

Suvremeni trendovi u obradi tokarenjem

Stepić, Alen

Undergraduate thesis / Završni rad

2012

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:720840>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-15**

Repository / Repozitorij:

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



1. UVOD

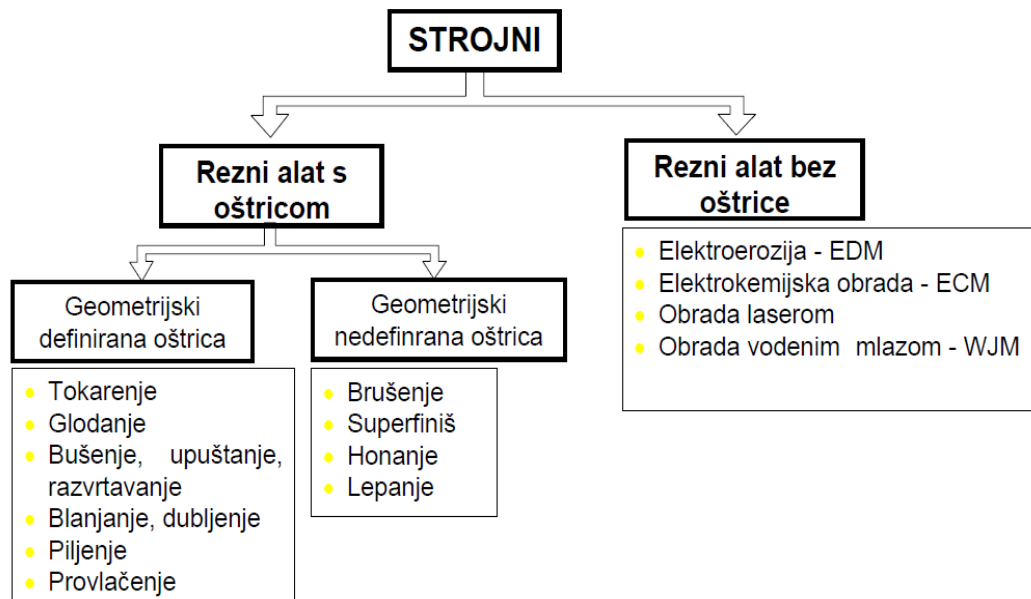
Razvoj čovječanstva je kontinuirano praćen povećanjem ukupnog znanja koje se različitim tehnikama i metodama pretvara u vrijednost, tako da je tijekom razvoja čovječanstvo podizalo razinu kvalitete i povećavalo količinu svojih proizvoda i usluga. Razvoj tehnologije je ubrzan i potrebno je imati mnogo više znanja nego što je to bio slučaj u prošlosti.

U području tehnologije obrade odvajanjem čestica poboljšanja se vrše da bi se povećala produktivnost i kvaliteta, a time i profit poduzeća koja primjenjuju takve tehnologije. Tehnologija obrade odvajanjem čestica je tehnologija u kojoj se određenom materijalu, tj. pripremu odvajaju određeni sloj materijala i tako dobiva obradak s drugačijim dimenzijama i izgledom.

Poboljšanja konvencionalnih postupaka su u obradi materijala povišene tvrdoće, visokobrzinskoj i suhoj obradi. Poboljšanja su u vidu veće brzine i točnosti obrade te smanjenju pomoćnih i dostavnih vremena.

Podjela postupaka obrade odvajanjem:

Daljnja podjela je prema slici 1.1.



Slika 1.1. Podjela postupaka obrade odvajanjem čestica [1].

2. TOKARENJE

Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) pretežno rotacijskih (simetričnih i nesimetričnih, okruglih i neokruglih) površina, ali je isto tako moguća obrada ravnih površina, pa i nekih drugih oblika ako su slični rotacijskim tijelima. Izvodi se na alatnim strojevima, tokarilicama [1].

2.1. Podjela tokarenja

Tokarenje se može podijeliti na osnovi više kriterija podjele [1]:

Podjela tokarenja prema proizvedenoj kvaliteti obrađene površine:

- a) grubo
- b) završno (čisto)
- c) fino tokarenje

Podjela tokarenja prema kinematici postupka:

- a) uzdužno
- b) poprečno

Podjela tokarenja prema položaju obrađene površine:

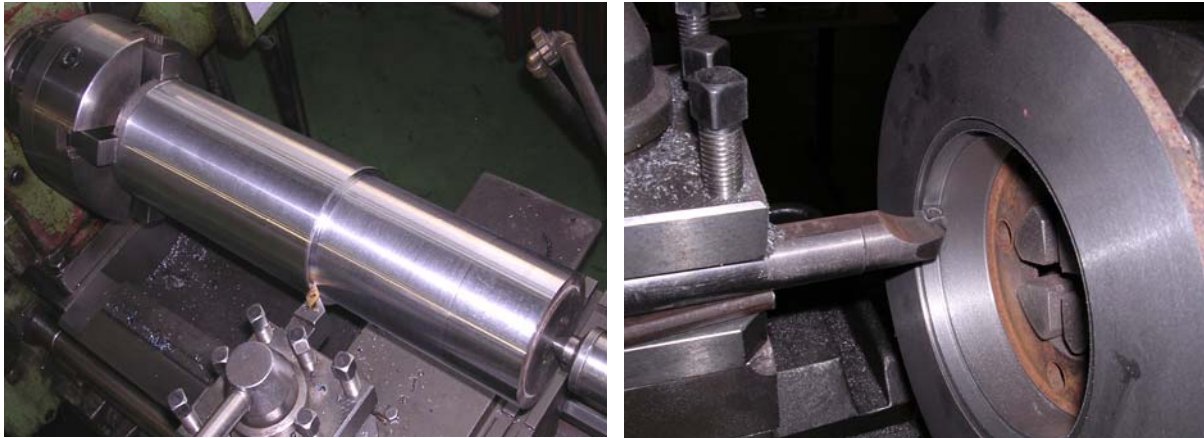
- a) vanjsko
- b) unutarnje

Podjela tokarenja prema obliku obrađene površine:

- a) okruglo
- b) plansko (poprečno)
- c) konusno
- d) profilno
- e) oblikovano (kopirno)
- f) tokarenje navoja
- g) neokruglo

Prikaz tokarenja prema smjeru posmičnog kretanja u odnosu prema osi obrađivanog predmeta [1]:

Uzdužno tokarenje (slika 2.1.1.) – Može biti vanjsko ili unutarnje. Posmično kretanje je paralelno s osi rotacije obratka.



Slika 2.1.1. Uzdužno tokarenje [1].

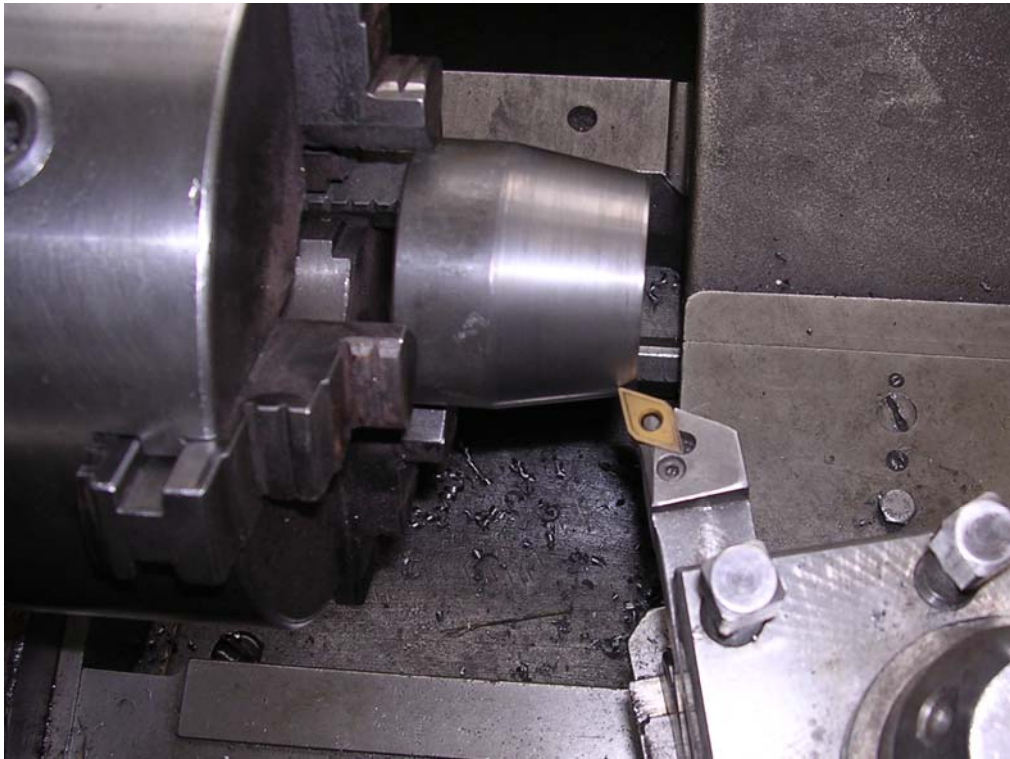
Poprečno tokarenje (slika 2.1.2.) – Također može biti vanjsko ili unutarnje. Posmično kretanje je radialno i okomito na os rotacije obratka.



Slika 2.1.2. Poprečno tokarenje [1].

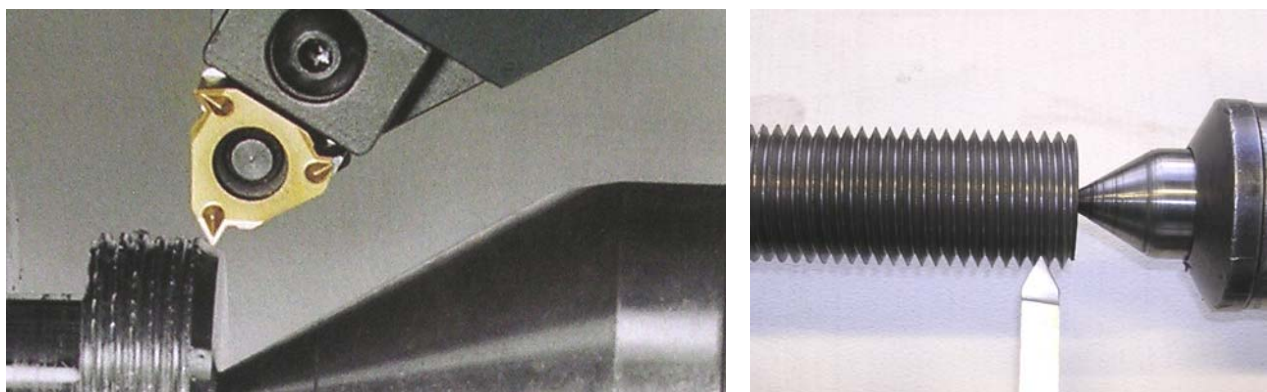
Prema obliku obrađivane (elementarne) površine obrađivanog predmeta tokarenje može biti:

Konusno tokarenje (slika 2.1.3.) – Može biti vanjsko i unutarnje. Posmično kretanje je koso prema osi obrađivanog predmeta.



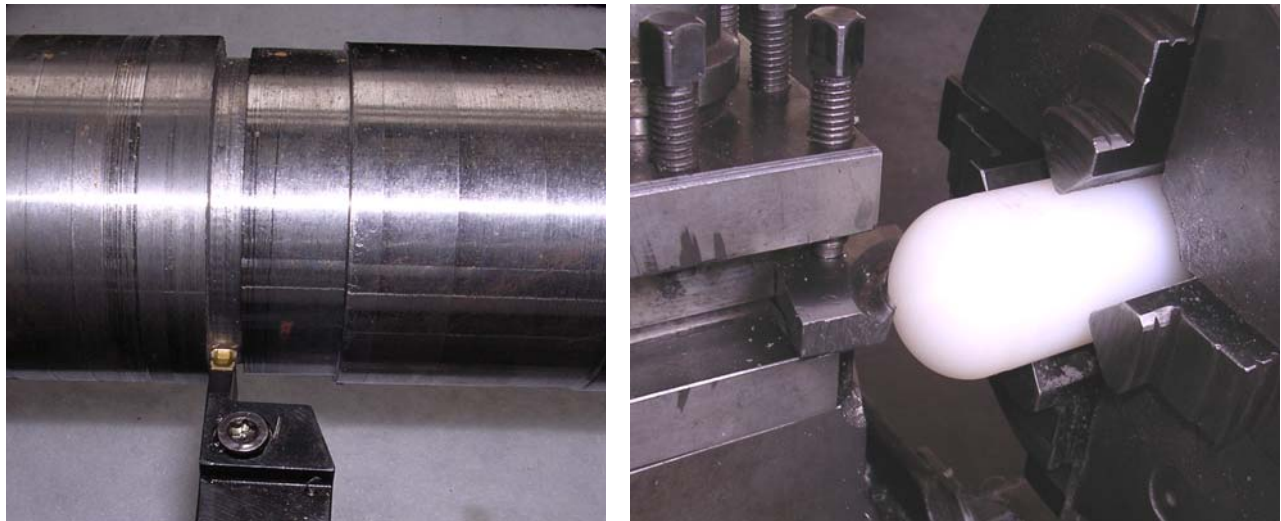
Slika 2.1.3. Konusno tokarenje [1].

Tokarenje navoja (slika 2.1.4.), i vanjskih i unutarnjih, i to na svim slučajevima cilindričnog i konusnog tokarenja. U tom slučaju je veličina posmaka f jednaka koraku navoja, odnosno u točno je određenom konstantnom odnosu prema učestalosti vrtnje predmeta n , dok je dubina rezanja jednaka dubini navoja.



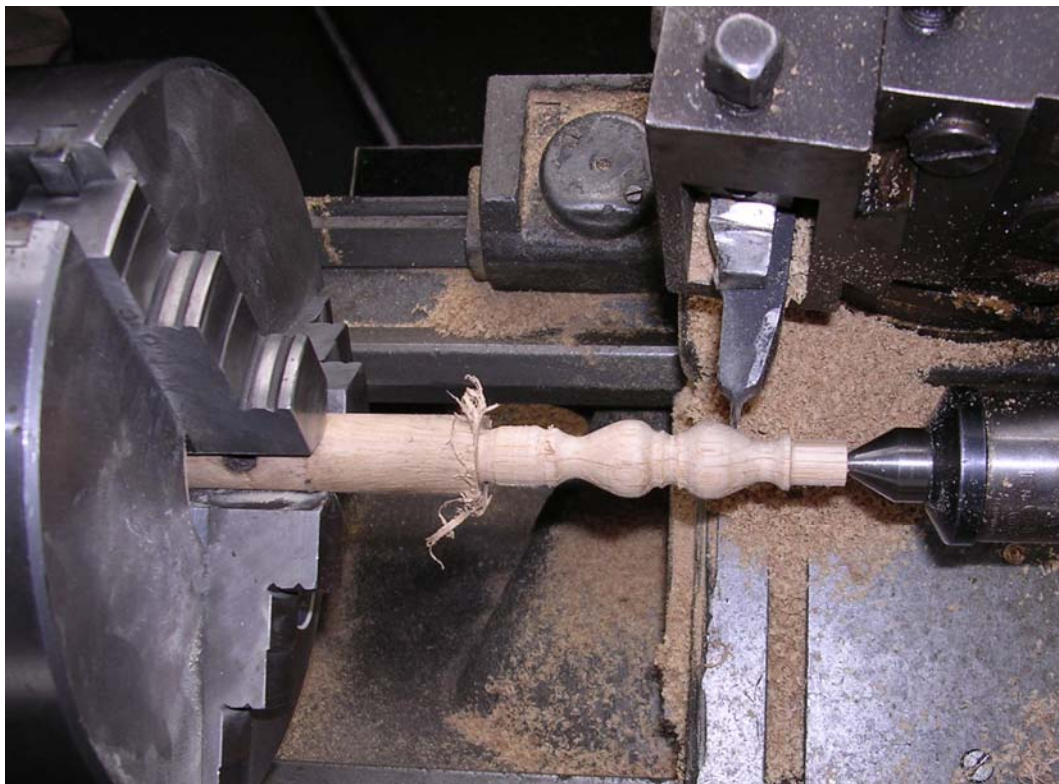
Slika 2.1.4. Tokarenje navoja [1].

Profilno tokarenje (slika 2.1.5.). Pri toj vrsti tokarenja imamo dostavno kretanje i određeno posmično kretanje za neku dubinu rezanja, a alat mora imati oblik traženog profila.



Slika 2.1.5. Profilno tokarenje [1].

Oblikovno (kopirno) tokarenje (slika 2.1.6.), pri kojem možemo dobiti svaki zatraženi rotacijski oblik. Kretanje tokarskog noža sastoji se od kombiniranog uzdužnog posmaka i poprečnog posmaka. Ako imamo kružno posmično kretanje, onda je to tokarenje kugle.



Slika 2.1.6. Oblikovno (kopirno) tokarenje [1].

Neokruglo tokarenje (slika 2.1.7.) nastaje kad alat izvodi dostavno kretanje u radijalnom smjeru, ali u točno određenom odnosu s brojem okretaja obrađivanog predmeta.



Slika 2.1.7. Neokruglo tokarenje [1].

2.2. Kinematika i dinamika rezanja kod tokarenja

Za ostvarivanje procesa rezanja neophodno je relativno kretanje alata u odnosu na obradak. Za najveći broj postupaka obrade rezanjem ovo relativno kretanje je složeno kretanje i ostvaruje se kombinacijom glavnog kretanja i posmičnog kretanja. Kinematika rezanja kod tokarenja se može opisati kao jedno pravolinijsko (ili krivolinijsko) posmično i jedno rotacijsko glavno kretanje.

Glavno gibanje (G):

Glavno gibanje se izvodi brzinom v_c i njome se obavlja odvajanje čestica, pri čemu se troši najveći dio snage na alatnom stroju. Glavno gibanje je kružno kontinuirano i izvodi ga obradak.

