

Optimiziranje vibracijskog stanja u postupku obrade tokarenjem

Baričak, Viktor

Doctoral thesis / Disertacija

2004

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:235:497859>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-13**

Repository / Repozitorij:

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



**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU**

**OPTIMIZIRANJE VIBRACIJSKOG STANJA U
POSTUPKU OBRADJE TOKARENJEM**

DOKTORSKA DISERTACIJA

VIKTOR BARIČAK

ZAGREB, 2004.

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU**

**OPTIMIZIRANJE VIBRACIJSKOG STANJA U
POSTUPKU OBRADJE TOKARENJEM**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Dr.sc. Milenko Stegić, red. prof.

ZAGREB, 2004.

KLJUČNE DOKUMENTACIONE INFORMACIJE:

U D K:

Ključne riječi: **parametri obrade, geometrija alata, samouzbudne vibracije, kvaliteta površine, CNC strojevi, modeliranje, optimizacija.**

Znanstveno područje :	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb
Mentor rada :	Dr.sc. Milenko Stegić, red. prof.
Broj stranica :	IX +120
Broj slika :	120
Broj tablica :	39
Broj korištenih bibliografskih jedinica :	65
Prilozi:	80 stranica
Datum obrane:	
Povjerenstvo:	Dr.sc.Nikola Šakić, red. prof. Dr.sc.Milenko Stegić, red. prof. Dr.sc.Sanjin Mahović, red.prof. Dr.sc.Tomo Udiljak, van. prof. Dr.sc. Franci Čuš, red. prof. Fakultet za strojništvo, Maribor
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Ivana Lučića 5, Zagreb, Hrvatska

ZAHVALA

Velika želja za istraživanjima u području vibracija alatnih strojeva i matematičkog modeliranja, ne bi mi uspjela bez sveobuhvatne i iskrene pomoći mentora **dr. sc. Miljeka Stegića, red. prof.**, predsjednika komisije **dr. sc. Nikole Šakić red. prof.**, članova komisije **dr. sc. Sanjina Mahović, red. prof.**, **dr. sc. Tome Udiljak, izvan. prof.** i **dr. sc. Franca Čuš, red. prof.** koji su se prihvatili da me vode u tijeku izrade kao i na stručnim savjetima te moralnoj podršci do okončanja doktorske disertacije.

U Zagrebu, 7.12. 2004. god.

Viktor Baričak

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
1.1.	CILJ ISTRAŽIVANJA	12
1.2.	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	14
1.3.	POSTAVKE HIPOTEZE	15
2.	TEORIJSKA RAZMATRANJA	17
2.1.	JEDNADŽBE VIBRIRANJA	17
2.1.1.	Poprečne (fleksijske) vibracije grede	20
2.1.2.	Vibriranje obratka	21
2.1.3.	Vibriranje pogonskog sklopa (motor – reduktor)	22
2.2.	VIBRACIJE TIJEKOM PROCESA OBRADE	25
2.2.1.	Prisilne vibracije pri procesu obrade na CNC strojevima	26
2.2.2.	Samouzbudne vibracije pri procesu obrade na CNC strojevima	27
2.2.3.	Metode uklanjanja i smanjenja vibracija	31
2.2.4.	Određivanje sile samouzbudnih vibracija	34
2.2.4.1.	Mehanički model procesa odvajanja čestica	38
2.2.4.2.	Koeficijenti sile odvajanja čestica	40
2.2.4.3.	Ovisnost sile odvajanja čestica o relativnom pomaku alata spram obratka	43
2.2.4.4.	Opći oblik sile odvajanja čestica pri samouzbudnim vibracijama	47
2.2.5.	Diferencijalna jednačina samouzbudnih vibracija	48
3.	OPĆENITO O OBRADI NA CNC TOKARILICI	50
3.1.	STRUKTURA MATERIJALA	50
3.2.	UTJECAJNI FAKTORI NA TOČNOST OBRADE	51
3.3.	TOČNOST STROJA I KRUTOST TEHNOLOŠKOG SUSTAVA	51
3.4.	RADNI ALAT	53
3.5.	EKSPLOATACIJSKE KARAKTERISTIKE ALATA ZA TOKARENJE I OCJENA KVALITETE	56
3.6.	HRAPAVOST POVRŠINE	56
4.	POKUSNA ISTRAŽIVANJA	59
4.1.	MATERIJAL POKUSNOG UZORKA – OBRADAK	59
4.2.	MJERNA OPREMA	60
4.2.1.	Obradni centar	60
4.2.2.	Nosač mjernih osjetila	61
4.2.3.	Opće smjernice o izboru osjetila i mjerenjima vibracija	62
4.2.4.	Mjerenje hrapavosti obrađene površine	66
4.3.	PLAN POKUSA	69
4.3.1.	Tehnološki parametri obrade	71
4.3.2.	Geometrijski parametri alata	72
4.4.	REZULTATI POKUSNIH ISTRAŽIVANJA	72
4.4.1.	Rezultati pokusnih istraživanja hrapavosti površina	72
4.4.1.1.	Rezultati mjerenja hrapavosti obrađenih površina obradaka Ø20	72

4.4.1.2	Rezultati mjerenja hrapavosti obrađenih površina obradaka Ø40	75
4.5	ANALIZA REZULTATA MJERENJA HRAPAVOSTI POVRŠINA OBRADAKA	78
4.5.1.	Rezultati mjerenja hrapavosti.....	84
4.5.1.1.	Prosječna hrapavost obradaka Ø20 mm	84
4.5.1.2.	Prosječna hrapavost obradaka Ø40 mm	85
5.	MATEMATIČKO MODELIRANJE	87
5.1.	SHEMA MODELIRANJA.....	87
5.2.	IZBOR RAZINE PARAMETARA I KODIRANJA.....	87
5.3.	MATRICA EKSPERIMENTA I POSTUPKA MODELIRANJA	88
5.4.	IZBOR POLAZNOG MATEMATIČKOG MODELA	<u>80</u>
6.	MODELIRANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE OBRADKA.....	<u>81</u>
6.1.	SHEMA MODELIRANJA HRAPAVOSTI POVRŠINE	<u>81</u>
6.2.	IZBOR NIVOVA PARAMETARA I KODIRANJA.....	<u>81</u>
6.2.1.	Matrica pokusa i postupka modeliranja.....	<u>82</u>
6.3.	IZBOR POLAZNOG MATEMATIČKOG MODELA	<u>82</u>
6.4.	MATEMATIČKI MODEL HRAPAVOSTI DRUGOG REDA - ANALIZA POKUSNIH PODATAKA	<u>82</u>
6.5.	OPTIMIZIRANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE OBRADAKA	<u>87</u>
6.5.1.	Optimalna hrapavost površine dobijena pokusom	97
6.5.2.	Optimalna hrapavost površine	<u>87</u>
7.	REZULTATI POKUSNIH ISTRAŽIVANJA AMPLITUDA SAMOUZBUDNIH VIBRACIJA	<u>90</u>
7.1.	SISTEMATIZIRANJE REZULTATA MJERENJA AMPLITUDA SAMOUZBUDNIH VIBRACIJA OBRADAKA Ø20 mm i Ø40 mm.....	<u>91</u>
7.2.	ANALIZA REZULTATA MJERENJA AMPLITUDA VIBRACIJA OBRADAKA	<u>97</u>
8.	MODELIRANJE AMPLITUDE SAMOUZBUDNIH VIBRACIJA ...	<u>99</u>
8.1	SHEMA MODELIRANJA AMPLITUDA	<u>99</u>
8.2.	IZBOR NIVOVA PARAMETARA I KODIRANJA.....	<u>99</u>
8.2.1.	Matrica eksperimenta i postupka modeliranja	<u>100</u>
8.3.	IZBOR POLAZNOG MATEMATIČKOG MODELA	<u>100</u>
8.4.	MATEMATIČKI MODEL AMPLITUDA	101
8.5.	OPTIMIZIRANJE AMPLITUDE SAMOUZBUDNIH VIBRACIJA..	105
8.5.1.	Grafički prikaz optimalne amplitude samouzbudnih vibracija pokusom dobijenih podataka	105
8.5.2.	Optimalna amplituda vibracija DESIGN-EXPERT SOFTWARE alatom	106
9.	OPTIMALNE VRIJEDNOSTI	108

10.	VERIFIKACIJA POSTVLJENE HIPOTEZE.....	109
11.	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA.....	110
12.	PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA.....	112
	KRATKA BIOGRAFIJA	119
	SHORT BIOGRAPHY	120
	PRILOG.....	

PREDGOVOR

Utjecaj samouzbudnih vibracija na kvalitet i točnost obrade je nedovoljno istraženo

VI

područje. Pojava samouzbudnih vibracija je prisutna kod svih obradnih sustava bez obzira na oblik i način kretanja alata i predmeta obrade (obradaka). Sa stajališta krutosti sustava (stroj, obradak, alat), alatni strojevi su izuzetno dobro riješeni. Kod novih konstrukcija alatnih strojeva-obradnih centara, prisutan je veliki broj operacija i alata koji izvode glavna odnosno pomoćna gibanja. U tim slučajevima samouzbudne vibracije se superponiraju i negativno utječu na točnost izrade obradaka. U današnjim uvjetima kvalitete proizvoda (EU standardi), zahtijeva niskih cijena i rokova isporuke, neophodno je smanjenje amplituda samouzbudnih vibracija. Ako se to ostvari proizvodi će biti izrađeni u višoj kvaliteti i konkurentniji na tržištu.

SAŽETAK RADA

Suvremeni pravci razvoja gospodarstva i tržišni uvjeti proizvodnje nameću potrebu istraživanja procesa obrade materijala odvajanjem čestica. Pored razvijenih i verificiranih metoda kojima se definira apsolutna obradivost, sve se više u proizvodnim uvjetima primjenjuju brze metode za definiranje relativne obradivosti materijala, funkcionalnog kvaliteta alata te kvaliteta izrade. Na ovim i sličnim istraživanjima radio je i radi čitav niz istraživača, a istraživanja imaju veliki praktični i teorijski značaj.

Obrada odvajanjem čestica je složen proces, a ta složenost se očituje velikim specifičnim tlakovima u zoni rezanja i visokim stupnjem zagrijanosti. Kao popratne pojave tijekom procesa obrade odvajanjem čestica su: mehanička i toplinska opterećenja, generiranje toplinske energije, trošenje i vibracije (samouzbudne). Analizom vibracija utvrđena je ovisnost istih od intenziteta sila pri odvajanju čestica. Sile pri odvajanju čestica su u funkcionalnoj ovisnosti od geometrije oštrice alata i tehnoloških parametara obrade.

Ovisnost vibracija i sila rezanja pri obradi odvajanjem čestica iskorištena je tako da su definirani: optimalna geometrija oštrice alata (γ i λ_r) i optimalni tehnološki parametri obrade (f i a_p) spram kriterija minimalne amplitude vibracija ($A|_{\min}$). Također je pokazano (pokusima potvrđeno) da kvalitet obrađene površine kao zahtijevane izlazne karakteristike koje se moraju ostvariti tijekom procesa odvajanja čestica ovisi o geometrijskim parametrima oštrice alata (γ i λ_r) i tehnološkim parametrima obrade (f i a_p). Optimalne vrijednosti geometrijskih parametara oštrice alata (γ i λ_r) i tehnoloških parametara obrade (f i a_p) dobijaju se po kriteriju da parametar R_z bude minimalan ($R_z|_{\min}$).

Ovisnost veličine amplitude vibracija o uvjetima obrade, geometrijskim parametrima oštrice alata i tehnološkim parametrima obrade može se pisati u obliku $A=A(c, f, a_p, \lambda_r, \gamma)$.

Ovisnost parametra kvalitete površine R_z o uvjetima obrade, geometrijskim parametrima oštrice alata i tehnoloških parametara obrade može se pisati u obliku $R_z=R_z(c, f, a_p, \lambda_r, \gamma)$.

Kao kriterij za optimiziranje parametara geometrije oštrice alata i tehnoloških parametara obrade uzete su minimalna vrijednost amplitude vibracija ($A|_{\min}$) i minimalna vrijednost parametara kvalitete ($R_z|_{\min}$).

Optimalne vrijednosti geometrijskih parametara oštrice alata (γ i λ_r) i parametri obrade (f i a_p) dobiveni po kriteriju $A|_{\min}$ i kriteriju $R_z|_{\min}$ su podudarne.

Mjerenje parametara vibracija (amplitude) je relativno prosto, rezultati pouzdani, a vrijeme mjerenja za potreban broj podataka relativno kratko (spram nekih drugih mjerenja), i mogu se izvoditi ne prekidajući proizvodni proces.

Mogućnosti definiranja optimalne geometrije oštrice alata, optimalnih tehnoloških parametara obrade, funkcionalnog kvaliteta alata te obradivosti s modelom za parametre vibracija (amplitude) ima veliki praktični značaj te mogućnost implementacije tog načina u laboratorijskim i proizvodnim uvjetima.

Ključne riječi: geometrija alata, parametri obrade, samouzbudne vibracije, kvalitet površine, CNC tokarilica, modeliranje i optimizacija.

SUMMARY

Contemporary directions of economic development and market conditions of modern production processes impose the need for the research of metal cutting processes. In addition to various well developed and verified methods which assess machinability, short and fast methods for assessing relative machinability of materials, functional quality of tools and machined parts quality are more and more used in real production conditions. Such researches, which have significant practical and theoretical experience, have been involving entire expert teams.

The metal cutting is a complex process, and its complexity is manifested in high specific pressure in the cutting zone and in high heating level. During the metal cutting process, various secondary effects occur, such as mechanical and thermal loads, tool wear and vibration (self-exciting). Analysis of vibrations shows dependency of these effects on intensity of the cutting forces. These forces functionally depend on cutting tool geometry and of machining conditions.

Dependence of vibrations and cutting forces during the metal cutting process has been used through definition of optimal cutting tool geometry (γ and λ_r) and optimal machining conditions (f and a_p) versus criteria of minimal amplitude of vibrations ($A|_{\min}$). It has also been proved (and practically explored) that the machined surface quality, in fact the required output characteristics to be achieved during the metal cutting process, depends on cutting tool geometry (γ and λ_r) and on machining conditions (f and a_p). Optimal values of geometrical parameters of the cutting edges (γ and λ_r) and of machining conditions (f and a_p) are obtained following the criteria that parameter R_z is minimal ($R_z|_{\min}$).

Dependence of the vibration amplitudes on the machining conditions, cutting tool geometry and cutting conditions could be formulated as $A = A(c, f, a_p, \lambda_r \text{ and } \gamma)$

Dependence of surface quality parameter R_z on the machining conditions, cutting tool geometry and cutting conditions could be formulated as $R_z = R_z(c, f, a_p, \lambda_r \text{ and } \gamma)$.

As a criteria for optimization of parameters of cutting tool geometry and of machining conditions, minimal values of the vibration amplitude ($A|_{\min}$) and minimal value of machined surface parameters ($R_z|_{\min}$) are used.

Optimal values of geometrical parameters of cutting edges of the tools (γ and λ_r) and machining conditions (f and a_p), obtained according to the criteria $A|_{\min}$ as and the criteria $R_z|_{\min}$ are identical.

Measurement of vibration parameters (amplitude) is relatively simple, results are reliable, and duration of the measurement for obtaining required number of data is relatively short (in comparison with some other measurements). These measurements can be done without interrupting the production process.

Possibilities for defining optimal cutting tool geometry, optimal machining conditions, functional quality of the tools, as well as machinability, by using the model of vibration parameters (amplitude) has enormous practical importance and possibility for implementation of such methodology in both laboratory and industrial conditions.

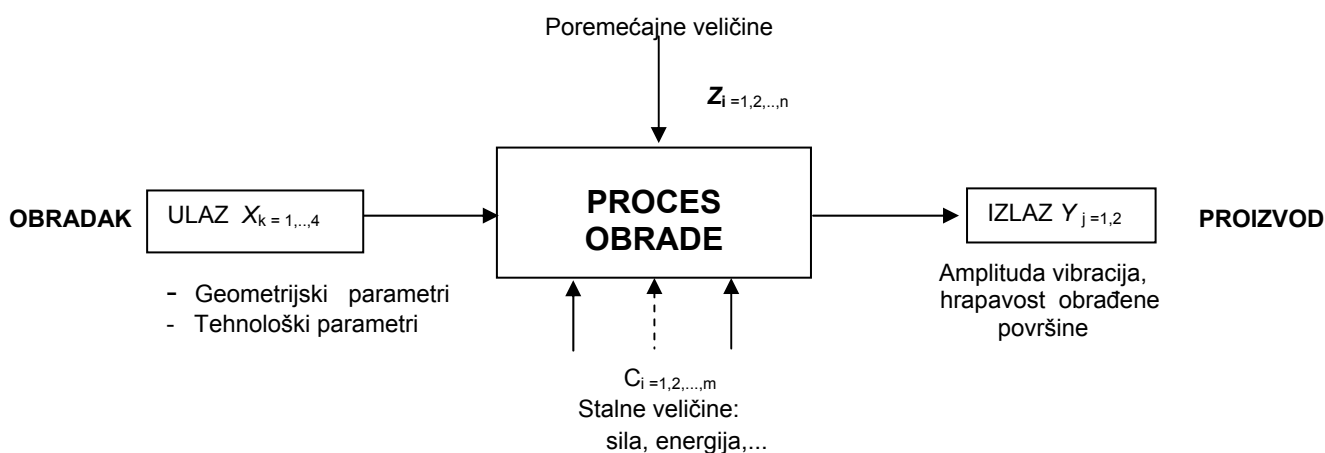
Key words: tools geometry, machining conditions, self-exciting vibrations, surface quality, CNC lathe, modelling and optimization.

1. UVOD

Zahtjevi koji se postvaljaju pred proizvođače strojeva kao što su: kvaliteta površine, krutost, točnost izrade, vremenom nisu izgubili na značaju. Razvoj tehnologije tokarenja zahtijeva stalnu primjenu novih dostignuća u znanosti. Istraživanja procesa tokarenja imaju praktični značaj ako rezultati istraživanja omogućuju projektiranje tehnološkog procesa koji će biti pouzdan (bez prekida usljed poremećaja) i polučivati bolje tehno-ekonomske efekte.

Od mnogobrojnih zahtjeva najčešće se od proizvoda traži: mogućnost izrade uz minimalne troškove, postizanje povećanog (zadanog) kvaliteta izrade, te maksimalna pouzdanost u eksploataciji.

U radu je primjenjena sofisticirana mjerna oprema i obavljena matematička obrada dobivenih podataka vibracija i hrapavosti obrađenih površina pri obradi na CNC tokarilici.



Slika 1.0. Kibernetički prikaz procesa obrade

Planiranje i priprema pokusa izvršeni su prema razvijenim i opće prihvaćenim metodama.

Matematička obrada podataka (za dobivanje matematičkih modela i definiranje optimalnih vrijednosti) provedena je primjenom postojeće programske podrške.

Dobiveni rezultati (preuzeti iz literature, a dobrim dijelom provjereni u laboratorijskim i proizvodnim uvjetima) mogu se upotrijebiti kao vjerodostojni (točni) za praksu i za dalja znanstvena istraživanja.

1.1. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja je da se na osnovu izabranih tehnoloških parametara obrade, geometrije alata i dobivenih pokusnih rezultata, dobiju matematički modeli optimalne vrijednosti amplituda vibracija i hrapavosti obrađenih površina. Treba napomenuti da dobiveni podaci za amplitude samouzbudnih vibracija su ustvari amplitude superponiranih vibracija, u kojima samouzbudne dominiraju. Samouzbudne vibracije su izmjerene na uzorcima iz dvije vrste konstrukcijskih čelika.

U ovoj disertaciji cilj istraživanja je takođe dostizanje zadovoljavajuće razine hrapavosti obrađene površine. Da bi to bilo moguće neophodno je definirati parametre koji utječu na hrapavost, a to su:

- tehnološki parametri obrade,
- geometrijski parametri alata i
- amplitude vibracija CNC tokarilice (stroj, alat, obradak)*.

Imajući u vidu da na proces obrade odvajanjem čestica utjecaj imaju i mnogi drugi elementi, kao što su: krutost sustava, vrsta materijala obratka te intenzitet sile, postavljena su slijedeća ograničenja:

- o Pokusi su provedeni na dva konstrukcijska čelika. Ti čelici su tipični predstavnici u strojarstvu za izradu složenih konstrukcija. Jedan je ugljični čelik s garantiranim kemijskim sastavom, a drugi legirani čelik.
- o Mjerenje parametara vibracija *frekvencije* i *amplituda* u tijeku obrade je vršena s odgovarajućom opremom.
- o Variranje geometrije reznog dijela alata (γ - kut prednje površine alata, λ_r - kut namještanja oštrice alata) pri provođenju pokusa imale su tri razine.
- o Samouzbudne vibracije u tijeku obrade dominiraju, te kao takve bile su predmet pokusa.

Pokusnim mjerenjima su:

- Izmjerene vrijednosti f_r (frekvencija) i A (amplituda) vibracija za pojedine kombinacije geometrijskih i tehnoloških parametara,
- Izmjerene vrijednosti R_z (hrapavosti) obrađenih površina za pojedine kombinacije geometrijskih i tehnoloških parametara.

Nakon pokusnih mjerenja urađeno je slijedeće:

- izvršena analiza dobivenih rezultata,
- definiran matematički model, za parametre hrapavosti i parametre vibracija,

* Amplitude vibracija obradnog sustava su ovisne o tehnološkim parametrima i reznog geometriji alata, te se tijekom procesa ne mogu upotrijebiti kao programski promjenljive veličine.

- utvrđeni geometrijski i tehnološki parametri obrade, (optimalni) s kojima se postižu minimalne vrijednosti parametara hrapavosti odnosno maksimalni kvalitet,
- utvrđeni geometrijski i tehnološki parametri obrade s kojima su postignute minimalne amplitude vibracija.

Što predstavlja realizaciju postavljenog cilja!

Proces obrade promatran sa stanovišta vibracija je stohastički proces, a rezultati pokusnih mjerenja amplituda vibracija i hrapavosti obrađenih površina uvjeti za formiranje matematičkog modela. Kao kriterij za optimizaciju tehnoloških i geometrijskih parametara je minimalna hrapavost i minimalna amplituda vibracija.

1.2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Pregledom literaturnih podataka u: “Sveučilišnoj knjižnici” Zagreb, “Universitäts Bibliothek” Graz, Bibiloteka instituta “Termische Turbomaschinen” Graz, Bibiloteka instituta “Mechanica– vibroacustica” u Barceloni te pretraživanjem internetskih podataka nisu pronađeni podaci i naslovi koji se konkretnije odnose na samouzbudne vibracije u procesu obrade odvajanjem čestica (tokarenje) na CNC tokarilici. Međutim, istraživanja utjecaja samouzbudnih vibracija na hrapavost obrađene površine istraživana su, u smislu definiranja praga stabilnosti procesa obrade, što je prikazano u literaturi npr. [1,7,34,35,36,47 i 49]. Šire područje vibracija kod alatnih strojeva prikazano je u literaturi npr. [2,3,4,7,10,12,32,40,41 i 43].

Do sada izvedena istraživanja [7,34,35, 36,47 i 49] odnosila su se na:

- razmatranje samouzbudnih vibracija u cilju analize utjecaja pojedinih geometrijskih i kinematičkih parametara procesa rezanja i karakteristika alatnog stroja na njegovo dinamičko ponašanje, kao i analiziranje vibracijski stabilnih parametara obrade,
- proučavanje sila koje uzrokuju samouzbudne vibracije,
- razmatranje uvjeta stabilnosti samouzbudnih vibracija kao i uvjeta za koje su samouzbudne vibracije stabilne, kako bi se u ovisnosti o zahtjevanom stupnju prigušenja samouzbudnih vibracija mogli odabrati stabilni parametri rezanja,
- relativne samouzbudne vibracije između alata i obratka.

Samouzbudne vibracije ovisne o parametrima procesa obrade i karakteristika materijala obradka također su predmet analize.

Dakle, do sada izvedena istraživanja samouzbudnih vibracija na CNC tokarilici i njihov utjecaj na hrapavost površine nisu šire dostupna, što ne znači da neki svjetski proizvođači obradnih sustava nisu izvodili takva ispitivanja. Svi do sada učinjeni pokušaji od strane autora ovoga rada da se dobiju informacije iz ovoga područja od vodećih svjetskih proizvođača CNC tokarilica i alata ostali su bez odgovora, što navodi na zaključak da se radi o nedostupnosti podataka za širu uporabu.

1.3. POSTAVKE HIPOTEZE

Samouzbudne vibracije su inducirane konstantnom silom koju održava stalna opskrba energijom, gdje vibracijski sustav ima unutarnji mehanizam pretvorbe energije te periodički tu energiju oslobađa podržavajući vibracije, slika 1.1.

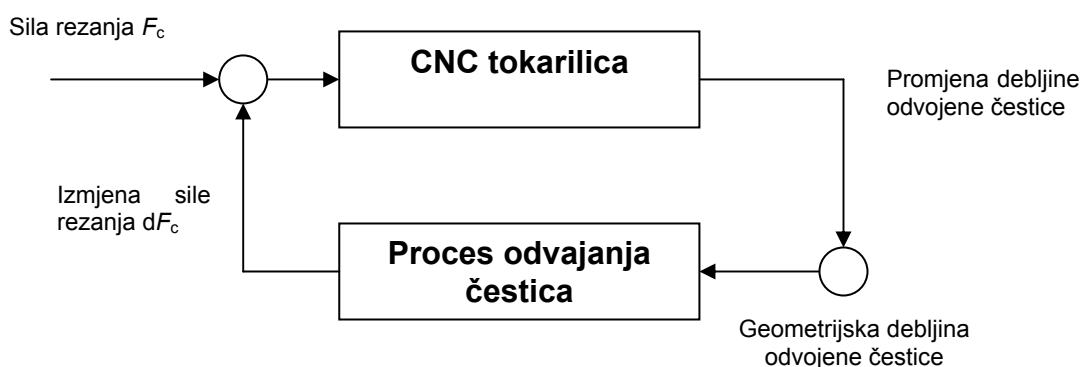
Karakteristike samouzbudnih vibracija mogle bi se prikazati u slijedećem:

1. Energiju, za samouzbudne vibracije daje stalan vanjski izvor preko obratka i vretena (slika 1.2),
2. U trenutnom radu amplituda se povećavaju, a vibracije su periodične,
3. U stalnom radu amplituda periodički raste do određene granice, frekvencija odziva je vrlo blizu nekoj od vlastitih frekvencija sustava,
4. Glavno svojstvo je postojanje nelinearnosti sustava koje ima za posljedicu povratnu petlju (slika 1.2).



Slika 1.1. Svojstva samouzbudnih vibracija pri obradi odvajanjem čestica

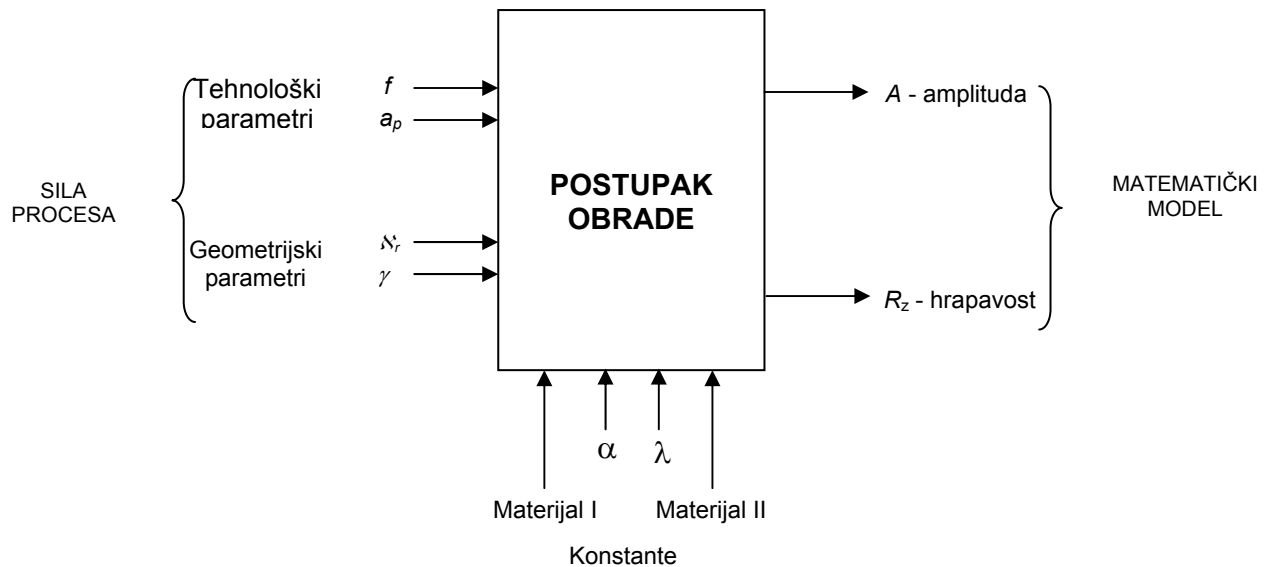
Samouzbudne vibracije su neminovna prateća pojava kod procesa obrade metala rezanjem. Zahtjevi za povećanom točnošću značajno poskupljuju proces obrade a samim time povećavaju cijenu proizvoda, što ima za posljedicu smanjenje konkurentne sposobnosti poduzeća.



