,5	0,14	992
4	5	2,5	0,14	874
5	1,18	1	0,28	716
6	5	1	0,28	647
7	1,18	2,5	0,28	1690
8	5	2,5	0,28	1492
9	3,08	1,75	0,2	840
10	3,08	1,75	0,2	831
11	3,08	1,75	0,2	849
12	3,08	1,75	0,2	839

Polazna jednažba, za glavnu silu rezanja, kod plana pokusa prvog reda glasi:

$$F_c = C \cdot v_c^{p_1} \cdot a_p^{p_2} \cdot f^{p_3}$$

Rezultati podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu statistica V6.0 prikazani su u tablici 4.4. Pošto razina signifikantnosti nije niti za jedan parametar prešla prag signifikantnosti od 0.05 zaključuje se da su svi članovi modela signifikantni.

Tablica 4.4. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja  $F_c$  kod velikog raspona brzina rezanja  $v_c$

	Procjena	Standardna greška	t - vrijednost	Razina signifikantnosti
$C_1$	1953,484	69,96098	27,9225	0
$\rho_1$	-0,089	0,00882	-10,0794	0,000008
$\rho_2$	0,928	0,01862	49,8275	0
$\rho_3$	0,773	0,02075	37,2384	0

Koeficijent korelacije iznosi:  $r=0,99914233$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost glavne sile rezanja  $F_c$ :

$$F_c = 1953,484 \cdot v_c^{(-0,089)} \cdot a_p^{0,928} \cdot f^{0,773}$$

Test adekvatnosti modela proveden je pomoću analize varijance (ANOVA) i kako je prikazano na tablici 4.5 vidi se da je model adekvatan.

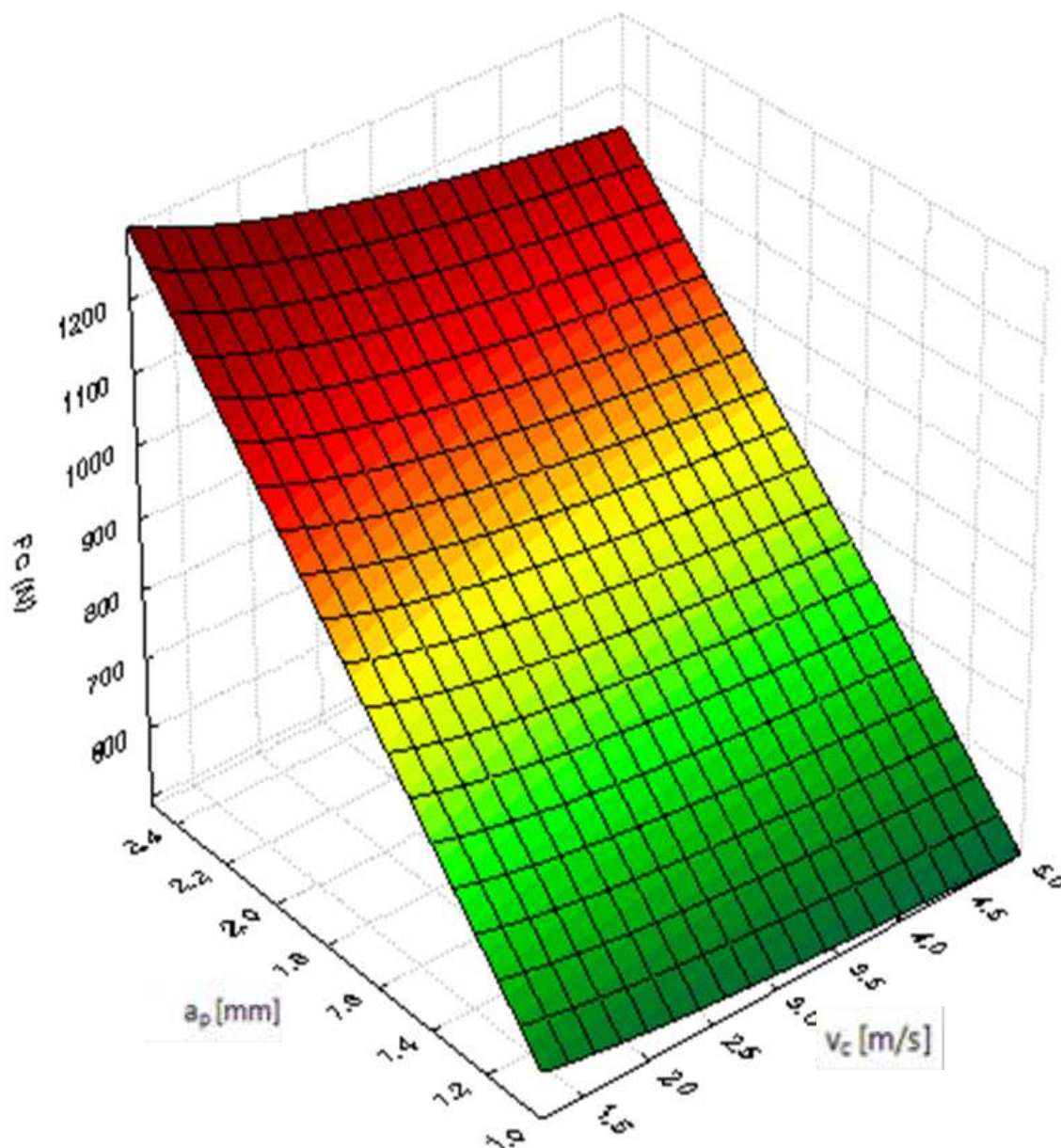
Tablica 4.5. Analiza varijance za eksponencijalni model

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat	F-vrijednost	Razina adekvatnosti
Model	10929203	4	2732301	8173,527	0
Ostatak	2674	8	334		
Ukupno	10931877	12			

Tablica 4.6. Eksperimentalni rezultati, rezultati modela i ostatak

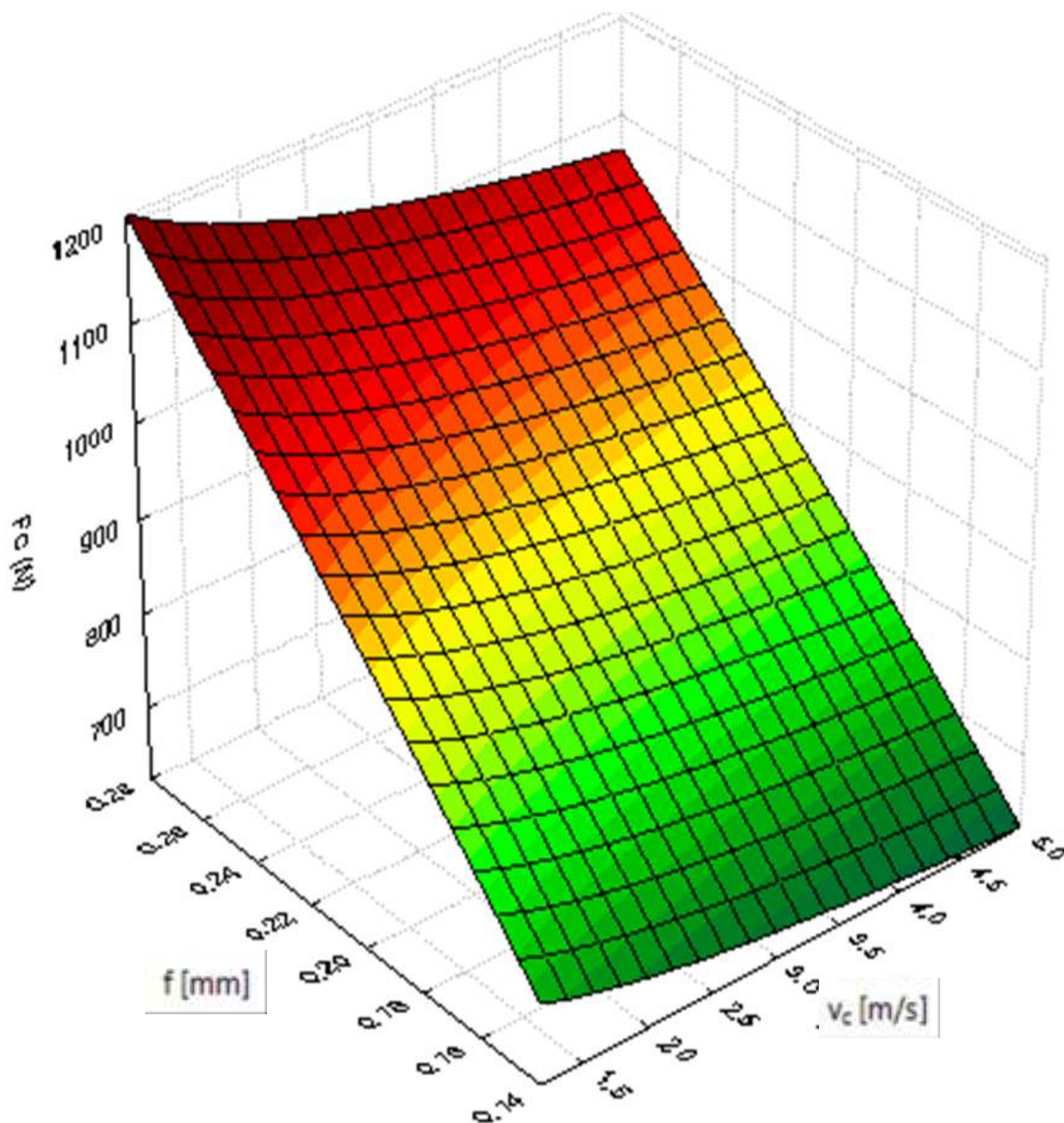
	Eksperiment	Model	Ostatak
1	440	421,457	18,5434
2	395	370,671	24,3294
3	992	986,2	5,8001
4	874	867,363	6,6383
5	716	719,972	-3,9722
6	647	633,215	13,853
7	1690	1684,72	5,2796
8	1492	1481,71	10,2904
9	840	856,768	-16,7682
10	831	856,768	-25,7682
11	849	856,768	-7,7682
12	839	856,768	-17,7682