Pomoćna gibanja

Posmično gibanje (P):

Posmično gibanje je pravolinijsko, translacijsko i kontinuirano u ravnini koja je okomita na pravac brzine glavnog gibanja i izvodi ga alat. Izvodi se brzinom v_f i služi za održavanje kontakta između alata i obratka. Os okretanja glavnog gibanja zadržava svoj položaj

prema obratku bez obzira na smjer brzine posmičnog gibanja i naziva se C os. Posmično gibanje zahtjeva malu količinu energije. Pravac posmičnog gibanja je paralelan s osi obratka kod uzdužnog tokarenja, dok je kod poprečnog tokarenja okomit.

Dostavno gibanje (D):

Sva dostavna gibanja potrebna za prilaz alata ka obratku, određivanje dubine rezanja i postizanje nekog osobitog oblika obavlja uvijek samo alat i ona su sva pravolinijska.

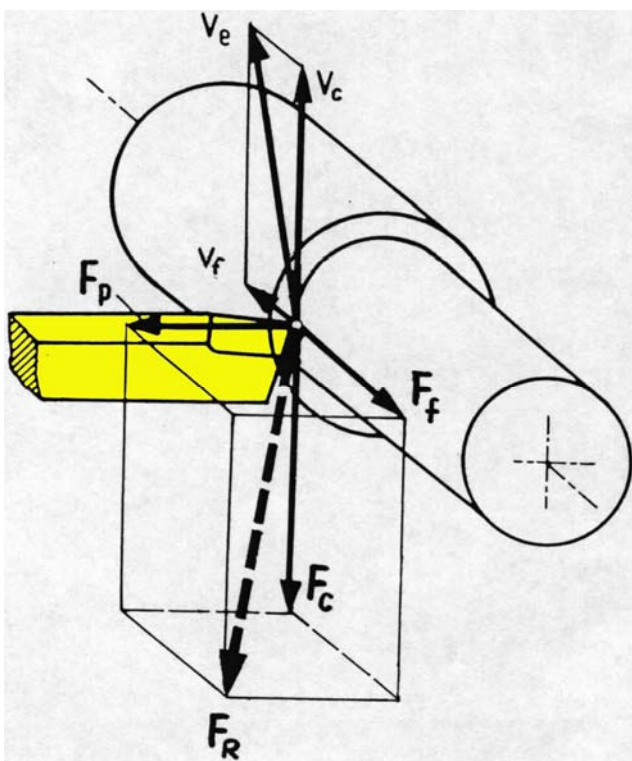
U ovom slučaju obradak vrši glavno okretno kretanje obodnom brzinom \vec{v}_C , a alat posmično pravolinijsko kretanje brzinom \vec{v}_f . Iz toga slijedi da je ukupna brzina rezanja:

$$\vec{v}_e = \vec{v}_C + \vec{v}_f \quad (1)$$

Rezultirajuće gibanje nastaje kao vektorski zbroj glavnog i posmičnog gibanja. Pravac rezultirajućeg gibanja odabrane točke na reznoj ošttrici ima otklon od pravca glavnog gibanja za kut η koji se računa kao:

$$\eta = \arctan \frac{v_f}{v_c} \quad (2)$$

Rezultirajuća brzina rezanja v je trenutna brzina rezultirajućeg gibanja u odabranoj točki na reznoj ošttrici.



F_R – rezultatna sila rezanja

F_C – glavna sila rezanja

F_f – posmična sila rezanja

F_p – natražna sila rezanja

Slika 2.2.3. Prikaz tokarskog noža i obratka u gibanju i pripadajuće sile [1].

2.3. Alati kod tokarenja

Alat za tokarenje je tokarski nož. Tokarski nož ima definiranu geometriju rezne oštrice, s jednom glavnim reznim oštricom. Postoji više vrsta reznih oštrica, različite geometrije i materijala ovisno o vrsti tokarenja, materijalu obratka i parametrima obrade.

2.3.1. Geometrija tokarskog noža

Osnovni element svih reznih alata s oštricom je rezni klin [1].

Rezni alat (tokarski nož) se sastoji od dva osnovna dijela:

- a) reznog dijela - osigurava proces rezanja
- b) prihvatnog dijela ili drške - služi za prihvat alata na alatni stroj i prijenos sila rezanja

Rezni dio alata definiran je s tri površine:

- a) A_V - prednja površina; površina koja je u kontaktu s odlazećom česticom (površina po kojoj klizi odvojena čestica)
- b) A_α - stražnja (slobodna) površina; površina koja je u nepoželjnom kontaktu s površinom obrade
- c) A'_α - pomoćna stražnja površina

Glavna oštrica - S je presječna površina A_V i A_α .

Pomoćna oštrica - S' je presječna površina A_V i A'_α .

Tehnološki sustav ravnina kod noža za tokarenje sastoji se od tri ravnine:

- a) P_r - osnovna ravnina: okomita je na pravac glavnog gibanja u promatranoj točki oštrice i istodobno je okomita ili paralelna na neku površinu ili os alata, a koja je bitna za izradu, oštrenje ili kontrolu alata
- b) P_s - ravnina rezanja: okomita je na P_r i paralelna s tangentom na oštricu u promatranoj točki štrice
- c) P_o - ortogonalna ravnina: okomita je na P_r i P_s

Kutevi alata su neophodni za određivanje položaja rezne oštrice, prednje i stražnje površine reznoga dijela alata.

Kutevi se definiraju pomoću referentnog sustava ravnina.

Tehnološki (geometrijski) kutevi:

a) za orijentaciju prednje i stražnje površine:

definiiraju se pomoću tehnološkog referentnog sustava ravnina

γ – **prednji kut (kut prednje površine)** - mjeri se između prednje površine A_V i osnovne ravnine P_r

β – **kut klina** - mjeri se između prednje i stražnje površine

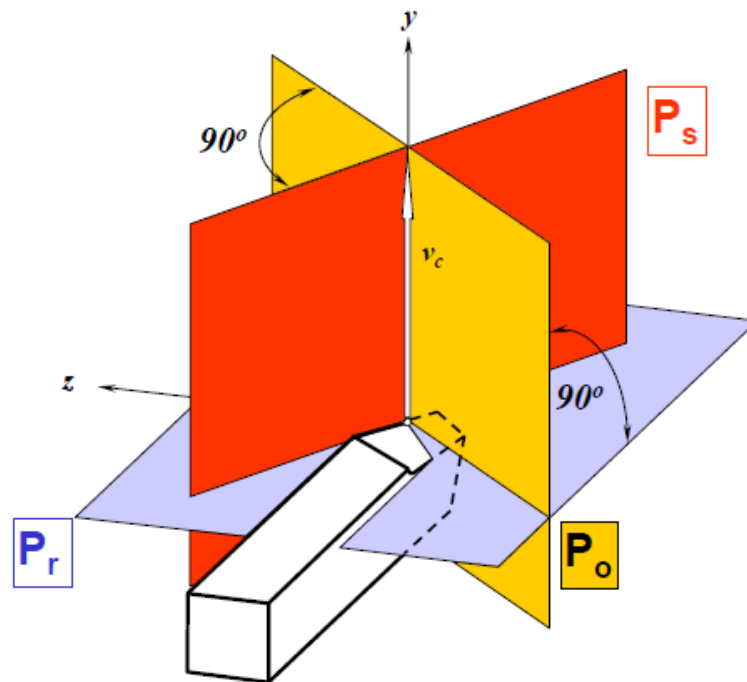
α – **stražnji kut (kut stražnje površine)** - mjeri se između stražnje površine A_α i ravnine rezanja P_s

b) kutevi za orijentaciju rezne oštrice:

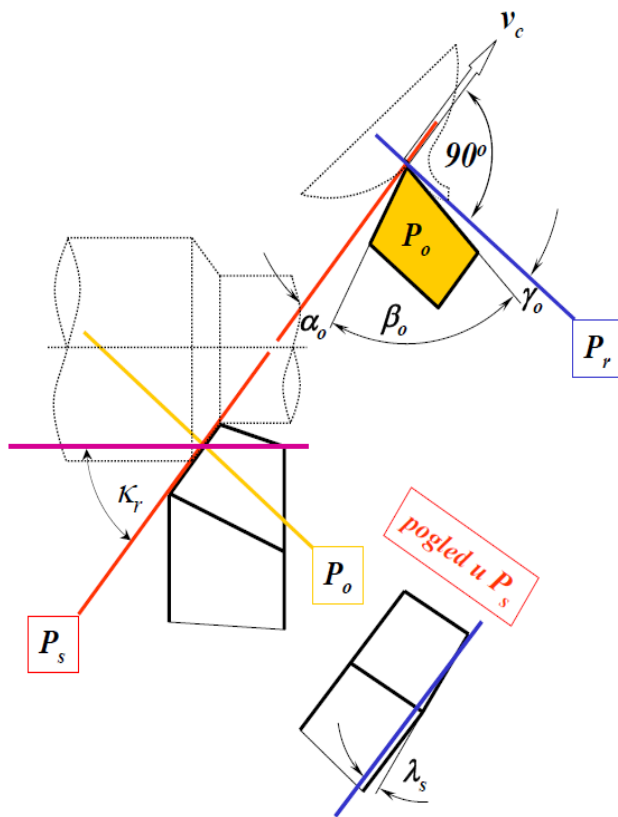
κ_r – **kut namještanja glavne oštrice** – mjeri se između ravnina P_s i P_f a u ravnini P_r

λ_s - **kut nagiba glavne oštrice** – mjeri se između oštrice i ravnine P_r a u ravnini P_s

Bitno je naglasiti da je tokarenje kontinuirani postupak odvajanjem čestica tako da je geometrija alata jako bitna kako bi se formirala isprekidana odvojena čestica ili umetnuti lomač. Dobivanje isprekidane odvojene čestice je jako bitno radi mogućnosti automatizacije procesa.



Slika 2.3.1.1. Tehnološki koordinatni sustav [1].



općenito:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

kut	mjeri se između	u ravnini
napadni kut κ_r	P_s i P_f	P_r
kut vrha alata ϵ_r	P_s i P_s'	P_r
kut nagiba oštrice λ_s	P_r i s	P_s
prednji kut γ_0	A_γ i P_r	P_0
kut klina β_0	A_γ i A_α	P_0
stražnji kut α_0	P_s i A_α	P_0

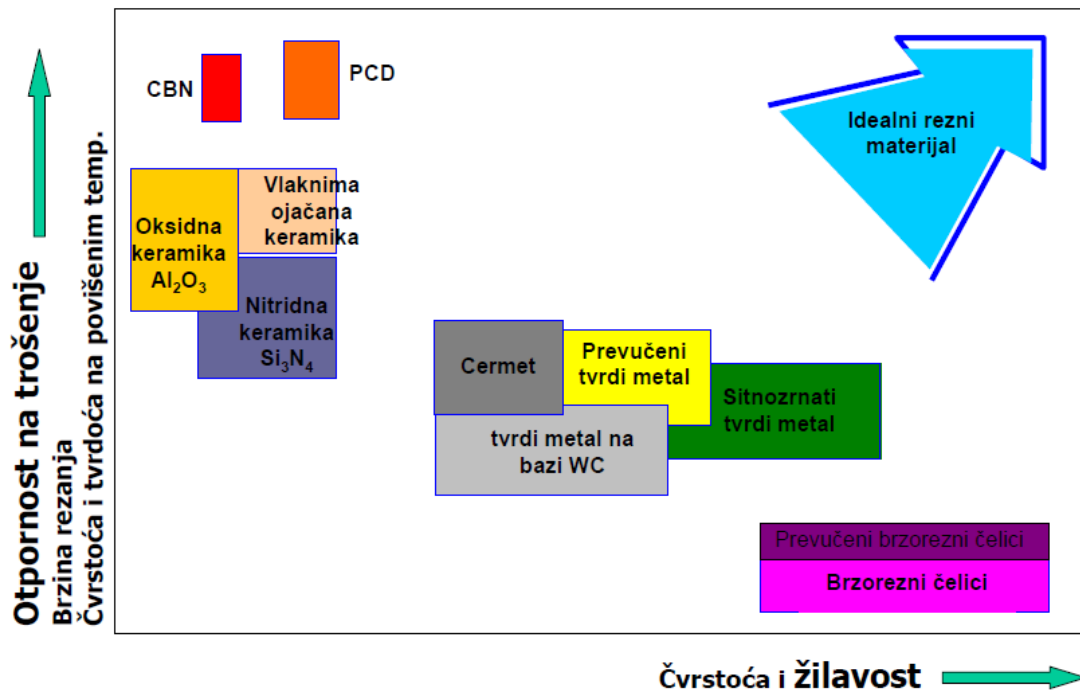
Slika 2.3.1.2. Prikaz kuteva alata [1].

2.3.2. Rezni materijali kod tokarskog noža

Uvjeti koji se javljaju tijekom procesa rezanja postavljaju sljedeće zahtjeve na materijal reznog alata [2]:

- mehanička (povećana tvrdoća, čvrstoća, žilavost)
- toplinska (temperaturna postojanost, tvrdoća na povišenim temperaturama, otpornost na temperaturni šok)
- kemijska (što niža sklonost difuziji i oksidaciji)

Od svih karakteristika kod materijala za rezne alate najvažnije su otpornost protiv trošenja (rezna postojanost) i žilavost



Slika 2.3.2.1. Područja žilavosti i tvrdoće osnovnih vrsta reznih materijala [1].

Iz slike 2.3.2.1. vidljivo je da rezni materijali koji imaju visoku otpornost na trošenje, veću tvrdoću i čvrstoću na povišenim temperaturama istovremeno imaju nisku žilavost i čvrstoću.

Materijali za izradu oštrice alata mogu biti:

- alatni čelici
- brzorezni čelici
- tvrdi metali (TM)
- cermet
- rezna keramika
- kubični bor nitrid (CBN)
- polikristalni dijamant (PCD)

Alatni i brzorezni čelici. Stariji tokarski noževi koji su bili izrađeni od alatnog i brzoreznog čelika (s dodatkom karbidotvoraca Cr, W, V, Mo te Co kao vezivo). Kobalt ne stvara karbide, ali utječe na sprječavanje rasta zrna pri visokim temperaturama što im daje veću žilavost. Oni su izrađeni u jednom komadu i oštrica se brusila nakon istupljivanja. Prednost im je bila veća žilavost (ali su zato imali nisku tvrdoću s obzirom na današnje rezne materijale), jednostavna toplinska obrada, manja osjetljivost na razugličenje površine tijekom toplinske obrade, itd. [Specijalni čelici].



Slika 2.3.2. Tokarski nož od alatnog čelika [3].

Današnji alati se sastoje od više dijelova. Rezni dio alata su pločice koje se umeću na držač alata i stežu posebnim vijcima, a između rezne pločice i držača se umeće kaljena pločica. Nekada su se rezne pločice tvrdo lemile na držač alata, ali je problem bio što se nakon trošenja alata stezni dio nije više mogao uporabiti. Jedna rezna pločica može imati više reznih oštrica ovisno o tome kako je izvedena. To omogućuje da držač bude žilaviji dok su pločice tvrde, krhke. Mogućnost jako brze izmjene pločice za razliku od prijašnjeg brušenja je ogromna prednost. Izvedba alata u više dijelova omogućuje trajno korištenje držača alata i opravdanje njihove skupe izrade.

Tvrđi metal (TM) je sinterirani materijal sastavljen od karbida W, Ti, Ta, Nb, Mo i vezivne metalne osnove, najčešće Co. Skoro sve vrste tvrdog metala sadrže WC. TM spada u grupu veoma tvrdih materijala otpornih na trošenje i postojanih na visokim temperaturama. Razvoj tehnika površinskih prevlaka omogućio je veliku prednost primjene TM-a. [2].

Cermet je mješavina metala ili legure sa najmanje jednom keramičkom fazom. Keramičke komponente uložene su u metalnu vezivu fazu (ugl. Ni). Osim karbida poznatim tvrdim metalima (WC, TiC, TaC), cermeti sadrže i spojeve s dušikom (TiN).

Rezna keramika je nemetalni materijal dobiven postupkom sinteriranja. Postoje tri vrste keramike [4]:

- a) oksidna (ugl. Al_2O_3)
- b) nitridna (ili neoksidna, ugl. Si_3N_4)
- c) miješana (crna) keramika od Al_2O_3 različitih drugih karbida i nitrida (TiC, TiN, WC)

Kod obrade reznom keramikom treba uzeti u obzir njenu cijenu u odnosu na CBN [12].

Kubični bor nitrid (CBN) je postojan na temperature do $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Prikladan je za obradu čelika povišene tvrdoće. [4]. Alati iz CBN-a su veoma prikladni za visokobrzinsku obradu. Zbog malog trošenja rezne oštrice omogućavaju veoma dobru kakvoću obrađene površine [Š.S. doc. dis.]. Kod upotrebe CBN alata treba biti oprezan jer imaju malu žilavost, pa pojava i najmanjih vibracija može dovesti do pucanja alata.

Polikristalni dijamant (PCD). Najtvrđi poznati prirodni materijal je dijamant. Ono što ograničava njegovu veću upotrebu kao reznog materijala je njegova visoka cijena.

Dijamant je alotropska modifikacija ugljika u obliku kubične kristalne rešetke. PCD se dobije sinteriranjem na visokoj temperaturi i tlaku. [2].

Pet puta je tvrdi od tvrdog metala. Nedostaci su mu osjetljivost na udarce i niska tlačna čvrstoća te je postojan samo do temperature do 600 °C, a iznad 800 °C izgara [4].

Trošenje alata od PCD neznatno je i omogućava vrlo visoku kakvoću obrađene površine [Š.S. doc. dis.].

Kao generalna ocjena upotrebe PCD-a i CBN-a možemo reći sljedeće. Ono što je bilo nezamislivo prije 30-ak godina, npr. obrada materijala tvrdoće 50, 60 pa i 65 HRC, upotrebom PCD i CBN alata je postala stvarnost. Izuzetne rezne sposobnosti, velika tvrdoća i otpornost na trošenje su rezultat njihovih karakteristika [2].