Slika 1.2. Prikaz sustava CNC tokarilice [32]

Istraživanjima je utvrđeno da postoji ovisnost: veličina amplitude vibracije A i hrapavosti površine obrade R_z o geometriji alata (λ_r i γ) i tehnološkim parametrima procesa obrade (f , a_p), to jest $A=A(f, a_p, \lambda_r \text{ i } \gamma)$, odnosno $R_z=R_z(f, a_p, \lambda_r \text{ i } \gamma)$. Optimiziranjem tehnoloških parametara obrade i geometrije oštice alata moguće je minimizirati hrapavost površine i amplitude vibracija, to jest kada su (f , a_p , λ_r i γ) optimalni tada je A minimalna, odnosno R_z je minimalna. Parametri koji utječu na pojavu samouzbudnih vibracija su: brzina, polumjer alata, dubina odvajanja čestica, posmak, geometrija alata, sredstvo za hlađenje,

karakteristike CNC stroja, materijal obratka, konstrukcijska izvedba alata... Parametri koji značajno utječu na nastajanje samouzbudnih vibracija su geometrijski λ_r i γ te tehnološki f i a_p [3]. Radi te činjenice ti parametri su uzeti pri sastavljanju matematičkog modela. Dijagram postavljene hipoteze (na temelju koje je rađen matematički model), predložen je na slici 1.3.



Slika 1.3. Opći model pokusnog istraživanja

2. TEORIJSKA RAZMATRANJA

Postoje različiti konstrukcijski oblici radnih vratila kod obradnih centara. Na radnom vratilu, uležištenom na dva mjesta, nalazi se stezna glava. Tijekom obrade dolazi do pojave vibracija sustava stroj-alat-obradak. U ovom poglavlju dat je pregled osnovnih načina vibriranja pri obradi na CNC strojevima, uključujući i samouzbudne vibracije.

2.1. JEDNADŽBE VIBRIRANJA

Mehaničke vibracije se dijele, obzirom na postojanje prigušenja ili uzbude, na:

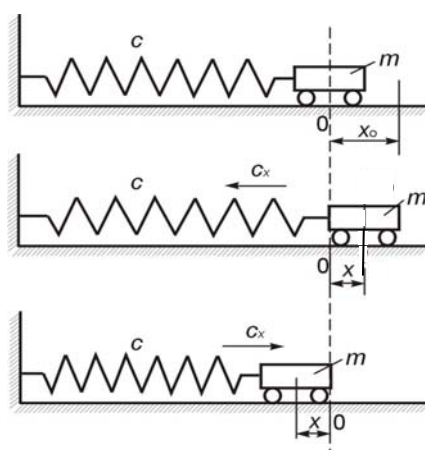
- slobodne vibracije bez prigušenja,
- slobodne vibracije s prigušenjem,
- prisilne vibracije bez prigušenja i
- prisilne vibracije s prigušenjem.

Navedene mehaničke vibracije su obično harmonijskog porijekla. U ovom radu se izučavaju, mjere i analiziraju samouzbudne vibracije. Za samouzbudne vibracije se može reći da spadaju u grupu neharmonijskih vibracija.

Jednadžbe za navedena četiri osnovna oblika harmonijskih vibracija prikazane su pomoću diferencijalnih jednadžbi drugog reda.

a) Slobodne vibracije bez prigušenja

Slobodno harmonijsko vibriranje je osnovni oblik vibriranja jer su zanemareni trenje i uzbude.



Slika 2.1. Najjednostavniji model slobodnog harmonijskog vibriranja

Homogena diferencijalna jednačba slobodnih neprigušenih vibracija, po osi x , slijedi iz modela prikazanog na slici 2.1, a sastoji se od inercijske i elastične sile:

$$m\ddot{x} + cx = 0, \quad (2.1)$$

gdje su:

- m – masa koja vibrira,
- c – konstanta krutosti elastičnog elementa,
- x – vibracijski pomak u x smijeru i
- $\ddot{x}$ – vibracijsko ubrzanje u x smijeru.

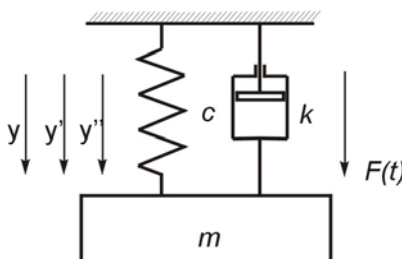
Diferencijalna jednačba slobodnih vibracija (2.1) ima rješenje oblika:

$$x = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t, \quad (2.2)$$

gdje su:

- A i B – konstante,
- ω_0 – kružna vlastita frekvencija slobodnih vibracija,
- t – vrijeme.

Diferencijalna jednačba slobodnih neprigušenih vibracija u y smijeru slijedi iz modela prikazanog na slici 2.2:



Slika 2.2. Najjednostavniji model prisilnih prigušenih vibracija

$$m\ddot{y} + cy = 0, \quad (2.3)$$

gdje su:

- y – vibracijski pomak u y smijeru,
- $\ddot{y}$ – vibracijsko ubrzanje u y smijeru .

Diferencijalna jednačba slobodnih vibracija (2.3) ima rješenje oblika:

$$y = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t, \quad (2.4)$$

gdje je značenje oznake kao kod jednačbe (2.2).

b) Slobodne vibracije s prigušenjem

Homogena diferencijalna jednačba drugog reda slobodnih vibracija s viskoznom prigušnom silom proizilazi iz modela sa slike 2.2, i predstavljena je jednačbom:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = 0, \quad (2.5)$$

gdje su:

- m – masa koja vibrira,
- b – konstanta viskoznog prigušenja,
- $\dot{y}$ – vibracijska brzina u y smjeru i
- $\ddot{y}$ – vibracijsko ubrzanje u y smjeru i .

Karakteristična jednačba jest:

$$\lambda^2 + 2\delta\lambda + \omega^2 = 0, \quad (2.6)$$

Diferencijalna jednačba slobodnih vibracija (2.5) pri vibriranju po osi y ima rješenje oblika:

$$y = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} = e^{-\delta t} (A \cos pt + B \sin pt), \quad (2.7)$$

gdje je:

p – kružna frekvencija vibracija prigušenog sustava.

c) Prisilne vibracije bez prigušenja

Nehomogena diferencijalna jednačba drugog reda s konstantnim koeficijentima, prisilnih vibracija bez prigušenja, proizilazi iz modela prikazanog na slici 2.2. i ima oblik:

$$m\ddot{y} + cy = F \cos(\Omega t - \Theta_0), \quad (2.8)$$

gdje su:

- Ω – kružna frekvencija uzbudne sile,
- F – amplituda uzbudne sile i
- Θ_0 – kut faznog pomaka uzbudne sile.

Rješenje jednačbe 2.8 se sastoji iz homogenog y_h i partikularnog y_p dijela:

$$y = y_h + y_p. \quad (2.9)$$

Homogeni dio već je određen, a partikularni dio rješenja ima oblik:

$$y_p = C \cos(\Omega t - \Theta_0) + D \sin(\Omega t - \Theta_0), \quad (2.10)$$

gdje su:

C i D – konstante,

a opće rješenje prisilnih vibracija sustava bez prigušenja ima oblik:

$$y = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t + C \cos (\Omega t - \Theta_0). \quad (2.11)$$

U jednadžbi (2.11) prva dva člana predstavljaju slobodnu komponentu vibracija, dok treći član predstavlja prisilnu komponentu vibracija.

d) Prisilne vibracije s prigušenjem

Jednadžba prisilnih vibracija s prigušenjem, modela prikazanog na slici 2.2, jest:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F \cos(\Omega t - \Theta_0) \quad (2.12)$$

Partikularni dio rješenja jednadžbe 2.12 ima oblik:

$$y_p = C \cos (\Omega t - \Theta_0) + D \sin (\Omega t - \Theta_0) \quad (2.13)$$

a opće rješenje jednadžbe jest:

$$y = e^{-\delta t} (A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t) + N \cos (\Omega t - \beta), \quad (2.14)$$

gdje su:

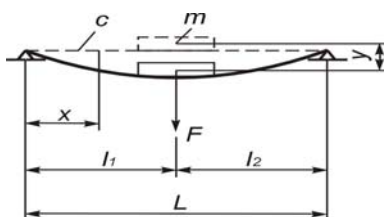
- ω_0 – kružna vlastita frekvencija slobodnih vibracija,
- N – amplituda prisilne komponente vibracija i
- β – kut faznog pomaka,
- δ – ($\delta = b/m$), faktor prigušenja.

2.1.1. Poprečne (fleksijske) vibracije grede

Strojevi za obradu mogu vibrirati složeno, pa je i rješavanje njihovih matematičkih modela složeno. S toga se u teorijskim razmatranjima problem pojednostavljuje. Značajno pojednostavljenje problema nastaje zanemarivanjem inercije elastičnih elemenata.

Dinamičke veličine modela se određuju tako da vibracijsko ponašanje ostane kao na originalnom modelu.

Gibanje koncentrirane mase određeno je pomakom x , odnosno poprečne vibracije određuje funkcija $y(x)$, a oblik vibriranja prikazan je na primjeru proste grede, slika 2.3.

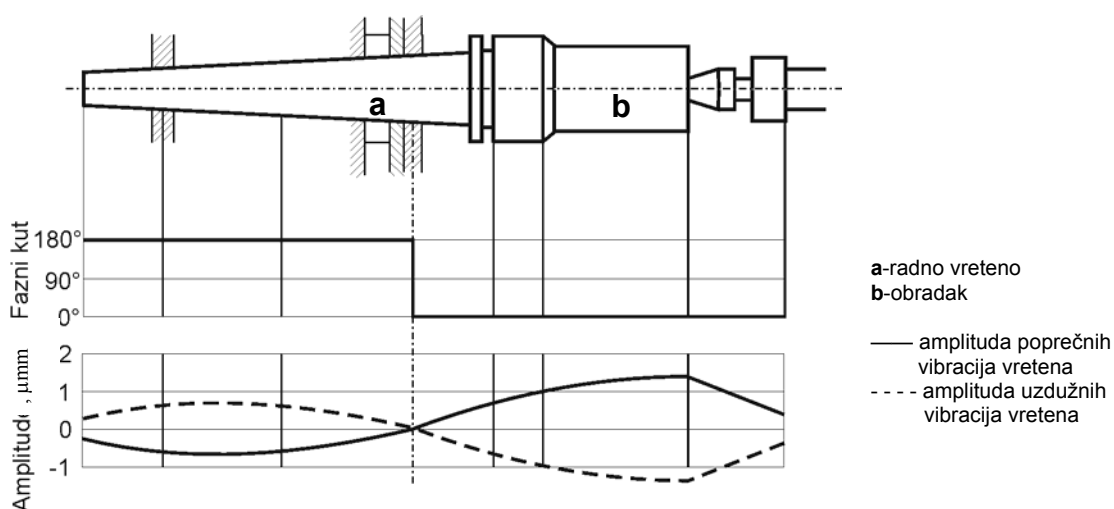


Slika 2.3. Poprečne vibracije proste grede

2.1.2. Vibriranje obratka

Krutost podsklopa, (obradak-vreteno) igra značajnu ulogu pri analizi vibriranja sustava. Ta krutost je ovisna o konstrukcijskim veličinama, materijalu i vrsti uležištenja.

Analizirajući podsklop (obradak-vreteno) očito je da glavni ležaj miruje (čvor vibracija), a da je amplituda na lijevom kraju vretena različita od nule.

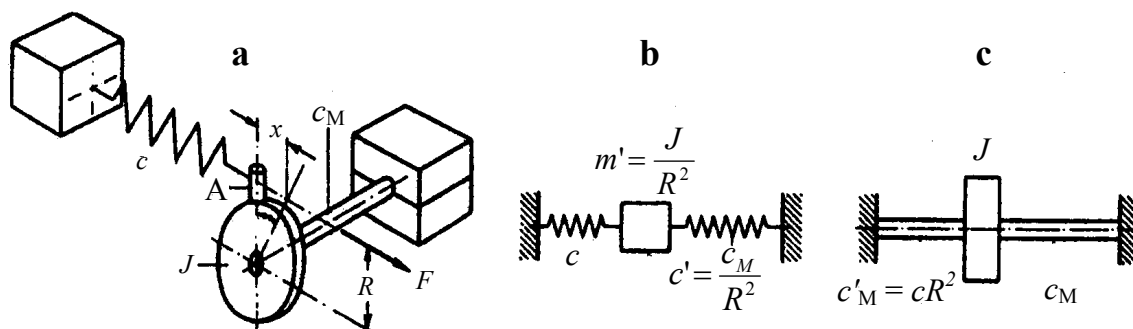


Slika 2.4. Shema vibriranja sklopa radno vreteno-obradak

Također se da primijetiti da postoji dinamički progib na vrhu konjića što se može smatrati kao mjesto "gerberovog" zgloba. Slika 2.4, predočava formu vibriranja, što upućuje da je amplituda poprečnih vibracija vretena (neprekinuta krivulja) veća od uzdužnih vibracija (isprekidana krivulja), mada je taj omjer redovito mali. Do sada poznati rezultati istraživanja ipak ne daju jasan pregled omjera poprečnih i uzdužnih vibriranja radnog vretena i obratka, a vlastite frekvencije radnog vretena su od 200 do 300 Hz.

2.1.3. Vibriranje pogonskog sklopa (motor – reduktor)

Jedan od značajnijih uzročnika pojave vibracija pri obradi na obradnom centru jest njegov pogonski sklop. U tom sklopu postoje zupčanici, klizni i kotrljajući ležajevi, vratila i drugi elementi. Jednostavan vibracijski model pogonskog sklopa prikazan je na slici 2.5a ili još jednostavniji jest translacijski model predložen na 2.5b, odnosno rotacijski model predložen na 2.5c.



a) Jednostavan vibracijski sustav

b) Translacijski sustav

c) Rotacijski sustav

Slika 2.5. Vibracijski sustavi pogonskog sklopa [1]

a.) Nadomjesni translacijski sustav

U translacijskom modelu rotacijska inercija se reducira na masu m' , na rastojanju R spram osi zakretanja, tako da je:

$$J = m' R^2, \quad (2.15)$$

pri čemu se R bira tako da m' bude u osi opruge. Na osnovu poznatih vrijednosti određuje se nadomjesna masa:

$$m' = \frac{J}{R^2}. \quad (2.16)$$

Torzijski moment $M = F R$, zakreće sustav za kut Θ :

$$\Theta = \frac{F R L}{I_p G} = \frac{F R}{c_M}, \quad (2.17)$$

pri čemu su: c_M – konstanta torzijske krutosti elastičnog elementa, F – sila u smjeru osi aksijalne opruge i L – duljina vratila.

Pomak točke A (slika 2.5 a) jest:

$$x = \Theta R = \frac{R^2}{c_M} F = \frac{F}{c'}, \quad (2.18)$$

pa je konstanta torzijskog elastičnog elementa zamjenjena s ekvivalentnom aksijalnom oprugom:

$$c' = \frac{c_M}{R^2} = \frac{I_p G}{LR^2}. \quad (2.19)$$

Za nadomjesni sustav (slika 2.5.b) vlastita kružna frekvencija s paralelnom vezom opruga jest:

$$\omega_o^2 = \frac{c + c'}{m'}. \quad (2.20)$$

b.) Torzijski (rotacijski) nadomjesni sustav

Povratni moment aksijalne opruge jest:

$$M = FR = cxR, \quad (2.21)$$

a budući da jest $\Theta = \frac{x}{R}$, jednadžba 2.21 ima oblik:

$$M = cR^2\Theta = c'_M\Theta, \quad (2.22)$$

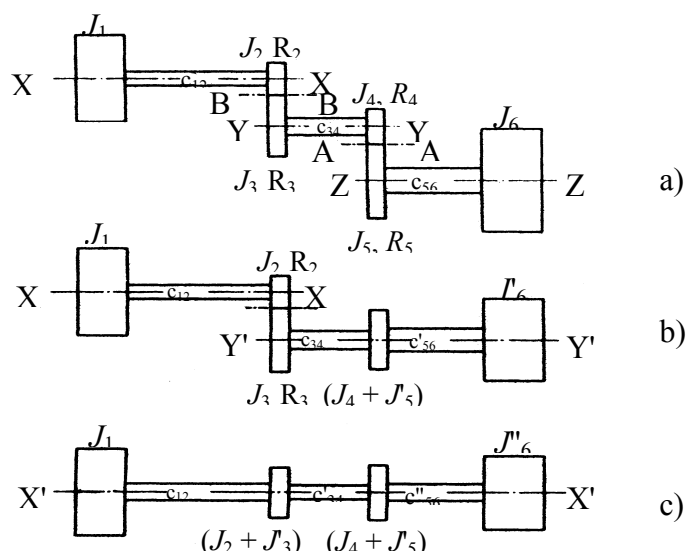
pa je ekvivalentna torzijska konstanta:

$$c'_M = cR^2, \quad (2.23)$$

odnosno vlastita kružna frekvencija ekvivalentnog torzijskog sustava jest:

$$\omega_o^2 = \frac{c'_M + c_M}{J} = \frac{R^2 c + c_M}{J}, \quad (2.24)$$

c.) Svođenje inercija reduktora



Slika 2.6. Svođenje inercija reduktora [1]

To se često primjenjuje kod računanja vlastitih frekvencija zupčastih prijenosnika, a pojednostavljen primjer svođenja pokazuje slika 2.6. Vratila YY i ZZ se svode na vratilo Y'Y' i to:

- vratilo ZZ (slika 2.6.a) se svodi na vratilo Y'Y' (slika 2.6.b),
- vratilo Y' Y' na vratilo X'X' (slika 2.6.c).

Kod toga se zanemaruje elastičnost zubi, pri čemu:

1. se svodi J_5 , c_{56} i J_6 na vratilo YY, provodi u dva koraka: prvo se odrede parametri svedeni na točku dodira A-A:

$$m_5' = \frac{J_5}{R_5^2}, \quad \bar{c}_{56}' = \frac{c_{56}}{R_5^2}, \quad m_6' = \frac{J_6}{R_5^2} \quad (2.25)$$

2. a zatim se parametri od A-A svode na vratilo Y' Y' pa je:

$$J_5' = m_5' R_4^2 = J_5 \frac{R_4^2}{R_5^2}, \quad c_{56}' = \bar{c}_{56}' R_4^2 = c_{56} \frac{R_4^2}{R_5^2}, \quad (2.26)$$

$$J_6' = m_6' R_4^2 = J_6 \frac{R_4^2}{R_5^2}.$$

Dakle parametri svedeni na vratilo YY, od vratila ZZ, dobivaju se množenjem s kvadratom omjera:

$$a_A = \frac{R_4}{R_5}, \quad (2.27)$$

to jest:

$$J_5' = J_5 a_A^2, \quad c_{56}' = c_{56} a_A^2, \quad J_6' = J_6 a_A^2. \quad (2.28)$$

Elementi svođenja na vratilo X'X' (slika 2.6.c) su:

$$J_3, c_{34}, \left(J_4 + J_5' \right), c_{56}', J_6', \quad (2.29)$$

pri čemu je prijenosni omjer $a_B = \frac{R_3}{R_4}$.

$$J_3' = J_3 a_B^2, \quad c_{34}' = c_{34} a_B^2, \quad \left(J_4 + J_5' \right)' = \left(J_4 + J_5' \right) a_B^2, \quad (2.30)$$

$$c_{56}'' = c_{56}' a_B^2, \quad J_6'' = J_6' a_B^2.$$

Na kraju je nadomjesni sustav X' X' (slika 2.6.c) određen s parametrima:

$$J_1, c_{12}, J_2 + J_3' = J_2 + J_3 a_B^2, \quad c_{34}' = c_{34} a_B^2$$

$$\left(J_4 + J_5' \right)' = \left(J_4 + J_5 a_A^2 \right) a_B^2, \quad c_{56}'' = c_{56} a_A^2 a_B^2 \quad (2.31)$$

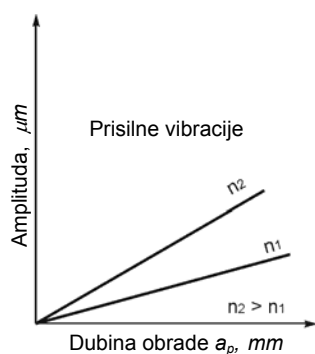
$$J_6'' = J_6 a_A^2 a_B^2.$$

2.2. VIBRACIJE TIJEKOM PROCESA OBRADE

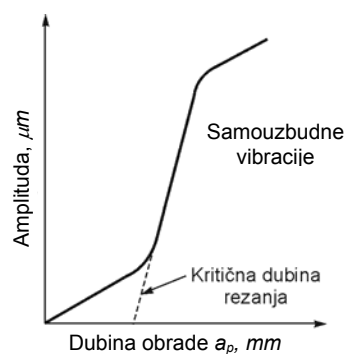
Vibracije (slobodne, prisilne i samouzbudne) nastale obradom odvajanjem čestica uzrokovane su uzbudnim silama i svojstvima elastičnog sustava: *stroj-alat-obradak*. Parametari pri procesu obrade uzrokuju mogućnost pojave vibracija i njihov intenzitet. Vibracije negativno djeluju tijekom procesa obrade te:

- smanjuju kvalitetu obrađene površine,
- ubrzavaju trošenje alata i oštećuju vitalne dijelove stroja,
- dovode do krzanja i loma alata, pri lošem izboru sredstava rada i parametara obrade te
- smanjuju produktivnost procesa rezanja.

Uzbudne sile, koje djeluje u elastičnom sustavu, *stroj-alat-obradak*, mogu uzrokovati prisilne i samouzbudne vibracije. Kvalitativna ovisnost amplituda prisilnih i samouzbudnih vibracija o dubini odvajanja čestica, predložena je na slikama 2.7 i 2.8.



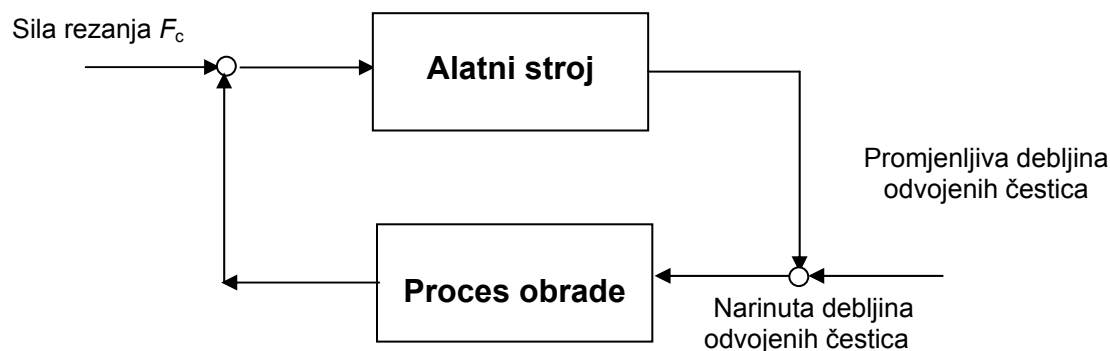
Slika 2.7. Ovisnost amplituda prisilnih vibracija o dubini obrade [32]



Slika 2.8. Ovisnost amplituda samouzbudnih vibracija o dubini obrade [32]

Amplitude, kod prisilnih i samouzbudnih vibracija, rastu s povećanjem dubine odvojenih čestica razmjerno uzbudnim silama

Pri obradi na CNC stroju na vibracije utječe: sila rezanja, karakteristike obradka, rezna geometrija alata, parametri procesa obrade te promjena presjeka reza. Shematski prikaz procesa vibriranja predložen je blok dijagramom na slici 2.9.



Slika 2.9. Blok dijagram alatnog stroja i procesa obrade

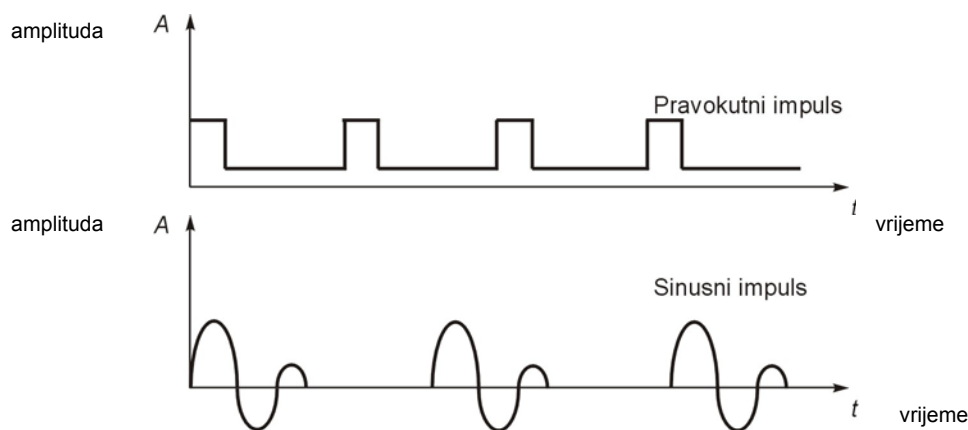
2.2.1. Prisilne vibracije pri procesu obrade na CNC strojevima

Prisilne vibracije alatnih strojeva mogu nastati zbog trajnog djelovanja periodične uzbudne sile (od nekih susjednih strojeva) i promjenljivih otpora rezanja (sila) tijekom procesa obrade na CNC strojevima, i to u:

- elastičnom sustavu: *alatni stroj-naprava-obradak-alat* i
- u procesu odvajanja čestica.

Prisilne vibracije vanjskog uzroka nastaju od neuravnoteženosti rotacijskih dijelova obradnog sustava. Dakako da su, u tom slučaju, moguće i rezonancije.

Za razliku od trajnog djelovanja uzbudne sile, kod impulsne uzbude, impuls zatrese alat, a potom slijede prigušene vibracije do pojave novog impulsa [32], što je predloženo slikom 2.10. Sinusni i pravokutni oblici impulsa (slika 2.10) pokazuju promjenu amplitude kod rotacijskih, a isto tako i kod translacijskih strojeva.



Slika 2.10. Prikaz udarnih uzbuda

Ako se prije nastanka novog impulsa vibracijski sustav ne umiri gibanja se zbrajaju.

Moment pogonskog motora određen je jednačbom:

$$M = k \frac{P_0}{n_0},$$

(2.32)

gdje su:

P_0 – snaga,

n_0 – frekvencija vrtnje radnog vretena.

k – konstanta.

Dijagram momenta pogonskog elektromotora, u ovisnosti o vremenu, dat je na slici 2.11.