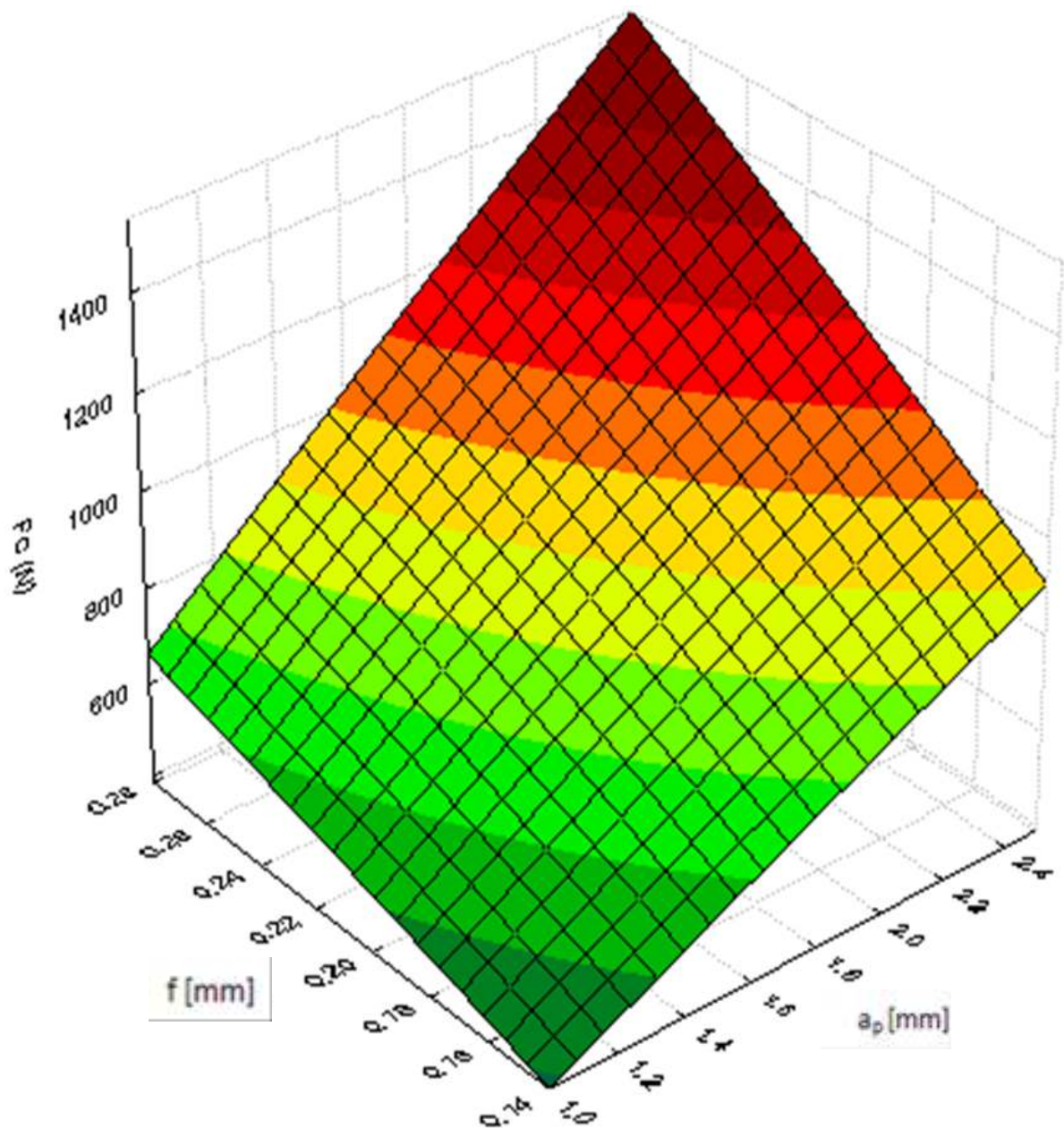
Slika 4.9 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(a, v_c)$  za  $f = 0,2$  mm

Kao što je vidljivo na slici 4.9 promjena glavne sile rezanja najviše ovisi o dubini rezanja ( $a$ ) i to tako da se povećavanjem dubine rezanja povećava i glavna sila rezanja. Povećanjem brzine rezanja dolazi do malog pada glavne sile rezanja.



Slika 4.10 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, v_c)$  za  $a = 1,75$  mm

Na slici 4.10 može se primjetiti da je najveći iznos sile rezanja pri velikim posmacima i pri najmanjim brzinama rezanja, dok je najmanji iznos pri velikim brzinama rezanja i pri malim posmacima.



Slika 4.11 dijagram ovisnosti  $F_c = f(f,a)$  za  $v_c = 3,08$

Kao što se vidi na dijagramu sa slike 4.11 glavna sila rezanja najviše se mijenja promjenom dubine rezanja, a najveći iznos glavne sile rezanja je kod maksimalnog iznosa dubine rezanja i maksimalnog iznosa posmaka.



### 4.3.1.2 Model drugog stupnja

Kod modela 2. stupnja ukupni broj eksperimentalnih točaka ( $N$ ) računa se prema formuli:

$$N = 2^k + 2k + n$$

Gdje je  $k$ - broj nezavisnih faktora, a  $n$ - broj ponavljanja u središtu.

Za  $K=3$  uzima se da je  $n=6$ .

Tablica 4.7. Nepotpuna matrica plana pokusa " $2^3 + 2 \cdot 3 + 6$ "

Redni broj mjerenja	Ulazni faktori			Izlazni faktor
	$v$ [m/s]	$a$ [mm]	$f$ [mm]	$F_c$ [N]
1	1,18	1	0,14	440
2	5	1	0,14	395
3	1,18	2,5	0,14	992
4	5	2,5	0,14	874
5	1,18	1	0,28	716
6	5	1	0,28	647
7	1,18	2,5	0,28	1690
8	5	2,5	0,28	1492
9	3,08	1,75	0,2	840
10	3,08	1,75	0,2	831
11	3,08	1,75	0,2	849
12	3,08	1,75	0,2	839
13	1,18	1,75	0,2	910
14	5	1,75	0,2	815

Rezultati obrađenih podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu statistika V6.0 prikazani su u tablici 4.8. Pošto razina signifikantnosti nije niti za jedan parametar prešla prag signifikantnosti od 0.05 zaključuje se da su svi članovi modela signifikantni.

Tablica 4.8. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja  $F_c$  kod velikog raspona brzina rezanja  $v_c$

	Procjena	Standardna greška	t - vrijednost	Razina signifikantnosti
p11	5,364	1,12824	4,75449	0,001437
p2	138,541	10,8476	12,77154	0,000001
p3	379,456	84,29518	4,50152	0,001998
p13	-124,498	29,33603	-4,24386	0,002823
p12	-19,563	2,91231	-6,71729	0,00015
p23	1888,656	49,80778	37,91889	0

Koeficijent korelacije kod modela drugog stupnja je:  $r=0,99957909$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost glavne sile rezanja  $F_c$ :

$$F_c = p_{11} \cdot v^2 + p_2 \cdot a + p_3 \cdot f + p_{13} \cdot v \cdot f + p_{12} \cdot v \cdot a + p_{23} \cdot a \cdot f$$

$$F_c = 5,364 \cdot v^2 + 138,541 \cdot a + 379,456 \cdot f + (-124,498) \cdot v \cdot f + (-19,563) \cdot v \cdot a + 1888,656 \cdot a \cdot f$$

Test adekvatnosti modela proveden je pomoću analize varijance (ANOVA) i kako je prikazano na tablici 4.9 vidi se da je model adekvatan.

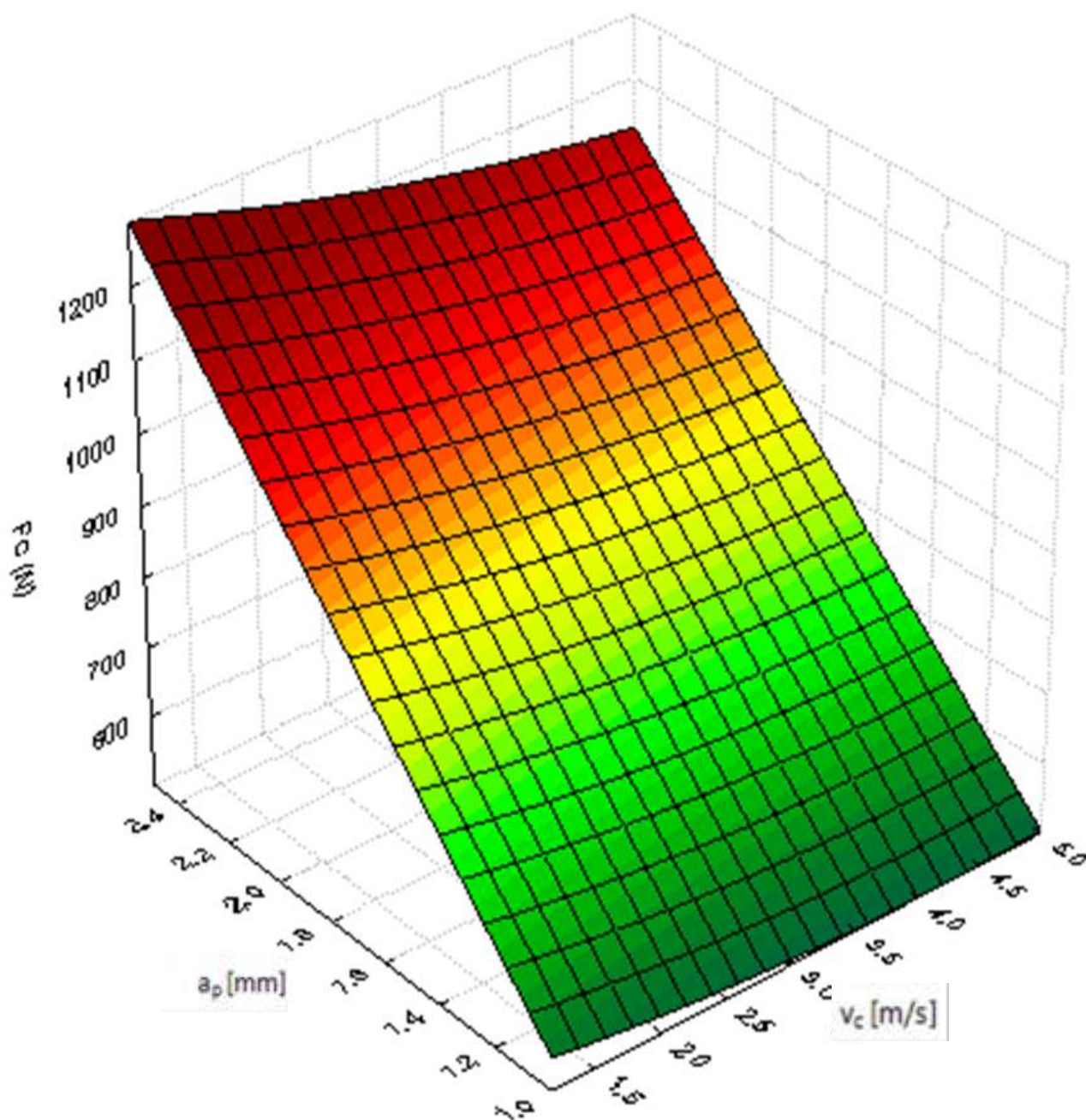
Tablica 4.9. Analiza varijanci za polinom 2. stupnja