Slika 2.3.3. Rezna pločica od tvrdog metala umetnuta sa vijkom u držač [6].



Slika 2.3.2.4. Različite vrste reznih pločica, različite geometrije, broja oštrica i materijala [1].

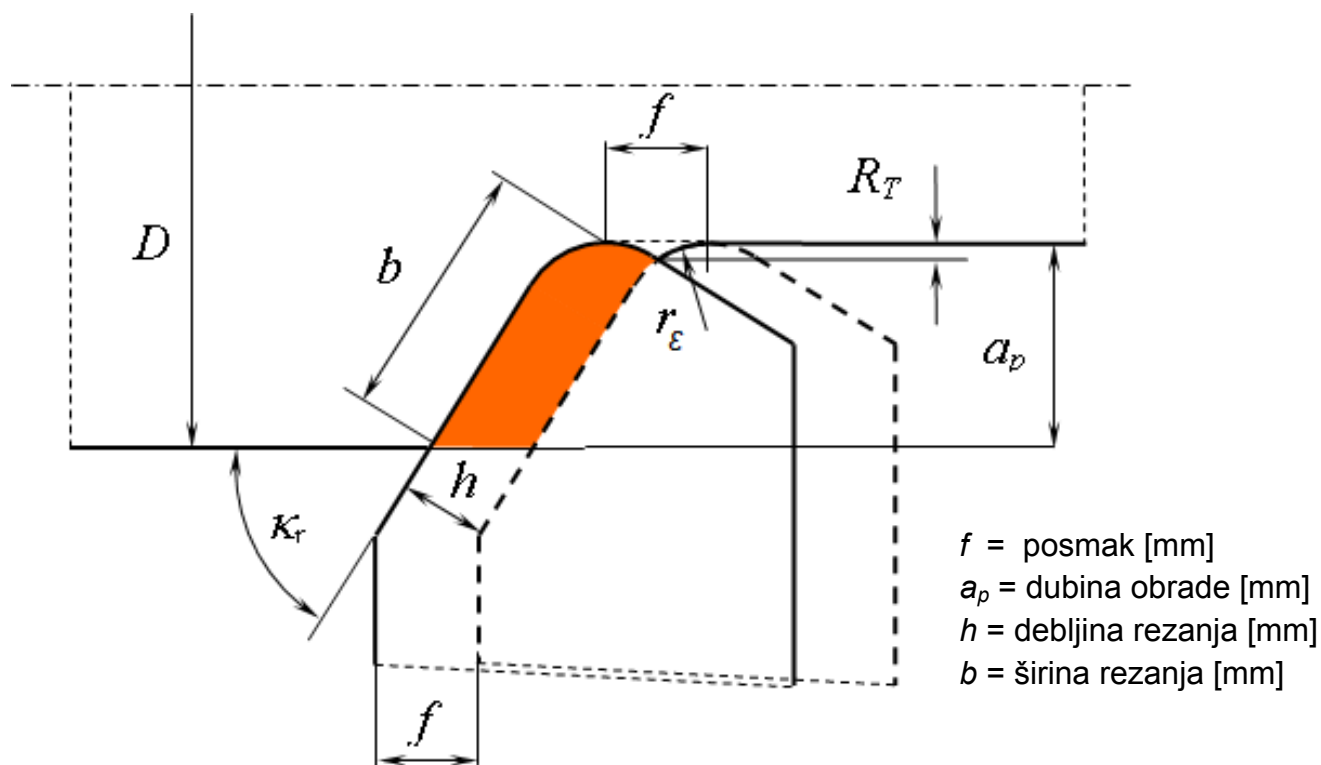
2.4. Parametri režima obrade

Postupak obrade omogućen je određenim režimom rada. Za obradu odvajanjem čestica postoje odgovarajući parametri režima obrade čije vrijednosti proizlaze iz mogućnosti tehničkog sustava kojim se rješavaju zadani zahtjevi. Za svaki zasebni slučaj potrebno je što točnije odrediti elemente režima obrade, jer direktno utječu na ekonomičnost obrade tokarenjem. Ekonomičnost obrade ne može se povećati bilo kako jer između pojedinih veličina režima obrade postoji funkcijska zavisnost, iz čega proizlaze pojedinačne vrijednosti. Osnovne veličine koje određuju režim obrade su [2]:

Dubina obrade a_p [mm] je sloj odvojenog materijala. Obično je određena veličinom dodatka za obradu, odnosno razmakom između obrađivane i obrađene površine, a mjeri

se okomito na obrađenu površinu (slika 2.4.1.). Limitirana je vitkošću odvojene čestice odnosno omjerom a_p/f koje obično propisuje proizvođač alata [Šavar ooč II dio].

$$a_p \approx \frac{D-d}{2} \quad (3)$$



Slika 2.4.1. Prikaz osnovnih elemenata režima rada [1].

Brzina rezanja v_c [m/min] je put koji prijeđe glavna oštrica alata u odnosu prema obrađivanoj površini u jedinici vremena. Kako je promjer obratka pri tokarenju različit u pojedinim točkama oštrice noža, u proračun se uzima najveći promjer (slika 2.12.). Kako nož istovremeno obavlja posmično gibanje brzinom v_f , brzina resultantnog gibanja v može se odrediti kao relativna brzina između gibanja tokarskog noža i obratka. Brzina v se određuje kao vektorski zbroj brzina [Šavar ooč II dio].

Brzina rezanje izračunava se iz izraza:

$$v_c = D \pi n \quad (4)$$

gdje je:

- v_c – obodna brzina obratka [m/min]
- n – broj okretaja obratka [okr/min]
- D – promjer obratka [m] .

Zbog toga što je kut pravca glavnog gibanja η malen, brzina rezanja v_c je približno jednaka brzini rezultantnog gibanja v . Brzina obrade je najznačajniji parametar obrade jer najviše određuje trošenje, tako da i Taylorova jednadžba ($v_c T^m = C_T$) postojanosti uzima u obzir samo brzinu.

Posmak f [mm] je veličina puta glavne oštrice alata u pravcu posmičnog kretanja alata za jedan okretaj obratka. Pri gruboj obradi veličina posmaka ovisi o materijalu obratka, njegovim dimenzijama, vijeku trajanja noža, dubini rezanja i snazi stroja. Pri prijelaznoj i finoj obradi kvaliteta obrađene površine ovisi o veličini posmaka. Vrijednost posmaka se može izračunati iz izraza za teoretsku hrapavost [8]:

Hrapavost R_t izračunava se iz izraza:

$$R_t \approx \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (5)$$

gdje je r_ϵ radijus vrha alata.

3. OBRADA OBRADAKA POVIŠENE TVRDOĆE (HARD MACHINING)

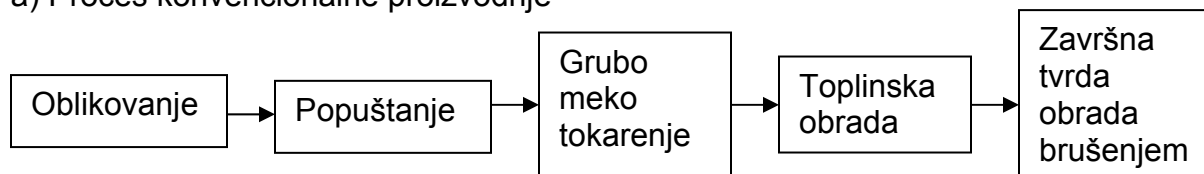
Tvrdo tokarenje je obrada obradaka tvrdoće iznad 45 HRC iako veoma često proces tvrde obrade sadrži obradu obradaka tvrdoće između 58 – 68 HRC [9].

Materijali obratka su različite legure otvrdnulog čelika, alatnog čelika, superlegura, toplinsko obrađeni obratci dobiveni metalurgijom praha, nitrirana željeza itd. Primjenjivana je uglavnom u završnoj obradi gdje se treba postići visoka točnost dimenzija, oblika i završna površina [9].

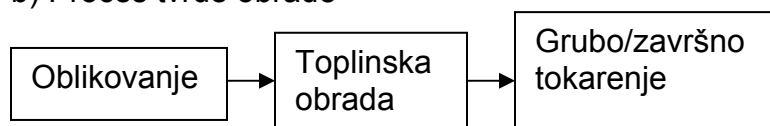
Tvrdo tokarenje je djelotvorno za povećanje kvalitete obrade i smanjenje troškova i vremena obrade kako bi se povećala ukupna konkurentnost. Kod usporedbe s brušenjem, tvrdo tokarenje nudi prednosti u produktivnosti, fleksibilnosti i troškovima zbog mogućnosti primjene kubičnog borovog nitrida (CBN) za rezanje bez sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP-a). Pored toga, suha završna obrada je najdjelotvornija u realizaciji procesa zbog postroženih propisa o očuvanju okoliša i povećanja troškova povezanih s odlaganjem SHIP-a. Zbog tih razloga tvrdo tokarenje treba zamijeniti brušenje i operacije završnih strojnih obrada. Kako god, završno, suho, tvrdo tokarenje je promjenjivi proces i željeni zahtjevi kvalitete dijela (završna površina i tolerancija) se teško postižu konvencionalnim CNC tokarilicama zbog problema stabilnosti procesa povezano sa krutosti, vibracijama i trošenjem CBN alata. Stoga je šira primjena tvrdog tokarenja ometana zbog takve nesigurnosti u stabilnost procesa i kvalitetu izratka [10].

Istraživanje [10] ističe glavne faktore kao što su: materijal obratka, tvrdoća obratka, materijal alata za rezanje, geometrija alata, uvjeti rezanja, krutost alatnog stroja, vibracije alatnog stroja i trošenje alata. Ti faktori utječu na točnost obrade, hrapavost površine, cjelovitost i produktivnost završne, suhe, tvrde obrade [10].

a) Proces konvencionalne proizvodnje



b) Proces tvrde obrade

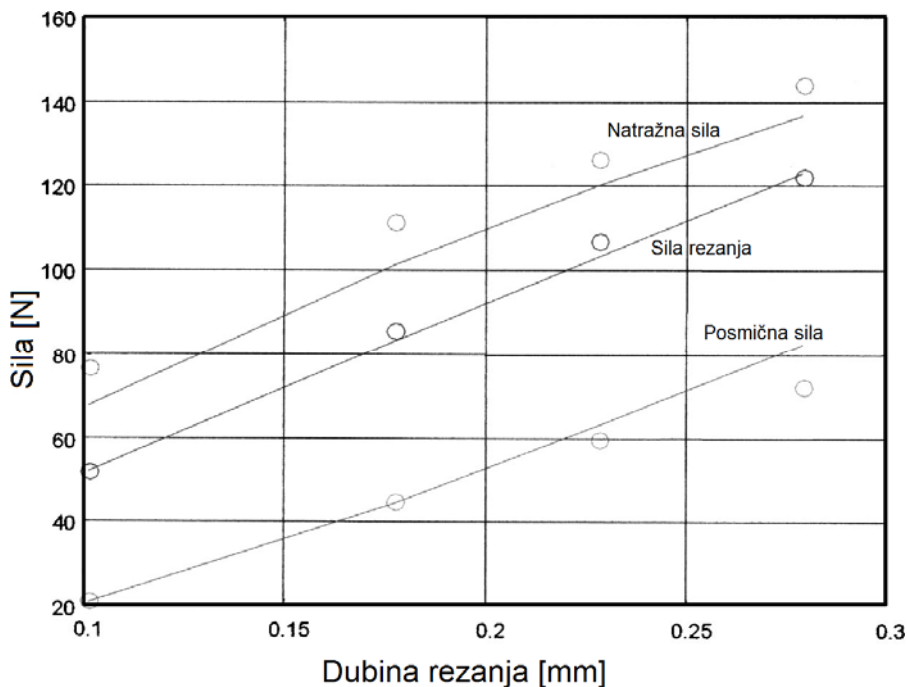


Slika 3.1. Usporedba procesa konvencionalne proizvodnje naspram procesa tvrde obrade [10].

Već tradicionalno, čelični metalni obratci se kao mekani obrađuju obradom odvajanjem čestica, otvrdnjuju toplinskom obradom (kaljenje) i završno obrađuju brušenjem (Sl. 3.1.). Brušenje je oko tri puta sporije od tvrdog tokarenja i stroj je oko tri puta skuplji nego tokarilica za tvrdo tokarenje što čini proces tvrdim tokarenjem jako učinkovitim načinom proizvodnje zbog velikog smanjenja troškova kako u obliku investicije, tako i u obliku eksploatacije [10].

3.1. Sile rezanja kod tvrdog tokarenja

Kod procesa tvrdog tokarenja sile rezanja značajno ovise o dubini rezanja. Posmična F_f i glavna komponenta F_C rastu skoro linearno sa dubinom rezanja, ali posmična komponenta F_p pokazuje izrazit rast kad se poveća dubina rezanja [10]. Na slici 3.1.1. je prikazan odnos sila i dubine rezanja za konstantnu brzinu i posmak rezanja. Kružićima su označeni eksperimentalno dobiveni podaci, a linijom aproksimirani iznos.



Slika 3.1.1. Promjena iznosa sila s obziroma na posmak kod nepotrošenog alata [11].

Bitno je napomenuti da je kod procesa tvrdog tokarenja natražna sila najveća među svim komponentama za razliku od konvencionalnog tokarenja [10]. Jedan od razloga je u geometriji alata jer se formiranje odvojene čestice uglavnom održava na vrhu alata pri negativnim prednjim kutem. Trošenje alata također ima velik utjecaj na sile rezanja i obrnuto [10].

Kod korištenja CBN alata pokazalo se da udio CBN-a u alatu također ima utjecaj na sile rezanja. Smanjenjem postotka CBN-a u alatu dolazi do smanjenja sila rezanja zbog manje toplinske vodljivosti alata. Toplina koja se zadržava tada u području rezanja omekšava površinu obratka, a time i smanjuje sile rezanja.

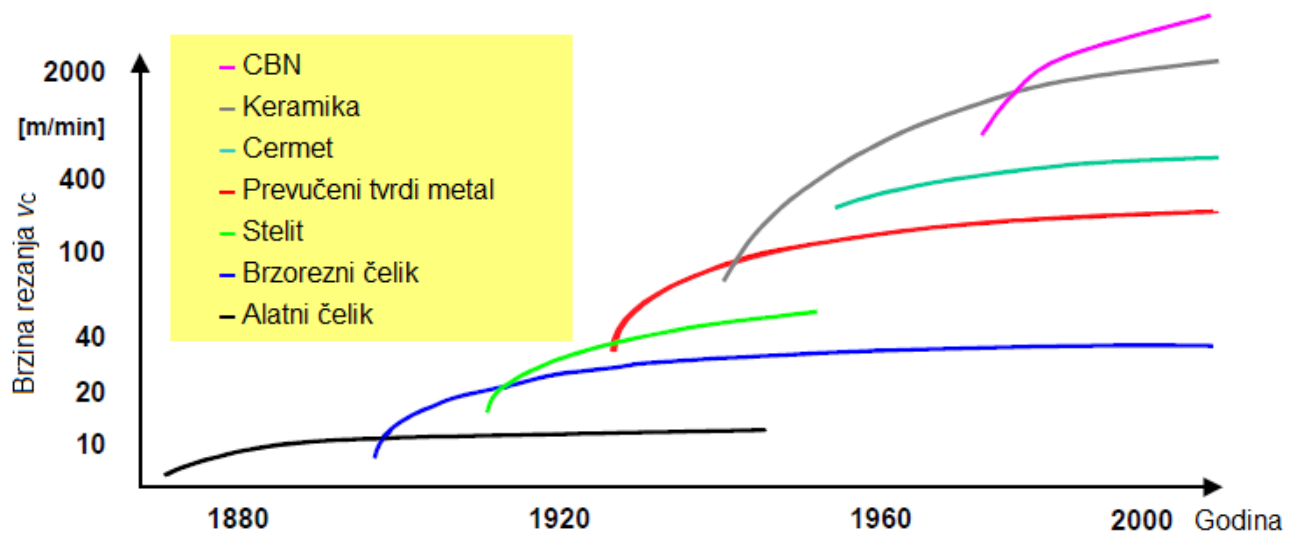
3.2. Alati kod tvrde obrade

Budući da se kod tvrde obrade obrađuju materijali koji imaju tvrdoću i do 68 HRC, rezni alati moraju biti čvršći, tvrdi, otporni na trošenje te kemijski postojani i sve to na povišenim temperaturama. Zato se za obradu obradaka povećane tvrdoće koriste presvučene i nepresvučene rezne pločice od tvrdog metala, cermeta, rezne keramike, polikristalnog borovog nitrida i polikristalnog dijamanta [„Stoić Antun, dr. dis.“].



Slika 3.2.1. Generiranje visokih temperatura pri tvrdom tokarenju [13].

Polikristalni kubični borov nitrid (PCBN, obično CBN) je rezni alatni materijal pogodan za tvrdo tokarenje, pogotovo za proizvodnju preciznih obradaka u malim serijama jer ima veliku tvrdoću, visoku otpornost na trošenje abrazijom i zadržava svoju tvrdoću i kemijsku stabilnost na visokim temperaturama generiranim suhom obradom. Korištenje CBN alata kod tvrdog tokarenja za grubu i poluzavršnu obradu je prepoznato kao tehnološki i ekonomski fleksibilan proces. Zbog slabe toplinske vodljivosti CBN-a toplina generirana tijekom procesa rezanja je odvedena sa odvojenom česticom od zone rezanja, eliminirajući uporabu SHIP-a. Pored toga, suha završna obrada je najdjelotvornija u realizaciji procesa zbog postroženih propisa o očuvanju okoliša i povećanja troškova povezanih s odlaganjem SHIP-a. [10].