Slika 2.11. Dijagram promjene momenta

2.2.2. Samouzbudne vibracije pri procesu obrade na CNC strojevima

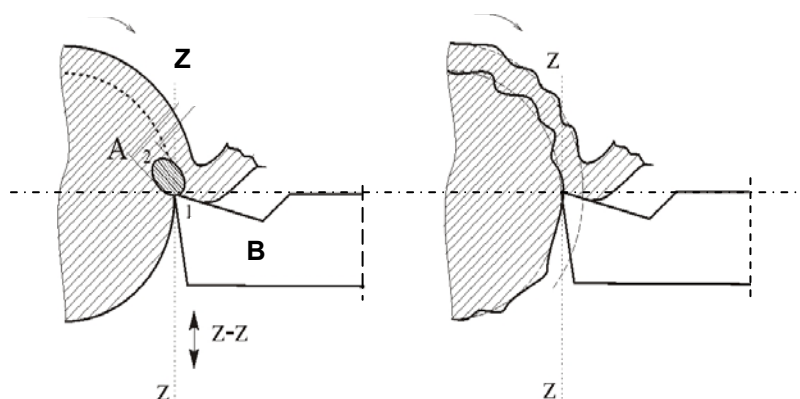
Samouzbudne vibracije ne nastaju kao posljedica djelovanja vanjskih periodičnih sila već je za pojavu samouzbudnih vibracija nužna određena unutarnja nestabilnost u samom sustavu: *radno vreteno-alat-obrađak*. Energetski gledano samouzbudne vibracije se napajaju iz konstantnih izvora, kao što je elektromotor, za razliku od prisilnih vibracija za koje mora postojati periodični izvor. U procesu odvajanja čestica u realnom elastičnom sustavu može postojati veći broj fizikalnih pojava koje uzrokuju samouzobudne vibracije, a koje su ovisne o:

- karakteristikama elastičnog sustava,
- karakteristikama procesa odvajanja čestica i
- fizikalnim vezama koje postoje između parametara složenog elastičnog sustava i procesa odvajanja čestica.

Kada je proces odvajanja čestica ustaljen, nastaje stalna sila rezanja (ne mijenja se s vremenom), pri čemu ona izaziva statičke deformacije elemenata koji leže u ravnini djelovanja sile. Ako toj sili dodamo dinamičku silu, koja se mijenja s vremenom (nastalu npr. obradom tvrdih mjesta u obratku), ta rezultirajuća sila uzrokuje odstupanja u relativnom gibanju alata, a kao rezultat nastaje promjena debljine odvojenog materijala. Nastala valovita površina uzrokuje dinamičku silu rezanja.

U određenim okolnostima može postojati sprega između samouzbudnih vibracija uzrokovanih zračnostima i trenjem u ležajevima i procesa odvajanja čestica. Ako su samouzbudne vibracije alata male (male amplitude), oštrica alata opisivat će zatvorenu krivulju, najčešće u obliku elipse.

U prvu grupu uzročnika samouzbudnih vibracija ubrajaju se nepravilnosti u samim prijenosnim elementima CNC tokarilice, naprimjer netočno izvedena ozubljenja, a zatim i hidraulični udar u hidrauličnom prijenosnom sustavu.



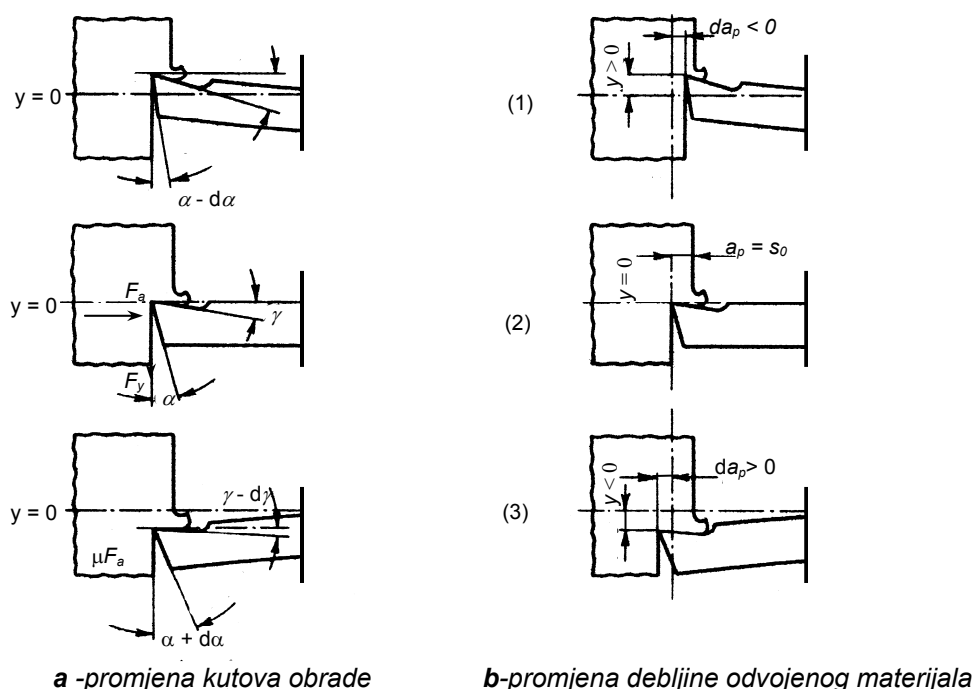
Slika 2.12. Relativno gibanje alata pri odvajanju čestica i izgled površine [3]

Samouzbudne vibracije nastaju i zbog sila trenja na dodirnim površinama lineta, vratila i drugih dijelova CNC strojeva. Frekvencija tih vibracija jednaka je frekvenciji izvora vibracija. Isto tako mogu i vibracije nekog susjednog stroja dati početni impuls i time prouzročiti samouzbudne vibracije alata stvaranjem jedne periodične sile; znači da statička sila dobiva dinamičku komponentu. Tako nastala dinamička rezultirajuća sila uzrokuje odstupanja u relativnom gibanju alata, a to uzrokuje promjenljivu dubinu obrade (slika 2.13).

Slika 2.13 predočava tri položaja radnog alata: ako je radni alat u gornjem maksimalnom položaju (1) za koji je kut prednje površine alata jest $\gamma + d\gamma$, ako je alat u ravnotežnom položaju (2) taj je kut γ , te ako je radni alat u donjem položaju (3) kut prednje površine alata jest $\gamma - d\gamma$, a stražnji kut jest $\alpha + d\alpha$. U tom poluperiodu gibanja od 2 do 1 (slika 2.12) energija se predaje vibracijskom sustavu preko sile rezanja. Dubina obrade veća je nego u prvom poluperiodu gibanja od 1 do 2 (slika. 2.12), pa će i sila rezanja tijekom tog gibanja oštice biti veća.

Tijekom gibanja od 1 prema 2, (slika 2.13), odnosno, kada se mijenja smjer vibriranja alata, tj. počinje gibanje alata prema gore, od 3 do 1, alat prolazi ravnotežni položaj 2 i dolazi do gornjeg položaja 1, gdje je prednji kut $\gamma + d\gamma$, a stražnji je $\alpha - d\alpha$. U tom poluperiodu energija se troši jer sila rezanja i pomak oštice alata imaju suprotan smjer. Višak energije od 2 do 1 (slika. 2.12) dobiven u procesu odvajanja čestica, predstavlja vibracijsku energiju, tj. energiju samouzbudnih vibracija koja će podržavati vibracije radnog alata.

Izborom parametara obrade (geometrijskih i tehnoloških) može se utjecati na dinamičku stabilnost samouzbudnih vibracija sustava.



Slika 2.13 Modeli vibriranja alata [1]

Mehanizam nastajanja samouzbudnih vibracija ilustriran je na slici 2.13 gdje pomak radnog alata iz ravnotežnog položaja 2 na dolje traje sve dok elastična sila alata ne postane jednaka sili trenja između alata i skidanog materijala (odreska), a pri brzini relativnog gibanja jednakoj razlici brzina gibanja odreska i alata.

U krajnjem položaju alata, na dolje, ta jednakost nije zadovoljena, F_y postaje veća od F_{tr} (slika 2.14) jer brzina relativnog gibanja raste od $V_{odreska} - V_{alata}$ do $V_{odreska} + V_{alata}$, a sila rezanja se smanjuje zbog djelovanja elastične sile. Alat se giba ubrzano prema gore, prolazi položaj ravnoteže, doseže krajnji gornji položaj, kada nastaje samouzbudni vibracijski ciklus.

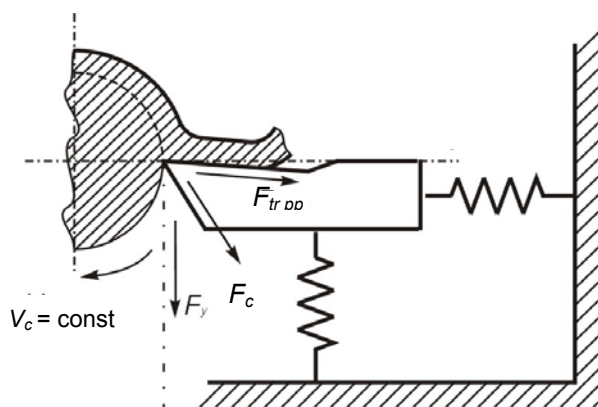
Nužan uvjet za pojavu samouzbudnih vibracija tog tipa jest zaostajanje u fazi pomaka za silom. Do tog zaostajanja u fazi može doći usljed dva razloga:

1. Debljina odvojene čestice razmjerna je pomaku elastičnog sustava od položaja ravnoteže, a sila rezanja nije razmjerna trenutnoj debljini odvojene čestice.
2. Debljina odvojene čestice nije razmjerna pomaku elastičnog sustava od položaja ravnoteže, a sila rezanja može biti razmjerna dubini odvajanja čestica obratka.

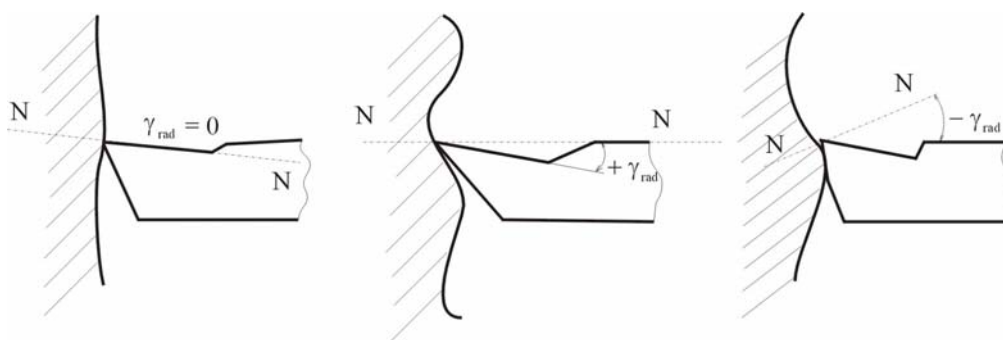
Vibracije mogu nastati i promjenom sile trenja na prednjoj i stražnjoj površini alata (slika 2.14). Zbog promjene brzine odvajanja čestica, nastale kao

rezultat promjene koeficijenta sabijanja i promjene geometrije rezanja pri trošenju alata, (slika 2.15), mijenja se sila trenja na prednjoj površini (slika 2.14). To stvara radijalnu silu rezanja, a ta uzrokuje radijalne vibracije alata što daje valovitu površinu obratka, te promjenu presjeka i kuta prednje površine alata γ . Nadalje promjena deformacije odvojene čestice i njene brzine odvajanja, stvara promjene sile trenja i radijalne sile te se, tako ciklično, podržavaju vibracije.

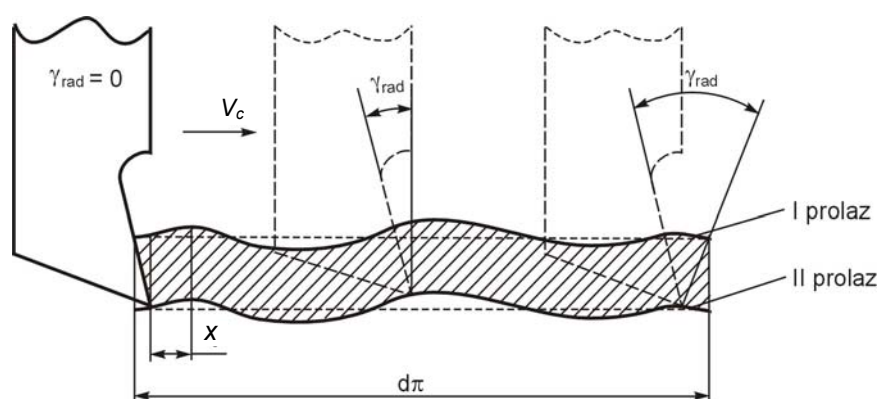
Promjena sile trenja na stražnjoj površini alata uzrokuje poprečne vibracije. Kao posljedica vibracija dobiva se valovita obrađena površina. Vibracijski trag prvog prolaza alata, (slika 2.16), podržava i pojačava vibracije u drugom prolazu jer je trag drugog prolaza pomaknut fazno spram prvog prolaza. To je razlog promjene debljine rezanog sloja i geometrijskih parametara rezanja.



Slika 2.14. Vibracije usljed promjene trenja na stražnjoj površini [3]



Slika 2.15. Promjena geometrije alata zbog poprečnih vibracija [3]



Slika 2.16. Podržavanje vibracija vibracijskim tragom prvog prolaza alata [3]

Kod analize samouzbudnih vibracija promatra se odvojeno obradak od alata. Oni imaju različita inercijska i elastična svojstva. Na osnovu toga mogu se uočiti tri oblika samouzbudnih vibracija:

- Samouzbudne vibracije koje nastaju pri malim brzinama odvajanja čestica (2-60 m/min), imaju i nisku frekvenciju (do nekoliko stotina Hz) . Te vibracije su karaktersitične za sustav obradak – alat – stroj i bliskih su frekvencija, a izazivaju valovitost obrađene površine, proizvode buku niskog tona, mogu oštetiti obradak i izazvati lom alata ili dijela stroja. Vibracije niske frekvencije ne utječu značajno na postojanost alata od tvrdog metala.
- Samouzbudne vibracije visoke frekvencije (do 6000 Hz) koje se javljaju pri odvajanju čestica s visokim brzinama, oko 150 – 200 m/min. Te frekvencije su bliske vlastitim frekvencijama alata. Proizvode buku visokog tona, a na površini obratka uzrokuju malu valovitost. Vibracije visoke frekvencije utječu na postojanost alata od tvrdog metala jer skraćuju vrijeme trajanja oštice.
- Samouzbudne vibracije vrlo niske frekvencije nastaju u mehanizmu za posmično gibanje radnog alata.

2.2.3. Metode uklanjanja i smanjenja vibracija

Na intenzitet vibracije pri obradi odvajnjem čestica najviše utječu sljedeći faktori:

- Krutost sustava alatni stroj-alat-obradak

Povećanje krutosti sustava smanjuje amplitudu, a povećava frekvenciju vibracija. Frekvencija raste i sa smanjenjem mase sustava. Krutost se može povećati smanjenjem zračnosti u sklopovima stroja, krutim stegama alata i obratka, većim poprečnim presjekom alata, pravilnim postavljanjem alata i obratka.

- Parametri procesa odvajanja čestica

Povećanje brzine odvajanja čestica povećava amplitude do neke kritične vrijednosti, iza koje one opadaju. Kod malih i velikih brzina odvajanja čestica praktično nema vibracija. Povećanjem dubine odvajene čestice povećava se sila rezanja, a time i amplitude vibracija.

- Geometrijski parametri alata

Smanjenje kuta prednje površine γ alata, (slika 2.17), značajno povećava vibracije [3]. Povećanjem polumjera vrha alata povećavaju se vibracije. Trošenje alata povećava silu rezanja, a ona povećava vibracije.

- način hlađenja tijekom obrade

Upotreba rashladnih mazivih sredstava smanjuje koeficijent trenja, a to smanjuje silu rezanja i vibracije.

Vibracije su višestruko štetna pojava u procesu obrade odvajanjem čestica i zato ih treba ukloniti ili svesti u granice dopuštenih. Smanjenje prisilnih vibracija postiže se prije svega izbjegavanjem rezonancijskog područja, a zatim uklanjanjem i slabljenjem izvora, i to:

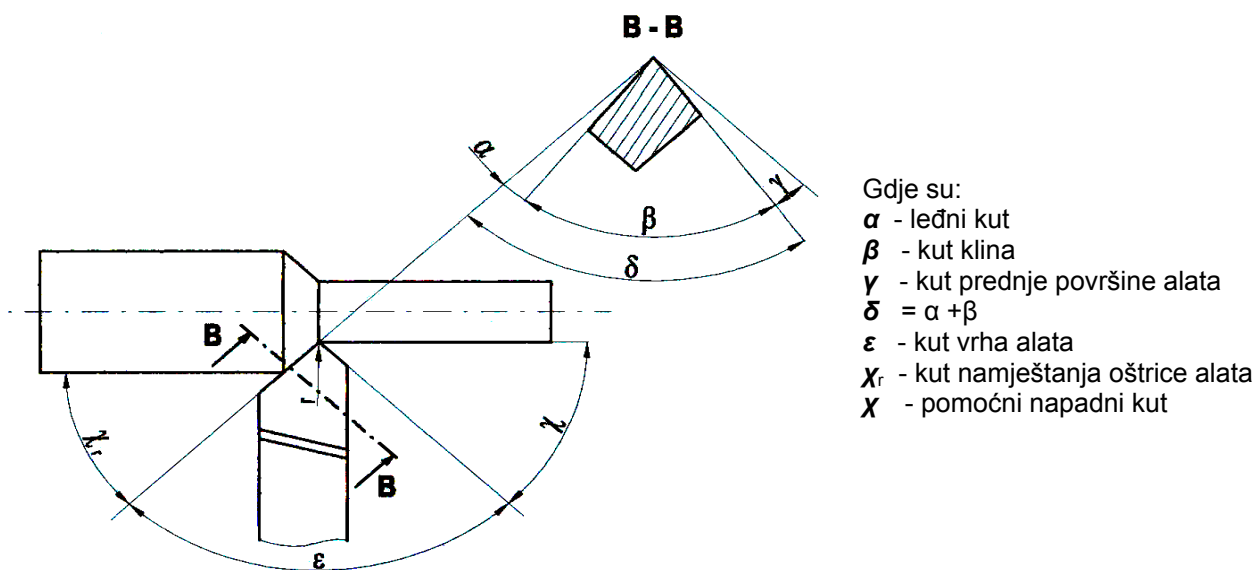
- uravnoteženjem,
- boljim uležištima i
- izborom povoljnog zahvata alata.

U prvoj skupini izvora su prisilne vibracije uzrokovane netočnostima u prijenosnim elementima snage, kao što su netočno izvedene osi, pogreške u ozubljenju zupčanika, neuravnoteženosti rotirajućih dijelova. U drugoj skupini su vibracije uzrokovane diskontinuitetima u procesu obrade, kao što je slučaj periodične promjene presjeka odvojenih čestica (presjeka reza), zatim prekidni karakter rezanja pri obradi zupčanika, lopatica postavljenih po obodu, obrada ekscentrično postavljenog vratila ili unutarnja obrada nesimetričnog otvora.

Izbjegavanje prisilnih vibracija postiže se postupcima odstranjivanja uzročnika vibracija. Uz odstranjivanje uzročnika treba osigurati pravilan odabir sredstava rada (*stroj, alat, obradak*) i parametara obrade.

Uklanjanje štetnih utjecaja prisilnih vibracija u praksi može se ostvariti:

- uklanjanjem zračnosti u pokretnim dijelovima,
- uravnoteženjem pogonskog elektromotora,
- promjenom vlastite frekvencije i
- prigušenjem vibracija.



Slika 2.17. Geometrija alata

Prisilne vibracije mogu se ukloniti ili prigušiti i na jedan od sljedećih načina:

- pravilnom izradom stroja u pogledu konstrukcijskih i tehnoloških parametara, kako bi se izbjegli unutarnji izvori vibracija,
- povećanjem krutosti sustava, smanjenjem zračnosti i pravilnim izborom oslonca,
- uporabom elastičnih podmetača, i to iz materijala s visokim koeficijentom unutarnjeg trenja (plastične mase, meki bakar) i
- izborom nadrezonancijskih parametara odvajanja čestica (veće brzine).

Samouzbudne vibracije prigušuju se:

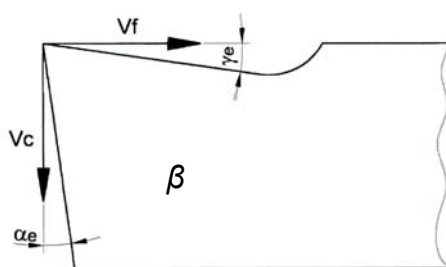
- izborom odgovarajućih parametara odvajanja čestica iznad rezonancijskih i
- promjenom geometrije alata odnosno kuteva γ i χ_r te smanjenjem polumjera vrha alata.

Za slučaj nepovoljnog temeljenja stroja, težih uvjeta rada, te ako je krutost alata i radnog obratka mala, primjenjuju se posebni postupci prigušenja vibracija kao:

- promjena načina temeljenja stroja elastičnim podmetačima,
- povećanje presjeka alata i smanjenje slobodne dužine alata,
- uporabom podmetača za alat od plastične mase, bakra ili mjedi,
- uporabom alata s oprugama,
- uporabom uređaja za prigušenje vibracija, tarnog i hidrauličnog tipa.

2.2.4. Određivanje sile samouzbudnih vibracija

Vrijednostima f - posmak po okretaju obratka i a_p - dubina obrade, određena je površina poprečnog presjeka odvojene čestice. Kut α_e utječe na trenje, a kut γ_e na stupanj sabijanja odvojene čestice, a oba na sile rezanja. Ovisnost otpora rezanja o posmičnoj brzini V_f se svodi na otpor materijala prodiranju alata u materijal i na promjenu kutova γ i α . Što se tiče otpora materijala prodiranju alata, jasno je da, od početka procesa odvajanja čestica, na mjestu alata i obradka nastaje sila pritiska, koja uvjetuje elastičnu deformaciju obratka. To se pojavljuje na mjestu dodira, i zatim, kada ta deformacija dosegne graničnu vrijednost plastičnog tečenja, dolazi do plastičnih deformiranja te smicanja.



Gdje su:

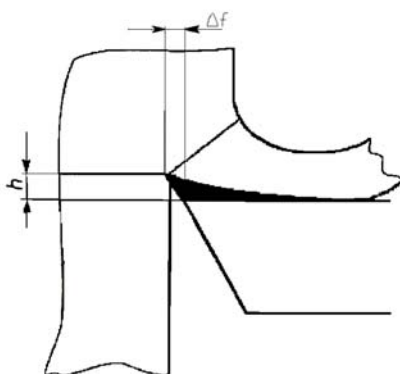
V_c - brzina rezanja
 V_f - posmična brzina rezanja
 α_e - efektivni leđni kut
 β_e - efektivni kut klina
 γ_e - efektivni kut prednje površine alata

Slika 2.18. Efektivni kutovi rezanja [34]

Brzina rezanja V_c utječe direktno na brzinu relativnog klizanja odvojene čestice po prednjoj površini obratka i sile trenja po tim površinama.

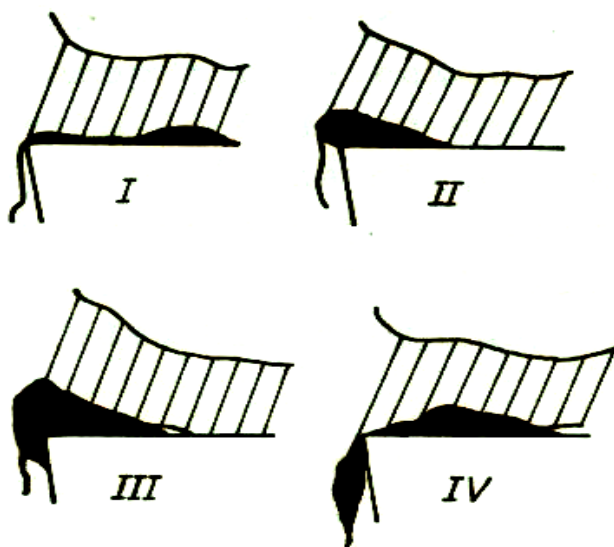
Samouzbudne vibracije pri obradi na CNC tokarilici javljaju se u praznom i radnom hodu. U praznom hodu CNC tokarilice, samouzbudne vibracije su posljedica parametara vezanih za elastični sustav stroja i procesa koji se odvijaju u pogonu. U radnom hodu, samouzbudne vibracije su posljedica parametara vezanih za proces odvajanja čestica. Zato se, u dosta slučajeva, uočavaju različita objašnjenja samouzbudnih vibracija pri obradi na CNC tokarilicama. Utjecaj pogona na proces obrade, u prelaznom razdoblju (pokretanje, zaustavljanje) je značajan. U radnom procesu taj utjecaj se promatra kao sastavni dio cjelokupnog elastičnog sustava CNC tokarilice.

Samouzbudne vibracije pri određenim uvjetima i parametrima obrade nastaju usljed stvaranja naslaga na alatu, slika 2.19. Ta pojava uzrokuje promjenu geometrijskih parametara reznog klina.



Slika 2.19. Naslaga materijala na radnom alatu [7]

Na slici 2.20, su prikazane faze stvaranja i otkidanja naslaga na alatu. Naslage nastaju uslijed razvijanja topline u sloju materijala bliskom zoni odvajanja čestica, odnosno kada maksimalna temperatura premašuje temperaturu rekristalizacije materijala obratka.



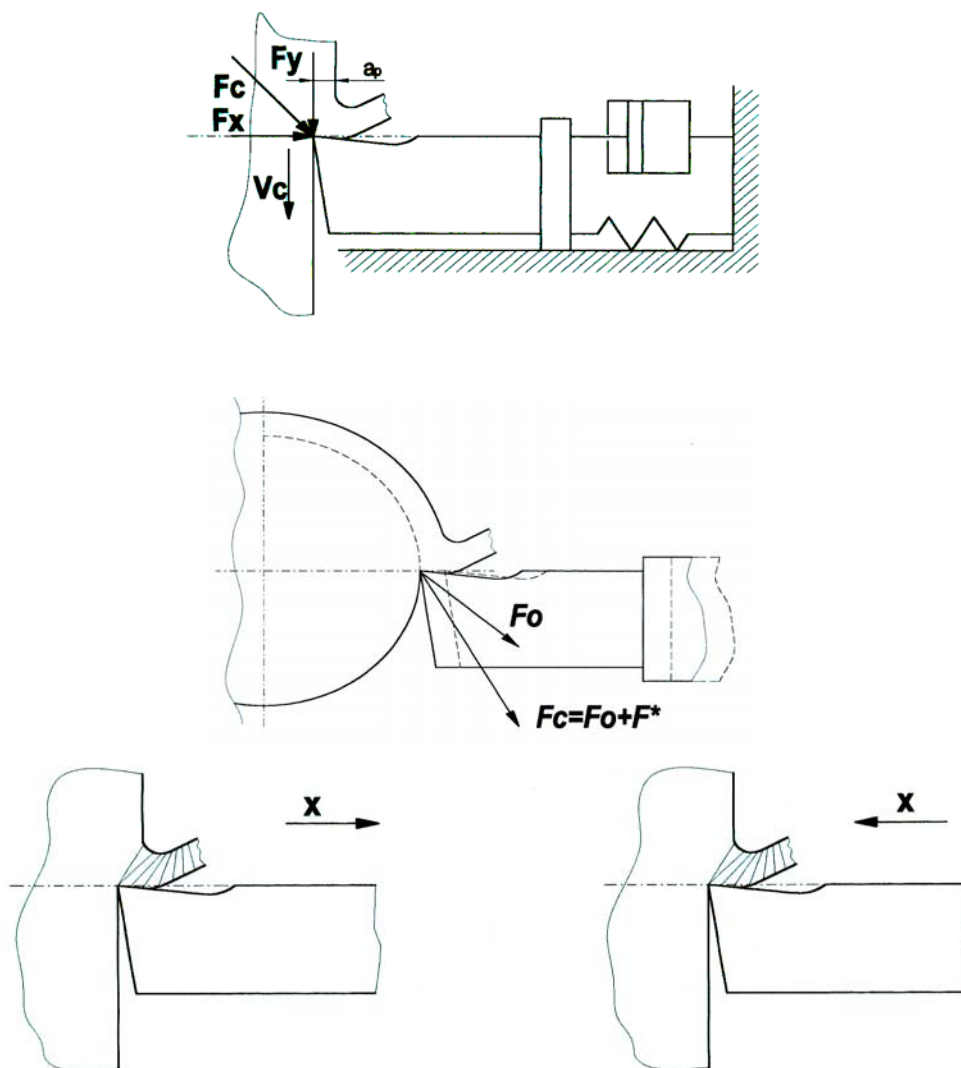
Slika 2.20. Razni oblici naslaga na alatu [7]

Promjena sile rezanja uvjetuje dodatnu deformaciju sustava što predočuje isprekidana linija na slici 2.21.