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat	F-vrijednost	Razina adekvatnosti
Model	12422885	6	2070481	12575,49	0
Ostatak	1317	8	165		
Ukupno	12424202	14			

Tablica 4.10 prikazuje vrijednosti modela i razliku između vrijednosti dobivenih eksperimentom i modelom

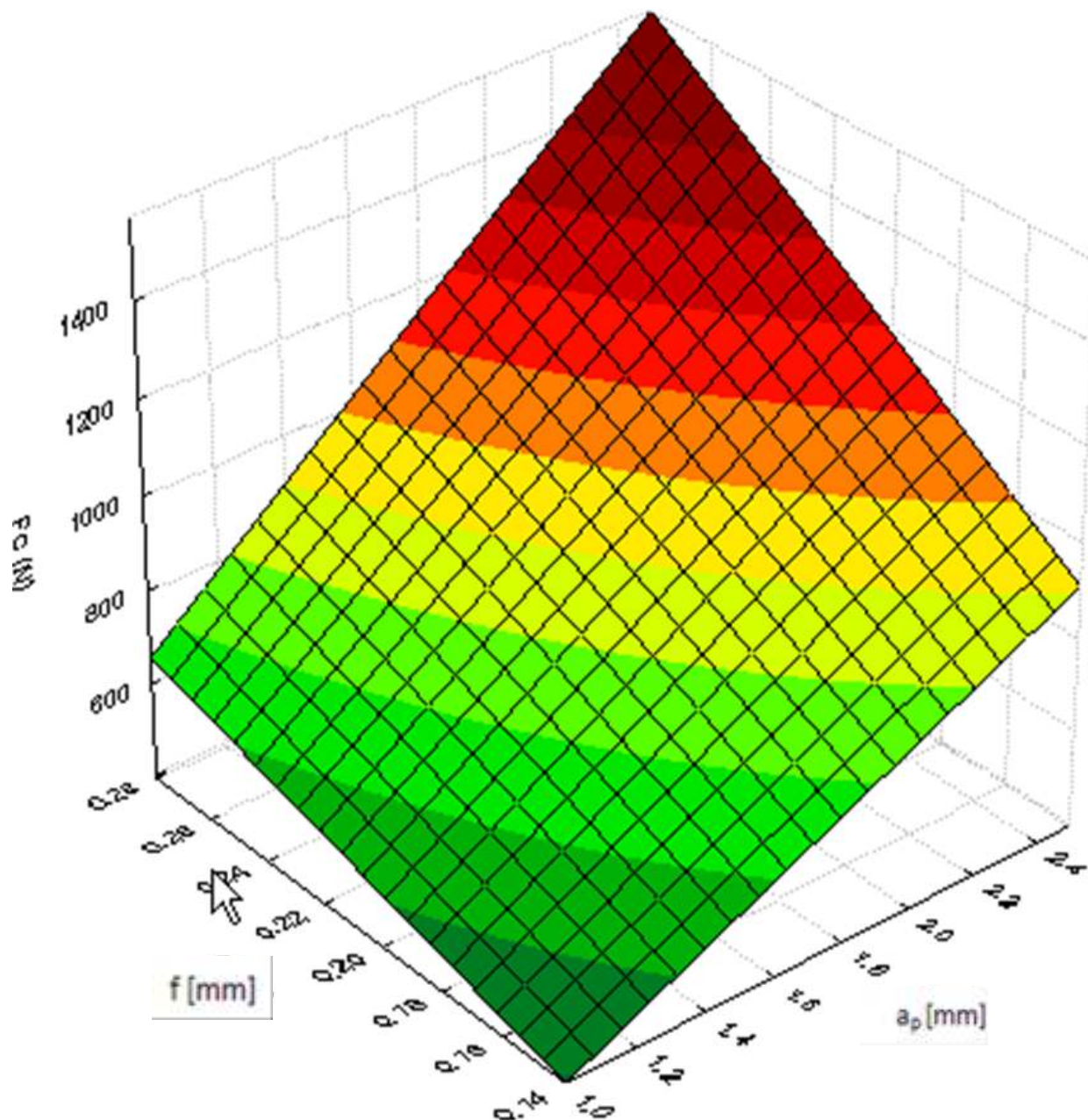
Tablica 4.10. Eksperimentalni rezultati, rezultati modela i ostatak

	Eksperiment	Model	Ostatak
1	440	419,894	20,1059
2	395	405,218	-10,2182
3	992	989,696	2,3036
4	874	862,926	11,0744
5	716	716,863	-0,8627
6	647	635,605	11,3947
7	1690	1683,283	6,7173
8	1492	1489,93	2,0696
9	840	848,119	-8,1192
10	831	848,119	-17,1192
11	849	848,119	0,8808
12	839	848,119	-9,1192
13	910	917,057	-7,057
14	815	817,779	-2,7987



Slika 4.12 dijagram ovisnosti  $F_c = f(a, v_c)$  za  $f = 0,2$  mm

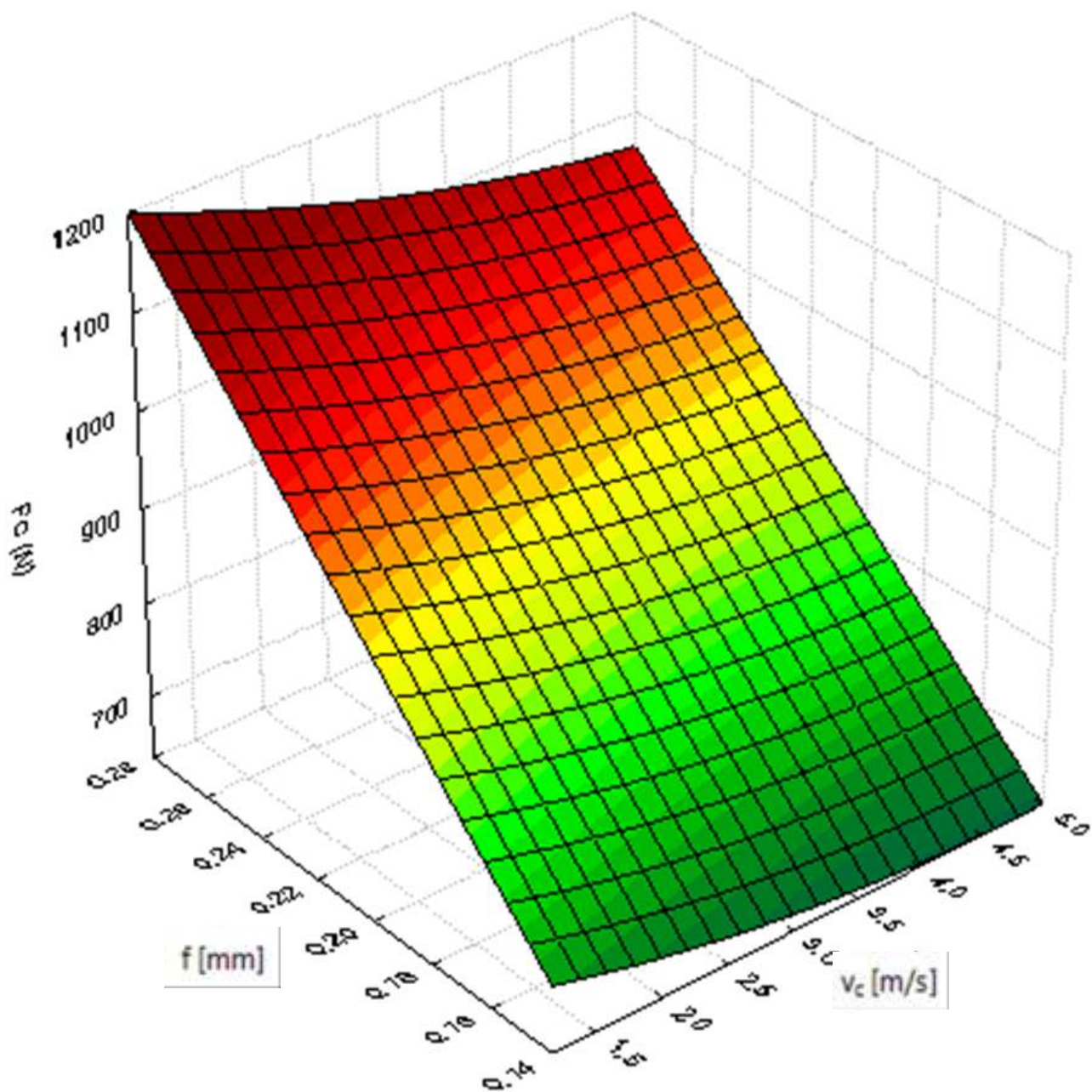
Na slici 4.12 vidi se ovisnost glavne sile rezanja o dubini obrade i glavne brzine rezanja pri konstantnom posmaku. Kao što se može očitati sa dijagrama najveći iznos glavne sile rezanja je pri maksimalnoj dubini rezanja i pri minimalnoj brzini rezanja.