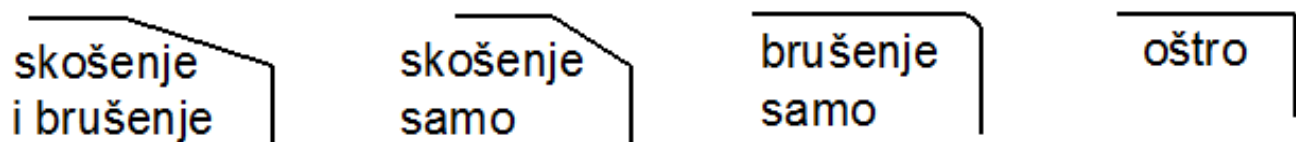
Slika 3.2.1.1. Razvoj reznih alata. [14].

3.3. Utjecajni faktori na stabilnost procesa tvrdog tokarenja

Prateći faktore koji utječu na stabilnost procesa, kvalitetu dijela i produktivnost te pažljivim razmatranjem i uzimanjem u obzir prijašnja istraživanja identificirani su [10]:

3.3.1. Geometrija i materijal reznog alata

Geometrija alata je dizajnirana na taj način da je dobivena obrađena površina što je moguće manje plastično deformirana. CBN rezni alati imaju nižu žilavost nego ostali rezni alatni materijali pa je vjerojatnije da će doći do njegovog pucanja. Stoga je pravilna priprema oštrice nužna kako bi se povećala čvrstoća rezne oštrice i postigle površinske karakteristike završnim obradama metala. CBN rezni alati konstruirani za tvrdo tokarenje imaju negativnu prednju geometriju i pripremu oštrice (skošen ili brušen ili oba) [10].

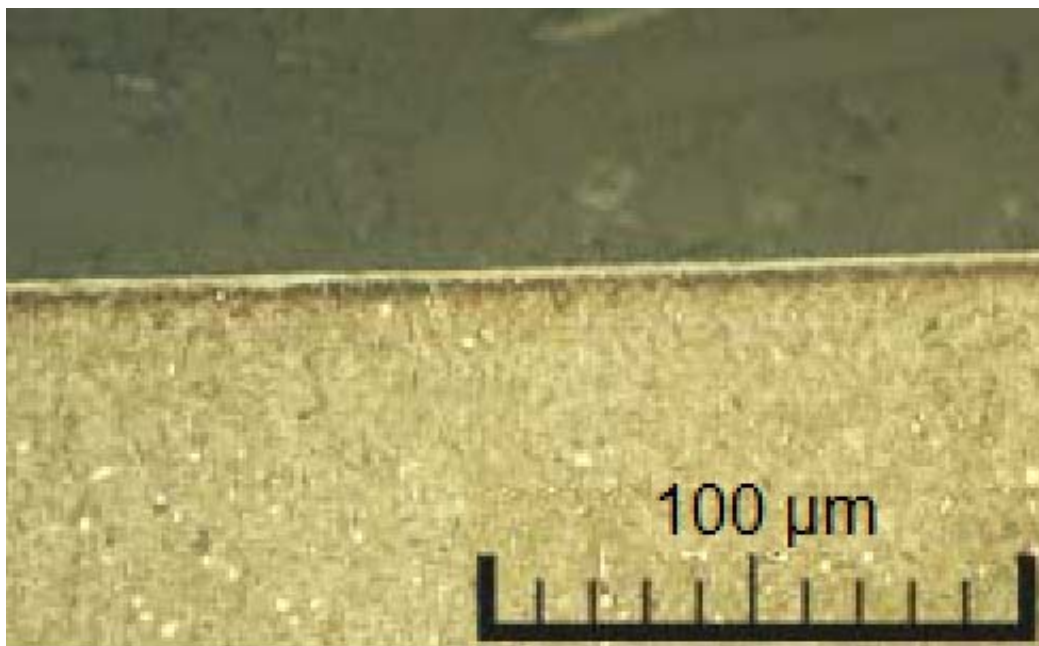


Slika 3.3.1.1. Vrsta pripremljenih oštrica za CBN reznih oštrica [10].

Novija istraživanja su pokazala da je korištenje različitih priprema oštrica nužno za grubo i fino tokarenje. Pokazano je i da veliki radijus brusa producira veće tlačno naprezanje, ali također i „bijeli sloj“ [10].

Kod drugog provedenog pokusa materijal obratka je legirani alatni čelik sa srednjom količinom ugljika. Ova vrsta čelika je odabrana kao usporedni materijal iz razloga postizanja visoke tvrdoće nakon kaljenja (64 HRC-a) koji je onda popušten na 60 ± 2 HRC. Sve mikrostrukture kod suhog tokarenja imaju tanki bijeli sloj, debljine 2 – 3 μm preko

cijele površine. Ispod bijelog sloja na slici 3.4.1. se može vidjeti zona utjecaja temperature rezanja. To je tamni sloj popuštenog martenzita debljine 2 – 4 μm .

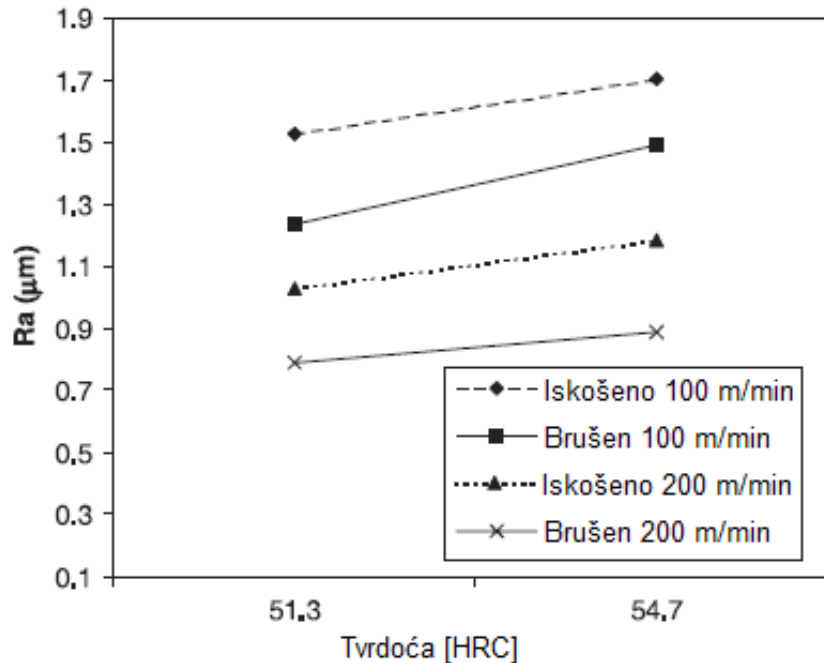


Slika 3.3.1.2. Mikrostruktura kaljenog čelika nakon procesa tvrdog suhog tokarenja [15].

Četiri vrste pripreme ruba (oštri, brušen, skošen te skošen plus brušen) su korištene kako bi se poboljšala svojstva alata. Dobiveno je da su zaostala naprezanja generirana zbog alata s velikom brušenom reznom oštricom uglavnom češće tlačna u odnosu na ona koja su uzrokovana alatom s malom brušenom reznom oštricom i ona također ostavljaju bijele slojeve. Učinak geometrije oštrice ima važnu ulogu kod termoplastične deformacije obratka. Veliki negativni prednji kut (između -15° i -20°) rezultira bržim trošenjem oštrice alata. Skošenje reznog ruba CBN alata rezultira značajnim smanjenjem vijeka trajanja alata i ono obično uzrokuje trošenje rezne oštrice. Kod tvrdog tokarenja sa CBN-om negativni prednji kut (-6°) rezultira manjim trošenjem stražnje površine nego pozitivan ili neutralan kut. Skošenje je nepovoljno naspram brušenog ili oštrog ruba zbog postizanja završne površine. Rezultati ispitivanja tri vrste pripreme kuta za CBN kod završnog tokarenja čelika pokazuju da brušene rezne oštrice imaju najgora svojstva naspram ostala dva, vezano uz trošenje stražnje površine i završne površine dijela [10].

3.3.2. Tvrdoća obratka

Sama tvrdoća obratka postavlja zahtjeve za potrebnom većom silom rezanja. Zbog promjene svojstava zakaljenih obradaka, osnovni proces smicanja i formiranja odvojene čestice razlikuju se kod tvrdog tokarenja. Pokazalo se da tvrdoća obratka ima dubok učinak na svojstva CBN alata kao i na cjelovitost (mikrostruktura i zaostala naprezanja) završno obrađenih površina [10]. Što je veća tvrdoća obratka, veća su i tlačna zaostala naprezanja [16]. Postoji omekšanje u području rezanja, tj. između rezne oštrice i površine obratka, koje postaje lakše oblikovati plastično [17].



Slika 3.3.2.1. Utjecaj geometrije rezne oštice i tvrdoće površine na hrapavost površine (posmak = 0,2 mm/okr, duljina = 203,2 mm) [16].

3.3.3. Točnost i krutost alatnog stroja

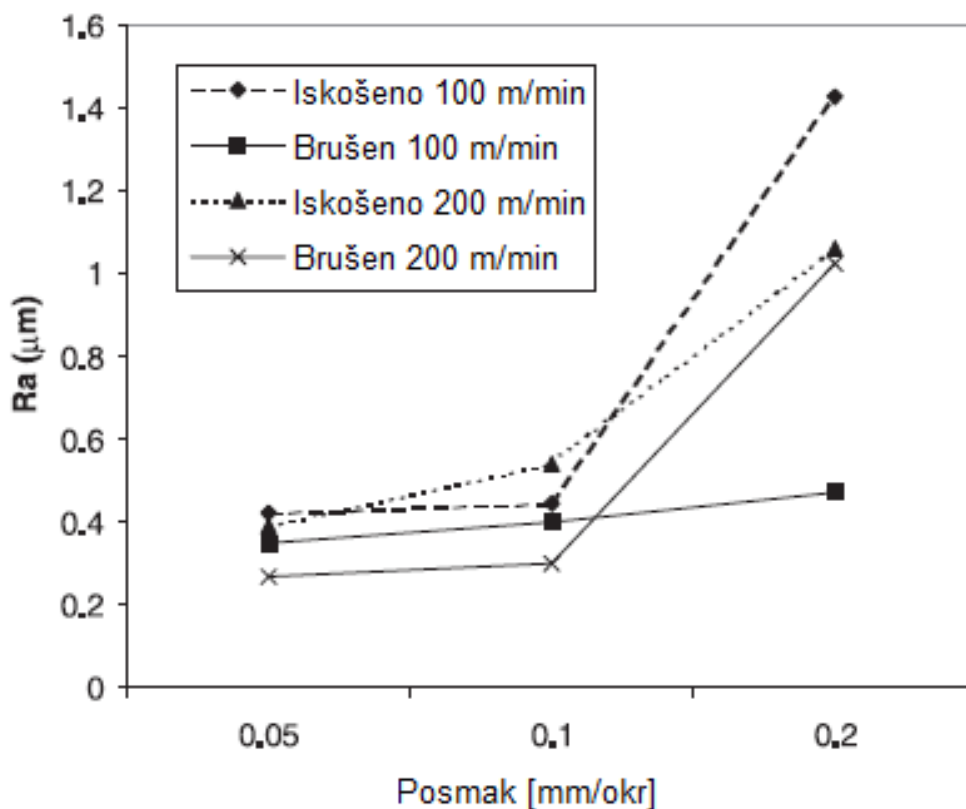
Parametar koji se često zaboravlja je vibracija alata. Dobro je poznato da su vibracije važan problem koji umanjuje kvalitetu obratka i svojstva alata. U svrhu smanjenja vibracije alata važno je koristiti dovoljno krute alate i naprave za stezanje obratka. Također je bitno da je sustav alata jako krut kako bi izdržao velike sile rezanja. CBN alati su jako krhki i lako pucaju i zato su za tvrdo tokarenje potrebni jako kruti alati koji su pogonjeni visokom snagom i koji su visoko precizni kako ne bi došlo do vibracija i dinamičkih sila. Pogotovo kod završne obrade, za krutost stroja se očekuje da bude čak i veća. Također je preporučeno posjedovanje sustava krućih steznih alata. Osim ako je sustav za stezanje adekvatno krut, rezultirani veliki progibi također mogu uzrokovati pucanje rezne oštice. Povećanjem krutosti sustava alatnog stroja trajanje CBN alata može biti značajno produljeno [10].

3.3.4. Brzina rezanja, posmak i dubina rezanja

Važnost određivanja parametara kod tvrdog tokarenja je velika. Odabir sile rezanja, posmaka i dubine je određen tvrdoćom materijala obratka, kemijskim sastavom, mikrostrukturom i inertnosti s materijalom reznog alata. Mogućnosti CBN reznog alata jako ovise o uvjetima rezanja, tj. brzini rezanja, posmaku i dubini rezanja, a brzina i dubina rezanja pogotovo imaju velik utjecaj na vrijeme trajanja alata [10].

Većom brzinom rezanja se smanjuje vrijeme obrade. Ne smije se zaboraviti ni da se prema Tayloru povećanjem brzine rezanja eksponencijalno ubrzava trošenja alata tako da se treba naći optimalna brzina rezanja koja će troškove vezane uz alat i vrijeme obrade svesti na minimum.

Posmak je drugi faktor koji može biti promijenjen kod dobivanja rezultata. Pokazano je da se mijenjanjem posmaka hrapavost površine poboljšala s $R_{\max} = 4,5 \mu\text{m}$ na $R_{\max} = 1,0 \mu\text{m}$ za razliku od rezanja sa stabilnim posmakom. Tvrdilo se da mijenjanjem posmaka sa NC programom može promijeniti lokacija kraterskog trošenja što bi moglo smanjiti hrapavost površine. Povećanjem posmaka maksimalno raste tlačno zaostalo naprezanje i dubina zone na koju to utječe. Primijećeno je i da se u slučaju povećanja posmaka zaostala naprezanja mijenjaju iz tlačnih u vlačna i da uzrokuju povećanje sila rezanja [10].



Slika 3.3.4.1. Utjecaj geometrije rezne oštice i posmaka na hrapavost površine (54,7 HRC, duljina = 101,6 mm) [16].

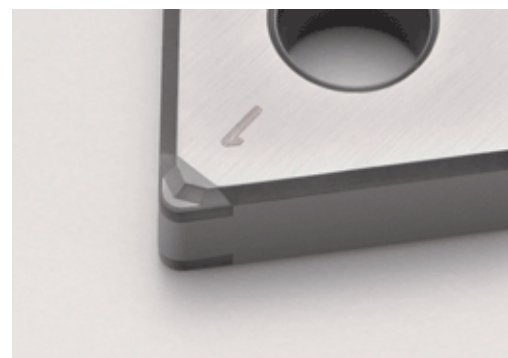
Povećanjem dubine rezanja se također skraćuje vrijeme obrade kod grube obrade, ali velika dubina rezanja može uzrokovati pojavu vibracija [10]. Povećanjem dubine rezanja povećava se temperatura u zoni rezanja. Budući da je CBN keramički materijal, kemijsko trošenje postaje primarni oblik trošenja i može dovesti do pucanja rezne pločice [16]. Veća dubina rezanja također otežava formiranje isprekidane odvojene čestice [14].

3.3.5. Utjecaj suhog rezanja

Smanjenje troškova i potrošnje energije zbog korištenja suhe obrade daju znatan doprinos u očuvanju okoliša. Suha obrada kod tokarenja nudi veću produktivnost kroz kratko vrijeme ciklusa, veću fleksibilnost kroz CNC tokarilice, niže troškove obrade, korist vezanu uz okoliš, smanjenje troškova vezanih uz alatni stroj [10]. Primjenom SHIP-a postoje rizici zbog štetnog djelovanja na ljudski organizam, na alatni stroj i na okoliš te opasnost od požara. Troškovi primjene SHIP-a mogu iznositi i do 16 % ukupnih troškova obrade što nije zanemarivo. Izbacujući uporabu SHIP-a mogu se izbjeći ti nedostaci. Ali ne smije se zaboraviti da SHIP osim uloge podmazivanja i hlađenja ima ulogu i ispiranja odvojene čestice. Veliki je problem kod neispiranja odvojene čestice ako ona dolazi na mjesto rezanja i troši se energija i rezna oštrica na „ponovno rezanje“ već odvojene čestice. U tom slučaju možemo koristiti komprimirani zrak koji nije štetan ni za ljude ni za alatni stroj i još mu je prednost što mu je intenzivnost hlađenja alata manja jer se CBN ne smije preintenzivno hladiti kako ne bi došlo do pucanja uslijed toplinskih naprezanja [4]. Primarna briga kod tvrdog suhog tokarenja je generiranje neželjene promjene mikrostrukture na površini i formiranje vlačnog naprezanja [18].



Slika 3.3.5.1. Pločice za tokarenje kaljenog čelika od CBN-a za urezivanje žljebova u vratilu i držači visoke krutosti tvrtke sumitomo [19].



Slika 3.3.5.2. Najnoviji CBN alat tvrtke sumitomo s integriranim lomačem čestice. Prvi proizvedeni te vrste. Služi za tvrdo-meko tokarenje tvrtke sumitomo [19].