Promjena sila rezanja nastaje u slučaju pojave nehomogenosti u materijalu. Stacionarna sila rezanja $\vec{F}_o$ tada se uvećava za prirast sile $\vec{F}^*$, pa tako ukupna sila rezanja (slika 2.21) iznosi:

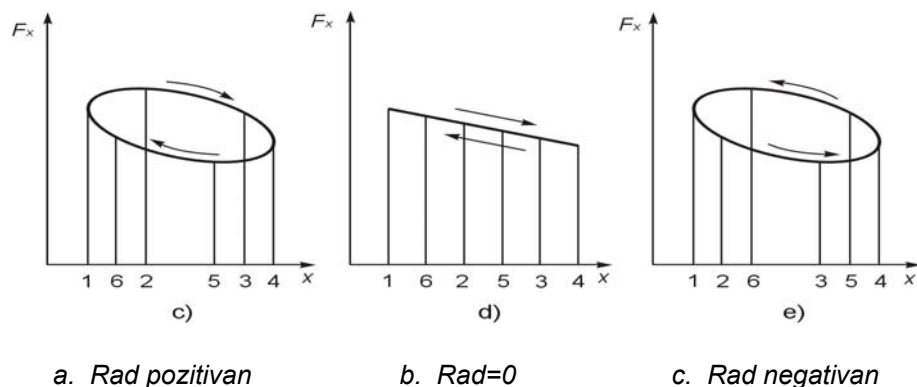
$$\vec{F}_c = \vec{F}_o + \vec{F}^* .$$

Pojava samouzbudnih vibracija pri odvajanju čestica može se objasniti i energetskom bilansom. Na slici 2.21, prikazan je model sustava CNC tokarilice, odnosno proces odvajanja čestica s jednim stupnjem slobode gibanja, gdje je pomak oštrice u smjeru promjene dubine odvajanja čestica. Na slici je takođe dat shematski prikaz ulaska i izlaska oštrice alata iz obratka.



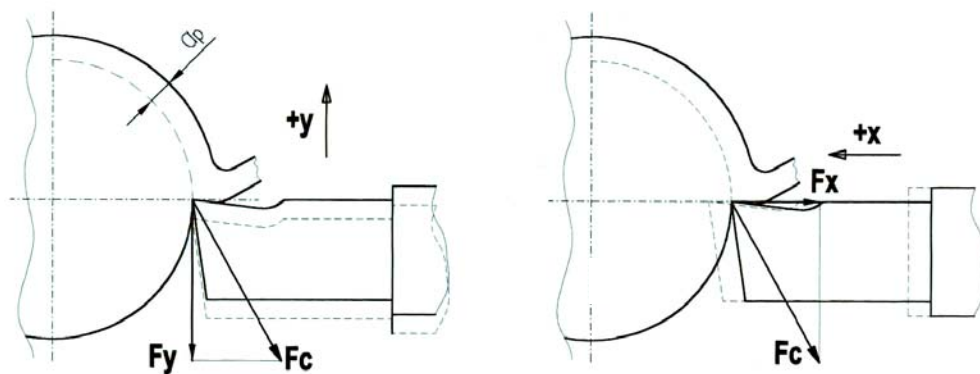
Slika 2.21. Model sustava alat-obradak [7]

Energetska bilansa može se predložiti i grafom. Ako je ukupni rad jednog perioda pozitivan, slika 2.22a, dolazi do pojave samouzbudnih vibracija. Ako je jednak nuli, slika 2.22b, zatečeno stanje se neće promijeniti, a ako je rad negativan slika 2.22c sustav vibrira stabilno [46].



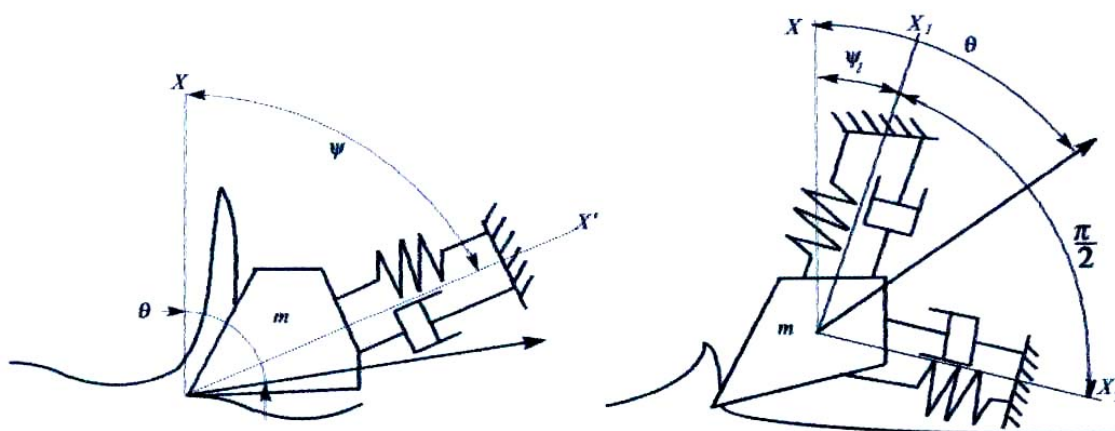
Slika 2.22 Energetski bilanca

Samouzbudne vibracije pri obradi na CNC tokarilici mogu se razmatrati u tri okomita smjera (x, y i z), a na slici 2.23 su prikazana dva osnovna smjera, po osi x i osi y.



Slika 2.23. Pravci djelovanja samouzbudnih vibracija [7]

Ekvivalentni vibracijski sustavi s jednim i dva stupnja slobode gibanja radnog alata predloženi su na slici 2.24.

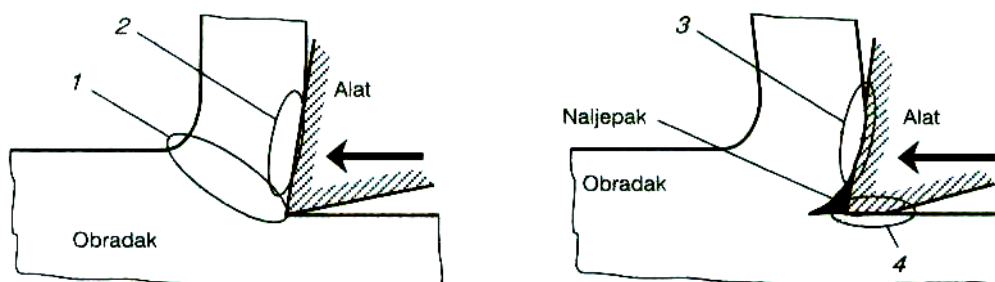


Slika 2.24. Ekvivalentni vibracijski sustavi [49]

2.2.4.1 Mehanički model procesa odvajanja čestica

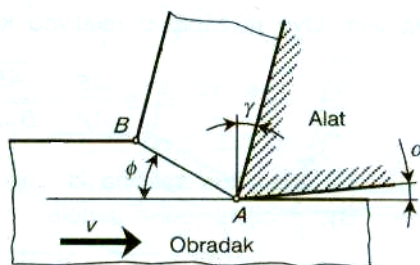
Proces odvajanja čestica, moguće je podijeliti u četiri zone:

1. primarna zona deformiranja,
2. sekundarna zona deformiranja,
3. primarna zona trenja i
4. sekundarna zona trenja.



Slika 2.25. Karakteristične zone pri odvajanju čestica metala [57]

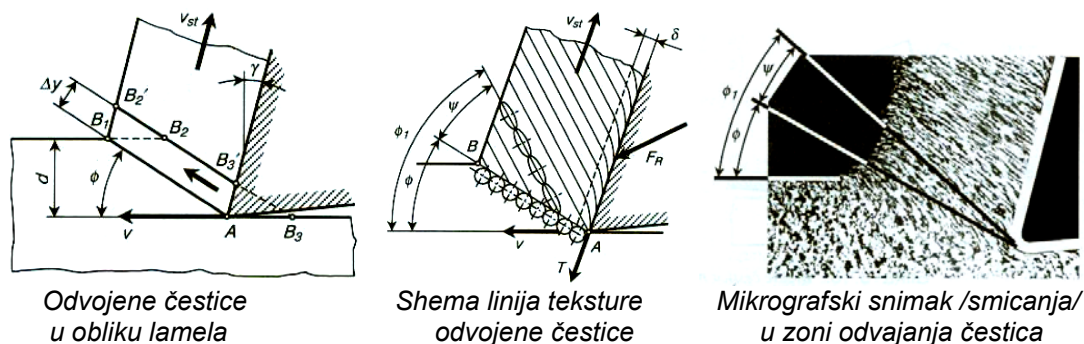
Smicanje se odvija u ravni A-B, slika 2.26. Ta ravnina je nagnuta prema pravcu brzine odvajanja čestica pod kutom Φ koji se naziva kut nagiba ravnine smicanja.



Slika 2.26. Model nastajanja odvojene čestice u jednoj ravni smicanja [57]

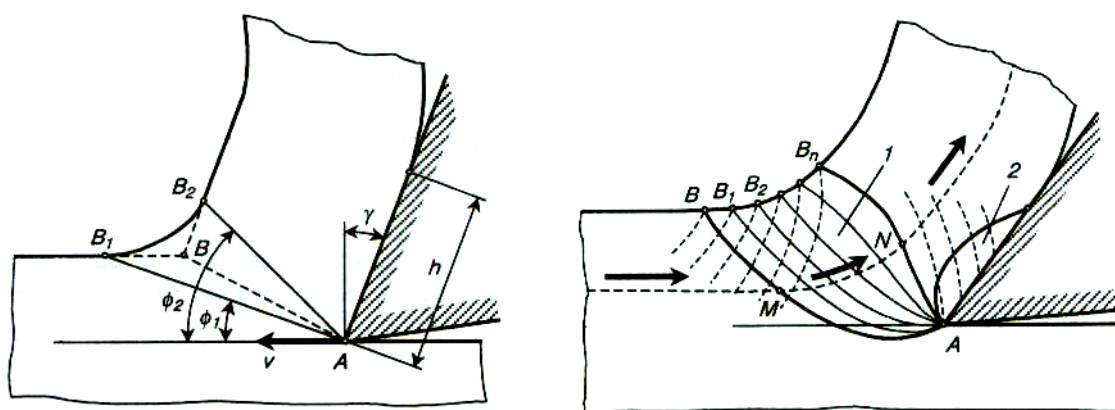
Procesi u području 4 svode se uglavnom na trenje i toplinske pojave, dok su procesi u druga tri područja praćeni i dodatnim složenim procesima.

Elementarna lamela početnog, nedeformiranog oblika $AB_1 B_2 B_3$ deformira se u oblik $AB_1 B_2' B_3'$. Međutim važno svojstvo jest činjenica da se tim modelom može objasniti razlika položaja ravni smicanja i tzv. ravni teksture odvojene čestice, slika 2.27. Mikrografski snimak korijena odvojene čestice, pokazuje, pravac izduženja zrna odvojene čestice pod kutem ψ spram ravnine smicanja. Taj kut se naziva kut teksture zrna i predstavlja razliku kutova Φ_1 i Φ .



Slika 2.27. Modeli odvajanja čestice [57]

Područje smicanja, predstavljeno je kao ravnina smicanja pod određenim kutem. Međutim ustanovljeno je da se plastično deformiranje ne odvija u jednoj ravni već u više ravnina smicanja koje se zrakasto rasprostiru od vrha alata A, slika 2.28. Na taj način postoji zona smicanja klinastog oblika omeđena prvom AB_1 i zadnjom ravninom smicanja AB_2 koje zatvaraju kutove s vektorom brzine odvajanja čestica ϕ_1 i ϕ_2 .



Slika 2.28. Ravnine smicanja [57]

Granica AB, slika 2.28, predstavlja početnu ravninu smicanja u kojoj su naprezanja jednaka vrijednostima naprezanja na granici razvlačenja materijala. Položaj te granice ovisi dakle, o vrsti materijala obratka, ali i od drugih faktora, na primjer, brzini odvajanja čestica, dubini odvajanja čestica, posmaku, geometriji reznog klina alata i sličo. Granica AB_n , predstavlja krajnju granicu zone smicanja.

2.2.4.2. Koeficijenti sile odvajanja čestica

Kod idealnog odvajanja čestica bez vibracija (stacionarni proces rezanja) veza između kinematičkih i geometrijskih parametara odvajanja čestica [1], jest:

$$V_{f0} = \frac{f_o n_0}{2\pi}, \quad (2.33)$$

ili

$$V_{f0} = \frac{f_o v_{no}}{2\pi R}, \quad (2.34)$$

gdje su :

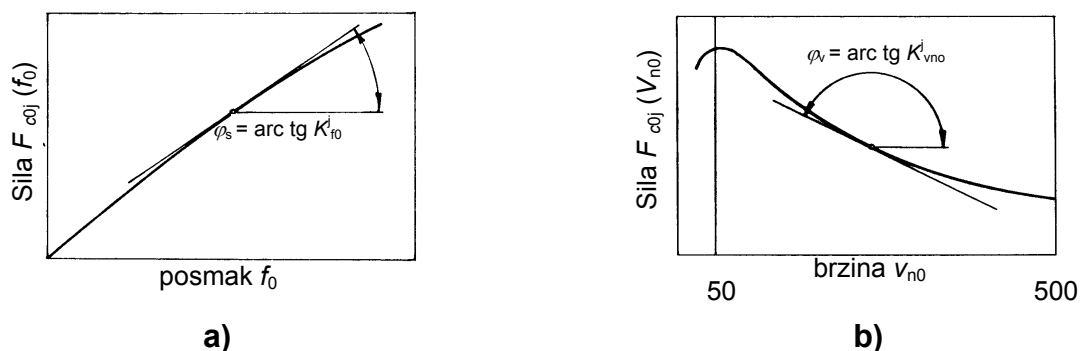
- f_o – posmak, m po okretaju,
- V_{f0} – posmična brzina, m/sek,
- V_{no} – brzina odvajanja čestica, m/sek,
- R_o – polumjer obratka, m i
- n_0 – frekvencija vrtnje radnog vretena-bez vibracija, s^{-1} .

U tom idealnom slučaju (bez vibracija), sila odvajanja čestica F_c jednaka je stacionarnoj sili F_{co} . Njena projekcija na os ξ_j ($j = x, y, z$) jest:

$$F_{coj} = F_{coj}(f_o, a_{po}, V_{no}) \quad (2.35)$$

Iz jednadžbe je očito da sila stacionarnog odvajanja čestica ovisi o presjeku odvojene čestice i brzini vrtnje obratka [7].

Ovisnosti sile odvajanja čestica F_{coj} o parametrima f_o , a_{po} , V_{no} , mogu se dobiti kao $F_{coj}(f_o)$, $F_{coj}(a_{po})$ i $F_{coj}(V_{no})$ gdje pri postupnom mijenjanju jednog parametra, ostala dva zadržavaju stalne vrijednosti.



Slika 2.29. Ovisnost sile odvajanja čestica F_{coj} o: a) posmaku f_o i b) brzini v_{no}

Totalni diferencijal sile F_{coj} jest, prema [3],:

$$dF_{coj} = K_{f_o}^j df_o + K_{a_{po}}^j da_{po} + K_{v_{no}}^j dV_{no}, \quad (2.36)$$

gdje su:

$$K_{f_o}^j = \left(\frac{\partial F_{coj}}{\partial f_o} \right)_{d a_p = d V_{n0} = 0}, \quad (2.37)$$

$$K_{a_p}^j = \left(\frac{\partial F_{coj}}{\partial r_o} \right)_{d f_o = d V_{n0} = 0}, \quad (2.38)$$

$$K_{n_o}^j = \left(\frac{\partial F_{coj}}{\partial V_{n0}} \right)_{d f_o = d a_p = 0}, \quad (2.39)$$

koeficijenti debljine, dubine i brzine odvajanja čestica u stacionarnom stanju.

Samouzbudne vibracije uzrokuju odstupanje posmaka (f) od nominalne vrijednosti, odnosno od osnovnog posmaka (f_o):

$$f = f_o + f^*, \quad (2.40)$$

kao i odstupanje posmične brzine od nominalne:

$$V_f = V_{f0} + V_f^* = \frac{f_o n}{2\pi} + V_f^*, \quad (2.41)$$

pri čemu su:

f^* i V_f^* - dodatni, posmak i posmična brzina usljed pojave samouzbudnih vibracija.

Budući da se V_f , ne može izraziti u ovisnosti o f i V_{n0} to se sila F_{coj} mora izraziti u smjeru ξ_j pomoću jednadžbe:

$$dF_{c_j} = K_{f_o}^j df + K_{a_p}^j da_p + K_{f_v}^j dV_f + K_{n_0}^j dV_{n_0}, \quad (2.42)$$

gdje su:

$$K_{f_o}^j = \left(\frac{\partial F_{c_j}}{\partial f} \right)_{d a_p = d V_f = d V_{n0} = 0}, \quad (2.43)$$

$$K_{a_p}^j = \left(\frac{\partial F_{c_j}}{\partial a_p} \right)_{d f = d V_f = d V_{n0} = 0}, \quad (2.44)$$

$$K_{f_v}^j = \left(\frac{\partial F_{c_j}}{\partial V_f} \right)_{d f = d a_p = d V_{n0} = 0}, \quad (2.45)$$

$$K_{n_0}^j = \left(\frac{\partial F_{c_j}}{\partial V_{n0}} \right)_{d f = d a_p = d V_f = 0}, \quad (2.46)$$

koeficijenti debljine, dubine, posmične brzine i brzine odvajanja čestica pri nestacionarnom odvajanju čestica. Određivanje koeficijenata (2.44), (2.45) i (2.46) je otežano zbog nemogućnosti postizanja $dV_f = 0$ pri promjeni f ili V_f . Ipak postoji

povezanost koeficijenata stacionarnog i nestacionarnog odvajanja čestica, vidljivog na temelju slijedećih razmatranja:

- a. U slučaju stacionarnog odvajanja čestica višereznim alatom ($n > 1$) pri stalnoj brzini i dubini obrade, a mjenjanjem posmaka (f_o) po svakom okretaju obratka, diferencijal posmične brzine jest:

$$dV_{fo} = \frac{n_o}{2\pi} df_o. \quad (2.47)$$

Iz (2.36), (2.42), (2.47) i uzimajući u obzir prethodne napomene, dobiva se koeficijent posmične brzine za slučaj nestacionarnog odvajanja čestica:

$$K_{fv}^j = \frac{2\pi}{n_o} K^j, \quad (2.48)$$

gdje je:

$$K^j = K_{fo}^j - K_f^j, \quad (2.49)$$

koeficijent prodiranja alata u materijal.

- b. Slično razmatranje izvodi se i pri konstantnom posmaku f_o i dubini a_{po} , uz promjenu brzine v_{no} . Diferencijal posmične brzine tada jest:

$$dV_{po} = \frac{s_o}{2\pi R} dV_{\Omega o}, \quad (2.50)$$

tako da iz (2.36), (2.42) i (2.50) slijedi koeficijent brzine pri nestacionarnom odvajanju čestica:

$$K_n^j = K_{no}^j - \frac{f_o}{2\pi R_o} K_{fv}^j, \quad (2.51)$$

odakle se (uzimajući u obzir 2.48), dobiva:

$$K_n^j = K_{no}^j - \frac{f_o}{V_n} K^j. \quad (2.52)$$

Diferencijal sile u smjeru ξ_j za slučaj nestacionarnog odvajanja čestica (odvajanje čestica sa samouzbuđenim vibracijama) je iz (2.42), (2.48) i (2.52), određen s:

$$dF_{cj} = K_f^j df + K_{ap}^j da_p + \frac{2\pi}{n} K^j dV_f + \left(K_{no}^j - \frac{f_o}{V_n} K^j \right) dV_n. \quad (2.53)$$

2.2.4.3. Ovisnost sile odvajanja čestica o relativnom pomaku alata spram obratka

Da bi se na prikladan način mogao izraziti utjecaj pomaka alata na silu odvajanja čestica, te sile na samouzbudne vibracije u smjeru koordinatnih osi, potrebno je, izraziti parametre odvajanja čestica (f , a_p , V_f , V_n) u funkciji relativnih pomaka alata spram obratka. U daljnjem tekstu razmatran je utjecaj pomaka na silu i parametre odvajanja čestica.

a. Parametri odvajanja čestica ovisni o pomaku u smjeru x osi

Samouzbudne vibracije pri obradi uzrokuju valovitu površinu (slike 2.30 i 2.31). U općem slučaju posmak po okretaju radnog vretena jest:

$$f = z \left\{ (x_0)_t - \left[(x_0)_{t-\frac{T}{n}} \right] \right\}, \quad (2.54)$$

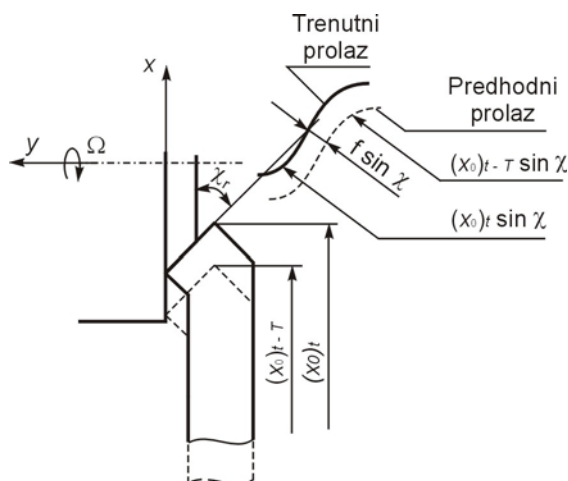
gdje su:

z – broj oštrica alata (u pokusima, $z=1$),

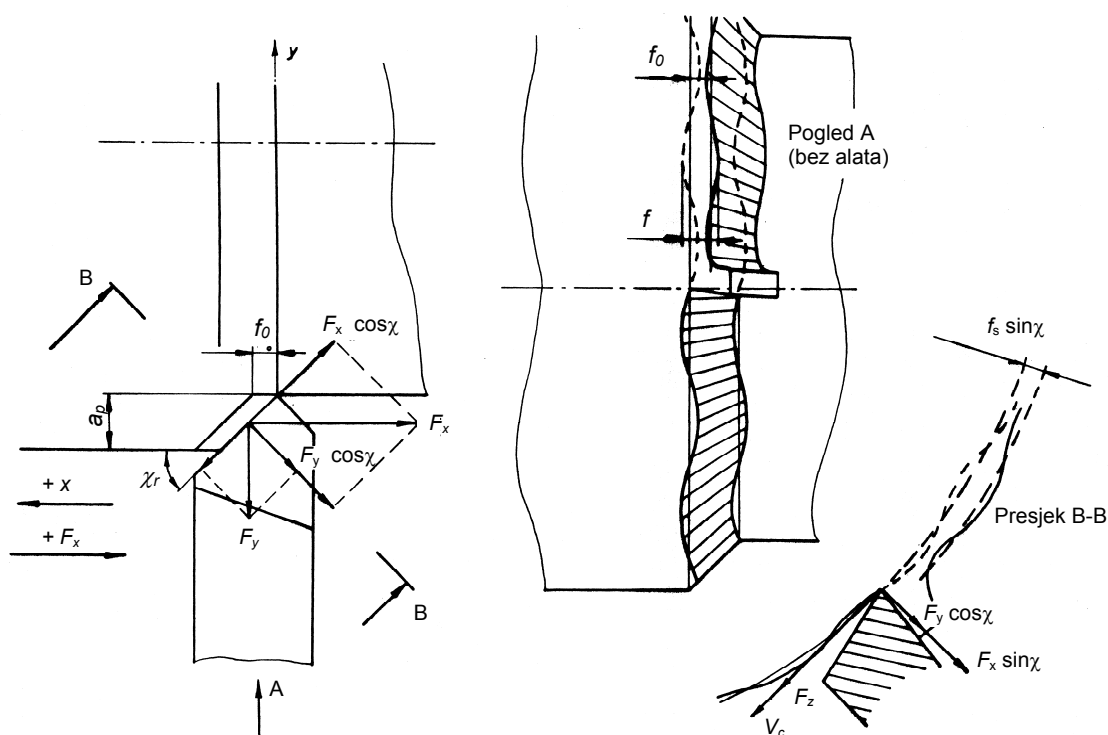
$(x_0)_t$ – relativni pomak alata i obratka ovisan o vremenu (t) u x smjeru,

$(x_0)_{t-T/z}$ – relativni pomak u trenutku kada je prethodna oštrica obrađivala mjesto koje se obrađuje u trenutku t , i

$T = \frac{2\pi}{n}$ – period jednog okretaja vretena.



Slika 2.30. Izgled površine [7]



Slika 2.31. Položaj sila i izgled površine [7]

S obzirom da se posmak, kao i ostale veličine, sastoje od osnovne (stacionarne) komponente posmaka i dodatne komponente usljed samouzbudnih vibracija, slika 2.32, jednađžba ima oblik:

$$f = z \left\{ (x_o)_t - \left[(x_o)_{t-\frac{T}{z}} \right] \right\} + z \left\{ (x^*)_t - \left[(x^*)_{t-\frac{T}{z}} \right] \right\}, \quad (2.55)$$

a njen diferencijal jest:

$$df = z \left\{ d(x_o)_t - \left[d(x_o)_{t-\frac{T}{z}} \right] \right\} + z \left\{ d(x^*)_t - \left[d(x^*)_{t-\frac{T}{z}} \right] \right\}, \quad \text{ili}$$

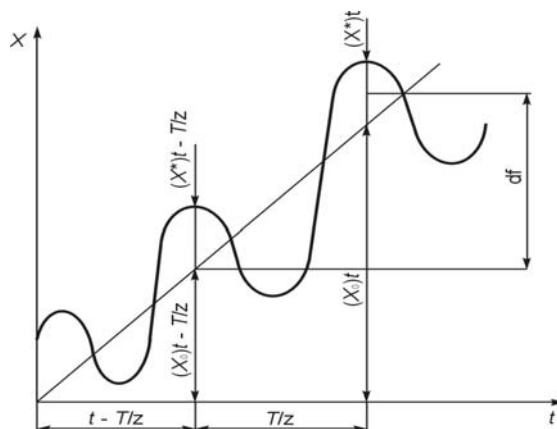
za $z = 1$:

$$df = d(x_o)_t - [d(x_o)_{t-T}] + [d(x^*)_t - d(x^*)_{t-T}]$$

odnosno:

$$df = d(x_o)_t + d(x^*)_t - [d(x_o)_{t-T} + d(x^*)_{t-T}]. \quad (2.56)$$

Graf pomaka za taj model predočuje slika 2.32 [7].