Slika 4.13. Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, a)$  za  $v_c = 3,08$  m/s

Slika 4.13 prikazuje ovisnost glavne sile rezanja od posmaka i dubine obrade za konstantni iznos brzine rezanja. Najveći iznos glavne sile rezanja je pri maksimalnom posmaku posmaku i pri maksimalnoj dubini obrade.





Slika 4.14 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, v_c)$  za  $a = 1,75$  mm

Na slici 4.14 prikazan je dijagram ovisnosti glavne sile rezanja o posmaku i brzini rezanja pri konstantnoj dubini obrade od 0,2 mm. Na dijagramu se vidi da se promjenom posmaka glavna sila rezanja znatno mijenja dok se promjenom brzine rezanja glavna sila rezanja malo mijenja.



### 4.3.1.3 Analiza

Kao što pokazuju tablice 7 i 11 i eksponencijalni model i model drugog stupnja su adekvatni. Međutim model drugog stupnja bolje opisuje eksperiment jer ima veći koeficijent korelacije  $r$ .

$$r_{\text{modela 2.stupnja}} > r_{\text{eksponencijalni model}}$$

$$0,99957909 > 0,99914233$$

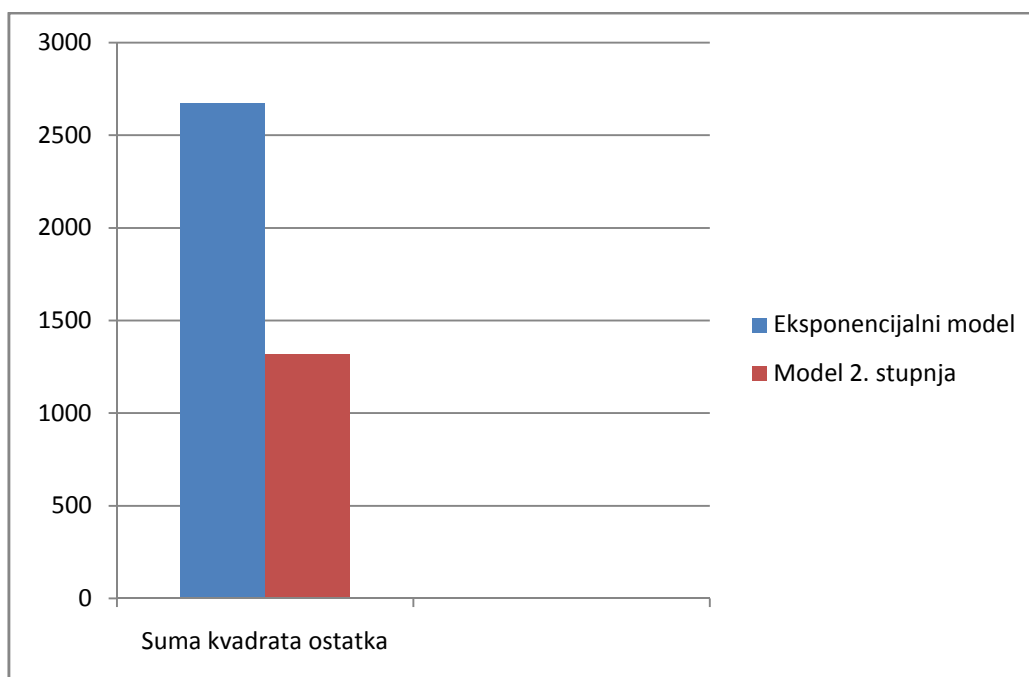
Osim koeficijenta korelacije kao veličine pomoću koje možemo usporediti dva modela i ocijeniti koji model bolje opisuje eksperiment to je moguće učiniti i preko sljedeće veličine koja se dobije analizom varijance za svaki model:

Suma kvadrata ostatka

$$SK_{\text{eksponencijalni model}} > SK_{\text{model 2.stupnja}}$$

$$2674 > 1317$$

Iz tih veličina vidljivo je da ,zaista, model drugog stupnja bolje opisuje eksperiment jer su vrijednost ostatka odnosno razlike između dobivenih vrijednosti eksperimentom i dobivenih vrijednosti modelom puno veće kod eksponencijalnog modela. Slika 4.15 prikazuje grafički prikaz vrijednosti sume kvadrata ostatka za model prvog i drugog stupnja.



Slika 4.15. Grafički prikaz vrijednost sume kvadrata ostatka kod većeg raspona brzina rezanja  $v_c$

Također valja naglasiti da i eksponencijalni model daje vrijednosti vrlo visoke korelacije i da se uspješno može koristiti kao zamjena za model 2. stupnja

### 4.3.2 Rezultati za manji raspon brzina

#### 4.3.2.1 Model prvog stupnja - eksponencijalni model

Postupak izvođenja pokusa je isti kao i za model prvog stupnja kod većeg raspona brzina. Dakle potrebno je napraviti tablicu razine variranja faktora i matricu plana pokusa.

Razine variranja faktora i pripadajući kod prikazane su na tablici 4.11. Iz nje se vidi da su vrijednosti faktori  $f_2$  (dubina rezanja) i  $f_3$  (posmak) ostale iste dok se, jedino, promjenio iznos faktora  $f_1$  (brzine rezanja)

Tablica 4.11. Razine variranja faktora i pripadajući kodovi za manji raspon brzina rezanja

Faktori	$f_{i,min}$	$f_{i,sr}$	$f_{i,max}$
$v_c$ [m/s]	2,4	3,7	5
$a_p$ [mm]	1	1,75	2,5
$f$ [mm]	0,14	0,2	0,28
Kod faktora	-1	0	1

Tablica 4.12. Matrica plana pokusa „ $2^3 + 4$ “ za manji raspon brzina rezanja

Redni broj mjerenja	Ulazni faktori			Izlazni faktor
	$v$ [m/s]	$a$ [mm]	$f$ [mm]	$F_c$ [N]
1	2,4	1	0,14	404
2	5	1	0,14	395
3	2,4	2,5	0,14	892
4	5	2,5	0,14	874
5	2,4	1	0,28	667
6	5	1	0,28	647
7	2,4	2,5	0,28	1543
8	5	2,5	0,28	1492
9	3,7	1,75	0,2	830
10	3,7	1,75	0,2	826
11	3,7	1,75	0,2	835
12	3,7	1,75	0,2	829

Polazna jednažba, za glavnu silu rezanja, kod plana pokusa prvog reda glasi:

$$F_c = C \cdot v_c^{p_1} \cdot a_p^{p_2} \cdot f^{p_3}$$

Rezultati podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu statistica V6.0 prikazani su u tablici 4.13. Pošto razina signifikantnosti nije niti za jedan parametar prešla prag signifikantnosti od 0.05 zaključuje se da su svi članovi modela signifikantni.

Tablica 4.13 Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja  $F_c$  kod malog raspona brzina rezanja  $v_c$

	Procjena	Standardna greška	t - vrijednost	Razina signifikantnosti
$C_1$	1868,324	49,47369	37,764	0
$p_1$	-0,043	0,01129	-3,82623	0,005045
$p_2$	0,909	0,01184	76,78243	0
$p_3$	0,778	0,01334	58,35009	0

Koeficijent korelacije iznosi:  $r=0,99963309$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost glavne sile rezanja  $F_c$ :

$$F_c = 1868,324 \cdot v_c^{(-0,043)} \cdot a_p^{0,909} \cdot f^{0,778}$$

Test adekvatnosti modela proveden je pomoću analize varijance (ANOVA) i kako je prikazano na tablici 4.13. vidi se da je model adekvatan.