4. VISOKOBRZINSKA OBRADA (HIGH SPEED MACHINING)

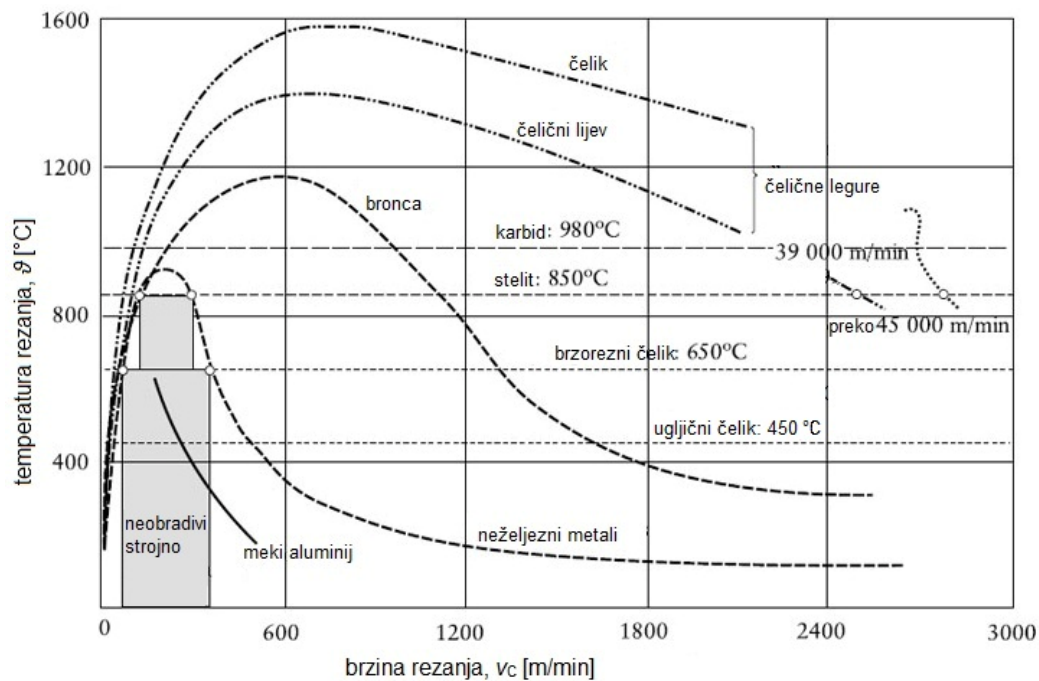
Visokobrzinska obrada podrazumijeva obradu odvajanjem čestica s velikim glavnim i posmičnim brzinama. To nije najnovije područje koje se istražuje kod obrade odvajanjem čestica. Njena ideja je nastala još 1931., samo što je tada nije bilo moguće primijeniti zbog više ograničenja. Ograničenja primjene VBO-e su bila [20]:

- velika učestalost vrtnje glavnog vretena
- uležištenje glavnog vretena
- rješenje velikih brzina i ubrzanja posmičnih gibanja
- sustav stezanja alata
- sustav upravljanja i programiranja

Tu bi trebalo dodati i nepostojanost reznog materijala koji bi mogao izdržati tolike brzine rezanja [4].

Tek se u zadnjih desetak godina povećala njena primjena, a razlog tome je naravno povećanje profita, odnosno opstanak konkurentnosti koje postavlja tržište.

Pretpostavka VBO-e je bila da povećanjem brzine rezanja nakon neke kritične veličine temperatura počinje padati. Ta se tvrdnja pokazala istinitom i dobiveno je da je iznos te temperature ovisan o vrsti materijala obratka. Otkrićem kvalitetnijih reznih materijala koji zadržavaju svojstva na većim temperaturama pa i razvojem strojeva veće krutosti omogućena je postepena primjena VBO [5].



Slika 4.1. Prjelazna brzina pri kojoj dolazi do pada temperature rezanja. [21]

Teško je definirati sam izraz VBO-e jer je sama brzina rezanja koja se može postići ovisna o materijalu obratka, alatu, posmaku, SHIP-u, vrsti obrade, alatnom stroju, prihvatima alata itd. [5].

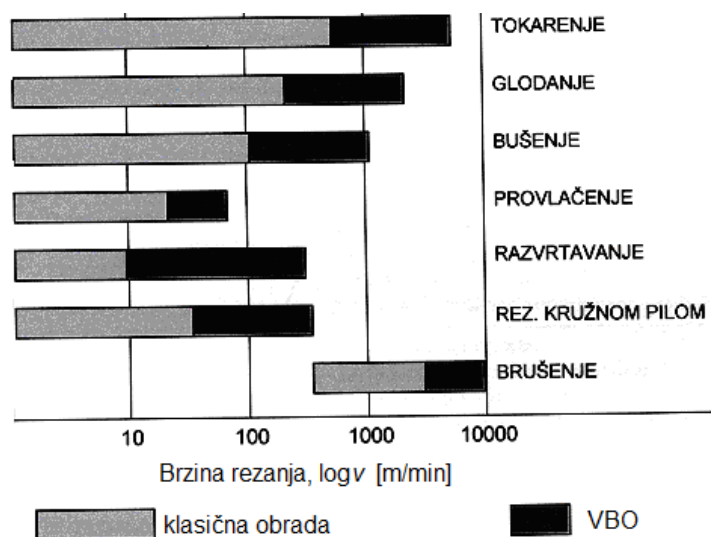
Jedna od definicija je preko učestalosti vrtnje glavnog vretena (GV) i govori da je VBO, obrada čije GV prelazi učestalost vrtnje preko 8 000 okr/min.

Druga definicija je ona koja ovisi o glavnoj brzini rezanja v_C . Sličan način je odabir preko DN broja. Taj je broj zapravo umnožak učestalosti vrtnje GV-a (u okr/min) i promjera alata/obratka (u mm): $DN = D n$. On je zapravo odabran jer se brzina rezanja računa kao: $v_C = R \cdot \omega = R \cdot 2 \pi n = D \pi n$, a π je ionako konstantna vrijednost. U tom slučaju VBO se smatra kada je vrijednost $DN > 500\ 000$ mm/min [22]. Za vrijednosti veće od 2 000 000 m/min postoje potrebe za hibridnim ležajevima zbog velikog zagrijavanja i tom slučaju je puno lakše definirati VBO preko učestalosti vrtnje GV-a [22,23].

Treća definicija u kojoj se autori drže glavne brzine govore da je VBO ona čija je $v_C > 500$ m/min [5].

4.1. Razlika visokobrzinske i konvencijalne obrade

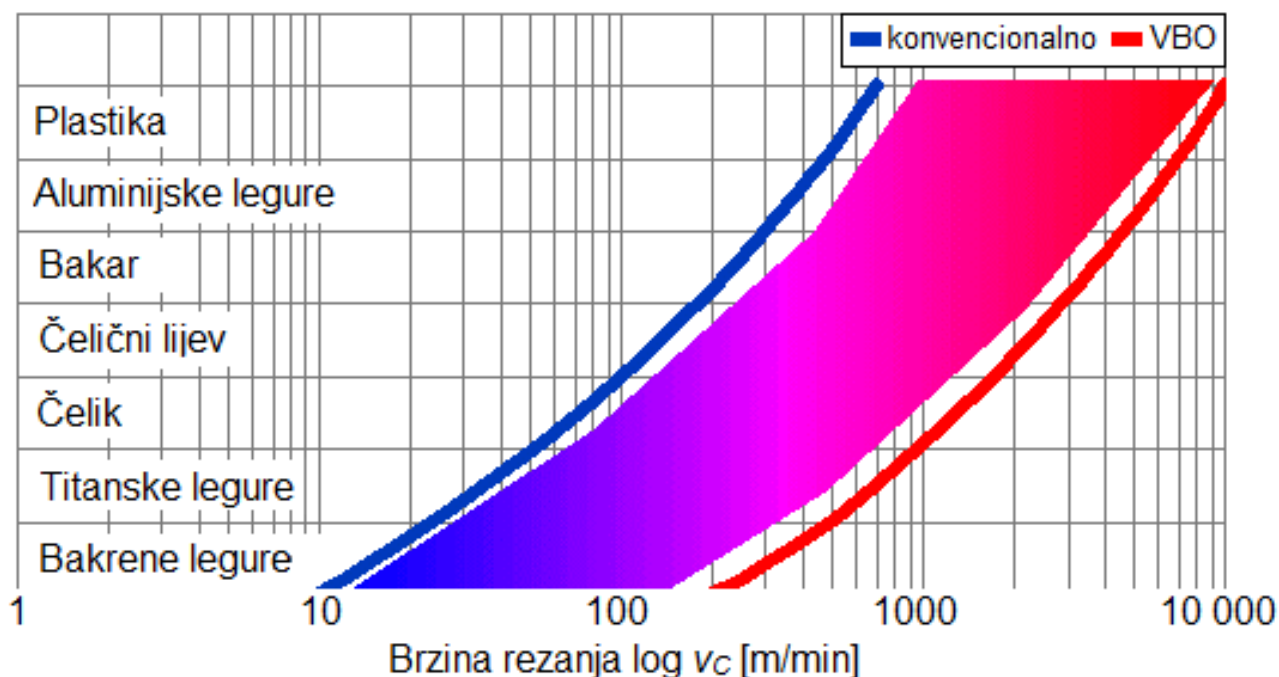
Brzina kod koje prestaje konvencionalna, a počinje visokobrzinska obrada je ona kod koje dolazi do pada temperature u zoni rezanja. Prema Ickasu podjela VBO ovisi o vrsti obrade, materijalu obratka i vrsti reznog alata. Ovisno o tim varijablama može se naći optimalna brzina rezanja koja nam daje optimum između trajanja alata i produktivnosti.



Slika 4.1.1. Ovisnost kritične brzine rezanja o vrsti obrade. [5].

U slici 4.1.1. se može vidjeti da je (osim kod bušenja) kod tokarenja ta brzina najveća. To je dobro jer kod VBO-e otvrdnutih čelika nije potreban lomač odvojene čestice, a opće je

poznato da je tokarenje skupa s bušenjem kontinuirani proces rezanja gdje odvojena čestica, ako nije lomljena, može biti poprilično duga, što je loše zbog otežavanja automatizacije procesa [5,1].



Slika 4.1.2. Područja brzina rezanja kod visokobrzinskog glodanja za različite materijale obradaka [4].

4.2. Osnovne značajke i kriteriji visokobrzinske obrade

Istraživanja su pokazala da pri VBO-i povećanjem brzine rezanja se povećava i specifični volumen odvojene čestice i kakvoća obrađene površine, a smanjuje se put izdržljivosti alata i sila rezanja kako to pokazuje slika 4.1.2. Na slici jedino nije prikazana suha obrada, tj. obrada bez uporabe SHIP-a. Slikom 4.1.2. nisu prikazane sve značajke VBO-e jer su neke vrijednosti diskretne i ne mogu se prikazati u dijagramu. Sve značajke su nabrojane u nastavku i to raspoređene u četiri grupe [5]:

Tehnološke mogućnosti:

- obrada zakaljenih čelika
- obrada teško obradivih materijala i slitina
- učinkovitija obrada sivog ljeva
- obrada tankostjenih obradaka
- obrada materijala osjetljivih na toplinu

Povećanje kvalitete:

- bolja kvaliteta obrađene površine
- smanjenje hrapavosti
- manja oštećenja površinskih slojeva
- obrada bez vibracija

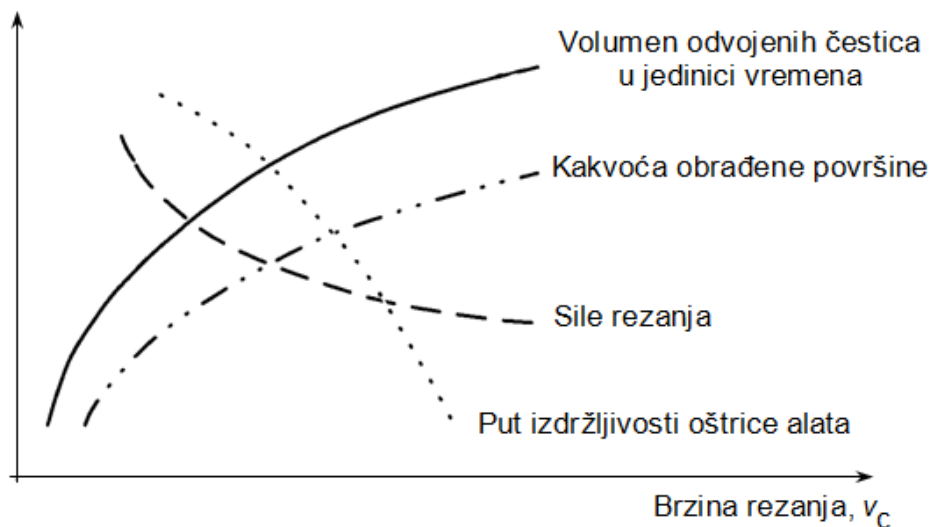
e) smanjenje sila rezanja

Smanjenje vremena obrade:

- a) veće brzine rezanja
- b) veće posmične brzine
- c) veći volumen odvojenih čestica
- d) kraća pomoćna vremena

Smanjenje troškova obrade:

- a) kraće komadno vrijeme
- b) veće vremensko iskorištenje stroja
- c) bolje iskorištenje alata
- d) suha obrada
- e) smanjenje ručne obrade kod kalupa i ukovnja

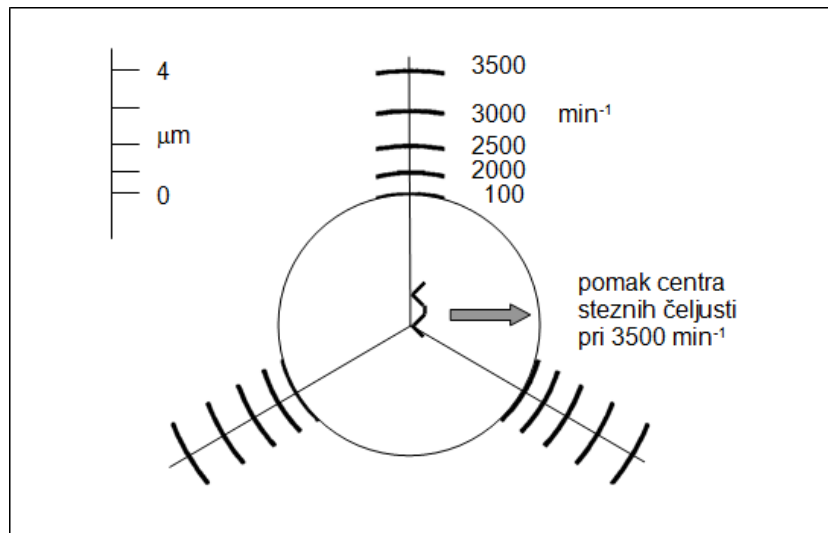


Slika 4.2.1. Kvalitativni prikaz značajki visokobrzinske obrade [5].

U pokušaju što točnijeg definiranja VBO-e postavili su se sljedeći kriteriji [20]:

- a) glavna brzina rezanja $v_c > 600$ m/min
- b) broj okretaja glavnog vretena $n > 8\ 000$ okr/min (iznos koji je skoro sigurno iznad kritičnog broja učestalosti vrtnje vratila)
- c) dinamičko ponašanje (dinamika GV-a i alata ovisno o vlastitoj frekvenciji u dominirajućem području vibracija) (b)
- d) materijal obratka

Veliki problem koji se javlja kod tokarenja kod primjene VBO-e je stezanje obratka. Budući da kod tipičnog stezanja u steznoj čeljusti centrifugalne sile djeluju suprotno od smjera stezanja one guraju stezne čeljusti prema van i smanjuju silu stezanja [5]. Centrifugalna sila raste s kvadratom kutne brzine (znači i s kvadratom broja okretaja) i pri velikim brojevima okretaja kakvi se javljaju pri VBO-i to nije ni malo zanemarivo. Ako je moguće treba tada primijeniti stezanje obratka s unutarnje strane [4].



Slika 4.2.1. Relativni pomak i otvaranje steznih čeljusti u ovisnosti o frekvenciji vrtnje kod tokarenja. [5].

4.3. Prednosti, nedostaci i preporuke VBO-e

Prednosti VBO-e:

Najveća prednost VBO-e je u biti i razlog zašto je nastala, a to je, kako je već spomenuto, povećanje produktivnosti [20].

Ostale prednosti VBO-e su [5]:

- a) smanjenje vremena obrade, zbog povećanih brzina rezanja i posmaka uzrokuje povećanje produktivnosti
- b) povećanjem brzine rezanja poboljšava se hrapavost obrađene površine jer je moguće smanjiti posmak (po okretaju kod tokarenja), uz isti učinak
- c) zbog veće brzine rezanja manje su sile rezanja pa je potrebna manja sila stezanja obratka što omogućuje obradu tankostjenih obradaka uz postizanje visoke točnosti zbog manjih elastičnih deformacija tijekom obrade.
- d) fina obrada se izvodi praktički bez vibracija, jer je frekvencija vrtnje za vrijeme fine obrade mnogo iznad kritičnih frekvencija rotirajućih elemenata alatnog stroja. Zbog toga se postiže visoka točnost obrade, smanjuje se trošenje alata te se smanjuje hrapavost površine
- e) moguća je obrada bez uporabe SHIP-a što omogućuje zaštitu okoliša i smanjenje troškova
- f) moguća je obrada tvrdih materijala pa nije potrebna dodatna operacija brušenja. Visokobrzinskom obradom se mogu postići male hrapavosti obrađene površine
- g) Zbog velikih brzina rezanja toplina koja se stvara u zoni rezanja prenosi se na odvojenu česticu pa je moguća obrada materijala osjetljivih na povišenu temperaturu.

Nedostaci VBO-e [5]:

- a) povećani troškovi održavanja zbog povećanog trošenja pri velikim brzinama, posebno kod visokobrzinskih vretena
- b) specijalna cijena za aktivnu i pasivnu sigurnost
- c) radi smanjenja vremena obrade, tj. velike proizvodnosti, prekid rada ima značajan utjecaj na pad proizvodnosti
- d) značajno povećanje ukupne potrošnje električne energije
- e) operater nema mogućnost vizualnog praćenja procesa za vrijeme obrade, osim pomoću specijalnih kamera pa je potreban pouzdan automatski sustav mjerenja obradaka i alata
- f) iako se VBO-a postiže i bez SHIP-a (prvenstveno na finim obradama) za vrijeme grubih obrada (posebno kod bušenja reznom keramikom), još uvijek su potrebne velike količine SHIP-a. Zbog toga se troškovi stalno povećavaju
- g) trošenje alata se povećava povećanjem brzine rezanja pa su zbog toga potrebni kvalitetniji rezni alati.