Slika 2.32. Graf pomaka [7]

Posmična brzina pri obradi iznosi:

$$V_f = \frac{dx}{dt} = \frac{dx_o}{dt} + \frac{dx^*}{dt} = x_o' + x^{*'} \quad (2.57)$$

$$dV_f = dx_o' + dx^{*'} \quad (2.58)$$

Brzina odvajanja čestica jest:

$$V_n = nR \quad (2.59)$$

a njen diferencijal:

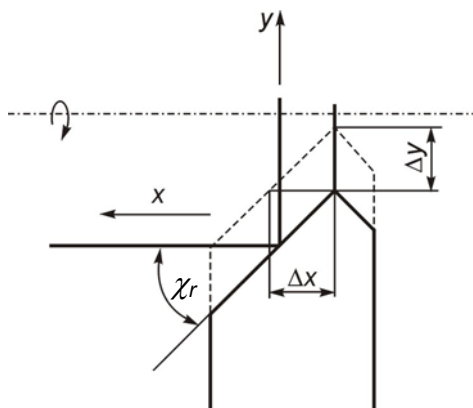
$$dV_n = n dR \quad (2.60)$$

Za obradu čeonim i poprečnim odvajanjem čestica i odsijecanjem promjena brzine data je jednadžbom:

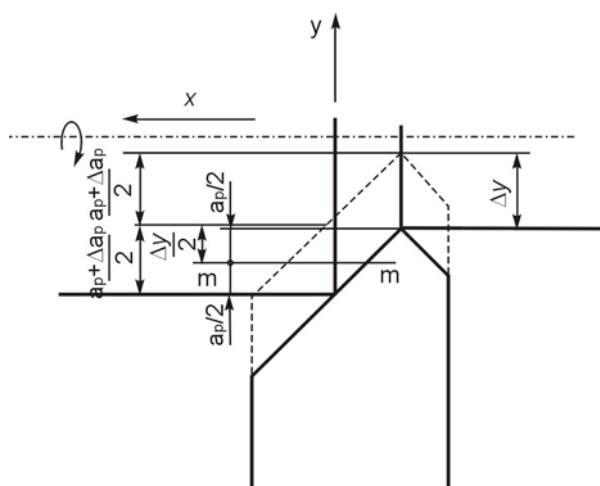
$$dV_n = -n dx_o - n dx^* \quad (2.61)$$

b. Parametri odvajanja čestica izraženi preko pomaka u smjeru y osi

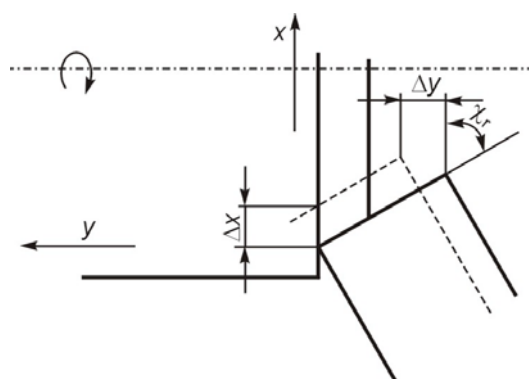
Kod uzdužne i čeonice obrade, usljed nagiba rezne oštrice spram pravca posmaka za kut χ_r , pomak u smjeru y osi dovodi do pomaka (točke koja se poklapa s vrhom alata) u smjeru x osi.



Slika 2.33. Pomak u smjeru y osi [7]



Slika 2.34. Parametri pomaka [35]



$$\Delta x = \frac{\Delta y}{\operatorname{tg} \chi_r}$$

Slika 2.35. Pomak u smjeru x osi [7]

Pri uzdužnoj i čeonoj obradi usljed nagiba rezne oštrice spram smijera posmaka, pomak u smjeru y osi dovodi do pomaka po osi x (slike 2.33. i 2.35.) pa je posmak:

$$f = \frac{1}{\operatorname{tg} \chi_r} \left\{ (y)_t - \left[(y)_{t-\frac{T}{z}} \right] \right\}, \text{ odnosno njegov diferencijal:}$$

$$df = \frac{1}{\operatorname{tg} \chi_r} \left\{ d(y_o)_t - \left[d(y_o)_{t-\frac{T}{z}} \right] + d(y^*)_t - \left[d(y^*)_{t-\frac{T}{z}} \right] \right\}. \quad (2.62)$$

Promjena dubine odvajanja čestica (slika 2.33.) može se napisati kao:

$$\Delta a_p = \Delta y, \text{ odnosno :} \quad (2.63)$$

$$da_p = dy.$$

Posmična brzina za uzdužnu i poprečnu obradu jest:

$$V_f = \frac{1}{\operatorname{tg} \chi_r} \frac{dy}{dt},$$

odnosno :

(2.64)

$$V_f = \frac{1}{\operatorname{tg} \chi_r} (dy'_o + dy^{*'})$$

Promjena brzine odvajanja čestica (obzirom na pomak srednje oštrice m-m, slika 2.34), jest:

$$\Delta V_n = -\frac{\Omega}{2} \Delta y$$

odnosno:

$$dV_n = -\frac{n}{2\operatorname{tg} \chi_r} (dy_0 + dy^*)$$

2.2.4.4. Opći oblik sile odvajanja čestica pri samouzbudnim vibracijama

Uzimajući u obzir prethodna razmatranja, kao i 2.53 može se diferencijal prirasta sile u smjeru ξ_j napisati kao [7]:

$$\begin{aligned} dF_j^* = & z\rho_j K_s^j \left\{ d(\xi_j^*)_t - \left[d(\xi_j^*)_{t-\frac{T}{z}} \right] \right\} + \lambda_j K_{ap}^j d\xi_j^* + \frac{2\pi}{n} K^j \Gamma_j d\xi_j^* + \\ & \left(K_{n_o}^j - \frac{f_o}{R_0 n} K^j \right) \left(\Theta_j d\xi_j^* + \varepsilon_j d\xi_j^{*'} \right), \end{aligned} \quad (2.66)$$

gdje su:

- ρ_j - koeficijent utjecaja relativnog pomaka alata i obratka u smjeru osi ξ_j ,
- λ_j - koeficijent utjecaja pomaka na debljinu odvojene čestice,
- Γ_j - koeficijent utjecaja brzine pomaka na brzinu pomoćnog gibanja, (posmična brzina),
- Θ_j - koeficijent utjecaja pomjeranja vrha alata na obodnu brzinu i
- ε_j - koeficijent utjecaja brzine pomjeranja vrha alata na obodnu brzinu.

Za razumijevanje jednadžbe (2.66) vrijednosti za koeficijente ρ_j , λ_j , Γ_j , Θ_j i ε_j date su u tablici 2.1. Ranije je rečeno da indeks "j" znači položaj u smjerovima osi x, y i z te je i prirast sile $dF_{c_j}^*$ određen zamjenom odgovarajućih vrijednosti iz navedene tablice 2.1.

Integriranjem diferencijalne jednadžbe za silu dobva se sila odvajanja čestica u smijeru ξ_j kao funkcija samouzbudnih vibracija, vremena (t), vremenu ($t - T/z$), te brzine dodatnog posmaka u vremenu (t):

$$F_{cj}^* = K_1^j (\xi_j^*)_t - \rho_j z K_s^j (\xi_j^*)_{t-\frac{T}{z}} + \left(\frac{2\pi}{n} K_2^j + \varepsilon_j K_{n_o}^j \right) \frac{d\xi_j^*}{dt} + D_j, \quad (2.67)$$

gdje su novi koeficijenti u jednadžbi (2.67) dani s:

$$K_1^j = \rho_j z K_s^j + \lambda_j K_{a_p}^j + \left(K_{n_o}^j - \frac{f_o}{nR_0} K^j \right) \Theta_j \quad \text{i} \quad (2.68)$$

$$K_2^j = \left(\Gamma_j - \frac{f_o}{2\pi R_0} \varepsilon_j \right) K^j. \quad (2.69)$$

Koeficijent K_2^j predstavlja opći koeficijent prodiranja, a izravno je razmjernan koeficijentu prodiranja K^j .

Konstanta D_j je neodređena, zbog nemogućnosti poznavanja karaktera kao i kvantitativne vrijednosti slučajnog početnog poremećaja.

Tablica 2.1. Koeficijenti utjecajni na samouzbudne vibracije

Posmak po osi	ρ_j	λ_j	Γ_j	Θ_j	ε_j
x	1	0	1	0	0
y	$\frac{1}{\text{tg}\vartheta_r}$	1	$\frac{1}{\text{tg}\vartheta_r}$	$\frac{-n}{2}$	0
z	0	0	0	0	-1

2.2.5. Diferencijalna jednadžba samouzbudnih vibracija

Samouzbudne vibracije alata i obratka u smijeru ξ_j osi razmatraju se kao apsolutno vibriranje ekvivalentne mase m_j . Na ekvivalentnu masu (slika 2.36) djeluju slijedeće sile :

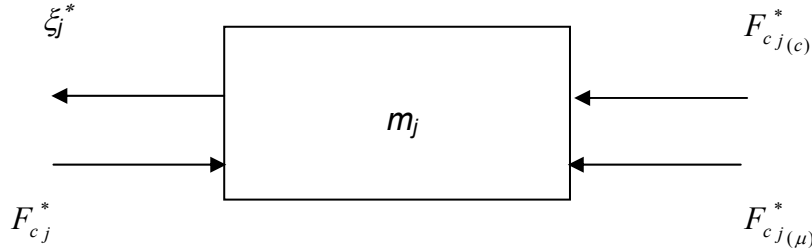
ekvivalentna elastična sila $F_{cj(c)}^*$:

$$F_{cj(c)}^* = -c_j \xi_j^* \quad \text{i} \quad (2.70)$$

ekvivalentna sila prigušenja $F_{j(\mu)}^*$:

$$F_{cj(\mu)}^* = -\mu_j \frac{d\xi_j^*}{dt}, \quad (2.71)$$

Ekvivalentna masa sa djelujućim silama i pomakom tvori ekvivalentni sustav, slika 2.36:



Slika 2.36. Ekvivalentni sustav

Zakon gibanja središta inercije u smjeru ξ_j^* osi, daje diferencijalnu jednadžbu:

$$m \frac{d^2 \xi_j^*}{dt^2} = F_{cj(c)}^* + F_{cj(\mu)}^* - F_{cj}^*. \quad (2.72)$$

odnosno:

$$m_j \frac{d^2 \xi_j^*}{dt^2} + \left(\mu_j + \frac{2\pi}{n} K_2^j + \varepsilon_j K_{n_o}^j \right) \frac{d\xi_j^*}{dt} + (c_j + K_1^j) \xi_j^* - z p_j K_f^j(\xi_j^*)_{t-\frac{T}{z}} + D_j = 0. \quad (2.73)$$

Pomak usljed samouzbudnih vibracija ξ_j^* određen je funkcijom:

$$\xi_j^* = A_j e^{-\delta_j^* t} \cos(\omega_j^* t - \beta_j), \quad (2.74)$$

gdje su:

- A_j – konstanta ovisna o početnim uvjetima,
- δ_j^* – faktor prigušenja samouzbudnih vibracija,
- ω_j^* – kutna brzina samouzbudnih vibracija i
- β_j – fazni kut između samouzbudne sile i pomaka.

Ovisno o parametrima geometrije alata i parametrima odvajanja čestica kao i karakteristici elastičnog sustava stroja, mogu nastupiti tri slučaja samouzbudnih vibracija [7]:

- a. $\delta_j^* > 0$, samouzbudne vibracije nastale usljed slučajne početne uzbude, koje se nakon kratkog vremena potpuno prigušuju.
- b. $\delta_j^* < 0$, samouzbudne vibracije su nestabilne, amplituda se povećava s vremenom.
- c. $\delta_j^* = 0$, postignuta je granica stabilnosti samouzbudnih vibracija.

3. OPĆENITO O OBRADI NA CNC TOKARILICI

3.1. STRUKTURA MATERIJALA

Pojave na kontaktnim površinama između alata i obratka tijekom odvajanja čestica ovise, prije svega, o fizikalno-kemijskim osobinama oba materijala. Te osobine ovise o vrsti i rasporedu kristala i zrna, odnosno o karakteristikama atoma od kojih su kristali sastavljeni. Za razumjevanje procesa obrade na CNC tokarilici neophodno je poznavati osnovne informacije o strukturi metala.

Struktura metala je kristalna što znači da se atomi nalaze u određenom pravilnom rasporedu u prostoru. Raspored kristala nije nikada slučajan već odgovara najmanjem volumenu i minimumu unutarnje energije.

Postoji nekoliko tipova veze koje drže atome zajedno. Kod metala je dominantan metalni tip međuatomske veze. Do metalnog tipa međuatomske veze dolazi tako što elektroni koji se nalaze u vanjskim slojevima omotača atoma i elektroni koji su najslabije vezani za atomsku jezgru, odlaze pod djelovanjem međuatomskih sila u prazan prostor između atoma formirajući elektronski oblak koji je negativno naelektriziran. Atomi koji su izgubili te elektrone postaju pozitivno naelektrizirani, a između njih i negativno naelektriziranog oblaka postoji privlačna elektrostatička sila koja sada cijeli sustav drži u ravnoteži omogućavajući da atomi zauzimaju minimum volumena u prostoru. Tom rasporedu odgovara i minimum unutarnje energije.

Čisti metali se vrlo malo primjenjuju u praksi. Umjesto njih u praksi se primjenjuju legure koje su sastavljene iz dvije ili više komponenata metalne ili nemetalne prirode. Kod svih legura razlikuju se osnovne i sekundarne komponente koje se dodaju da bi legura dobila odgovarajuća mehanička i fizikalno kemijska svojstva. Legure mogu nastati kao:

- mehaničke mješavine više komponenata,
- čvrst rastvor i
- metalna kemijska jedinjenja.

Legure tipa mehaničkih mješavina nastaju mješanjem komponenti u rastaljenom stanju te se hlađenjem dolazi do željene mješavine. U procesu hlađenja svaka komponenta kristalizira posebno tako da se dobija polikristalna struktura sastavljena od više vrsta zrna.

Kod legura tipa čvrstih rastvora javljaju se u procesu hlađenja rastaljenog metala, takozvani mješoviti kristali koji u prostornim rešetkama sadrže atome više komponenata. Kod tog tipa legura razlikuju se dvije vrste kristalnih rešetaka i to:

- kristalne rešetke zamjene i
- kristalne rešetke popune.

Kod procesa odvajanja čestica dolazi do čitavog niza pojava, počev od plastičnih deformacija dijela materijala ispred vrha reznog klina do raskidanja veze tog dijela materijala s osnovnim materijalom. Problemima plastičnosti materijala i njihovoj otpornosti na smicanje treba posvetiti posebnu pozornost ako se želi optimirati proces obrade metala odvajanjem čestica.

3.2. UTJECAJNI FAKTORI NA TOČNOST OBRADE

Znanost o obradi materijala grana se u više znanstvenih disciplina, kao što su:

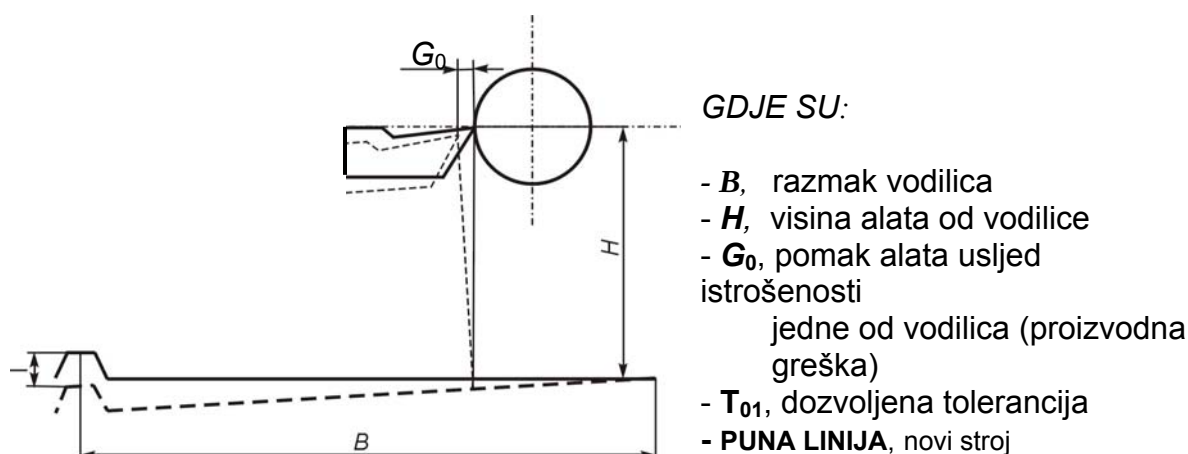
- Teorija stvaranja odvojenih čestica,
- Mehanika odvajanja čestica,
- Tribologija,
- Termodinamičke pojave pri odvajanju čestica,
- Trošenje alata,
- Teorija integriteta obrađene površine,
- Teorija vibracija pri obradi materijala,
- Teorija obradivosti materijala,
- Teorija optimizacije postupka obrade i
- Kibernetika obradnog procesa.

U radu su više od ostalih obrađena područja: teorija odvajanja čestica, teorija vibracija pri obradi materijala, teorija optimizacije postupka obrade i teorija izbora optimalnih parametara geometrije radnog alata.

3.3. TOČNOST STROJA I KRUTOST TEHNOLOŠKOG SUSTAVA

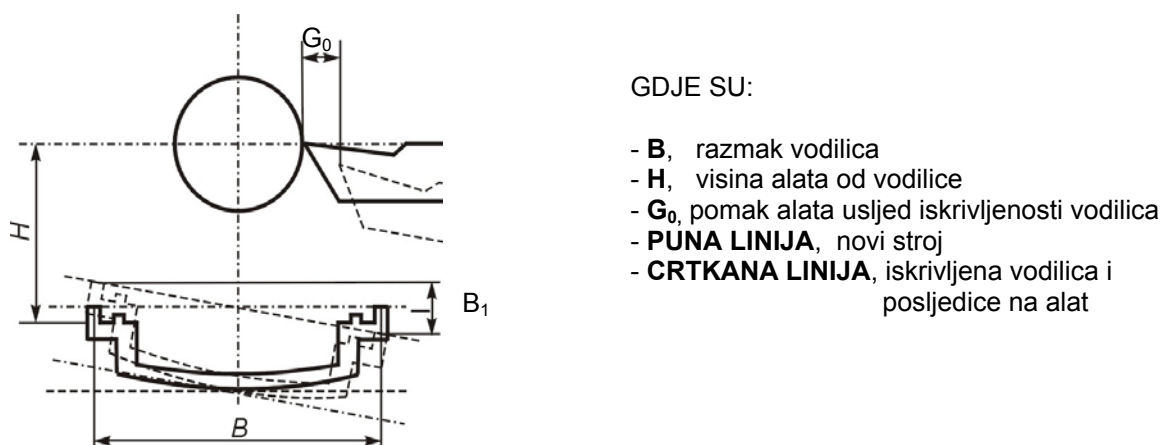
Točnost stroja, naprava i alata ogleda se u tome što se još u procesu njihove izrade pojavljuju određena odstupanja koja se prenose na obradak pri obradi. Prema tome, alatni stroj, naprava i alat nisu apsolutno točni ni onda kada su potpuno novi. Ako se tome doda da će tijekom uporabe doći do odstupanja točnosti, onda je i te kako važno poznavati pogrešku izrade stroja i alata kako bi se mogli primjeniti oni postupci koji će minimizirati pogrešku obrade. Može se zaključiti da dani stroj u pogledu točnosti daje slijedeće relacije:

- 1) $Go(\text{proizvodnagreška}) \leq Tol(\text{tolerancija})$,
- 2) $Go(\text{proizvodnagreška}) > Tol(\text{tolerancija})$ i
- 3) $Go(\text{proizvodnagreška}) \ll Tol(\text{tolerancija})$.



Slika 3.1. Utjecaj istrošenosti uzdužne vodilice [2]

Ako je proizvodna pogreška (G_0) manja ili jednaka dozvoljenoj toleranciji ($G_0 \leq Tol$), proizvedeni dio zadovoljava. Ako je proizvodna pogreška veća od dozvoljene tolerancije ($G_0 > Tol$), proizvedeni dio ne zadovoljava. Za slučaj da je ($G_0 \ll Tol$), tada su zadovoljeni tehnički i tehnološki zahtjevi.



Slika 3.2. Utjecaj izvijanja uzdužnih vodilica [2]

Smanjenje točnosti stroja tijekom uporabe posljedica je:

- istrošenosti vodilica,
- istrošenosti ležajeva i stvaranja zračnosti,
- stanja spojeva,
- povećanja vibracija izazvanih zračnostima,
- oštećenja graničnika, mjernih skala i slično,
- deformiranja prijenosnika, steznih naprava itd.

3.4. RADNI ALAT

Pod utjecajem složenih opterećenja dolazi u obradnom sustavu do otkaza alata, što u cjelini nepovoljno utječe na tehnoekonomske efekte obrade metala odvajanjem čestica.

Prisutno je više oblika otkaza. Na primjer usljed habanja, postepeno se gube rezna svojstva dok usljed loma i krzanja dolazi do trenutnog gubljenja reznih sposobnosti te otkazi vezani za točnost i kvalitet obrade (ovise od više faktora).

Poznavanjem vidova otkazivanja alata omogućava određene intervencije u pogledu izbora vrste materijala alata, te eksploatacijskih uvjeta i optimalne geometrije radnog alata, tako da istraživanja vidova otkaza ima veliko praktično značenje.

a) Analiza uzroka otkaza radnog alata

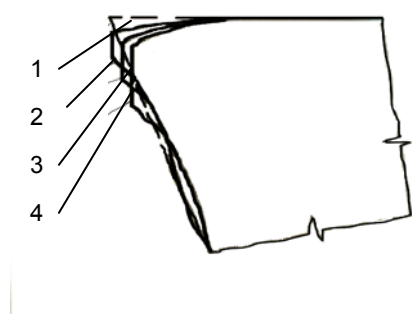
Na površinama radnog alata u tijeku procesa odvajanja čestica prisutni su složeni uvjeti: visoki specifični pritisci pri odvajanju čestica na grudnu površinu alata, visoke temperature pri odvajanju čestica i trenje na kontaktnim površinama odvojene čestice i alata te alata s obratkom. Takođe dolazi do postepenih oštećenja usljed habanja grudne i leđne površine alata. Pri tome su prisutni sljedeći oblici, odnosno tipovi trošenja alata u općem slučaju:

- mikromehaničko rezanje površine radnog alata,
- abrazijsko trošenje tarnih površina,
- adhezijsko trošenje,
- difuzijsko trošenje,
- oksidacija i kemijsko trošenje i
- plastično trošenje (puzanje materijala).

Navedeni oblici habanja nisu prisutni istovremeno. Koji će oblik habanja biti prisutan (dominantan) u većoj ili manjoj mjeri ovisi od temperature u temperaturnom polju zone odvajanja čestica.

b) Promjena oblika vrha alata usljed puzanja

Praćenje deformiranja vrha radnog alata preko profilograma čeone i prednje površine u normalnoj ravni (za točno fiksiranje procesa deformacije potrebno je pratiti deformaciju u dva pravca kao što prikazuje slika 3.3). Utvrđeno je da deformacija reznog klina predstavlja za sebe poseban proces koji može biti svrstan u kategoriju procesa puzanja.



GDJE SU:

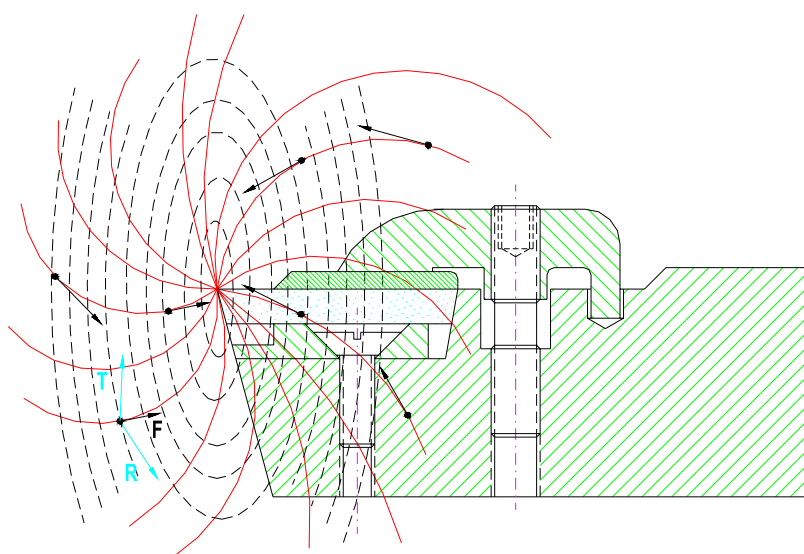
- 1- početni oblik reznog klina
- 2- oblik reznog klina poslije izvjesnog vremena odvajanja čestica t_1
- 3- oblik reznog klina poslije izvjesnog vremena odvajanja čestica t_2 ($t_2 > t_1$)
- 4- oblik reznog klina poslije vremena odvajanja čestica t_3 (alat otkazuje usljed istrošenosti)

Slika 3.3. Deformacija vrha radnog alata [13]

Pri određenim uvjetima zagrijavanja i opterećenja reznog klina može doći do procesa aktivnih promjena određenih volumena tvrdog metala.

c) Promjene usljed dinamičkih opterećenja

Vrh alata u procesu odvajanja čestica otklanja se od ravnotežnog položaja te dolazi do pojave dinamičkih sila upravljenih tako da tvore moment spram ravnotežnog položaja, slika 3.4. Rezultat takve neravnomjernosti jest pojava vibracija.



GDJE SU:

- crtkano-elipse**, putanja alata pri vibriranju u odnosu na ravnotežni položaj
- **parabole**, položaj dinamičke sile kao rezultat vibriranja vrha alata

Slika 3.4. Polja dinamičkih sila pri pomicanju vrha alata [54]

Postojanost radnog alata između ostalih ovisi i o sposobnosti da očuva geometrijske parametre pod djelovanjem toplinskih i mehaničkih opterećenja. Impulsi sile odvajanja čestica po svojoj prirodi su slučajni, neharmonijski i ne podliježu bilo kojem drugom zakonu promjene.

Pojava impulsa sile, pri odvajanju čestica, odnosno, odgovarajuće karakteristike ovisne o strukturi obradka, uzrokovane su makro i mikro geometrijom radnog alata, parametrima obrade i uvjetima obrade.

Sile odvajanja čestica u reznim elementima radnog alata izazivaju elastične i plastične deformacije (promjene) geometrijskih parametara: ispupčenje prednje i čeonu površine alata.

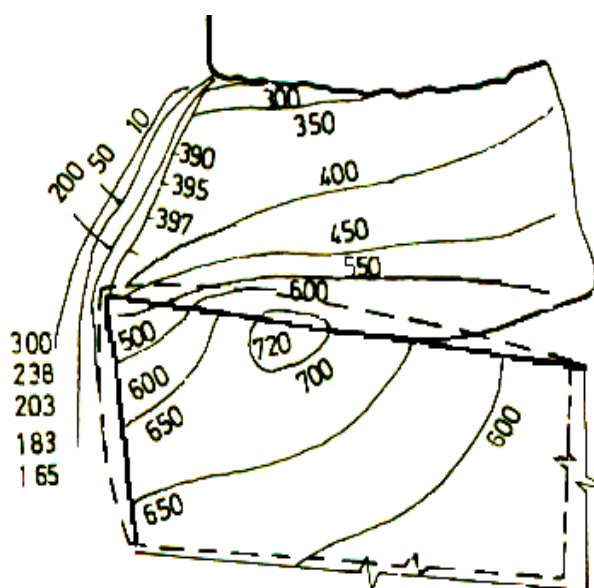
d) Promjene oblika vrha alata usljed širenja djelovanjem temperaturnog polja

Energija koja se troši pri odvajanju čestica za deformaciju materijala i savladavanje trenja na prednjoj i čeonu površini radnog alata pretvara se u toplinu. Temperatura obratka, reznog dijela alata i odvojene čestice raste u tijeku tokarenja do izvjesne granice oko koje mogu, ali ne moraju, nastati kolebanja.

Proces odvajanja čestica kod koga se, za određeno vrijeme, dosegne jedna razina temperature (u svakoj točki), a poslije toga temperatura ostaje manje više stalna, naziva se proces tokarenja sa stacionarnim temperaturnim režimom. U općem slučaju veličina temperature u svakoj točki obradka, alata i odvojene čestice Q , ovisi od položaja te točke spram koordinatnog početka i vremena trajanja procesa tokarenja. Koordinatni početak ortogonalnog koordinatnog sustava, vezan je za vrh alata (spoj glavne i pomoćne oštrice), te vektora brzine tokarenja:

$$Q=f(x,y,z,t)$$

gdje su u jednadžbi: x,y,z – koordinate položaja točke u obratku, radnom alatu i odvojenoj čestici i
 t – vrijeme odvajanja čestica.



GDJE SU:

- puna linija: radni alat prije obrade $t=0$
- crtkana linija: deformacija vrha radnog alata usljed generirane toplinske energije pri odvajanju čestica $t = t_i$
- vrsta alata: P20
- materijal obratka: Č.4730
- posmak: $f = 0,315\text{mm po okr.}$
- dubina obrade: $a_p = 3\text{mm}$

Slika 3.5. Temperaturna polja pri odvajanju čestica [13]

3.5. EKSPLOATACIJSKE KARAKTERISTIKE ALATA ZA TOKARENJE I OCJENA KVALITETE

Pod eksploatacijskim karakteristikama alata podrazumjeva se sveukupnost kvalitativnih karakteristika koje uvjetuju njegovu sposobnost da ostvari proces tokarenja za određeno vrijeme uz zadane parametre obrade, osiguravajući određeni kvalitet obrade.