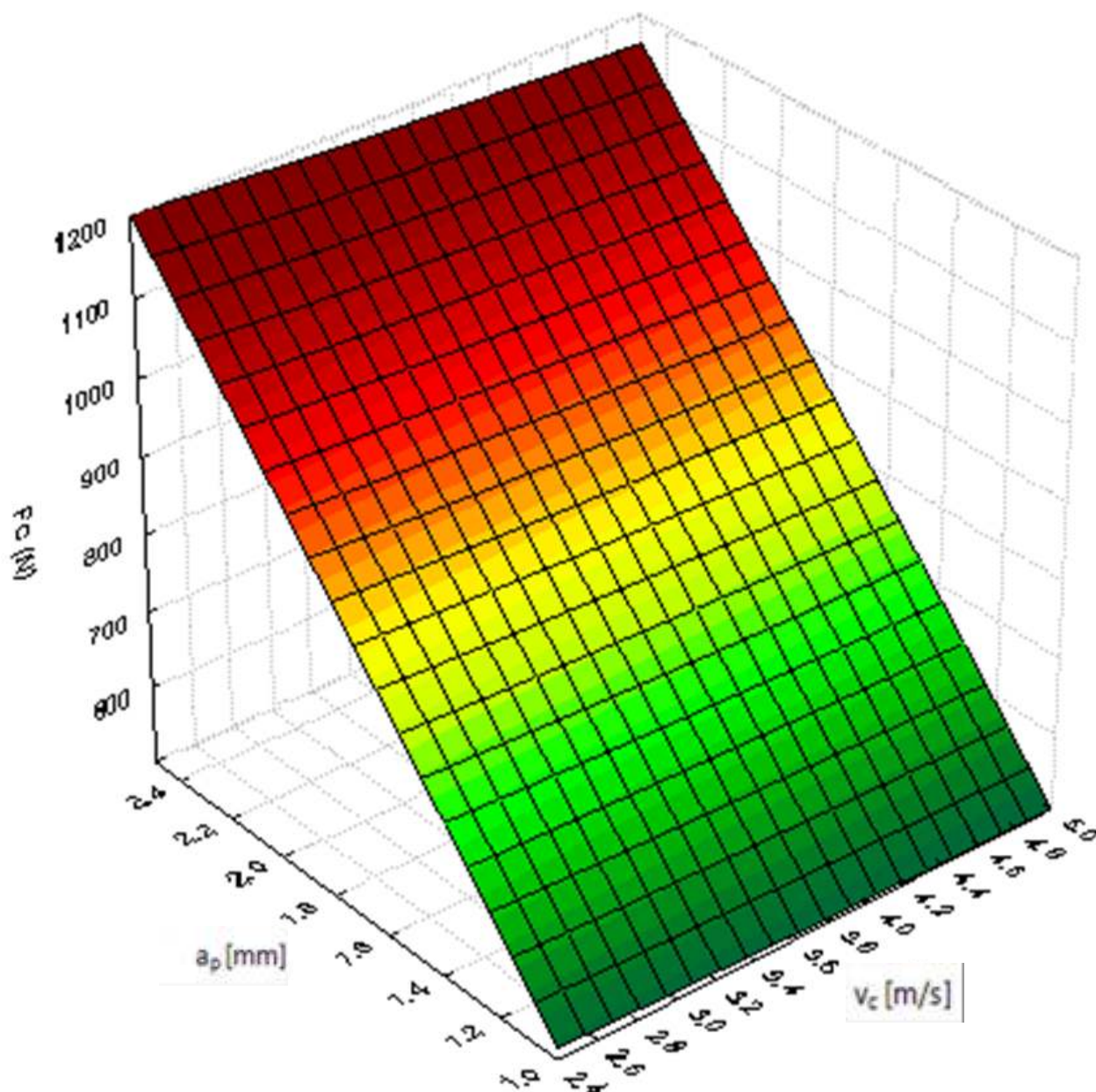
Tablica 4.14. Analiza varijanci za eksponencijalni model

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat	F-vrijednost	Razina adekvatnosti
Model	10103824	4	2525956	20003,08	0,000000
Ostatak	1010	8	126		
Ukupno	10104834	12			

Tablica 4.15 prikazuje vrijednosti dobivene eksperimentom, modelom i njihove razlike

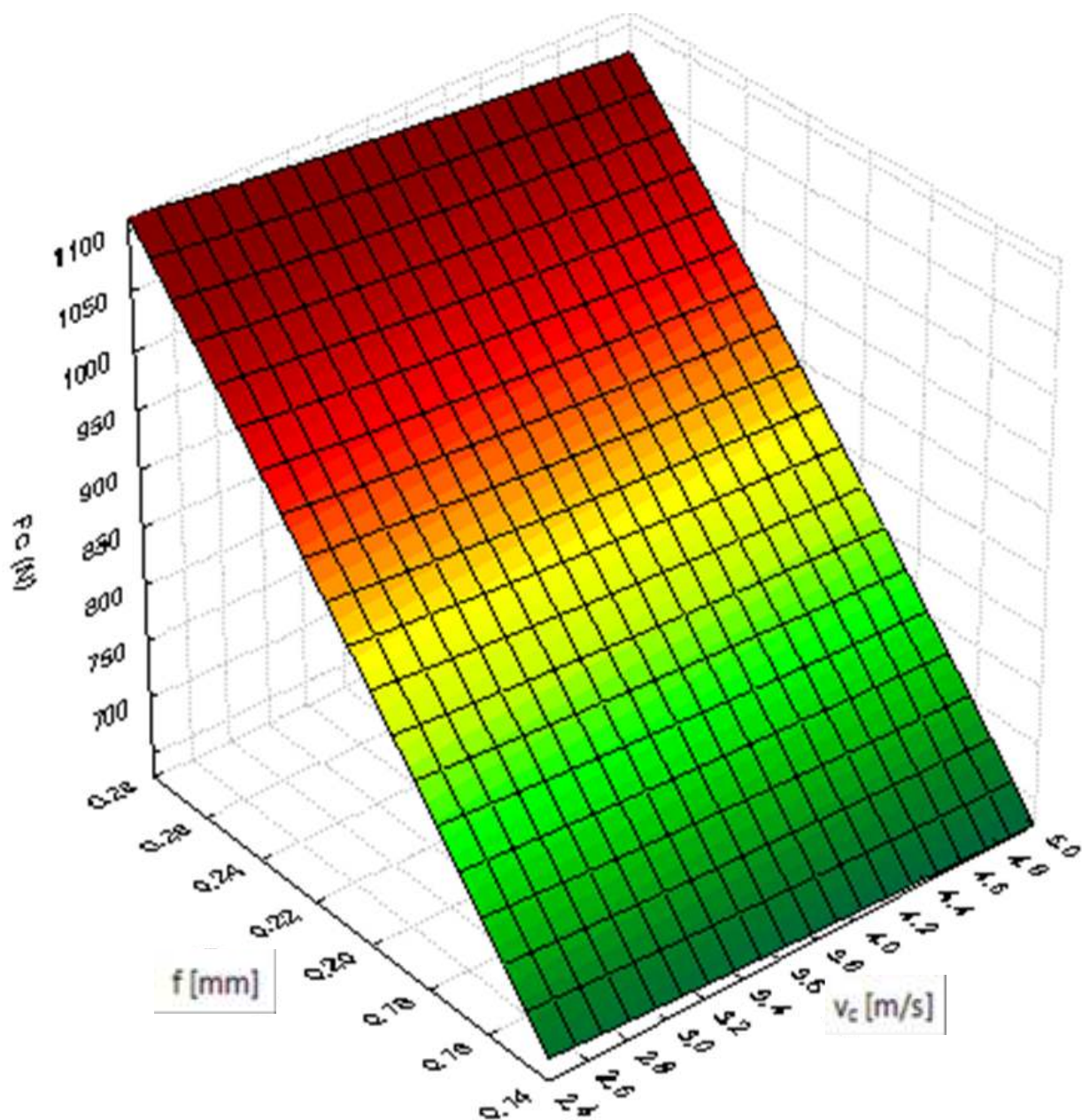
Tablica 4.15. Eksperimentalni rezultati, rezultati modela i ostatak

	Eksperiment	Model	Ostatak
1	404,000	389,394	14,6061
2	395,000	377,242	17,7579
3	892,000	895,603	-3,6034
4	874,000	867,654	6,3455
5	667,000	667,891	-0,8914
6	647,000	647,049	-0,0486
7	1543,000	1536,146	6,8540
8	1492,000	1488,208	3,7922
9	830,000	839,002	-9,0019
10	826,000	839,002	-13,0019
11	835,000	839,002	-4,0019
12	829,000	839,002	-10,0019



Slika 4.16. dijagram ovisnosti  $F_c = f(a, v_c)$  za  $f = 0,2$  m/s

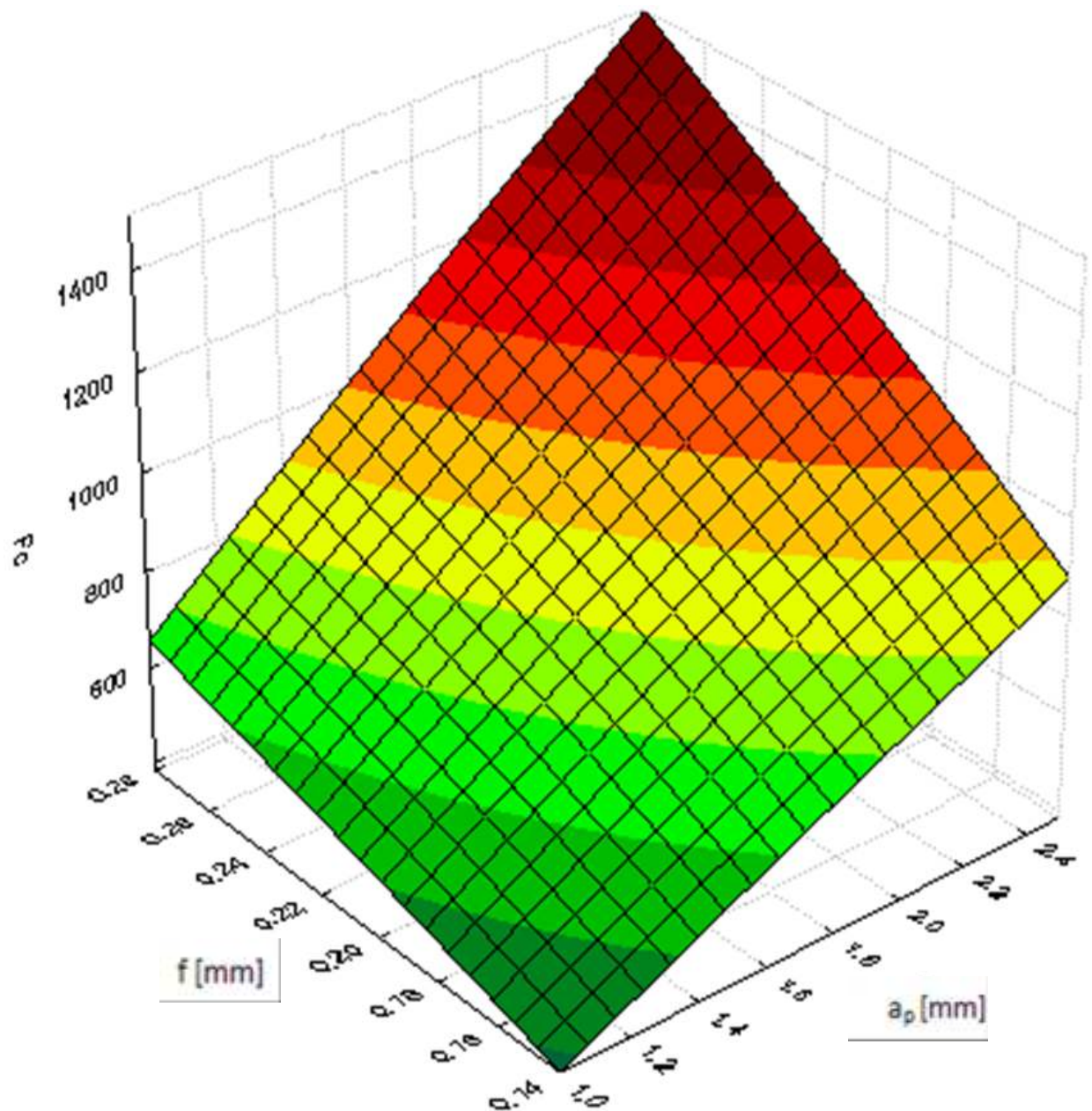
Na slici 4.16 vidljivo je da je glavna sila rezanja najveća pri maksimalnoj dubini rezanja i pri minimalnoj glavnoj brzini rezanja. Odnosno da je minimalna pri minimalnoj dubini rezanja i pri maksimalnoj glavnoj brzini rezanja. Također je vidljivo da do značajne promjene glavne sile rezanja dolazi promjenom dubine obrade. Promjena glavne sile rezanja ne utječe značajno na promjenu glavne sile rezanja odnosno povećanjem glavne brzine rezanja dolazi do malog smanjenja glavne sile rezanja.