Preporuke za primjenu VBO-e

Pretpostavke za primjenu visokobrzinske obrade su napravljene na temelju istraživanja (koja i danas traju) u području VBO-e, a cilj tih preporuka je što bolja primjena visokobrzinske obrade. Te preporuke su [5]:

- a) poželjno je odabrati simetričnu konstrukciju alata i obratiti pozornost na prihvat alata; preporuka za HSK prihvat alata
- b) presjek odvojene čestice držati konstantnim, što je vrlo važno za stabilnost procesa rezanja; konstantan presjek znači i jednoliko opterećenje i naprezanje pa se sprječava pojava vibracija; uzeti u obzir kod planiranja putanje alata [4]
- c) primijeniti višeslojne prevlake; preporuka pri obradi čelika je da se koriste TiN i TiCN prevlake; također dati prednost PVD postupku prevlačenja nad CVD postupkom; kombinacija navedenih prevlaka i PVD postupka daje veću postojanost alata i bolji prijenos topline
- d) kod obrade otvrdnutih čelika koristiti alate s ravnom prednjom površinom; neka istraživanja govore da kod primjene VBO-e za obradu otvrdnutih čelika lomač odvojene čestice nije potreban; pokazuju da reljefna prednja površina koja pomaže lomu čestice kod VBO-e može oslabiti reznu oštricu i povećati trošenje na prednjoj površini alata
- e) preporuka za ispiranje odvojene čestice od zone rezanja je korištenje stlačenog zraka; preporuča se i obrada bez SHIP-a kad god je to moguće jer kod VBO-e SHIP vrlo teško dolazi do zone rezanja pa je njegova zadaća kod VBO-e prvenstveno ispiranje odvojene čestice i podmazivanje. SHIP može prouzročiti toplinski šok alata kod VBO-e pa je bolje koristiti kombinaciju stlačenog zraka i ulja (uljna magla).

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj i metodologija ispitivanja

Cilj pokusa je da se na osnovu dosad objavljenih istraživanja i teorijskih saznanja pronađe funkcija obradivosti (adekvatni matematički model), koja bi opisivala uzajamnu ovisnost ulaznih i izlaznih parametara procesa obrade i koja predstavlja aproksimaciju stvarnog, nepoznatog, analitičkog oblika funkcije procesa.

U ovom eksperimentu analizira se karakter utjecaja parametara režima obrade (dubina rezanja a_p , posmak f i brzina rezanja v_c) na sile rezanja (glavnu silu rezanja F_c , posmičnu silu rezanja F_f , natražnu silu rezanja F_p) kod uzdužnog tokarenja.

Eksperiment se vrši na čeliku za cementiranje koji je normaliziran, promjera 100 mm. U ovom radu postavljen je zadatak da se adekvatni matematički model dobije pomoću višefaktorskog plana pokusa, koji se pokazao optimalnim za istraživanje matematičkih modela koji opisuju zakonitosti u procesu obrade odvajanjem čestica.

Za ulazne nezavisne veličine procesa odabrani su:

- a) dubina rezanja
- b) posmak
- c) brzina rezanja

Za ispitivani slučaj to znači utvrđivanje zakonitosti:

$$F_i = f_i(v_c, a_p, f) \quad (6)$$

Rezultati istraživanja i iz njih proizlazeći modeli, dati će fizikalnu sliku o karakteru utjecaja parametara obrade na sile rezanja.

5.2. Višefaktorski planovi pokusa

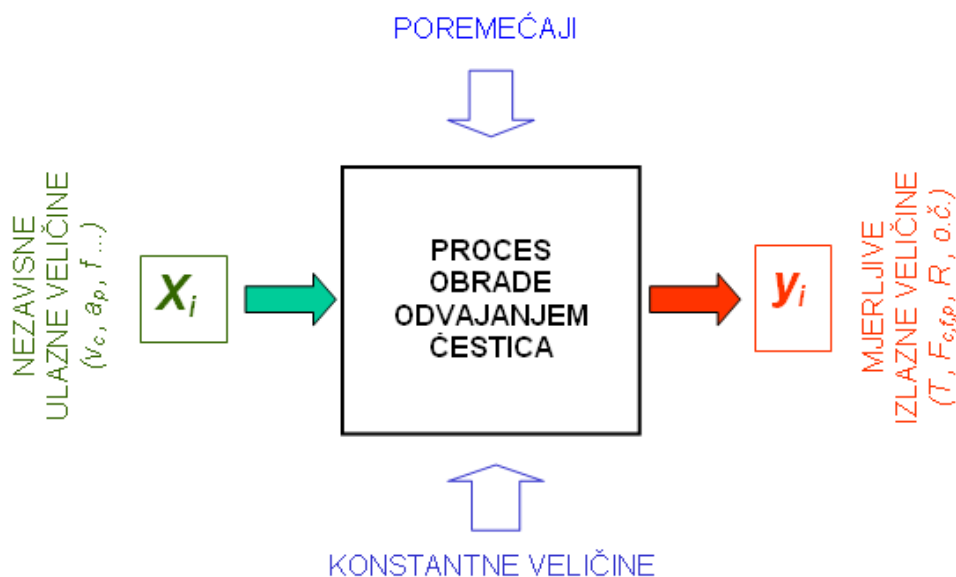
Metode za dobivanje funkcija obradivosti su različiti eksperimentalni statistički višefaktorski planovi. Krajnji rezultat su matematički modeli kojima se opisuje uzajamna ovisnost ulaznih i izlaznih parametara procesa obrade.

Na slici 5.2.1. shematski je prikazan proces obrade odvajanjem čestica sa svim ulazima i izlazima potrebnim za definiranje matematičkog modela procesa.

Pred istraživačem su dva bitna zadatka:

- istražiti koji ulazi (x_i) signifikantno djeluju na izlaz (y_i)
- odrediti funkcionalnu ovisnost izlaza o ulazu

Jedna funkcija obradivosti ne mora sadržavati sve signifikantne ulaze (niti je to moguće), već samo one koji su za određeni konkretni slučaj potrebne. Svi ostali signifikantni ulazi koji taj tren nisu interesantni da uđu u model moraju se tretirati kao konstante. Pri tome valja uvijek imati na umu da jedna funkcija obradivosti vrijedi za točno određene uvjete obrade, koji su na slici označeni kao "konstante". To praktično znači da za bilo koju drugu kombinaciju konstanti vrijedi neki drugi matematički model. Matematički model je dakle bezvrijedan ako uz njega nisu navedeni uvjeti obrade. "Poremećaji" su također uvjeti obrade, ali na njih se ne može utjecati (na primjer variranje napona u strujnoj mreži) [24].



Slika 5.2.1. Shematski prikaz procesa obrade odvajanjem čestica [24.]

Planirati pokus znači, na osnovi spoznaja iz literature, iskustva i očekivanja željenog cilja, unaprijed predvidjeti sve utjecajne faktore i radnje koje će kroz racionalna istraživanja dovesti do novih spoznaja. To praktično znači da je to način definiranja protokola za iznalaženje funkcionalnih ovisnosti između izlaza i ulaza procesa prikazanog na slici 5.2.1.

U osnovi planovi pokusa se mogu podijeliti u dvije grupe [24]:

- jednofaktorski plan pokusa; što predstavlja klasičnu metodu eksperimentiranja s jednom varijablom,
- višefaktorski statistički planovi pokusa (suvremene metode eksperimentiranja).

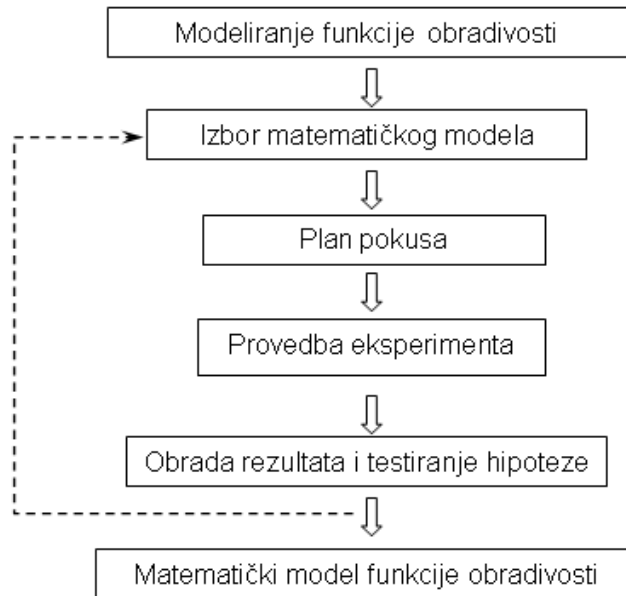
Budući da je proces obrade odvajanjem čestica označen mnogobrojnim utjecajnim faktorima, koji direktno ili međusobno, a po jačini djelovanja različito, djeluju na tijek i ishod pokusa, te zbog statističkog karaktera procesa, nužno je da pokus bude vođen statističkom višefaktorskom metodom [Š.S. doc. dis 2002.]. Višefaktorski plan pokusa odlikuje se slijedećim značajkama [24]:

- a) u tijeku eksperimenta varira se više utjecajnih faktora istodobno,

- b) poseban raspored eksperimentalnih točaka u prostoru,
- c) minimalan broj eksperimentalnih točaka u odnosu na količinu dobivenih informacija o zakonitosti procesa,
- d) relativno jednostavna matematička obrada rezultata,
- e) daje uvid u ovisnosti među faktorima (interakcije).

U praksi, a ponegdje i u literaturi pod pojmom plana pokusa često se kriju dva pojma: plan pokusa u širem smislu ili plan pokusa u užem smislu. Plan pokusa u širem smislu označava eksperimentalno istraživanje za dobijanje funkcije obradivosti, a koje se odvija po točno utvrđenom protokolu, prikazanom blok shemom na slici 5.2.2.

Kako prikazuje blok shema, eksperimentalno istraživanje započinje izborom matematičkog modela za kojeg se pretpostavlja 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 faktora koji su u tom trenutku od interesa istraživača i koji će ući u model. Svi ostali potencijalni faktori moraju biti konstantni. To u stvari označava postavljanje hipoteze. Nakon provedbe eksperimenta i obrade rezultata hipoteza se testira. Ako se pokaže da matematički model nije adekvatan, postupak počinje ispočetka postavljanjem novog matematičkog modela ili izborom drugačijeg intervala variranja faktora modela [24].



Slika 5.2.2. Blok shema protokola eksperimentalnog istraživanja [24]
 Plan pokusa u užem smislu znači odrediti za definirani matematički model: broj točaka pokusa, interval variranja faktora, način i broj ponavljanja i plan matricu pokusa [24].

5.3. Planiranje i priprema eksperimentalnih istraživanja

5.3.1. Karakteristike stroja

Eksperimentalna istraživanja provedena su na tokarskom obradnom centru Trens SBL-500, proizvedenom 2004. godine (slika 5.31.1.).



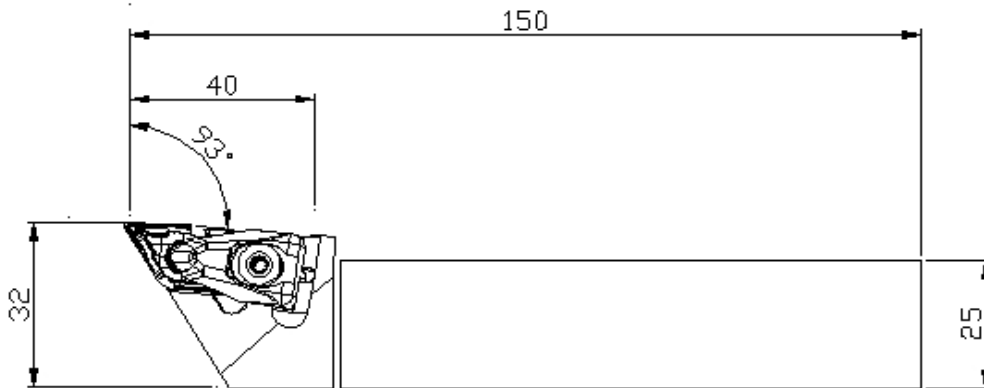
Slika 5.3.1.1. Tokarski obradni centar SBL-500 [25]

Tehničke karakteristike tokarskog obradnog centra Trens SBL-500 su [25]:

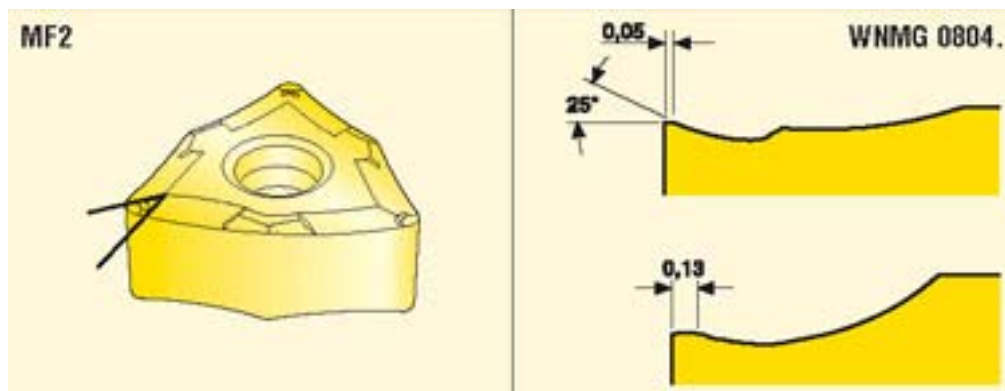
- Dimenzije: 1738 x 1900 mm (širina x visina)
- Radni prostor: - najveća duljina tokarenja: 845 mm
- najveći promjer tokarenja iznad kliznih staza: 405 mm
- Glavno vreteno: - frekvencija vrtnje: 4200 o/min
- snaga: 18,5 KW
- "C" os za indeksiranje glavnog vretena
- Upravljanje: SIEMENS 810 D SHOPTURN

5.3.2. Alat

Za ovo eksperimentalno istraživanje korišten je alat tvrtke Seco Tools GmbH. Izabran je držač oznake DDJNL2525M15 ($\lambda = -6^\circ$) (slika 5.3.2.1.) i rezna pločica od cermeta oznake DNMG150608-MF2CM (slika 5.3.2.2.).



Slika 5.3.2.1. Držač i rezna pločica marke Seco Tools [26]



Slika 5.3.2.2. Geometrija rezne pločice marke Seco Tools [26]

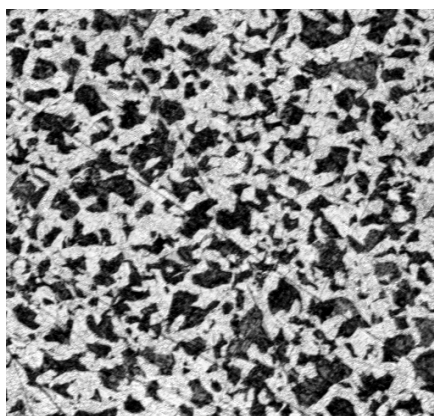
5.3.3. Materijal obradka

Istraživanje je provedeno na materijalu 16MnCr5 (Č4320). Taj materijal je tipičan predstavnik čelika za cementiranje i ima vrlo široku upotrebu u strojogradnji. Materijal je nabavljen u šipki Φ 100 mm, u meko žarenom stanju. Nakon valjanja mehaničke osobine materijala su po presjeku i dužini šipke neujednačene, a struktura neujednačena i usmjerena. Na materijalu su provedeni postupci toplinske obrade normalizacijom. Na taj način dobivena je ujednačena struktura po cijelom presjeku obratka.

Kemijski sastav i tvrdoća izmjerena nakon normalizacije prikazani su tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav materijala 16MnCr5 (Č4320) i tvrdoća nakon normalizacije.

C %	Mn %	Cr %	P %	S %	Si %	Cu %	Ni %	Tvrdoća (HB) nakon Normalizacije
0,168	1,125	0,968	0,01	0,026	0,077	0,069	0,031	160



Slika 5.3.3.1. Mikrostruktura materijala 16MnCr5 (Č4320) pri povećanju 100x

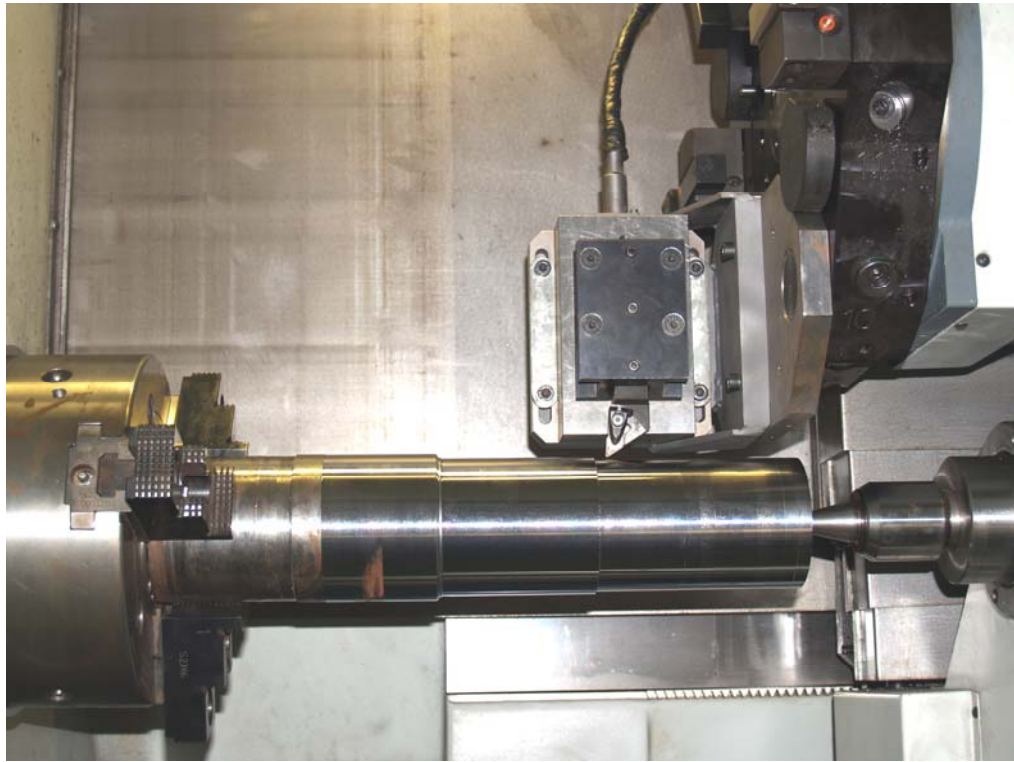
5.3.4. Mjerni instrument

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:

- a) područje mjerenja sila: ± 5 kN
- b) preopterećenje: $\pm 7,5$ kN; $-7,5/15$ kN za F_z
- c) krutost: $c_x, c_y > 1$ kN/ μm ; $c_z > 2$ kN/ μm
- d) temperaturno područje rada: 0 °C – 70 °C
- e) 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. Držać alata koji se montira na mjerni uređaj može prihvatiti alat s maksimalnim dimenzijama drške 26 mm \times 26 mm.