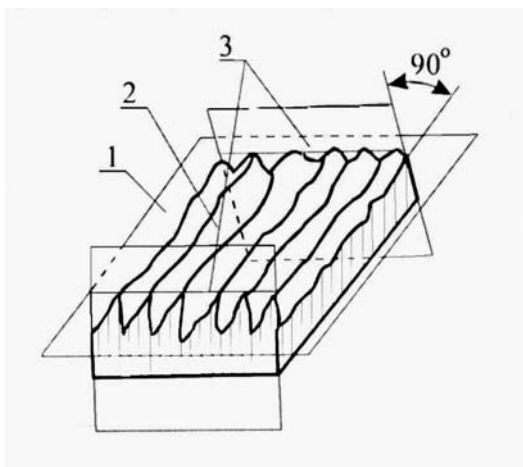
Funkcionalni kvalitet alata ovisi o velikom broju faktora koje možemo svrstati u skupine: konstrukcija alata, vrsta materijala alata i kvaliteta izrade alata. U tijeku rada dolazi do oštećenja reznih elemenata alata usljed mehaničkih i toplinskih opterećenja.

Pored konstrukcije i vrste materijala alata, na kvalitet alata utječe i kvalitet izrade koji opet ovisi o kvaliteti tehnološke opreme, tehnološkog procesa, načina proizvodnje, organizacije kontrole i ispitivanja radnog alata.

Pokazatelji kvalitete alata tijekom eksploatacije su: pokazatelji pouzdanosti rada alata bez oštećenja, proizvodnost i kvalitet obrađene površine. Visoki specifični pritisci, visoke temperature tokarenja i trenje na dodirnim površinama u zoni odvajanja čestica pri tokarenju, izazivaju postepeno oštećenje-habanje prednje i stražnje površine tokarskog noža.

3.6. HRPAVOST POVRŠINE

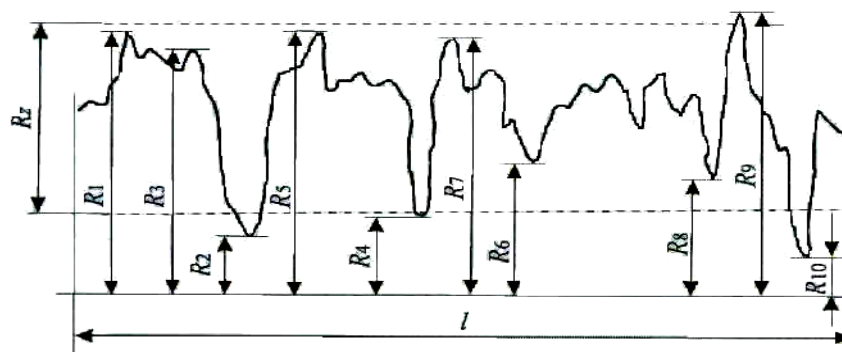
Pod hrapavosti se podrazumijeva skup neravnina s relativno malim hodovima, koje čine reljef unutar referentne dužine L (slika 3.6).



Slika 3.6. Reljef površine

Visina neravnina profila hrapavosti R_z (mjerena u 10 točaka) je razlika između srednjih aritmetičkih vrijednosti R . To su 5 najviših i 5 najnižih točaka

profila, u granicama referentne dužine L . To se odnosi na bilo koji pravac koji ne siječe profil, a paralelan je srednjem pravcu (slika 3.7).



Slika 3.7. Hrapavost površine

Jednadžba koja definira visinu neravnina profila hrapavosti R_z jest:

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + \dots + R_9) - (R_2 + R_4 + \dots + R_{10})}{5}. \quad (3.11)$$

Najveća visina neravnina $R_{\max}$ je razmak između dva pravca, paralelna srednjem pravcu, koji dodiruju, u granicama referentne duljine L , najviše, odnosno najniže točke profila $R_{\max} = R_1 - R_2$.

Hrapavost površine pri obradi na CNC tokarilici ovisi, uglavnom, o tehnološkom postupku, geometriji alata i kako je ranije rečeno, o amplitudi vibracija, odnosno samouzbuđenim vibracijama. Osim tog postupka mjerenja hrapavosti R_z , postoje i drugi postupci, kao što su [41] R_m , R_t , R_a i R_g :

Srednja hrapavost obrađene površine R_m jest:

$$R_m = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} y dx, \quad (3.12)$$

gdje je L_m – dužina mjerenja.

Ukupna hrapavost obrađene površine R_t jest:

$$R_t = R_m + R_p, \quad (3.13)$$

gdje je: R_p - idealna visina poravnanja.

Srednja aritmetička hrapavost obrađene površine jest (slika 3.9):

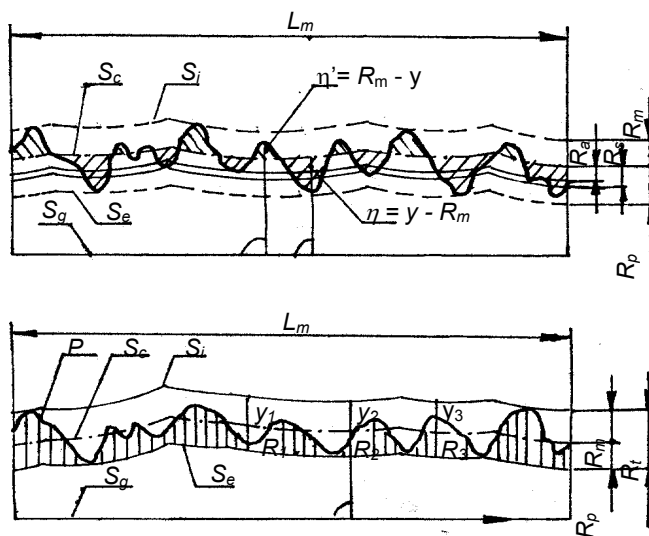
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y| dx, \quad (3.14)$$

Srednja geometrijska hrapavost obrađene površine jest:

$$R_g \cong 0,35R_t, \quad (3.15)$$

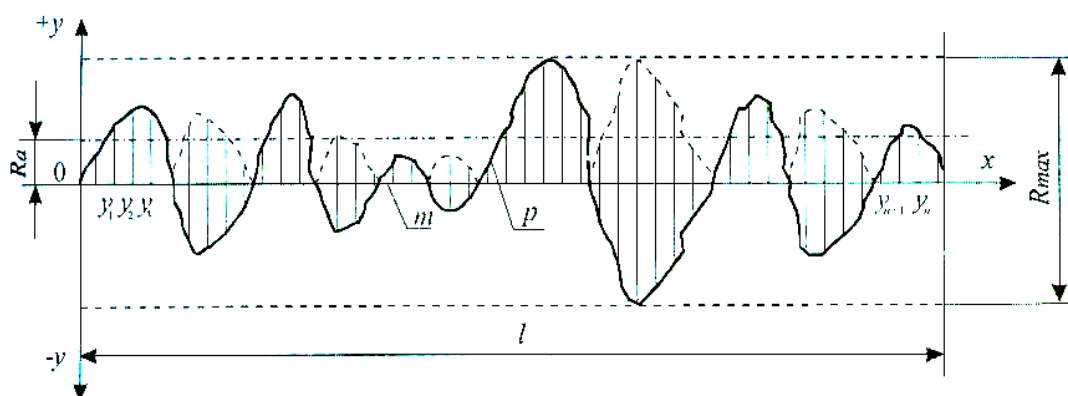
gdje je R_t definirano jednađbom (3.13).

Navedene vrijednosti hrapavosti obrađenih površina prikazane su i na slici 3.8.



Slika 3.8. Mikrogeometrija površine

Tih pet metoda izračuna, omogućavaju analitičko određivanje hrapavosti obrađenih površina. Te metode imaju prednosti i nedostatke. Motiv odabira metode ovdje jest praktične naravi. Naime, presudno je to što rabljeni instrument za mjerenje, obrađuje ulazne podatke definirane jednađbom (3.11).



Slika 3.9 Srednje odstupanje profila

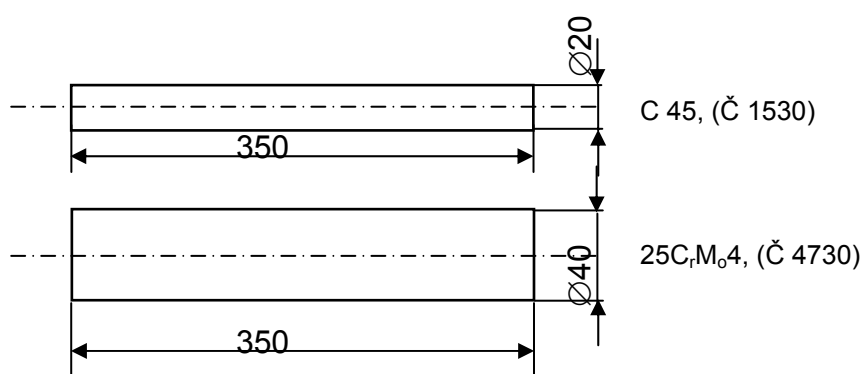
4. POKUSNA ISTRAŽIVANJA

Pokusna određivanja amplituda vibracija i hrapavosti obrađenih površina vršena su na CNC tokarilici. Mjerenje vibracija na obratku izvedena su bezdodirno. Samouzbudne i ostale vibracije na obratku su superponirane. Dobivene amplitude su složene, tj. na mjerene amplitude su utjecali: kućište alatnog stroja, vibriranje alata, i na koncu, vibracije koje uzrokuje obradak.

U ovom poglavlju će se detaljnije obraditi: karakteristike obradaka, primijenjena mjerna oprema, plan pokusa, rezultati pokusnih istraživanja i analiza rezultata hrapavosti obrađenih površina obradaka $\varnothing 20\text{mm}$ i $\varnothing 40\text{mm}$. Također će biti urađena analiza rezultata mjerenja amplituda vibracija dobivenih nakon provedenih pokusa.

4.1. MATERIJAL POKUSNOG UZORKA – OBRADAK

Za mjerenja samouzbudnih vibracija predviđeni su obradci od ugljičnog ($\varnothing 20\text{ mm}$) i legiranog ($\varnothing 40\text{ mm}$) čelika. To su dva karakteristična predstavnika konstrukcijskih materijala. Ugljični čelici se rabe u složenim strojarskim konstrukcijama, a legirani za vrlo složene (ekstremne vrijednosti tlaka, temperature i naprezanja) uvjete eksploatacije. Po DIN normama to su materijali C45 i 25CrMo4. Za pokuse je uzeto po sedam $\varnothing 20$ - C45, (Č.1530) i isto toliko $\varnothing 40$ - 25CrMo4, (Č.4730) obradaka. Toliki broj obradaka je uzet da bi se zadovoljili zahtjevi analize pokusno dobivenih podataka amplituda A i hrapavosti R_z .



Slika 4.1. Dimenzije obradaka

Vanjske površine svih obradaka prije provođenja pokusa, obrađene su na kvalitetu IT 7. S takvom kvalitetom vanjske površine, obavljena su pokusna istraživanja.

4.2. MJERNA OPREMA

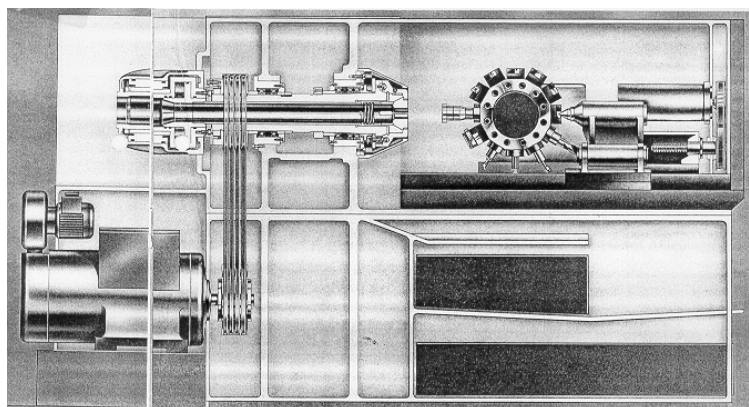
4.2.1. Obradni centar

Uvjet za uspješno izvođenje pokusa je dobra priprema i organizacija mjerenja. Od nekoliko CNC tokarilica odabrana je CNC RE 420, predložena u presjeku na slici 4.2. Vanjski izgled stroja, s upravljačkim ormarom, predložuje slika 1 (prilog 6). Osnovne karakteristike CNC tokarilice su: snaga motora 15 kW, snaga posmičnog motora 5 kW, moment na radnom vretenu 163 Nm, frekvencija vrtnje od 50 do 3600 min⁻¹, maksimalni promjer za obradu $\varnothing$ 42 mm, max. pomak alata po x osi 180 mm, a po z osi 400 mm. Posebna pažnja u pokusu posvećena je pripremi i odabiru mjesta za postavljanje nosača mjernih osjetila.

Mjerno osjetilo za mjerenje vibracija u x osi, (1), slika 4 (prilog 6), učvršćeno je na nosač mjernih osjetila (slika 4.3).

Osjetilo vibracija kojima su mjerene vibracije u y osi, (2), slika 4 (prilog 6), također je učvršćen na nosač. Osjetilo 3 (slika 5) kojim se mjeri pomak nosača u smjeru y osi, postavljen je na kraju nosača, iznad obratka (takođe prilog 6).

Osjetilo 4 (slika 6-prilog 6) koje mjeri pomake nosača u smjeru x osi postavljeno je na zadnjoj strani nosača (u ravnini nosača, popravljeni položaj). Nosač osjetila slika 4.3, pri konstruiranju zahtijevao je poznavanje posebnosti mjerenja s mjernim osjetilima vibracija u posebnim situacijama. Naprimjer, trebalo je izbjeći pojavu rezonancije nosača i stroja, zatim, konstrukcijske veličine su morale odgovarati traženim veličinama stroja. Prilagođavanje dimenzijama stroja postignuto je postavljanjem klizne plohe za nosače osjetila. Ostala instalirana oprema potrebna za pokuse (6), napajanje (7), i pretvornik s pojačalom (8) je na slikama 2 i 3 (prilog 6).

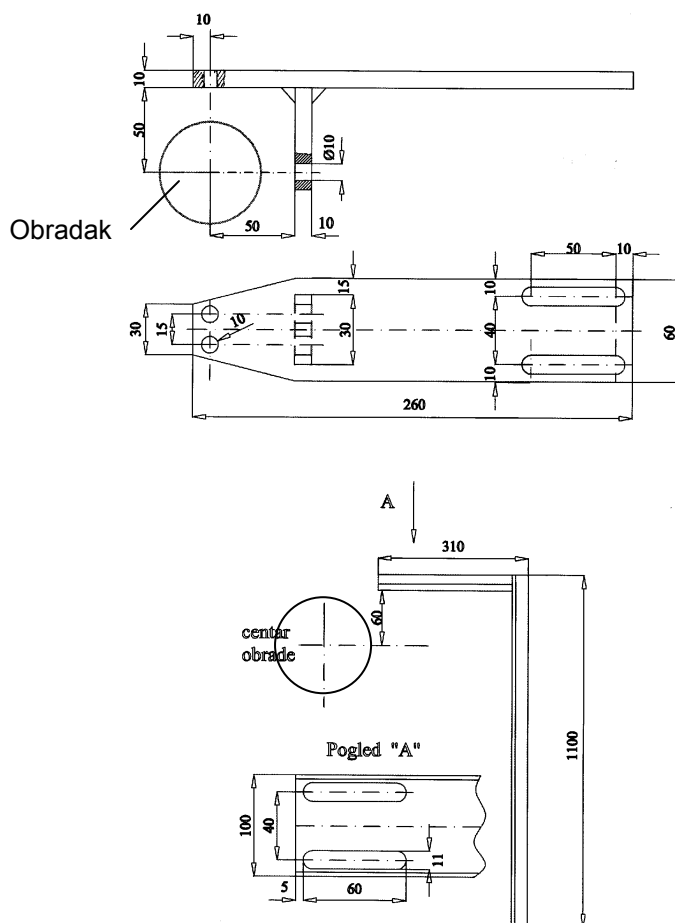


Slika 4.2. Presjek CNC RE 420

4.2.2. Nosač mjernih osjetila

Točnost i pouzdanost mjerenja postignuta je pravilnom konstrukcijom nosača mjernih osjetila i pravilnim izborom mjernih mjesta, odnosno:

- Pri izvođenju pokusa mogu nastati vrtložne struje ispod osjetila. Zato su predviđena po dva provrta $\varnothing 10$ mm jedan do drugog, na horizontalnom i vertikalnom dijelu nosača mada se postavlja jedno osjetilo. Naime mali promjer obradka može uzrokovati pojavu vrtložnih struja. To se pri izvođenju pokusa i dogodilo te su se osjetila morala postaviti po dijagonali čime je izbjegnuta ta pojava.
- Udaljenost vrha osjetila od obradka treba da je od 20÷50 mm. Taj zahtjev je također uvažen pri konstruiranju nosača. Nosač je zavaren za kućište obradnog centra, a mjerna osjetila postavljena u predviđenim granicama udaljenosti od obradaka. Obzirom da su analizirana dva promjera obradaka i osjetila su se dva puta podešavala. Materijal nosača mjernih osjetila je negarantirane čvrstoće.



Slika 4.3. Nosač mjernih osjetila

4.2.3. Opće smjernice o izboru osjetila i mjerenjima vibracija

Izbor osjetila je često utemeljen uglavnom na: frekvencijskom području, veličini, masi, mogućnostima ugradnje, cijeni, a često se nedovoljno posvećuje pozornosti njihovoj osjetljivosti.

U određenim mjerenjima mogu se pojaviti visoke amplitude ubrzanja ili visokofrekvencijski šumovi koji preoptereće pretvarač (transdudktor), uzrokujući izobličenja signala i velike “ski slope” odzive.

U odnosu na način djelovanja, osjetila se dijele na strujna i naponska. Strujna osjetila sadrže samo osjetljivi elemenat bez ikakve elektronike. Piezoelektrična ili elektromagnetska osjetila daju na izlazu visoku impedanciju. Strujni ili “in line” pretvarač se postavlja između osjetila i instrumenta za pretvaranje izlaznog signala u nisko impedancijski napon.

Naponska osjetila (akcelerometri) se upotrebljavaju u većini vibracijskih i udarnih mjerenja zbog njihove jednostavnosti, točnosti i širokog frekvencijskog područja. Ta osjetila uključuju ugrađen električni sklop za pretvaranje visoko impedancijskog strujnog signala u nisko impedancijski naponski signal, koji se može poslati preko oklopljenog (koaksijalnog) kabela u izlazni instrument za očitavanje.

Na izbor osjetila utječu različiti parametri: frekvencijsko područje, osjetljivost, mehanički način djelovanja (tlak, vlak ili savijanje), električni način djelovanja (strujni ili naponski), uzemljenje, materijal, veličina, masa, ugradnja i slično. Od nabrojanih, najvažniji su frekvencijsko područje i osjetljivost.

Izbor odgovarajuće osjetljivosti je važan zbog zadovoljavanja zahtjevanog amplitudnog područja. Pravilna osjetljivost za mjerenje, zahtijeva poznavanje područja vibracijskih amplituda kojima će pretvarač biti izložen tijekom mjerenja. Pri izboru, važno je voditi računa o osjetljivosti odnosno amplitudnom području.

Osjetljivost je definirana kao električki izlaz za jedinično ubrzanje. Za osjetila u naponskom području, osjetljivost je određena tipom osjetila seizmičkom masom i pojačanjem unutarnjeg pojačala. Iz osjetila (akcelerometra), strujni signal se akumulira u kondenzatoru te daje odgovarajući napon. Kapacitet jest zbroj distribuirane kapacitivnosti osjetila i izlaza pojačala.

Naponska osjetljivost je izražena u jedinicama milivolta po g (mV/ g), gdje je g gravitacijsko ubrzanje.

Strujna osjetljivost je obično izražena u pikokulonima po g (pC/ g). Osjetljivost industrijskih osjetila u naponskom području djelovanja je obično u granicama od 10 do 500 mV/ g . Donja i gornja vrijednost napona je obično 2÷4 V iznad vrijednosti i 2÷4 V ispod vrijednosti napona napajanja. Strujni izvor napaja pojačalo, smješteno unutar pretvarača, preko izlaznog kontakta. Izlazni napon pojačala je zbroj jednosmjernog napona i signala osjetila kao rezultat postojanja

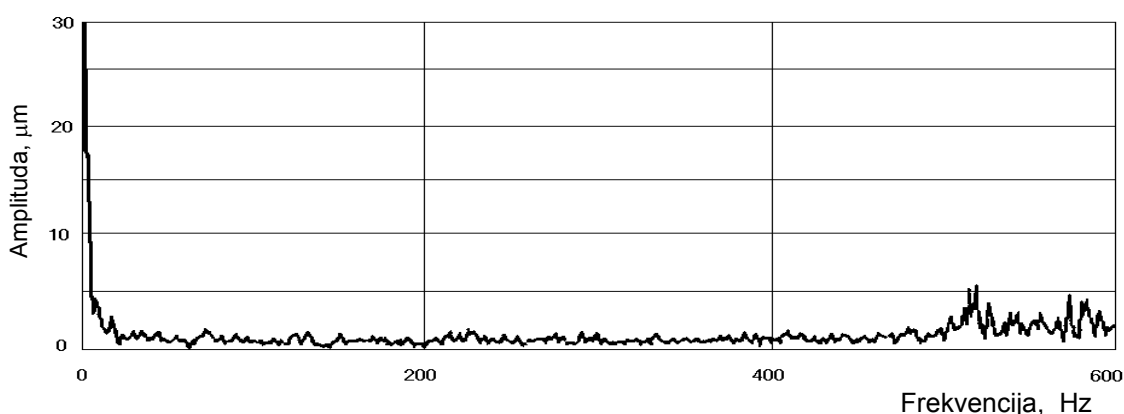
vibracija. Ekstremna vrijednost amplitudnog područja osjetila inverzno je razmjerna njegovoj osjetljivosti.

Visoko osjetljiva osjetila (≥ 500 mV/g) mogu razlučiti vrlo male signale od šuma. Visoko osjetljiva osjetila imaju ograničenu amplitudu i visokofrekvencijsko područje djelovanja. Zbog toga se osjetila često primjenjuju za niske frekvencije i male amplitude mjerenja. Visoko osjetljiva osjetila, zbog toga, nisu podesna za visokofrekvencijska mjerenja.

Mjerenja vibracija prate dva tipa smetnji, nazvana “ski slope”.

- Prvi tip smetnje je uzrokovan zasićenjem pojačala u odnosu na visoku amplitudu ubrzanja ili visokofrekvencijski šum.
- Drugi tip smetnje je zbog integracijskog šuma.

Napunjeni kondenzator treba određeno vrijeme da se isprazni, a za pojačalo, da se vrati u normalan način djelovanja. Taj proces je sličan impulsu s dugim vremenom trajanja. Pojave s dugim vremenom trajanja u vremenskom području se transformiraju u niskofrekvencijske komponente u frekvencijskom području. Taj efekt se zove “waskover” i ima “ski slope” izgled.



Slika 4.4. Izgled Waskover efekta

Prisustvo “ski slope” efekta uzrokuje gubitak visokofrekvencijskih podataka zbog skaliranja, što mjerene vibracijske podatke čini neupotrebljivim. Visokofrekvencijski šum može preopteretiti pojačalo uzrokujući efekt “ski slope”.

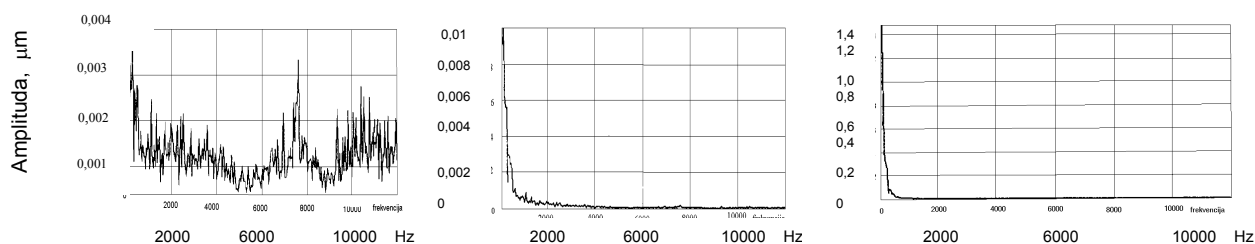
“Ski slope”, odziv se može pojaviti i u slijedećim slučajevima:

- visoka brzina vrtnje, propuštanje pare i kavitacija u pumpama, ili cjevovodima i
- kao posljedica integracijskog šuma.

Integracija se pojavuje, obično, u instrumentima za mjerenje vibracija ili softveru za pretvaranje mjernih podataka, kao što su pretvaranje ubrzanja u brzinu, ubrzanje u pomak i brzinu u pomak. Proces pretvaranja može biti implementiran ili u hardveru s uporabom analognih integratora ili u softveru, izvođenjem digitalne integracije. U nekim slučajevima, amplitude ubrzanja ili brzina su prilično male ili

blizu praga šuma. Kod integriranja ubrzanja u brzinu, ubrzanje u upomak ili brzine u pomake “ski slope” se pojavi zbog takozvanog “ $1/f$ ” efekta (visoka razina niskofrekvencijskog šuma). Primjer tog tipa “ski-slope” prikazan je na slici 4.5.

Za danu frekvenciju u Hz, digitalna integracija je jednostavan proces skaliranja. Skalirajući faktori ili faktori pretvaranja koji su upotrijebljeni za pretvaranje između ubrzanja i brzine ili ubrzanja i pomaka ili brzine i pomaka mogu se naći u literaturi.



Slika 4.5. Primjeri “ski-slope”

Pojava “ski-slope” u frekvencijskom spektru može biti uzrokom problema kod očekivane niske frekvencije. Te niskofrekvencijske anomalije generiraju mjerene vibracije i njihove amplitude će biti uključene u cjelokupni spektar ili širokopojasni analogni spektar. Iako se “ski-slope” pojavljuje u prvih nekoliko frekvencijskih komponenti u spektru, može imati značajan utjecaj na trend, pojase alarme i opće alarme. Zbog toga je važno izabrati pravilnu osjetljivost da bi se izbjeglo zasićenje.

Općenito, osjetila s nižom osjetljivošću (50 mV/g ili 25 mV/g) bi trebalo upotrebljavati za velike udare (velike amplitude ubrzanja ≥ 25 mV/g) ili za velike brzine. Tipične primjene su u monitoringu strojeva pri procesu obrade rezanjem.

Osjetila s većom osjetljivošću primjenjuju se za niskofrekvencijska mjerenja, kao što su strojevi za papir, niskobrzinske mješalice, pumpe i slično. Važni podaci za mjerenja su niskofrekvencijski odziv i prag šuma. Niskofrekvencijski odziv je dobiven s niskofrekvencijskim filterima koji se nalaze unutar osjetila i analizatora.

Kod niskofrekvencijskih mjerenja, prisutne su vrlo male vibracije i ubrzanja. Radi toga omjer signala spram šuma mora biti maksimalan. Visoko osjetljiva osjetila nisu pogodna za visokofrekvencijska mjerenja, kao što su “Spike Energy” mjerenja.

Prvo, visoko osjetljiva osjetila obično imaju niskopojasne filtre s “roll off” frekvencijom, obično, između 300 Hz i 700 Hz.

Drugo, amplitudno područje visukoosjetljivih osjetila je prilično nisko. Nije uobičajeno očitavati relativno visoke “Spike Energy”. U tom slučaju visoko osjetljiva osjetila mogu biti lako zasićena.

Automatsko postavljanje područja kod prenosnih instrumenata također zahtijeva duže vrijeme. Pristizanje podataka prije nego se ustale pretvarač i analizator može uzrokovati velika prekoračenja očitavanja koja su, naravno, pogrešna.