Slika 4.17. dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, v_c)$  za  $a = 1,75$  mm

Na slici 4.17 vidljivo je da je glavna sila rezanja najveća pri maksimalnom posmaku i pri minimalnoj sili rezanja. Dok se najmanja glavna sila rezanja može očekivati kod maksimalne brzine rezanja i minimalnog posmaka. Također je vidljivo da do značajne promjene glavne sile rezanja dolazi promjenom posmaka dok promjena glavne sile rezanja ne utječe na značajnu promjenu glavna sile rezanja.





Slika 4.18. dijagram ovisnosti  $F_c = f(a, f)$  za  $vc = 3,7$

Na slici 4.18 vidljivo je da je najveća glavna sila rezanja pri maksimalnom posmaku i pri maksimalnoj dubini rezanja. Također je vidljivo da na promjenu glavne sile rezanja značajnije utječe dubina obrade nego posmak.

### 4.3.2.2 Model drugog stupnja

Prije izvođenja pokusa potrebno je napraviti tablicu razine variranja faktora i matricu plana pokusa.

Tablica 4.16. Razine variranja faktora i pripadajući kodovi za manji raspon brzina rezanja

Faktori	$f_{i,min}$	$f_{i,sr}$	$f_{i,max}$
$v_c$ [m/s]	2,4	3,7	5
$a_p$ [mm]	1	1,75	2,5
$f$ [mm]	0,14	0,2	0,28
Kod faktora	-1	0	1

Tablica 4.17. Nepotpuna matrica plana pokusa " $2^3 + 2 \cdot 3 + 6$ "

Redni broj mjerenja	Ulazni faktori			Izlazni faktor
	$v$ [m/s]	$a$ [mm]	$f$ [mm]	$F_c$ [N]
1	2,4	1	0,14	404
2	5	1	0,14	395
3	2,4	2,5	0,14	892
4	5	2,5	0,14	874
5	2,4	1	0,28	667
6	5	1	0,28	647
7	2,4	2,5	0,28	1543
8	5	2,5	0,28	1492
9	3,7	1,75	0,2	830
10	3,7	1,75	0,2	826
11	3,7	1,75	0,2	835
12	3,7	1,75	0,2	829
13	2,4	1,75	0,2	855
14	5	1,75	0,2	815



Rezultati obrađenih podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu statistica V6.0 prikazani su u tablici 4.18. Pošto razina signifikantnosti nije niti za jedan parametar prešla razinu signifikantnosti od 0.05 zaključuje se da su svi članovi modela signifikantni.

Tablica 4.18. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja  $F_c$  kod velikog raspona brzina rezanja  $v_c$

	Procjena	Standardna greška	t - vrijednost	Razina signifikantnosti
C	79,912	6,09475	13,11162	0
p2	88,464	6,12922	14,43316	0
p12	-5,946	0,91198	-6,51964	0,000067
p23	1816,835	18,57129	97,83032	0

Koeficijent korelacije kod modela drugog stupnja je:  $r=0,99984129$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost glavne sile rezanja  $F_c$ :

$$F_c = C + p_2 \cdot a + p_{12} \cdot v \cdot a + p_{23} \cdot a \cdot f$$

$$F_c = 79,912 + 88,464 \cdot a + (-5,946) \cdot v \cdot a + 1816,835 \cdot a \cdot f$$

Test adekvatnosti modela proveden je pomoću analize varijance (ANOVA) i kako je prikazano na tablici 4.19 vidi se da je model adekvatan.

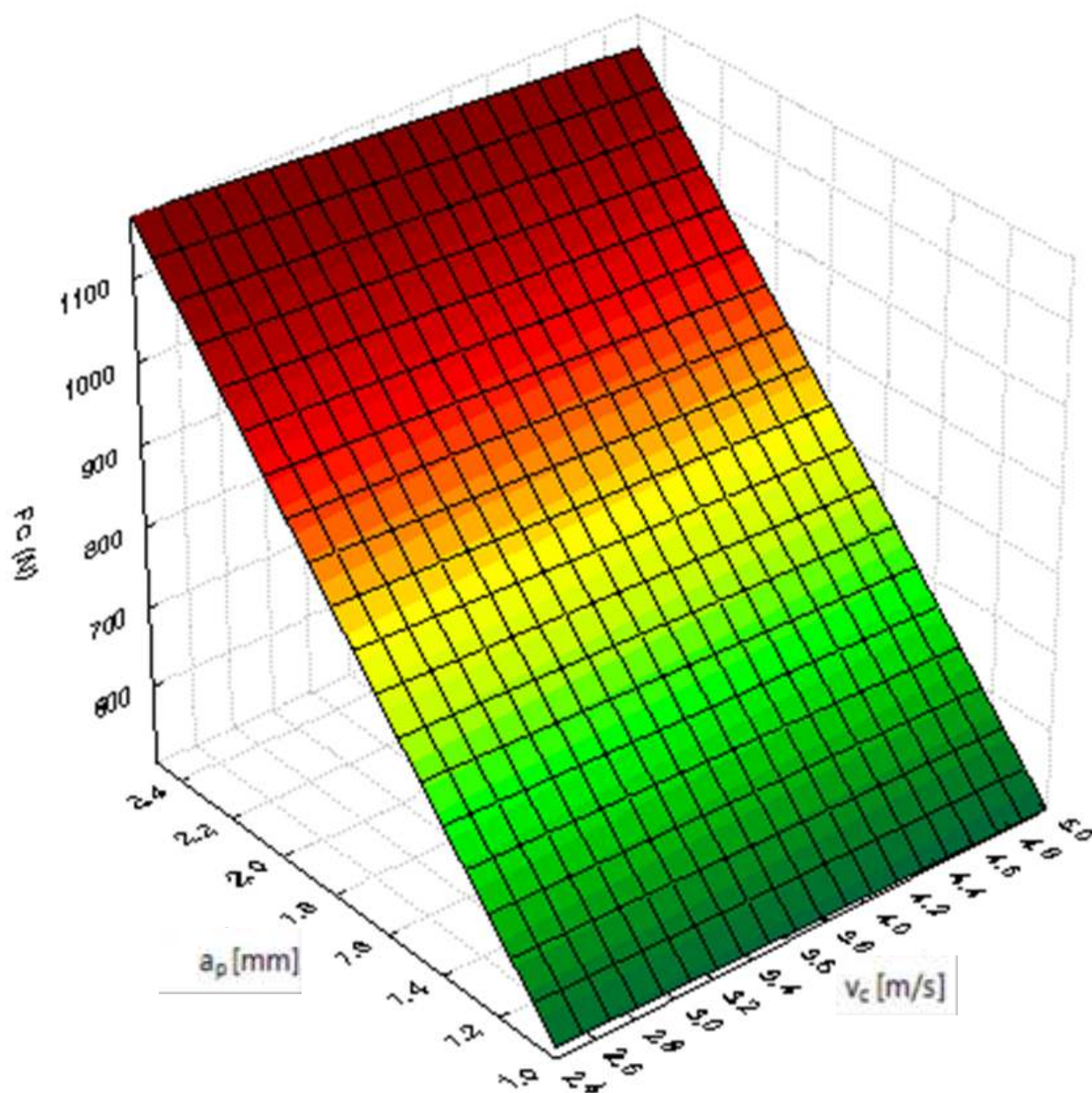
Tablica 4.19. Analiza varijanci za model 2. stupnja

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat	F-vrijednost	Razina adekvatnosti
Model	11499590	4	2874898	58229,99	0
Ostatak	494	10	49		
Ukupno	1150084	14			

Tablica 4.20 prikazuje vrijednosti dobivene eksperimentom, modelom i ostatak odnosno razliku između vrijednosti dobivenih modelom i eksperimentom.