Slika 5.3.4.1. Obradak, alat i mjerni uređaj sa senzorima



Slika 5.3.4.2. Pojačalo i ekran računala sa izlaznim signalom mjernog uređaja

5.4. Izbor matematičkog modela i planiranje istraživanja

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

$$\eta = \phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (7)$$

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

$$y = \phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (8)$$

Ako se označi očekivani odziv sa $E(y) = \eta$ onda se površina prikazana sa " η " naziva odzivna površina. Matematički model može biti polinom 0,1,2.... n reda. On predstavlja, ako je adekvatan, dovoljno točnu aproksimaciju stvarnog, nepoznatog, analitičkog oblika funkcije odziva. U pravilu polinom višeg reda daje bolju aproksimaciju. U većini eksperimentalnih istraživanja procesa obrade odvajanjem čestica zadovoljavaju polinomi prvog reda. Međutim u istraživanjima u kojima se očekuje funkcija odziva s ekstremom od značaja su polinomi drugog reda [Š.S. doc. dis 2002].

U ovom eksperimentu istražuje se karakter utjecaja parametara obrade na sile rezanja kod uzdužnog tokarenja i kao matematički model uzet je matematički model eksponencijalnog oblika koji je, kad se logaritmiraju, adekvatan polinomu prvog reda.

Kao izlazne mjerljive veličine procesa određuju se iznosi sile rezanja:

- F_c - glavna sila rezanja
- F_f - posmična sila rezanja
- F_p - natražna sila rezanja

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

Izabrane ulazne veličine procesa su:

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

Odabran je matematički model eksponencijalnog oblika. Na osnovi mnogobrojnih, do sada objavljenih, eksperimentalnih rezultata procesa obrade odvajanjem čestica, zaključuje se da je najčešće primjenjivani oblik matematičkog modela, također i kod istraživanja funkcija sile rezanja, eksponencijalni model, koji se općenito zapisuje u slijedećem obliku:

$$F = C \prod_{i=1}^k f_i^{p_i} \quad (9)$$

Tu se zavisne veličine prikazuju kao eksponencijalna funkcija ulaznih parametara. Taj model se usvaja kao polazni model ovih istraživanja [Š.S. doc. dis 2002].

Uvrste li se u prijašnji izraz odabrane ulazne veličine procesa (parametri modela) model poprima oblik:

$$F_x = C v_c^{p1} a_p^{p2} f^{p3} \quad (10)$$

Kod planiranja eksperimenta primijenjen je višefaktorski ortogonalni plan pokusa, koji se u teoriji rezanja najviše primjenjuje i koji se temelji na posebnom rasporedu eksperimentalnih točaka u eksperimentalnom prostoru. Glavne su mu prednosti u jednostavnoj matematičkoj obradi rezultata, minimalnom broju eksperimentalnih točaka i velikoj količini dobivenih informacija.

Najviše se primjenjuju oni ortogonalni planovi s variranjem faktora na dvije razine. Planovi čiji se faktori variraju na dvije razine nazivaju se planovi tipa "2^k" gdje je "k" broj faktora, odnosno nezavisnih varijabli. Primijenit će se centralni plan eksperimenta koji podrazumijeva da se ponavljanje izvodi samo u centralnoj točki višefaktorskog ortogonalnog plana. Ponavljanje je nužno kako bi se mogla odrediti greška eksperimenta, te na temelju toga testirati hipoteze. Zbog toga će se morati odrediti i srednje razine faktora prema izrazu [Š.S. doc. dis 2002]:

$$f_{i,sr} = \frac{f_{i,min} + f_{i,max}}{2} \quad (11)$$

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

$$f_{min} \Rightarrow kod = +1$$

$$f_{sr} \Rightarrow kod = 0$$

$$f_{max} \Rightarrow kod = -1$$

Kada se sve zbroji proizlazi i ukupni broj eksperimentalnih točaka (*N*) koji se računa prema formuli:

$$N = 2^k + n = 2^3 + 4 = 12 \quad (12)$$

Tako je na primjer:

- kod eksperimenta sa tri nezavisna faktora (*k* = 3), broj ponavljanja u središtu je četiri (*n* = 4) i ukupni broj eksperimentalnih točaka je 12 (*N* = 12),
- kod eksperimenta sa četiri nezavisna faktora (*k* = 4), broj ponavljanja u središtu je šest (*n* = 6) i ukupni broj eksperimentalnih točaka je 22 (*N* = 22).

Sve do sada definirane veličine faktora (razine variranja) je potrebno upisati u odgovarajuću tablicu (tablica 2).

Na kraju planiranja pokusa izrađuje se matrica plana pokusa po kojoj će biti izveden eksperiment (tablica 3.).

Tablica 2. Razine variranja faktora za matematički model eksponencijalnog oblika “2³+4”.

Faktori	$f_{i, \min}$	$f_{i, sr}$	$f_{i, \max}$
v_c [m/s]	3,33	5,33	7,33
a_p [mm]	0,8	1,4	2,0
f [mm]	0,1	0,15	0,2
Kod faktora	-1	0	+1

Tablica 3. Matrica plana pokusa “2³+4”.

Redni broj mjerjenja	v_c [m/s]	a_p [mm]	f [mm]	X_1	X_2	X_3
1.	3,33	0,8	0,1	-1	-1	-1
2.	7,33	0,8	0,1	1	-1	-1
3.	3,33	2,0	0,1	-1	1	-1
4.	7,33	2,0	0,1	1	1	-1
5.	3,33	0,8	0,2	-1	-1	1
6.	7,33	0,8	0,2	1	-1	1
7.	3,33	2,0	0,2	-1	1	1
8.	7,33	2,0	0,2	1	1	1
9.	5,33	1,4	0,15	0	0	0
10.	5,33	1,4	0,15	0	0	0
11.	5,33	1,4	0,15	0	0	0
12.	5,33	1,4	0,15	0	0	0

Prema već poznatim izrazima za sile rezanja za polazne jednadžbe za plan pokusa prvog reda uzimaju se jednadžbe:

$$F_c = C_1 \cdot v_c^{p_1} \cdot a_p^{p_2} \cdot f^{p_3} \quad (13)$$

$$F_f = C_2 \cdot v_c^{p_4} \cdot a_p^{p_5} \cdot f^{p_6} \quad (14)$$

$$F_p = C_3 \cdot v_c^{p_7} \cdot a_p^{p_8} \cdot f^{p_9} \quad (15)$$

5.5. Rezultati eksperimenta

Mjerenjem sila rezanja na tokarskom obradnom centru Trens SBL-500, normaliziranog 16MnCr5 (Č4320), prema planu pokusa prvog reda, dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablici 4.

Tablica 4. Rezultati mjerenja sila rezanja na tokarskom obradnom centru Trens SBL-500 normaliziranog 16MnCr5 čelika.

Redni broj mjerenja	Ulazni faktori			Rezultati mjerenja		
	v_c [m/s]	a_p [mm]	f [mm]	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
1.	3,33	0,8	0,1	210	133	82
2.	7,33	0,8	0,1	191	117	80
3.	3,33	2,0	0,1	505	315	80
4.	7,33	2,0	0,1	459	274	73
5.	3,33	0,8	0,2	376	154	139
6.	7,33	0,8	0,2	343	134	117
7.	3,33	2,0	0,2	933	509	122
8.	7,33	2,0	0,2	848	430	108
9.	5,33	1,4	0,15	470	249	92
10.	5,33	1,4	0,15	483	262	98
11.	5,33	1,4	0,15	466	244	97
12.	5,33	1,4	0,15	473	252	93

5.5.1. Rezultati pokusa za glavnu silu rezanja F_c

Rezultati dobiveni pokusom i potom obrađeni u programskom paketu Statistica v6.0. prikazani su u tablici 5. Vidimo da su svi članovi modela signifikantni.

Tablica 5. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja F_c .

	Procjena	Standardna greška	t - vrijednost	Razina signifikantnosti
C_1	2260,194	75,96408	29,7652	0,000000
p_1	-0,124	0,01128	-10,9498	0,000004
p_2	0,992	0,01323	74,9787	0,000000
p_3	0,886	0,01506	58,8215	0,000000

Koeficijent korelacije iznosi: $r = 0,99963987$

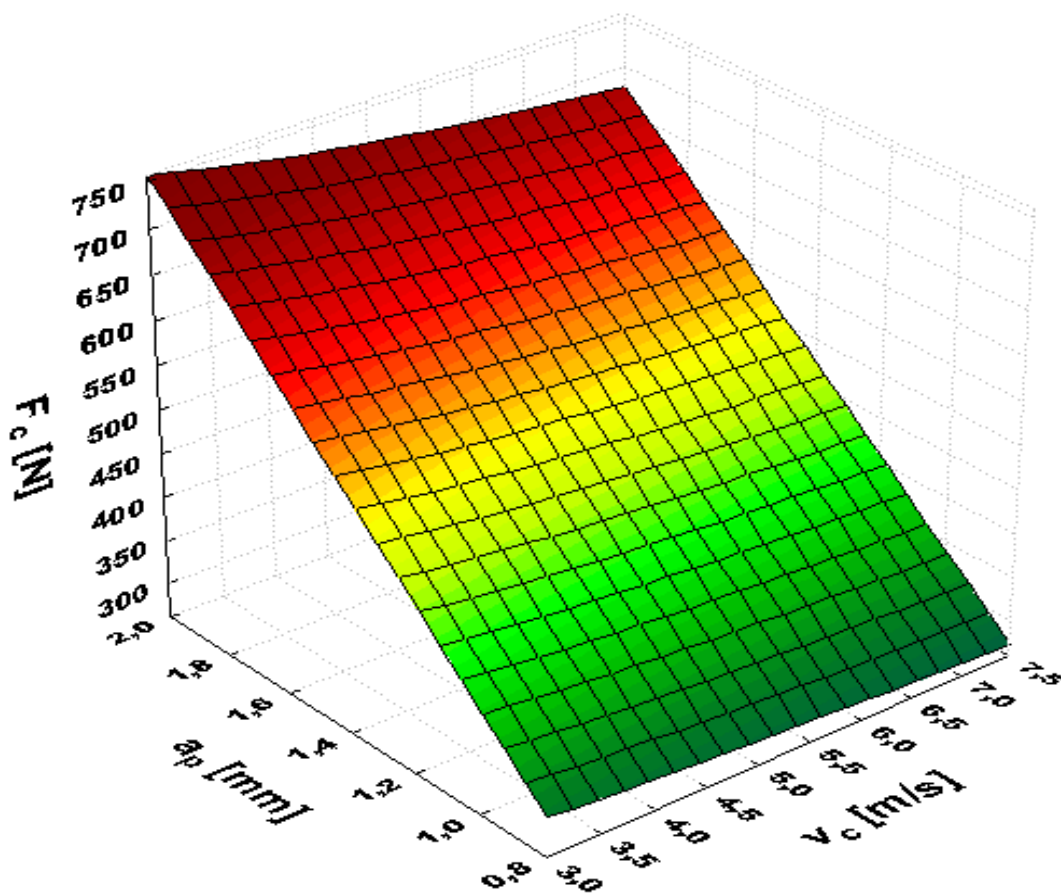
Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost glavne sile rezanja F_c :

$$F_c = 2260,19 \cdot v_c^{(-0,124)} \cdot a_p^{0,992} \cdot f^{0,886} \quad (16)$$

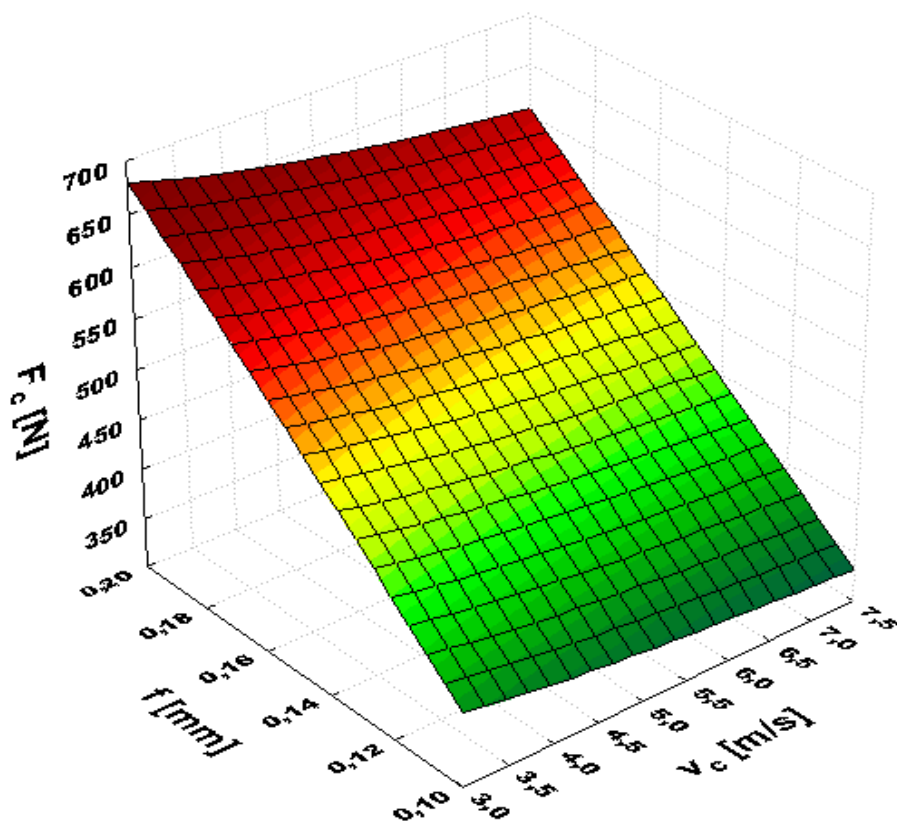
Analizom dobivenog matematičkog modela i njegovog grafičkog prikaza na slici 5.5.1.1. i slici 5.5.1.2. za glavnu silu rezanja F_c može se zaključiti sljedeće:

Na dijagramu na slici 5.5.1.1. primjetno je da se pri promjeni brzine rezanja v_c iznos glavne sile rezanja F_C ne mijenja značajno, tj. s porastom brzine rezanja v_c , dolazi do laganog pada iznosa glavne sile rezanja F_C . Očito je da najveći utjecaj na promjenu iznosa glavne sile rezanja F_C ima dubina rezanja a_p , tj. s povećanjem dubine rezanja a_p iznos glavne sile rezanja F_C značajno raste.

Na dijagramu na slici 5.5.1.2. također je primjetno da s porastom brzine rezanja v_c , dolazi do laganog pada iznosa glavne sile rezanja F_C . Ovdje najveći utjecaj na promjenu iznosa glavne sile rezanja F_C ima posmak f , tj. s povećanjem posmaka f iznos glavne sile rezanja F_C značajno raste, ali manje nego pri povećanju dubine rezanja a_p , sa slike 5.5.1.1.



Slika 5.5.1.1. Dijagram ovisnosti $F_c = f(v_c, a_p)$ za $f_{sr} = 0,20$ mm.



Slika 5.5.1.2. Dijagram ovisnosti $F_c = f(v_c, f)$ za $a_p = 1,4$ mm.

5.5.2. Rezultati pokusa za posmičnu silu F_f

Rezultati dobiveni pokusom i potom obrađeni u programskom paketu Statistica v6.0. prikazani su u tablici 6. Vidimo da su svi članovi modela signifikantni.