Visokofrekvencijski šum, kao što je kavitacija u pumpama i propuštanje pare može preopteretiti pojačalo i uzrokovati "ski-slope" efekat. Visokofrekvencijski šum, može biti uklonjen izborom osjetila s ugrađenim niskopojasnim filterima ili uporabom mehaničkih filtera za ograničavanje visokofrekvencijskog područja.

Pomicanje kabela može stvoriti električna pražnjenja (triboelektrične efekte) i rezultirati s pogrešnim izlaznim signalom.

Dakle prisutna su tri slučaja smetnji pri mjerenju vibracija:

- prvi, kazuje da je osjetilo s nižom osjetljivošću prikladnije za primjene s visokim udarima,
- drugi, ilustrira "ski-slope" spektar zbog integracijskog šuma,
- treći, prikazuje "ski-slope" spektar uzrokovan zasićenjem pretvarača.

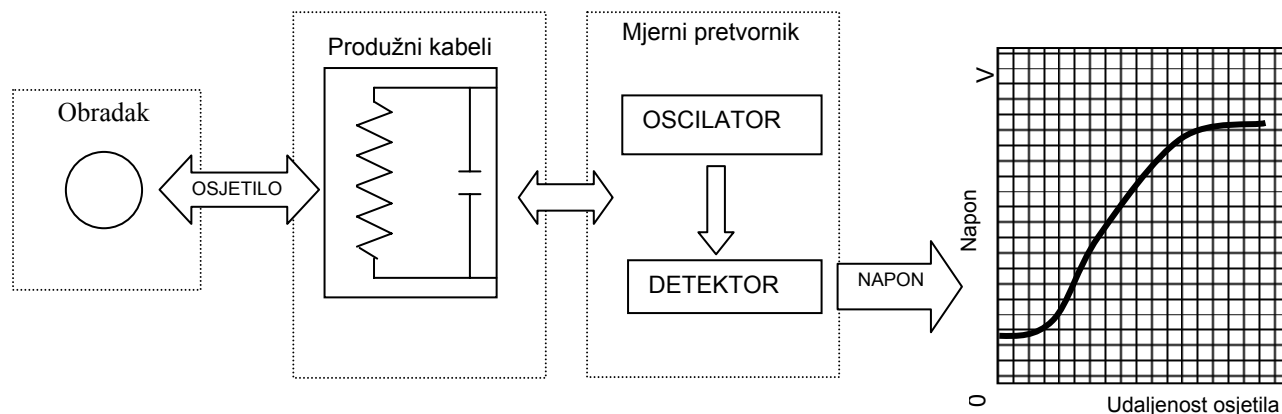
Nisko osjetljiva osjetila (50 mV/g ili 25 mV/g), upotrebljavaju se zbog izbjegavanja problema zasićenja. U mjerenjima visokofrekvencijskog šuma, mogu se upotrijebiti niskopojasni ili mehanički filteri, da bi se izbjegli problemi zasićenja.

Visokoosjetljiva osjetila mogu razlučiti vrlo male signale vibracija od šuma i obično se upotrebljavaju za niže frekvencije i mjerenja manjih amplituda. Drugo, visokoosjetljiva osjetila imaju ograničenu amplitudu i visoko frekvencijsko područje. Zbog toga, visoko osjetljiva osjetila nisu dobra za visokofrekvencijska mjerenja kao što su "Spike Energy" mjerenja. U mjerenjima visokih frekvencija preporučuju se osjetila s 50mV/g za mjerenje "Spike Energy".

Mjerna osjetila primjenjena u eksperimentima rade na principu vrtložnih struja. To je sustav mjerenja koji bezdodirno mjeri vibracije obratka.

Mjerni pretvornik pomaka mjeri udaljenost između vrha osjetila i vodljive površine obratka.

Sustav se sastoji od mjernog osjetila, produžnog kabela i mjernog pretvornika, slika 4.6.



Slika 4.6. Mjerni sustav za identifikaciju amplituda vibracija

Mjerni pretvornik stvara visoko frekvencijsko elektromagnetsko polje oko vrha mjernog osjetila. Kada se vrh osjetila dovede blizu vodljive površine magnetsko polje stvara, u vodljivoj površini, vrtložne struje. Vrtložne struje zapravo opterećuju oscilator mjernog pretvornika. Detektor u mjernom pretvorniku detektira koliko se snage troši te taj gubitak snage pretvara u adekvatan istosmjerni (DC) napon na izlazu. Taj napon ovisi od:

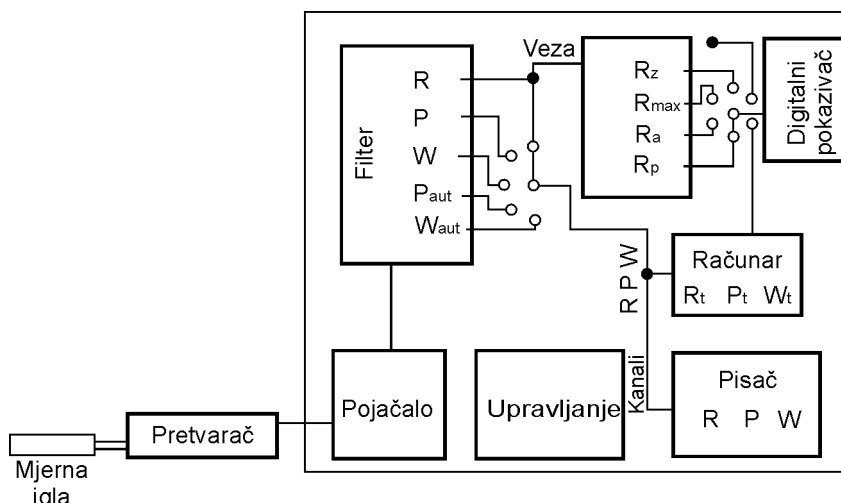
- frekvencije magnetskog polja,
- vodljivosti obratka i
- magnetne permeabilnosti obratka (koliko se jako može obradak magnetizirati).

Izlaz iz pretvornika je ovisan o frekvenciji oscilatora i jakosti magnetskog polja. Kombinacijom tog, s efektima materijala obratka, izvršena je konstrukcija mjernog pretvornika s najboljim odzivom izlaznog signala.

Ukoliko nema vibracija, izlaz sustava je istosmjerni (DC) napon, koji predstavlja udaljenost između obratka i vrha osjetila. Kad obradak započne vrtnju i pojave se vibracije, iste će uzrokovati pojavu izmjenične komponente (AC), koja će se superponirati istosmjernoj. Izlazni signal upotrijebljenog pretvornika će se uvijek sastojati od dva signala, DC komponente koja predstavlja položaj i AC komponente koja predstavlja vibracije. Frekvencijska karakteristika mjernog područja je promjenljiva i mijenja se s frekvencijom napajanja do 10 kHz.

4.2.4. Mjerenje hrapavosti obrađene površine

Shema mehaničko-elektroničkog uređaja s kojim su vršena mjerenja hrapavosti obrađenih površina prikazuje blok shema na slici 4.7.



Slika 4.7. Blok shema pertometra W5D

Mjerenje se izvodi tako što mjerna igla, prelazi preko neravnina, i u pretvaraču inducira struju ovisno o veličini neravnina.

Tehnički podaci za PERTOMETRA W5D su sljedeći:

PERTOMETER W5D se sastoji od:

- dijela za praćenje neravnina (mjerna igla),
- pretvarača, pojačala, filtera, digitalnog pokazivača,
- računara i
- pisača

Dio za praćenje neravnina (mjerna igla) ima karakteristike:

- brzinu gibanja mjerne igle od $0.01 \div 0.5$ mm po sekundi,
- maksimalnu dužinu mjerenja 32 mm,
- masu 1.5 kg.

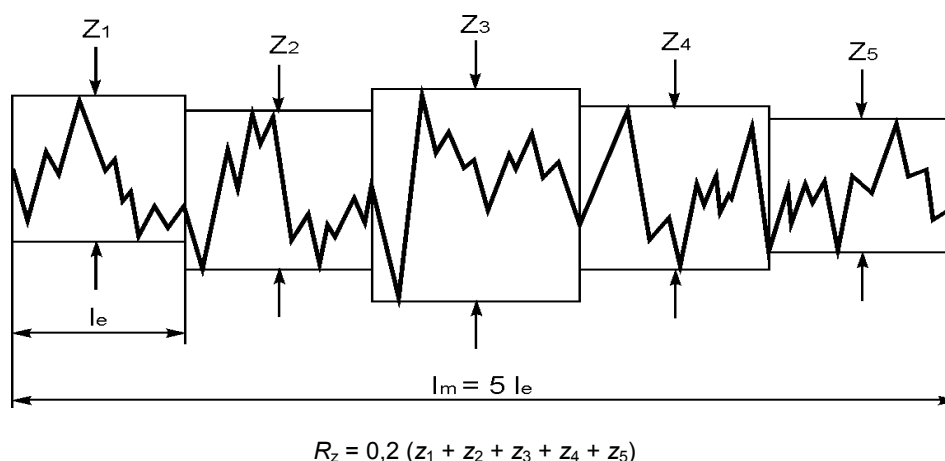
Digitalni pokazivač ima karakteristike:

- očitava neravninu R_z pomoću dva područja i to s točnošću $0.2 \div 50$ μm i $2 \div 500$ μm ,
- napajanje jest 220 V/50 Hz,
- masa 11 kg.

Pisač (zapisivanje na traku) ima sljedeće karakteristike:

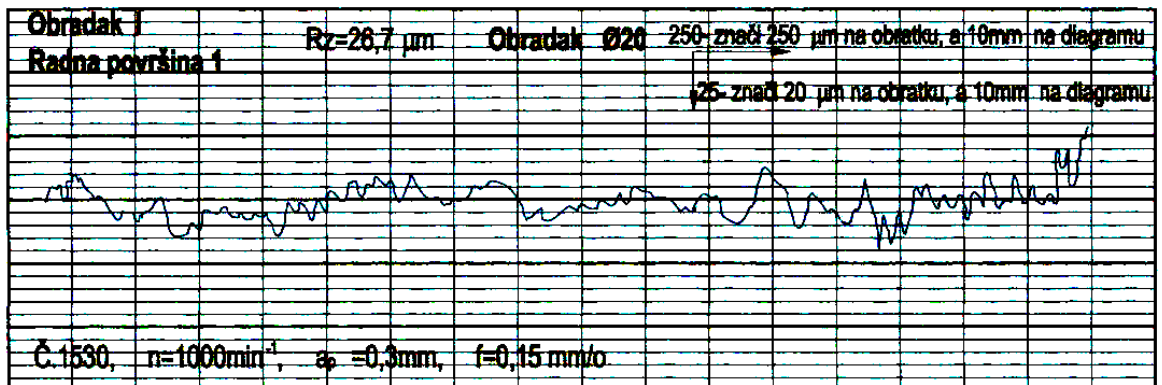
- brzina očitavanja trake jest $0.5 \div 1$ mm/s,
- napajanje 220 V/50 Hz,
- masa 17 kg.

Pertometer provodi mjerenje hrapavosti obrađene površine po dijagramu površina prikazanom na slici 4.8:



Slika 4.8. Dijagram površina (iz uputstva o upotrebi pertometra)

Mjerno područje pertometra, odnosno mjerilo koje je upotrijebljeno pri mjerenju predloženo je na slici 4.9. Po horizontali je mjerilo 250, a po vertikali 25.



Slika 4.9. Izgled hrapavosti površine prikazan na mjernoj traci sa mjerilom

Vertikala 25 znači mjerilo 1:2000 ili 20 μm na obradku odgovara 10 mm na dijagramu, a horizontalno 250 znači 250 μm dužine na obratku, a 10 mm na dijagramu.

4.3. PLAN POKUSA

Pokusi su, kao što je ranije navedeno, izvedeni na CNC tokarilici TIP RE 420, a obrađivane su dvije vrste konstrukcijskih čelika, C45 (Č 1530) i 25CrMo4 (Č 4730), a plan pokusa predočuje slika 4.10. Kemijski sastav tih materijala dat je tablicom 4.1.

Tablica 4.1. Kemijski sastav obradaka iz pokusa

Materijal obradka	Legirajući elementi						
	C %	Si%	Mn%	Cr %	Mo%	P%	S%
C45 (Č.1530)	0,36-0,44	0,10-0,40	0,60-1,0	-	-	0,050	≤0,050
25CrMo4 (Č.4730)	0,22-0,29	≤0,40	0,60-0,90	1,05	0,22	0,030	≤0,030

Za obradu su predviđeni standardni radni alati-noževi: desni 16 D1616 ISO 6 P30.

Geometrijske oznake (slika 2.17) jesu:

γ - kut prednje površine alata,

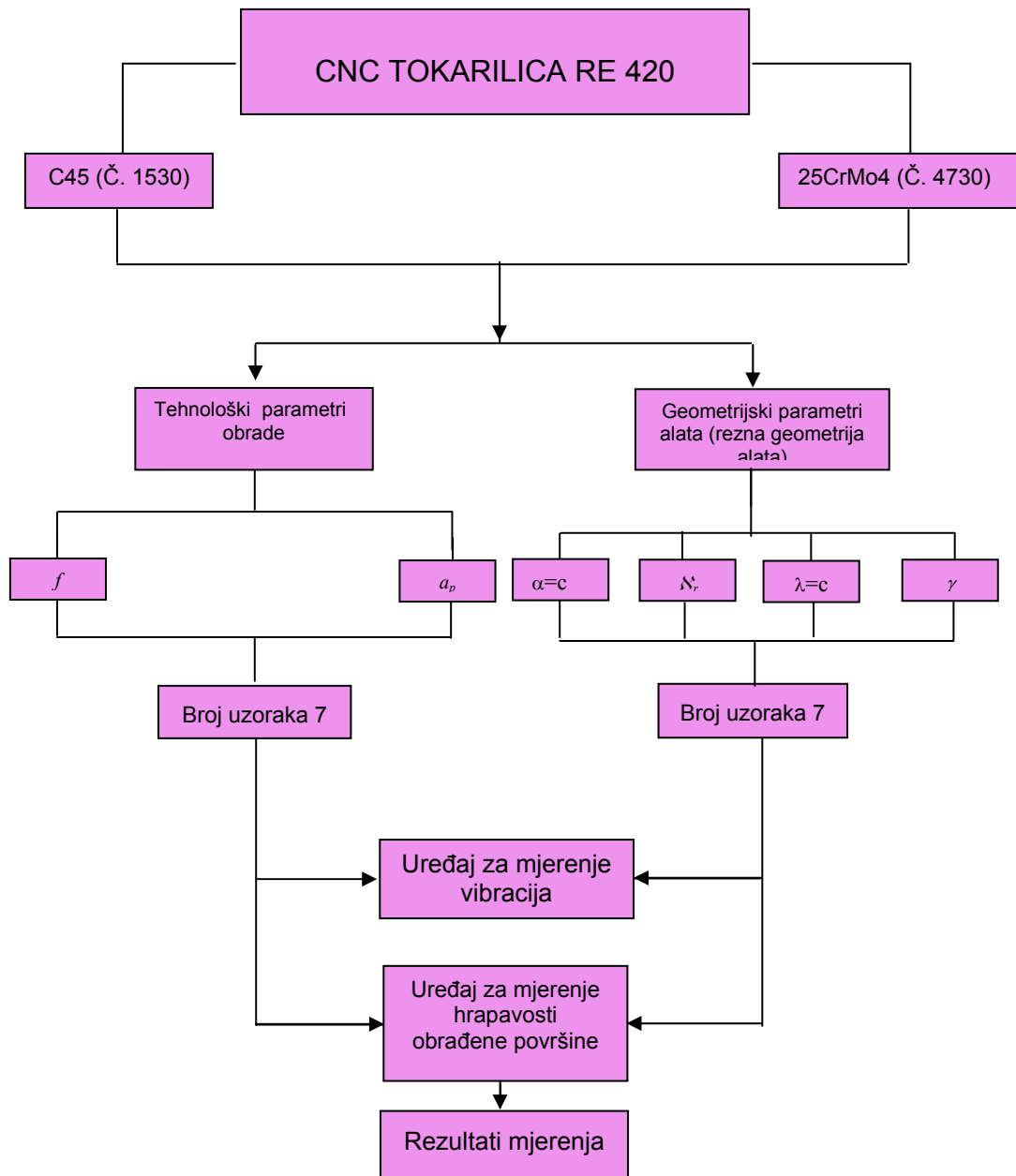
κ_r - kut namještanja oštrice alata (napadni kut),

α - leđni kut i

β - kut reznog klina.

Polazi se od pretpostavke da je poznata amplituda vibracija, tako da se ovisnost sile može prikazati funkcijom: $F=f(\kappa_r)$. Operacije su obavljane po planiranom postupku, prikazanom u tablici 4.2.

Primjenjena oprema za mjerenje amplituda jest: 208 Data Acquisition Interface Unit i ADRE for Windows software, 7200 Proximity Transducer Systems 5 mm and 8 mm and Velomitor Piezo-velocity Sensor (program licenciran i zaštićen u USA i ne prevodi se!), slika 4.6.



Slika 4.10. Blok dijagram izvođenja pokusa

4.3.1. Tehnološki parametri obrade

Za korektnu provedbu pokusa potrebno je uraditi plan izvođenja pokusa. U planu je neophodno definirati promjenljive parametre, mjerne veličine, redosljed izvođenja pokusa, te vrijednosti pojedinih promjenljivih u pokusima. Promjenljivi parametri su: posmak i dubina obrade (tehnološki parametri), frekvencija vrtnje te geometrijske karakteristike radnog alata. Tehnološki parametri su prevedeni na upravljački jezik CNC tokarilice RE 420.

Tablica 4.2. Tehnološki parametri obrade

Broj pokusa	Obradak Ø 20	Broj pokusa	Obradak Ø 40
I	$n = 1000$ okr po min. posmak = 0.15 mm po okr. dubina obrade=0.3 mm redosljed alata: 1,2,3,4,5,6,7,8	I	$n = 1000$ o po min. posmak = 0.15 mm po okr. dubina obrade=0.3 mm redosljed alata: 1,2,3,4,5,6,7,8
II	$n = 1500$ okr po min posmak = 0.2 mm po okr dubina obrade=0.3 mm redosljed alata: 1,2,3,4,5,6,7,8	II	$n = 1500$ okr po min posmak = 0.2 mm po okr dubina obrade=0.3 mm redosljed alata: 1,2,3,4,5,6,7,8
III	$n = 1100, 1200, 1300, 1400$ okr po min posmak = 0.15 mm po okr dubina obrade=0.3mm redosljed alata: 4,3,2,1,8,7,6 i 5	III	$n = 1100, 1200, 1300, 1400$ okr po min posmak = 0.15 mm po okr dubina obrade=0.3 mm redosljed alata: 4,3,2,1,8,7,6 i 5
IV	$n = 1500$ okr po min posmak = 0.15 mm po okr dubina obrade=0.15 mm redosljed alata: 1,2,3,4,5,6,7,8	IV	$n = 1500$ okr po min posmak = 0.15 mm po okr dubina obrade=0.15 mm redosljed alata: 1,2,3,4,5,6,7,8
V	$n = 1500$ okr po min posmak = 0.15 mm okr dubina obrade=0.15 mm redosljed alata: 1,2,3,4,5,6,7,8	V	$n = 1500$ okr po min posmak = 0.15 mm po okr dubina obrade=0.15 mm redosljed alata: 1,2,3,4,5,6,7,8
VI	$n = 1500$ okr. po min. posmak = 0.15 mm po okr dubina obrade=0.15 mm redosljed alata: 4,3,2,1,8,7,6,5	VI	$n = 1500$ okr. po min. posmak = 0.15 mm po okr dubina obrade=0.15 mm redosljed alata: 4,3,2,1,8,7,6,5
VII	$n = 1100, 1200, 1300, 1400$ okr. po min. posmak = 0.15 mm po okr dubina obrade=0.3mm redosljed alata: 4,3,2,1,8,7,6 i 5	VII	$n = 1100, 1200, 1300, 1400$ okr. po min. posmak = 0.15 mm po okr dubina obrade=0.3 mm redosljed alata: 4,3,2,1,8,7,6 i 5

Tehnološki parametri, tablica 4.2., prilagođeni za CNC tokarilicu RE 420, ispisani su u prilogu 1, (stranice od 1 do 7).

4.3.2. Geometrijski parametri alata

Svojstva alata, odnosno zadani kutovi na alatu koji izazivaju samouzbudne vibracije su: kut prednje površine alata γ i kut namještanja oštice alata λ_r . Od odabira kutova ovisila je praktična provedba pokusa. Samouzbudne vibracije uzrokuju kutevi γ i λ_r , i uz tehnološke parametre su osnovni utjecajni faktori u provedbi pokusa.

Tablica 4.3 Geometrijski parametri alata rabljenog u izvedbi pokusa

Broj noža-alata	1	2	3	4	5	6	7	8
Kutevi noža								
γ	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
λ_r	89°	88°	87°	86°	85°	84°	83°	82°

4.4. REZULTATI POKUSNIH ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju sadržani su podaci mjerenja hrapavosti obrađenih površina te njihova analiza.

4.4.1. Rezultati pokusnih istraživanja hrapavosti površina

Rezultati pokusnih istraživanja hrapavosti prikazani su u dva poglavlja: poglavlje rezultata hrapavosti za obratke $\varnothing 20$ mm i poglavlje za obratke $\varnothing 40$ mm.

4.4.1.1 Rezultati mjerenja hrapavosti obrađenih površina obradaka $\varnothing 20$ mm

Rezultati hrapavosti obrađenih površina proizašli su kao plod kontinuiranog zapisivanja očitanih vrijednosti hrapavosti s pertometra. Iz tih mjerenja proizašle su, za obratke $\varnothing 20$ mm, tablice od 4.4 do 4.9. Tablice sadrže broj alata, hrapavost površine R_z na radnom obratku, tehnološke parametre i u zadnjem stupcu srednju klasu hrapavosti za dati alat i odgovarajuću površinu. Tablica 4.10. sadrži, također, podatke za broj alata, radnu površinu, tehnološke parametre, s tim da je ovdje mijenjana kružna frekvencija od $1100 \div 1400 \text{ min}^{-1}$. Predzadnji stupac sadrži klasu hrapavosti za svaku od navedenih površina i na kraju zadnji stupac, aritmetičku sredinu hrapavosti $\overline{R_z}$ za odgovarajući alat i radnu površinu.

Tablica 4.4 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka I - $\varnothing 20$

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti
		Kružna frekv. okr. po min	Posmak f , mm po ok	Dubina obrade a_p , mm	R_z μm
1	1	1000	0,15	0,3	26,7
2	2	1000	0,15	0,3	38,3
3	3	1000	0,15	0,3	37,0
4	4	1000	0,15	0,3	44,7
5	5	1000	0,15	0,3	26,2
6	6	1000	0,15	0,3	34,5
7	7	1000	0,15	0,3	28,1
8	8	1000	0,15	0,3	22,4

Tablica 4.5 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka II - $\varnothing 20$

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti
		Kružna frekv. Okr. po min	Posmak f , mm po ok	Dubina obrade a_p , mm	R_z μm
1	1	1500	0,2	0,3	31,8
2	2	1500	0,2	0,3	22,2
3	3	1500	0,2	0,3	35,2
4	4	1500	0,2	0,3	33,7
5	5	1500	0,2	0,3	44,0
6	6	1500	0,2	0,3	39,2
7	7	1500	0,2	0,3	44,1
8	8	1500	0,2	0,3	22,6

Tablica 4.6 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka III - $\varnothing 20$

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti
		Kružna frekv. Okr. po min	Posmak f , mm po okr	Dubina obrade a_p , mm	R_z μm
1	1	1100	0,15	0,3	20,9
2	2	1200	0,15	0,3	17,5
3	3	1300	0,15	0,3	26,3
4	4	1400	0,15	0,3	27,7
5	5	1100	0,15	0,3	34,5
6	6	1200	0,15	0,3	38,3
7	7	1300	0,15	0,3	24,7
8	8	1400	0,15	0,3	14,5

Tablica 4.7 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka IV - $\varnothing 20$

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti
		Kružna frekv. okr po min	Posmak f , mm po okr	Dubina obrade a_p , mm	R_z μm
1	1	1500	0,15	0,15	17,5
2	2	1500	0,15	0,15	14,3
3	3	1500	0,15	0,15	19,8
4	4	1500	0,15	0,15	18,7
5	5	1500	0,15	0,15	25,1
6	6	1500	0,15	0,15	22,1
7	7	1500	0,15	0,15	29,9
8	8	1500	0,15	0,15	15,3

* Geometrija reznog dijela alata dana je u tablici 4.3.

Tablica 4.8 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka V - $\varnothing 20$

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti R_z μm
		Kružna frekv. Okr po min	Posmak f, mm po okr	Dubina obrade a_p , mm	
1	1	1500	0,15	0,1	23,5
2	2	1500	0,15	0,1	19,0
3	3	1500	0,15	0,1	22,8
4	4	1500	0,15	0,1	5,7 korozija
5	5	1500	0,15	0,1	28,4
6	6	1500	0,15	0,1	27,3
7	7	1500	0,15	0,1	22,0
8	8	1500	0,15	0,1	23,5

Tablica 4.9 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka VI - $\varnothing 20$

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti R_z μm
		Kružna frekv. Okr po min	Posmak f, mm po okr	Dubina obrade a_p , mm	
4	1	1500	0,15	0,3	16,1
3	2	1500	0,15	0,3	19,0
2	3	1500	0,15	0,3	21,0
1	4	1500	0,15	0,3	17,9
8	5	1500	0,15	0,3	33,4
7	6	1500	0,15	0,3	35,1
6	7	1500	0,15	0,3	22,6
5	8	1500	0,15	0,3	22,3

Tablica 4.10 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka VII - $\varnothing 20$

Alat broj	Površ broj	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti R_z μm	Ariti. sred. $\overline{R_z}$, μm
		Kružna frekv. Okr po min	Posmak f, mm po okr	Dubina obrade a_p , mm		
1	1	1100	0,15	0,3	5,74	6.35
		1200			5,76	
		1300			7,75	
		1400			6,18	
2	2	1100	0,15	0,3	8,75	11.37
		1200			11,65	
		1300			8,38	
		1400			16,71	
3	3	1100	0,15	0,3	18,73	12.77
		1200			15,09	
		1300			10,12	
		1400			7,16	
4	4	1100	0,15	0,3	10,56	12.71
		1200			12,90	
		1300			15,13	
		1400			12,25	
5	5	1100	0,15	0,3	15,07	17.09
		1200			18,89	
		1300			16,34	
		1400			18,07	
6	6	1100	0,15	0,3	16,50	15.97
		1200			15,20	
		1300			21,10	
		1400			11,10	
7	7	1100	0,15	0,3	8,50	8.85
		1200			10,30	
		1300			5,50	
		1400			11,10	
8	8	1100	0,15	0,3	7,50	8.77
		1200			9,80	
		1300			7,10	
		1400			10,70	

* Geometrija reznog dijela alata dana je u tablici 4.3.

4.4.1.2 Rezultati mjerenja hrapavosti obrađenih površina obradaka Ø40 mm

Rezultati hrapavosti obrađenih površina proizašli su kao plod kontinuiranog zapisivanja vrijednosti hrapavosti s pertometrom. Iz tih mjerenja proizašle su, za obradke Ø40 mm, tablice od 4.11 do 4.16. Tablice sadrže broj alata, površinu na obratku, tehnološke karakteristike i, u zadnjem stupcu, srednju hrapavost R_z za dati alat te odgovarajuću površinu. Tablica 4.17. sadrži također, podatke za broj alata, radnu površinu, tehnološke karakteristike, a mijenjana je kružna frekvencija od $1100 \div 1500 \text{ min}^{-1}$, u predzadnjem stupcu hrapavost R_z i u zadnjem stupcu aritmetička sredina hrapavosti $\overline{R_z}$ za odgovarajući alat i radnu površinu.