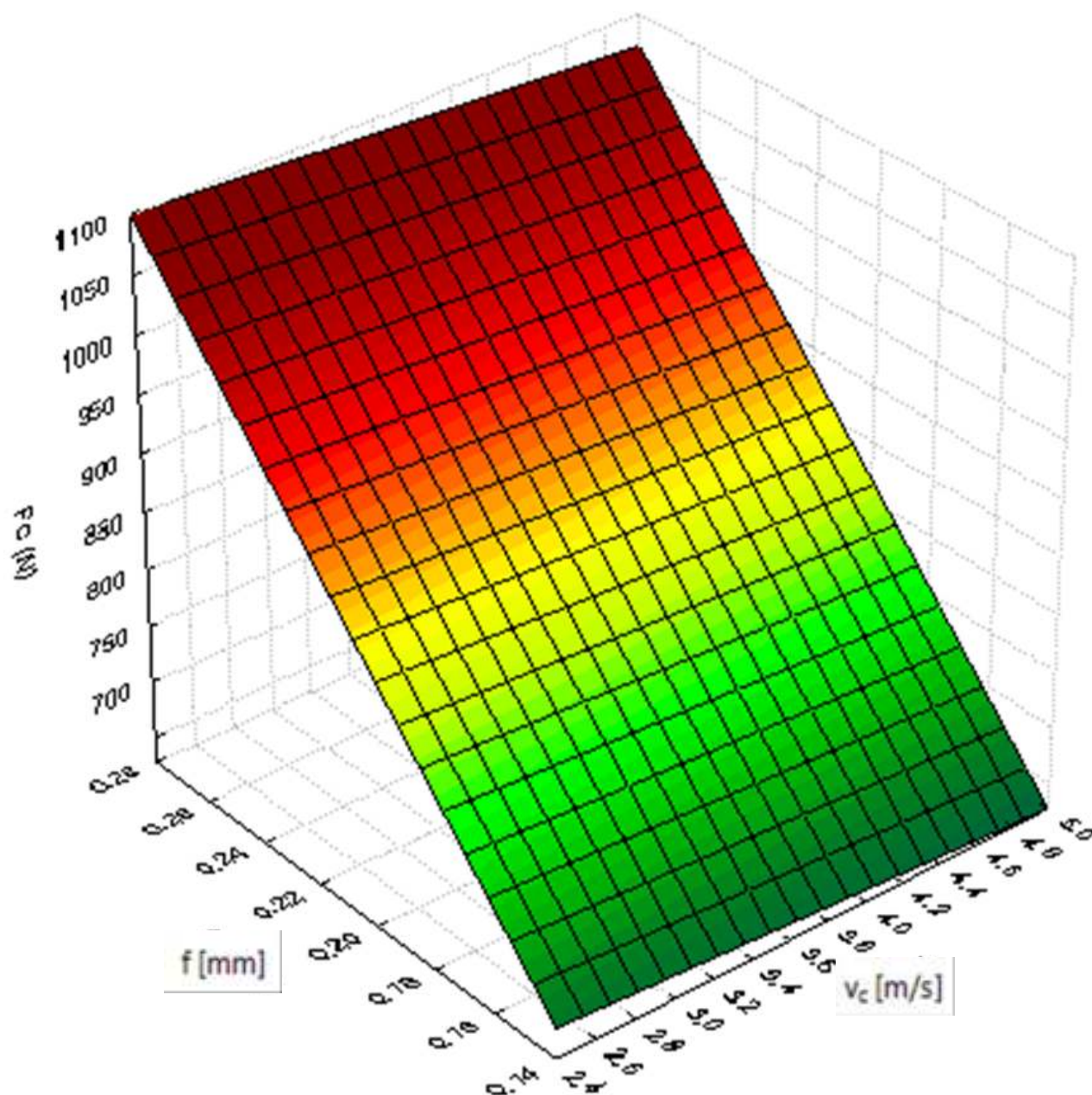
Tablica 4.20. Eksperimentalni rezultati, rezultati modela i ostatak

	Stvarna vrijednost	Procjenjena vrijednost	Rezidualna odstupanja
1	404	408,463	-4,463
2	395	393,004	1,996
3	892	901,290	-9,290
4	874	862,642	11,358
5	667	662,820	4,180
6	647	647,361	-0,361
7	1543	1537,182	5,818
8	1492	1498,534	-6,534
9	830	832,117	-2,117
10	826	832,117	-6,117
11	835	832,117	2,883
12	829	832,117	-3,117
13	855	845,644	9,356
14	815	818,591	-3,591



Slika 4.19 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(a, v_c)$  za  $f = 0,2$  mm/s

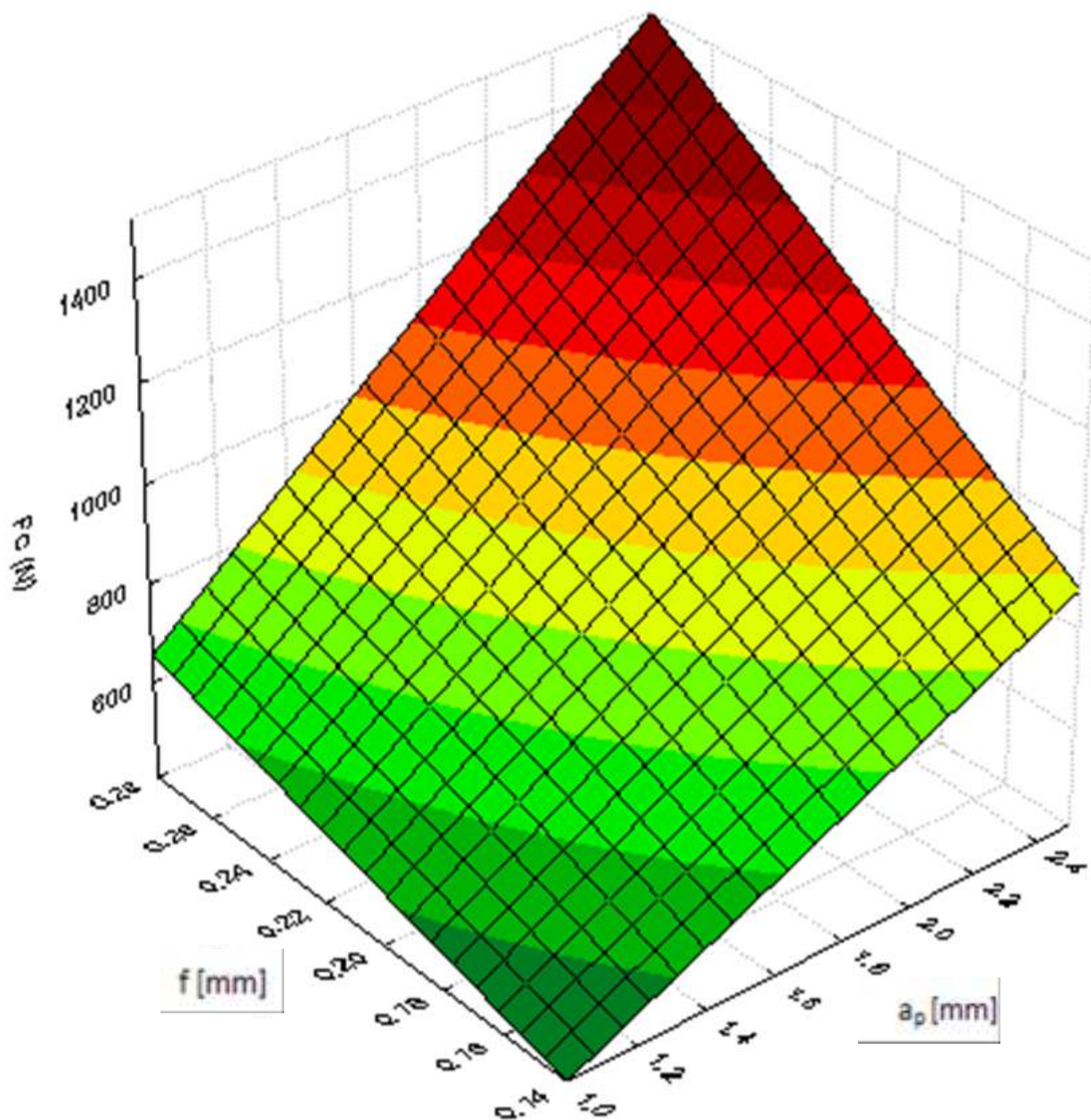
Na slici 4.19 vidljivo je da je glavna sila rezanja najveća pri maksimalnoj dubini rezanja i pri minimalnoj glavnoj brzini rezanja. Odnosno da je minimalna pri minimalnoj dubini rezanja i pri maksimalnoj glavnoj brzini rezanja. Isto tako vidljivo je da promjena dubine rezanja značajno utječe na promjenu glavne sile rezanja dok povećanjem brzine rezanja dolazi do ne značajnog smanjenja glavne sile rezanja.



Slika 4.20 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, v_c)$  za  $a = 1,75$  mm

Na slici 4.20 vidljivo je da je glavna sila rezanja najveća pri maksimalnom posmaku i pri minimalnoj sili rezanja. Dok se najmanja glavna sila rezanja može očekivati kod maksimalne brzine rezanja i minimalnog posmaka. Glavna sila rezanja, kao što se može primjetiti na slici, značajno se mijenja promjenom posmaka dok promjena brzine rezanja vrlo malo utječe na promjenu glavne sile rezanja.





Slika 4.21 Dijagram ovisnosti  $F_c = f(f, a)$  za  $v_c = 3,7$  m/s

Na slici 4.21 vidljivo je da je najveća glavna sila rezanja pri maksimalnom posmaku i pri maksimalnoj dubini rezanja. Također je vidljivo da promjena dubine rezanja najviše utješe na promjenu glavne sile rezanja.

### 4.3.2.3 Analiza

Iz tablica analiza varijanci za eksponencijalni model i za model drugog stupnja vidljivo je da su oba modela adekvatna.