Tablica 6. Vrijednosti parametara matematičkog modela za posmičnu silu rezanja F_f

	Procjena	Standardna greška	t - vrijednost	Razina signifikantnosti
C_2	768,9951	101,1288	7,60412	0,000063
p_4	-0,199	0,0453	-4,38907	0,002620
p_5	1,1733	0,0578	20,28296	0,000000
p_6	0,6222	0,0561	11,08247	0,000004

Koeficijent korelacije iznosi: $r = 0,99438029$

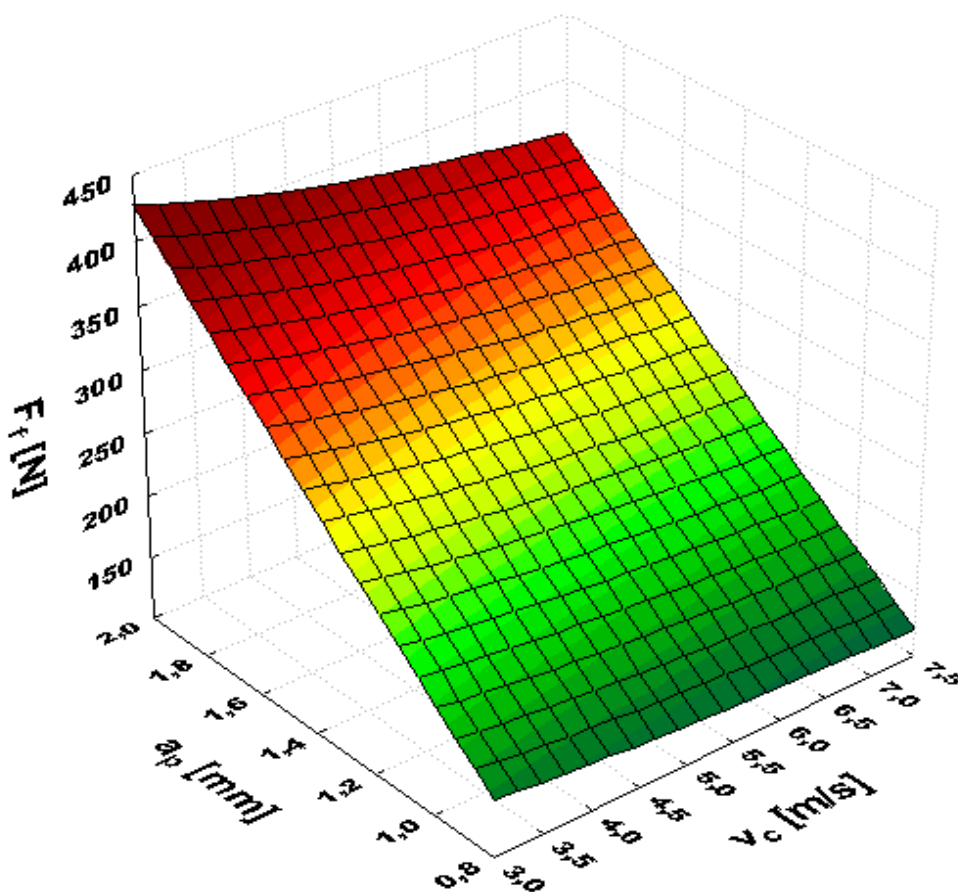
Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost posmične sile rezanja F_f :

$$F_f = 768,9951 \cdot v_c^{(-0,199)} \cdot a_p^{1,1733} \cdot f^{0,6222} \quad (17)$$

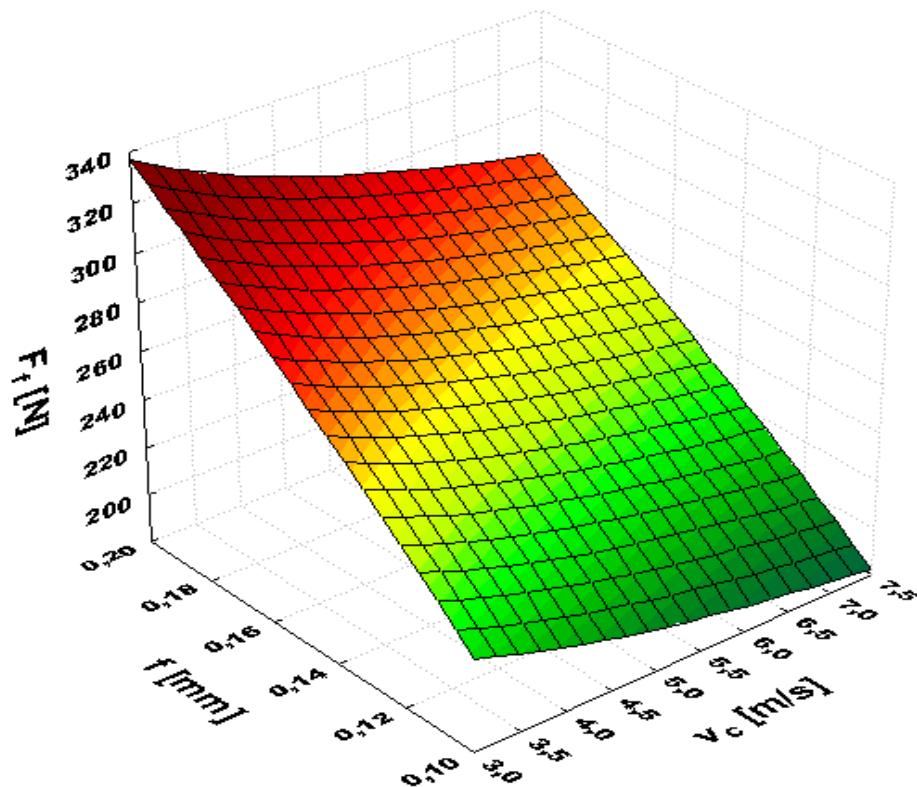
Analizom dobivenog matematičkog modela i njegovog grafičkog prikaza na slici 5.5.2.1. i slici 5.5.2.2. za posmičnu silu rezanja F_f može se zaključiti sljedeće:

Na dijagramu na slici 5.5.2.1. primjetno je da se, pri promjeni brzine rezanja v_c iznos posmične sile rezanja F_f ne mijenja značajno, tj. s porastom brzine rezanja v_c , dolazi do laganog pada iznosa posmične sile rezanja F_f . Očito je da najveći utjecaj na promjenu iznosa posmične sile rezanja F_f ima dubina rezanja a_p , tj. s povećanjem dubine rezanja a_p iznos posmične sile rezanja F_f značajno raste.

Na dijagramu na slici 5.5.2.2. također je primjetno da s porastom brzine rezanja v_c , dolazi do laganog pada iznosa posmične sile rezanja F_f , ali ipak u većoj mjeri nego glavna sila rezanja F_c na slici 5.5.1.2. I ovdje najveći utjecaj na promjenu iznosa posmične sile rezanja F_f ima posmak f , tj. s povećanjem posmaka f iznos posmične sile rezanja F_f značajno raste.



Slika 5.5.2.1. Dijagram ovisnosti $F_f = f(v_c, a_p)$ za $f_{sr} = 0,20$ mm.



Slika 5.5.2.2. Dijagram ovisnosti $F_f = f(v_c, f)$ za $a_p = 1,4$ mm.

5.5.3. Rezultati pokusa za natražnu silu F_p

Rezultati dobiveni pokusom i potom obrađeni u programskom paketu Statistica v6.0. prikazani su u tablici 5. Vidimo da su svi članovi modela signifikantni.

Tablica 7. Vrijednosti parametara matematičkog modela za natražnu silu rezanja F_p .

	Procjena	Standardna greška	t - vrijednost	Razina signifikantnosti
C_3	449,7594	44,32625	10,14657	0,000008
p_7	-0,1642	0,03553	-4,62118	0,001708
p_8	-0,1097	0,03050	-3,59570	0,007026
p_9	0,6418	0,04434	14,47275	0,000001

Koeficijent korelacije iznosi: $r = 0,984631$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost natražne sile rezanja F_p :

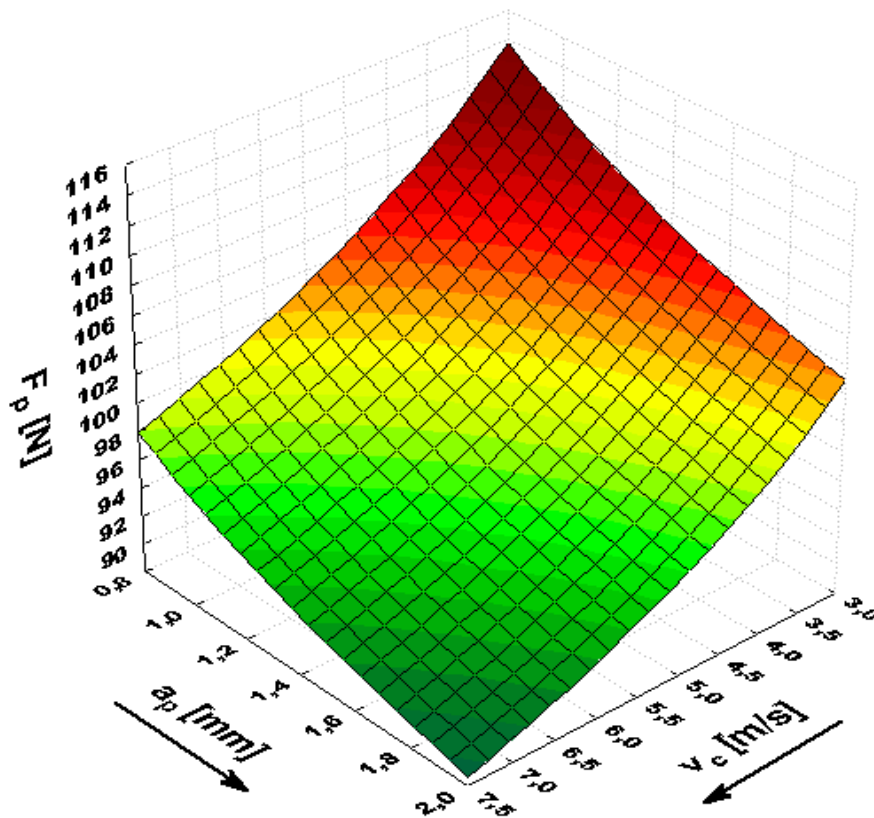
$$F_p = 449,7594 \cdot v_c^{(-0,1642)} \cdot a_p^{(-0,1097)} \cdot f^{0,6418} \quad (18)$$

Zbog negativnih vrijednosti članova p_7 i p_8 dijagram na slici 5.5.3.1. ispada tako da se ne vidi površina na dijagramu, pa je on zarotiran za 180° radi bolje preglednosti i time je promjenjen smjer rasta koordinata a_p i v_c .

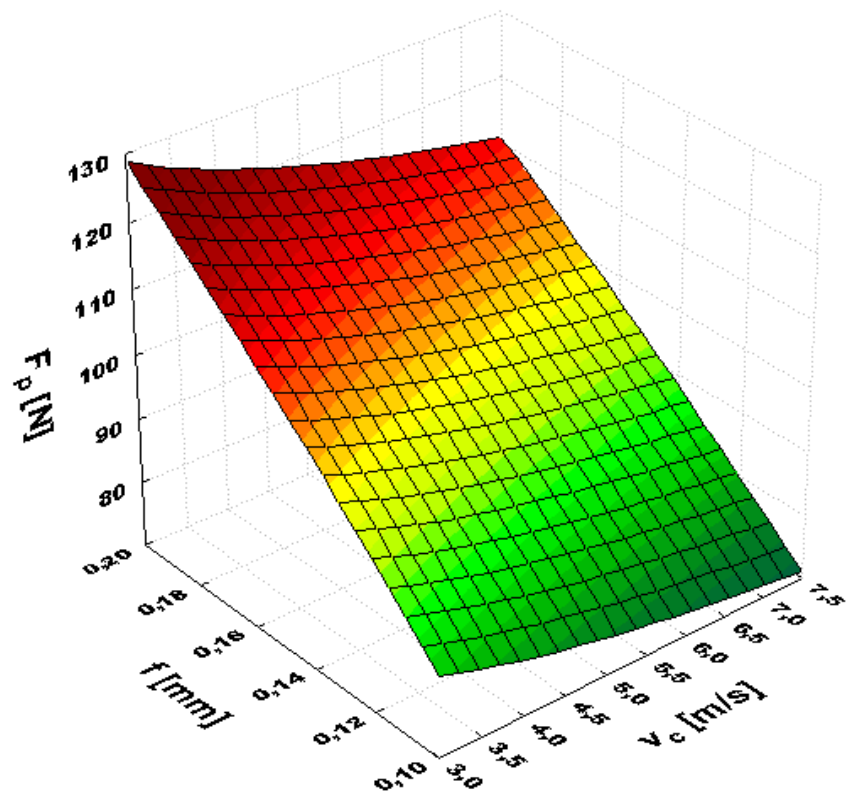
Analizom dobivenog matematičkog modela i njegovog grafičkog prikaza na slici 5.5.3.1. i slici 5.5.3.2. za natražnu silu rezanja F_p može se zaključiti sljedeće:

Na dijagramu na slici 5.5.3.1. primjetno je da s porastom brzine rezanja v_c , dolazi do pada iznosa natražne sile rezanja F_p . Primjetno je da iznos natražne sile rezanja F_p pada i s porastom dubine rezanja a_p zbog toga što je $\kappa_r > 90^\circ$.

Na dijagramu na slici 5.5.3.2. primjetno je da s porastom brzine rezanja v_c , dolazi do laganog pada iznosa natražne sile rezanja F_p . Ovdje najveći utjecaj na promjenu iznosa natražne sile rezanja F_p ima posmak f , tj. s povećanjem posmaka f iznos natražne sile rezanja F_p značajno raste.



Slika 5.5.3.1. Dijagram ovisnosti $F_p = f(v_c, a_p)$ za $f_{sr} = 0,20$ mm.



Slika 5.5.3.2. Dijagram ovisnosti $F_p = f(v_c, f)$ za $a_p = 1,4$ mm.

6. ZAKLJUČAK

Suvremeni trendovi u obradi tokarenjem su obrada materijala povišene tvrdoće, visokobrzinska obrada te suha obrada.

Tvrdo tokarenje je obrada obradaka tvrdoće iznad 45 HRC iako veoma često proces tvrde obrade sadrži obradu obradaka tvrdoće između 58 – 68 HRC. Tvrdo tokarenje je djelotvorno za povećanje kvalitete obrade i smanjenje troškova i vremena obrade kako bi se povećala ukupna konkurentnost.

Visokobrzinska obrada je trend koji se koristi s ciljem ostvarivanja većeg profita. Najveća prednost visokobrzinske obrade je povećanje produktivnosti. Suha obrada je jedan od trendova čiji su najvažniji razlozi primjene zdravlje radnika, zaštita okoliša, kao i smanjenje troškova. Kod primjene suhe obrade nastaje problem povećanog trenja između alata i obratka, nastaje problem odvođenja odvojenih čestica, problem čišćenja alata i obratka te problem hlađenja alata.

U eksperimentalnom djelu provedeno je istraživanje na tokarskom obradnom centru Trens SLB-500, a za alat se koristila rezna pločica od cermeta tvrtke Seco Tools. Materijal za obradu je čelik 16MnCr5 (Č 4320) koji je toplinski obrađen, tj. normaliziran. Ispitivanje je provedeno prema višefaktorskom planu pokusa. Za matematički model je uzet eksponencijalni oblik $2^3 + 4$, jer su tri nezavisna faktora. Izvršeno je ispitivanje utjecaja parametara obrade (brzina rezanja v_c , posmak f , dubina obrade a_p) na glavnu, posmičnu i natražnu silu rezanja. Treba napomenuti da je gornja granica brzine rezanja izabrana blizu granice visokih brzina rezanja kako bi se prikazalo ponašanje sila u prijelaznom području.

Na osnovu matematičkog modela i prikazanih grafova može se zaključiti sljedeće:

- Za glavnu silu rezanja F_c :
Uočeno je povećanje glavne sile rezanja F_c kako se povećavao posmak f i dubina rezanja a_p , gdje se vidi značajnije povećanje glavne sile rezanja pri povećanju dubine rezanja. Uočeno je još da se pri povećanju brzine rezanja v_c glavna sila F_c polagano smanjuje.
- Za posmičnu silu rezanja F_f :
Vidimo da povećanjem posmaka f i dubine rezanja a_p dolazi do rasta posmične sile. Porast brzine rezanja v_c nema veliki utjecaj na posmičnu silu, iako je uočeno polagano smanjenje posmične sile.
- Za natražnu silu F_p :

Uočeno je da porastom brzine rezanja v_c i porastom dubine rezanja a_p natražna sila se smanjuje, dok povećanjem posmaka f iznos natražne sile raste.

7. LITERATURA

- [1] <http://www.fsb.hr/kas>, Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem
- [2] Ekinović, S.: Obrada rezanjem, Dom štampe, Zenica, 2001.
- [3] http://web-trgovina.metal-kovis.hr/slike/velike/tokarski-noz-iso2-16%C3%9716-S-531_1.jpg
- [4] <http://www.fsb.hr/kas>, Postupci obrade odvajanjem
- [5] Škorić, Stephan: Istraživanje pogodnosti obrade ortogonalnim okruglim glodanjem, Doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 2002.
- [6] http://img.alibaba.com/img/pb/346/803/241/1271037877116_hz_myalibaba_web2_9660.jpg
- [7] Šavar ooč II dio
- [8] Šavar ooč I dio
- [9] http://books.google.hr/books?id=_BE2O1AvYq8C&pg=PA1&lpg=PA1&dq=hard+machining+definition&source=bl&ots=-PabRFJdte&sig=lheal8dfLoobSAKVVIMCoU6zxO0&hl=hr&sa=X&ei=Z-knT8SQPMfs-gbA05mkBQ&ved=0CCoQ6AEwAQ#v=twopage&q=hard%20machining%20definition&f=true
- [10] E.Zeren; T.Özel: Hard turning Technology, Report No MARL-01, The State University of New Jersey, Piscataway, June 2002
- [11] <http://www.clemson.edu/ces/camsil/publications/jpaper10.pdf>
- [12] Stoić, Antun: Obradivost tvrdih materijala visokobrzinskim tokarenjem, Doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 2002.
- [13] <http://hardingeus.com/usr/pdf/hardturn/ASME.pdf>
- [14] http://www.wzl.rwth-aachen.de/en/629c52491e476b86c1256f580026aef2/mt_i_exercise_8.pdf
- [15] <http://acta.fih.upt.ro/pdf/2010-3/ACTA-2010-3-13.pdf>
- [16] http://coewww.rutgers.edu/~ie/sub_nav/centers_labs/MARL/pdf/2004-ozel-hsu-zeren.pdf
- [17] http://www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_pp1592-1595.pdf
- [18] http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2009/jeas_0509_190.pdf
- [19] <http://www.sumitomo-hardmetal.co.uk/produkte-detail.php?lang=en&nr=1>
- [20] Proizvodna oprema Zlatan Car
- [21] <http://www.cnccookbook.com/CCNCMillFeedsSpeedsHeat.htm>
- [22] <http://www.allbusiness.com/professional-scientific/scientific-research-development/508569-1.html>
- [23] <http://blueswarf.com/productcart/pc/viewcontent.asp?idpage=198>
- [24] Škorić, Stephan: Modeliranje funkcija obradivosti (predavanja), FSB, Zagreb, 2007.
- [25] <http://www.trens.sk>
- [26] <http://www.secotools.com>