Kao i kod rezultata za veći raspon brzina rezanja ( $v_c$ ), obrađenih u poglavlju 4.3.1, gdje je model drugog stupnja bolje opisao eksperiment tako je i prema rezultatima za manji raspon brzina model drugog stupnja bolje opisao eksperiment od eksponencijalnog modela. To je vidljivo iz usporedbe sljedećih veličina:

1. Koeficijenta korelacije

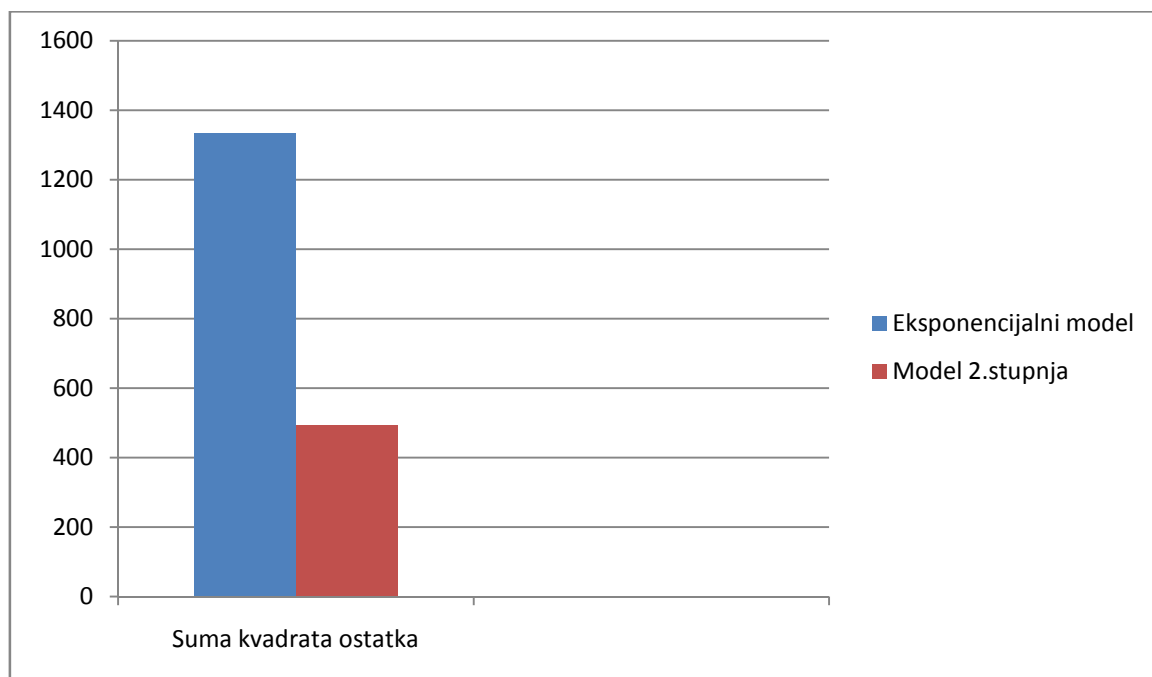
$$r_{\text{modela 2.stupnja}} > r_{\text{eksponencijalni model}}$$

$$0,99984129 > 0,99951524$$

2. Sume kvadrata ostatka

$$SK_{\text{eksponencijalni model}} > SK_{\text{model 2.stupnja}}$$

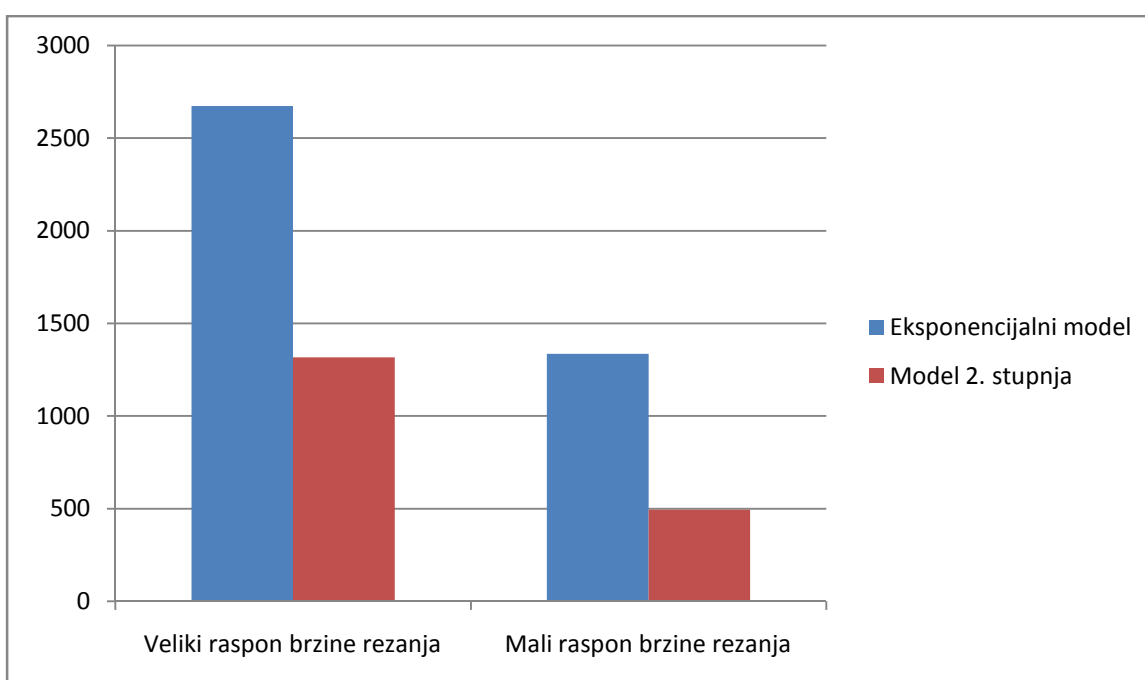
$$1335 > 494$$



Slika 4.22. Grafički prikaz vrijednosti sume kvadrata ostatka za eksponencijalni model. i model 2. stupnja kod malih raspona brzine rezanja  $v_c$

Iz obrađenih rezultata za jedan i drugi matematički model može se uočiti da su oba dva modela adekvatna. Oba dva modela imaju vrlo visoku korelaciju i malu međusobnu razliku korelacije te malu vrijednost  $SK_0$ . Također pokazalo se da kvadratni član polinoma nije signifikantan pa su praktično oba dva modela istog stupnja. Iz toga slijedi da je praktično sve jedno koji model će se upotrijebiti.

### 4.3.3 Analiza modela za mali i veliki raspon brzina



Slika 4.23. Usporedba vrijednosti eksponencijalnog modela i modela 2. stupnja kod malih i velikih raspona brzina rezanja

Sa slike 4.23 vidljivo je da eksponencijalni model bolje opisuje eksperiment kod manjeg raspona brzina rezanja nego kod većeg raspona glavne brzine rezanja. Međutim niti kod manjeg niti kod većeg raspona glavne brzine rezanja eksponencijalni model se nije pokazao boljim od modela 2. stupnja.

## Zaključak

U tehnologiji obrade odvajanjem čestica najčešće se kao matematički model koristi model prvog stupnja odnosno eksponencijalni model. Dok se, vrlo rijetko, kad se očekuje ekstrem koristi matematički model drugog stupnja.

Izvođenjem eksperimenta u kojem se mjerila glavna sila rezanja ( $F_c$ ) u zavisnosti o brzini rezanja ( $v_c$ ), posmaku ( $f$ ) i dubini obrade ( $a_p$ ) došlo se do zapažanja da bi možda kod većeg raspona glavne brzine rezanja model drugog stupnja bolje opisao eksperiment od matematičkog modela prvog stupnja. Međutim pokazalo se da su oba dva modela adekvatna. Iako model drugog stupnja ima signifikantan kvadratni član, eksponencijalni model također dobro opisuje eksperiment, a to se vidi iz vrlo visokog koeficijent korelacije i malih vrijednosti srednjih kvadrata ostatka SKo (slika 4.15).

Iz obrađenih rezultata kod manjeg raspona glavne brzine rezanja vidljivo je da su oba dva modela adekvatna. Vrijednosti koeficijenta korelacije oba dva modela su vrlo visoke i vrijednosti srednjih kvadrata ostatka kod oba dva modela su znatno manje nego kod većeg raspona glavne brzine rezanja (slika 4.22). Isto tako kad se usporede vrijednost koeficijenata korelacije oba dva modela vidljivo je da je razlika znatno manja nego kod većeg raspona glavne brzine rezanja. Također je vidljivo da kvadratni član kod matematičkog modela drugog stupnja nije signifikantan pa su praktično oba dva modela istog stupnja iz toga slijedi da je svejedno koji model ćemo koristiti kod manjeg raspona glavne brzine rezanja.

Kao što je već rećeno, oba dva modela su adekvatna i kod malog i velikog raspona glavne brzine rezanja i oba dva modela možemo upotrijebiti. Međutim model drugog stupnja je precizniji, ali je skuplji i uzima nam više vremena. Zbog toga korisnik sam mora odlučiti da li mu je od velike važnosti ta mala razlika u točnosti zbog koje će morati uložiti dodatno vrijeme i novac.



## Literatura

- [1] [www.fsb.hr/kas](http://www.fsb.hr/kas)
- [2] Schneider, George: Cutting tool application, GMRS Associates, 2002
- [3] Ekinović, S.: Obrada rezanjem, Dom štampe, Zenica, 2001
- [4] Škorić, S.: Istraživanje pogodnosti obrade ortogonalnim okruglim glodanjem, Doktorska disertacija, FSB, 2002
- [5] ASM- Metal handbook, Vol 16: ASM international, 1997
- [6] Machinery Handbook, Industrial press, New York, 2004
- [7] [www.secotools.com](http://www.secotools.com), SECO katalog
- [8] Šavar, Š.: Obrada odvajanjem čestica, I dio, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1977
- [9] [www.aluminium.matter.org.uk](http://www.aluminium.matter.org.uk)
- [10] Wuhib, Y.: Optimalni režim rada kod obrade teškoobradivih materijala, mag rad, FSB, Zagreb 1989
- [11] Stanić, J.: Teorija obrade metala, I dio, Mašinski fakultet, Beograd 1986
- [12] Škorić, S.: Modeliranje funkcija obradivosti (predavanja), FSB, Zagreb 2007
- [13] [www.mmu.ic.polyu.edu.hk/metal cutting processes](http://www.mmu.ic.polyu.edu.hk/metal%20cutting%20processes)
- [14] Degner, W.: spanende formung, Verlag Technik, Berlin 1987
- [15] Šavar, Š.: Obrada odvajanjem čestica, II dio, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb 1977
- [16] [www.trens.sk](http://www.trens.sk)
- [17] [www.kistler.com](http://www.kistler.com)