Tablica 4.11 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka I - Ø40

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti R_z μm
		Kružna frekv. Okr po min	Posmak f, mmpo okr	Dubina obrade a_p , mm	
1	1	1000	0,15	0,3	8,70
2	2	1000	0,15	0,3	5,76
3	3	1000	0,15	0,3	9,94
4	4	1000	0,15	0,3	9,28
5	5	1000	0,15	0,3	10,00
6	6	1000	0,15	0,3	10,49
7	7	1000	0,15	0,3	11,40
8	8	1000	0,15	0,3	8,84

Tablica 4.12 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka II - Ø40

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti R_z μm
		Kružna frekv. O po min	Posmak f, mm/o	Dubina obrade a_p , mm	
1	1	1500	0,2	0,3	9,12
2	2	1500	0,2	0,3	5,97
3	3	1500	0,2	0,3	12,22
4	4	1500	0,2	0,3	9,13
5	5	1500	0,2	0,3	10,47
6	6	1500	0,2	0,3	7,61
7	7	1500	0,2	0,3	8,39
8	8	1500	0,2	0,3	8,52

Tablica 4.13 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka III - Ø40

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti R_z μm
		Kružna frekv. O po min	Posmak f, mm po okr	Dubina obrade a_p , mm	
1	1	1100	0,15	0,3	9,15
2	2	1200	0,15	0,3	5,67
3	3	1300	0,15	0,3	6,46
4	4	1400	0,15	0,3	7,56
5	5	1100	0,15	0,3	11,26
6	6	1200	0,15	0,3	12,55
7	7	1300	0,15	0,3	11,62
8	8	1400	0,15	0,3	8,80

* Geometrija reznog dijela alata dana je u tablici 4.3.

Tablica 4.14 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka IV - $\varnothing 40$

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti R_z μm
		Kružna frekv. Okr po min	Posmak f, mm po okr	Dubina obrade a_p , mm	
1	1	1500	0,15	0,15	8,80
2	2	1500	0,15	0,15	6,60
3	3	1500	0,15	0,15	10,44
4	4	1500	0,15	0,15	10,01
5	5	1500	0,15	0,15	11,35
6	6	1500	0,15	0,15	11,65
7	7	1500	0,15	0,15	10,69
8	8	1500	0,15	0,15	9,69

Tablica 4.15 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka V - $\varnothing 40$

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti R_z μm
		Kružna frekv. Okr po min	Posmak f, mm po okr	Dubina obrade a_p , mm	
1	1	1500	0,15	0,1	9,55
2	2	1500	0,15	0,1	6,77
3	3	1500	0,15	0,1	10,02
4	4	1500	0,15	0,1	9,91
5	5	1500	0,15	0,1	10,78
6	6	1500	0,15	0,1	10,87
7	7	1500	0,15	0,1	11,54
8	8	1500	0,15	0,1	8,33

Tablica 4.16 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka VI - $\varnothing 40$

Alat br.	Površ. br.	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti R_z μm
		Kružna frekv. Okr po min	Posmak f, mm po okr	Dubina obrade a_p , mm	
4	1	1500	0,15	0,3	8,50
3	2	1500	0,15	0,3	6,05
2	3	1500	0,15	0,3	11,57
1	4	1500	0,15	0,3	8,95
8	5	1500	0,15	0,3	11,45
7	6	1500	0,15	0,3	8,34
6	7	1500	0,15	0,3	10,73
5	8	1500	0,15	0,3	9,45

* Geometrija reznog dijela alata dana je u tablici 4.3.

Tablica 4.17 Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od tehnoloških parametara i geometrije reznog dijela alata * obratka VII - $\varnothing 40$

Alat broj	Površ broj	Tehnološki parametri			Izmjerene vrijednosti	Aritimet. sredina(μm) $\overline{R_z}$
		Kružna frekv. Okr po min	Posmak f, mm po okr	Dubina obrade a_p , mm	R_z μm	
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1100	0,15	0,3	10,32	8.57
		1200			8,10	
		1300			8,31	
		1400			7,58	
2	2	1100	0,15	0,3	7,52	7.23
		1200			7,29	
		1300			6,75	
		1400			7,39	
3	3	1100	0,15	0,3	12,32	11.77
		1200			10,17	
		1300			13,03	
		1400			11,59	
4	4	1100	0,15	0,3	10,88	10.44
		1200			10,03	
		1300			10,28	
		1400			10,57	
5	5	1100	0,15	0,3	10,46	10.84
		1200			11,87	
		1300			11,45	
		1400			9,59	
6	6	1100	0,15	0,3	7,22	10.57
		1200			11,03	
		1300			9,95	
		1400			12,03	
7	7	1100	0,15	0,3	8,37	10.16
		1200			11,85	
		1300			10,08	
		1400			10,36	
8	8	1100	0,15	0,3	7,31	8.51
		1200			7,77	
		1300			8,93	
		1400			10,05	

* Geometrija reznog dijela alata dana je u tablici 4.3.

4.5 ANALIZA REZULTATA MJERENJA HRAPAVOSTI POVRŠINA OBRADAKA

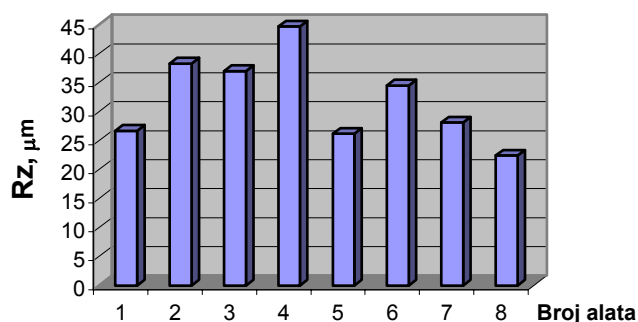
Na osnovu dobivenih rezultata pokusa za obratke Ø20 mm i Ø40 mm, (tablice 4.4 do 4.17) urađena je analiza dobivenih vrijednosti hrapavosti. Tablicama 4.18 i 4.19 prikazana je aritmetička sredina vrijednosti hrapavosti za obratke Ø20 mm i Ø40 mm ili jasnije, ona sadrži podatke iz zadnjeg stupca tablica od 4.4 do 4.17.

- Tablica 4.18 sadrži aritmetičke sredine podataka za sedam obradaka Ø20 s podacima hrapavosti, za svaki alat od 1 do 8.
- Tablica 4.19 sadrži takođe aritmetičke sredine za sedam obradaka Ø40 s podacima hrapavosti, za svaki alat od 1 do 8.

U obje tablice (4.18 i 4.19) prikazan je redoslijed kvaliteta hrapavosti. Po vertikali su poredani obradci od I do VII, a po horizontali radni alati-radne površine od 1 do 8. U posljednjem reduku prikazana je aritmetička sredina hrapavosti $\overline{R_z}$, postignute na obratku Ø20 tablica 4.18, i na obradaku Ø40 tablica 4.19.

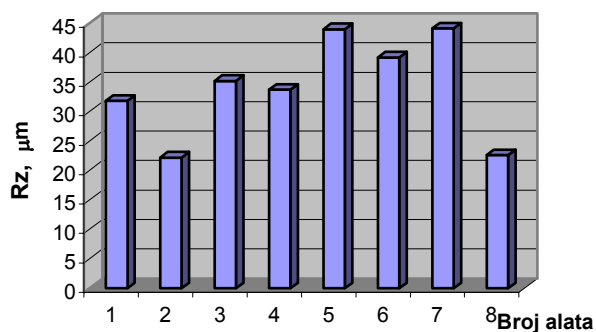
Tablica 4.18 Hrapavosti R_z i aritmetička sredina hrapavosti $\overline{R_z}$ u μm , obradaka Ø20

Broj obratka	broj alata = broj radne površine							
	1	2	3	4	5	6	7	8
I	26,7	38,3	37	44,7	26,2	34,5	28,1	22,4
II	31,8	22,2	35,2	33,7	44	39,2	44,1	22,6
III	20,9	17,5	26,3	27,7	34,5	38,3	24,7	14,5
IV	17,5	14,3	19,8	18,7	25,1	22,1	29,9	15,3
V	23,5	19	22,8	5,7 korozija	28,4	27,3	22	23,5
VI	16,1	19	21	17,9	33,4	35,1	22,6	22,3
VII	6,35	11,37	12,97	12,71	17,09	15,97	8,85	8,77
Arit. sredi. hrapavosti $\overline{R_z}$, μm	20,40	17,52	24,98	23,01	29,81	48,72	37,41	18,48



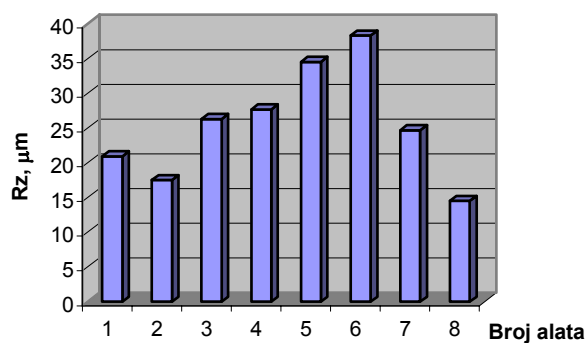
- **obrdak I**, promjer Ø20
- kružna frekvencija: $n=1000$ okr po min.
- posmak: $f=0,15$ mm po okr.
- dubina brade: $a_p=0,3$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.11. Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od rezne geometrije alata



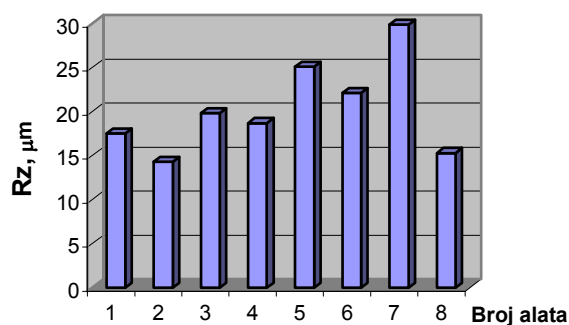
- **obrdak II**, promjer $\varnothing 20$
- kružna frekvencija: $n=1500$ okr po min
- posmak: $f=0,2$ mm po okr
- dubina obrade: $a_p=0,3$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.12. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata



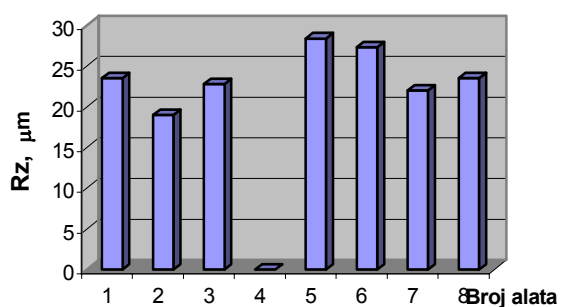
- **obrdak III**, promjer $\varnothing 20$
- kružna frekvencija: $n=1100-1400$ okr po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr
- dubina obrade: $a_p=0,3$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.13. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata



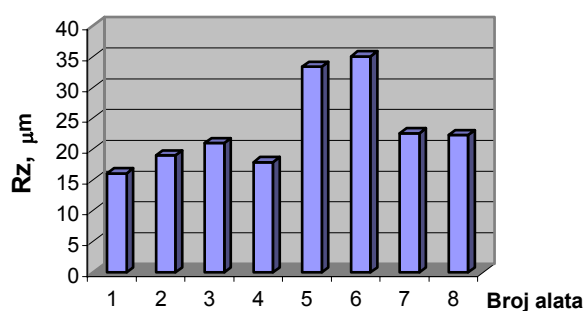
- **obrdak IV**, promjer $\varnothing 20$
- kružna frekvencija: $n=1500$ okr po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr
- dubina obrade: $a_p=0,15$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.14. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata



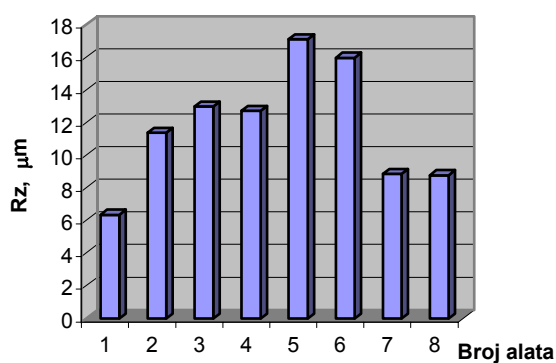
- obrdak V, promjer $\varnothing 20$
- kružna frekvencija: $n=1500$ okr po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr
- dubina obrade: $a_p=0,1$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije a dane su u tablici 4.3)
- površina 4, (obrađivana alatom 4) nije dala točno mjerenje-imala je zaostalu koroziju

Slika 4.15. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata



- obrdak VI, promjer $\varnothing 20$
- kružna frekvencija: $n=1500$ okr po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr
- dubina obrade: $a_p=0,3$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.16. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata

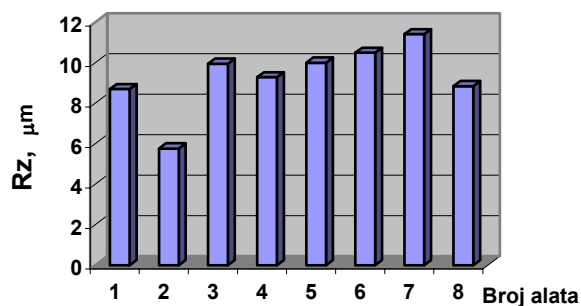


- obrdak VII, promjer $\varnothing 20$
- kružna frekvencija: $n=1100-1400$ okr po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr
- dubina obrade: $a_p=0,3$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.17. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata

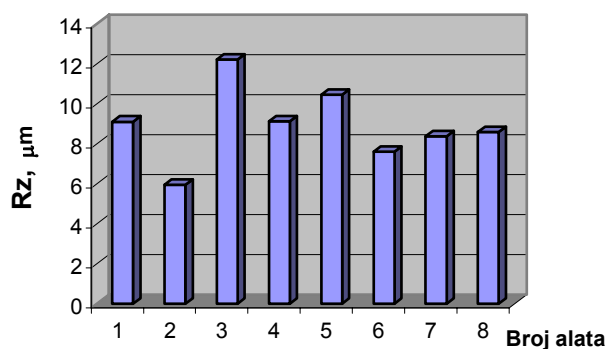
Tablica 4.19 Hrapavosti R_z i aritmetička sredina hrapavosti $\overline{R_z}$ u μm , obradaka $\varnothing 40$

Broj obratka	Broj alata $\equiv$ broj radne površine							
	1	2	3	4	5	6	7	8
I	8,7	5,76	9,94	9,28	10	10,49	11,4	8,84
II	9,12	5,97	12,22	9,13	10,47	7,61	8,39	8,59
III	9,15	5,67	6,46	7,56	11,26	12,55	11,62	8,8
IV	8,8	6,6	10,44	10,01	11,35	11,65	10,69	9,69
V	9,55	6,77	10,02	9,91	10,78	10,87	11,54	8,33
VI	8,5	6,05	11,57	8,95	11,45	8,34	10,73	9,45
VII	8,57	7,23	11,77	10,44	10,84	10,57	10,16	8,51
Arit. sredi. hrapavosti $\overline{R_z}$, μm	8,91	6,29	10,34	9,32	12,27	10,29	10,64	8,87



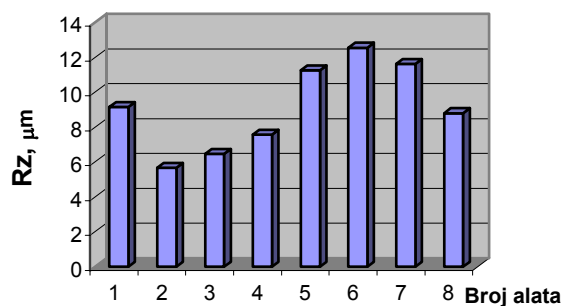
- obradak I, promjer $\varnothing 40$
- kružna frekvencija: $n=1000$ okr po min.
- posmak: $f=0,15$ mm po okr.
- dubina obrade: $a_p=0,3$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.18. Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od rezne geometrije alata



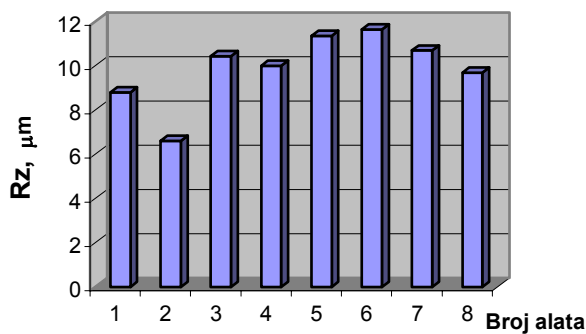
- obradak II, promjer $\varnothing 40$
- kružna frekvencija: $n=1100-1400$ okr po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr
- dubina obrade: $a_p=0,3$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.19. Vrijednosti hrapavosti R_z u ovisnosti od rezne geometrije alata



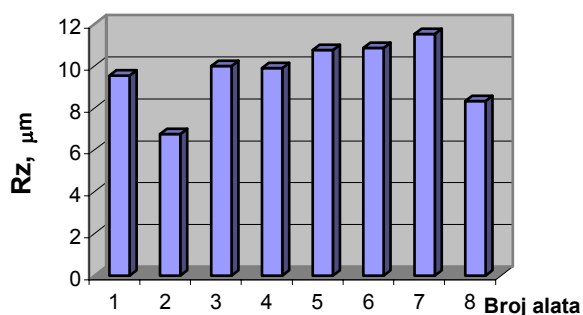
- **obrdak III**, promjer $\varnothing 40$
- kružna frekvencija: $n=1100\text{--}1400$ okr po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr.
- dubina obrade: $a_p=0,3$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.20. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata



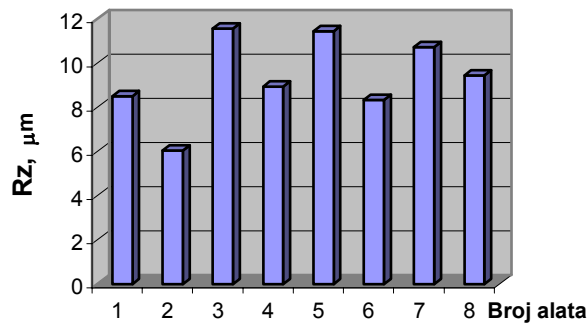
- **obrdak IV**, promjer $\varnothing 40$
- kružna frekvencija: $n=1500$ okr po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr.
- dubina obrade: $a_p=0,15$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.21. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata



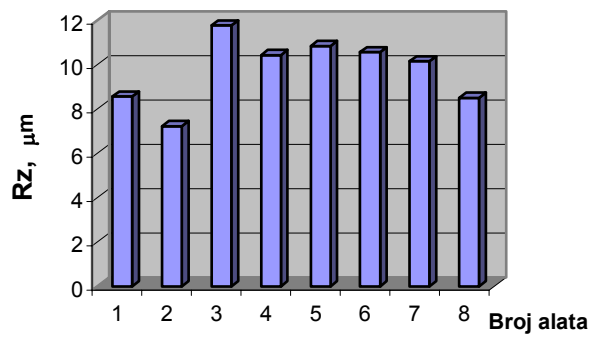
- **obrdak V**, promjer $\varnothing 40$
- kružna frekvencija: $n=1500$ okr. po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr.
- dubina obrade: $a_p=0,1$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.22. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata



- **obrdak VI**, promjer $\varnothing 40$
- kružna frekvencija: $n=1500$ okr. po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr.
- dubina obrade: $a_p=0,3$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.23. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata



- **obrdak VII**, promjer $\varnothing 40$
- kružna frekvencija: $n=1100-1400$ okr. po min
- posmak: $f=0,15$ mm po okr.
- dubina obrade: $a_p=0,3$ mm
- (Alati označeni brojevima 1,2,...,8 različite su geometrije, a dane su u tablici 4.3)

Slika 4.24. Vrijednosti hrapavosti Rz u ovisnosti od rezne geometrije alata

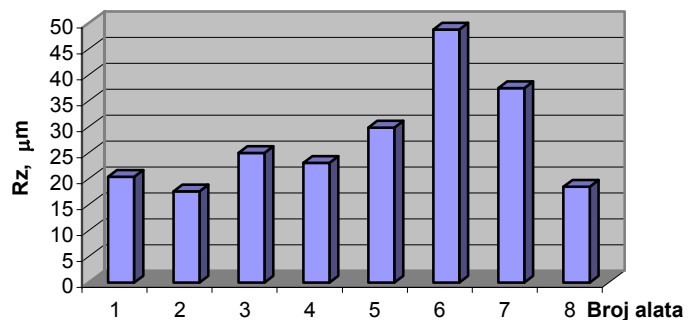
4.5.1. REZULTATI MJERENJA HRAPAVOSTI

4.5.1.1. Prosječna hrapavost obradaka Ø20 mm

Tablica 4.20 predstavlja radne alate i aritmetičku sredinu hrapavosti provedenih mjerenja za obradak Ø20 (tablica 4.18). Iz tablice 4.20, optimalnu vrijednost hrapavosti daje alat broj 2.

Tablica 4.20 Aritmetička sredina hrapavosti $\overline{R_z}$ i redoslijed kvaliteta - Ø20

Alat	Aritmetička sredina hrapavosti $\overline{R_z}$, μm	Redoslijed kvaliteta
1	20.40	3
2	17.52	1
3	24.98	5
4	23.01	4
5	29.81	6
6	48.72	8
7	37.41	7
8	18.48	2



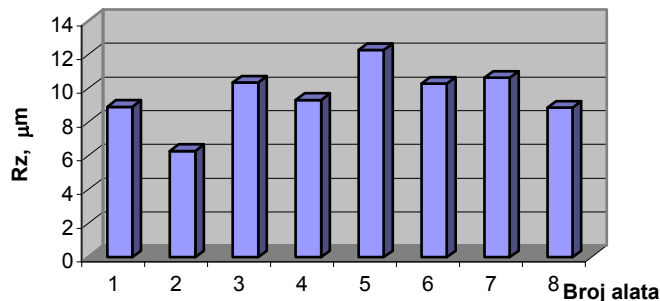
Slika 4.25. Dijagram aritmetičke sredine hrapavosti, obradaka Ø20

4.5.1.2. Prosječna hrapavost obradaka Ø40 mm

Tablica 4.21. predstavlja radne alate u pokusima i aritmetičku sredinu hrapavosti provedenih mjerenja za obradak promjera Ø40 (tablica 4.19). Iz tablice 4.21, optimalnu vrijednost aritmetičke sredine hrapavosti, daje alat broj 2.

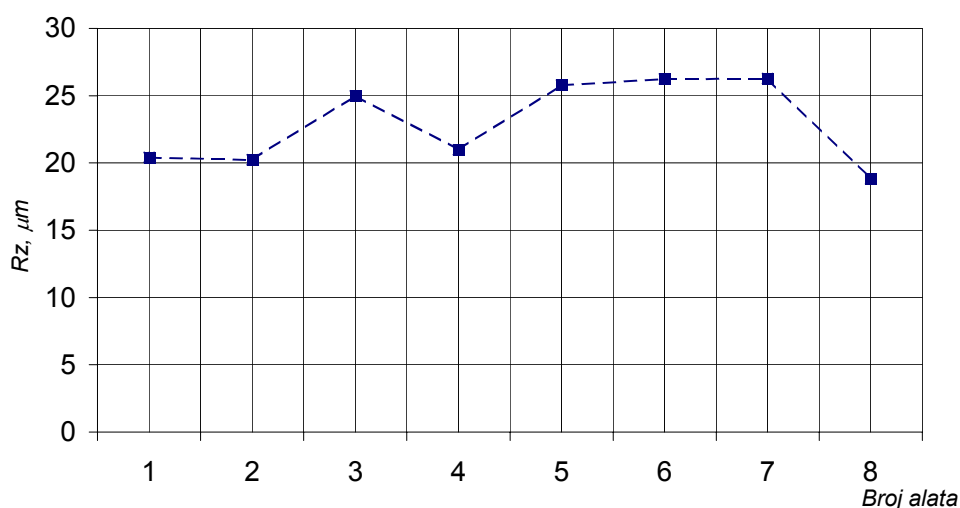
Tablica 4.21. Aritmetička sredina hrapavosti $\overline{R_z}$ i redoslijed kvaliteta - Ø40

Alat	Aritmetička sredina hrapavosti $\overline{R_z}$, μm	Redoslijed kvaliteta
1	8.91	3
2	6.29	1
3	10.34	6
4	9.32	4
5	12.27	8
6	10.29	5
7	10.64	7
8	8.87	2



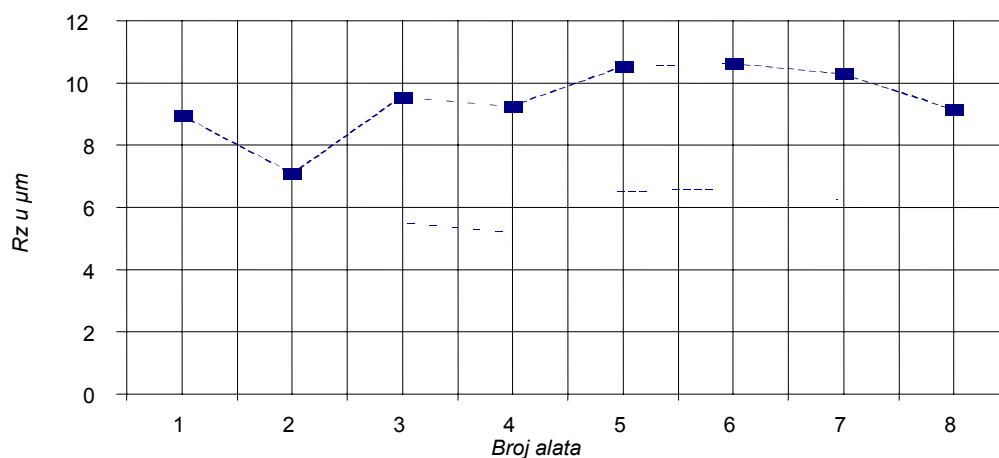
Slika 4.26. Dijagram aritmetičke sredine hrapavosti, obradaka Ø40

Tablice 4.20. i 4.21. omogućavaju i dijagramski prikaz. Za ordinatu je uzeta hrapavost (μm), a za apscisu broj alata. Dijagrami hrapavosti, prikazani slikama 4.25 i 4.27 daju prikaz hrapavosti površina obradaka Ø20 mm, a dijagrami hrapavosti, prikazani slikama 4.26 i 4.28 daju hrapavost površina obradaka Ø40 mm.



Slika 4.27. Dijagram prosječne hrapavosti $R_z \varnothing 20$

Osim prikaza na ekranu (upisano u tablice) pokusima mjerenih hrapavosti obrađivanih površina, pertometar je mogao i vizuelno prikazati hrapavosti, pomoću zapisa na traci.



Slika 4.28. Dijagram prosječne hrapavosti $R_z \varnothing 40$

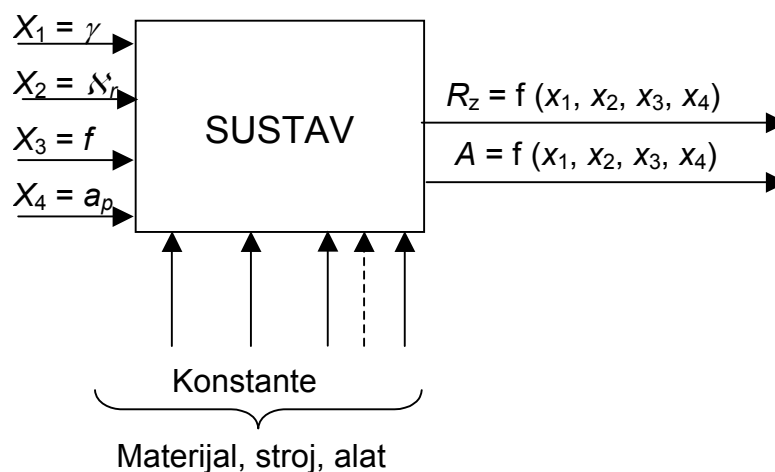
Na primjer u prilogu broj 2 dani su dijagramski zapisi mjerenja s pertometrom, prilog 2.1÷2.40. Tu su prikazane vrijednosti hrapavosti pokusima obrađene površine s naznačenim brojem pokusa te naznačenom površinom odgovarajućeg obradka. Tako, na primjer, prilog broj 2.1 sadrži obradak $\varnothing 20$ površinu 1 i alat broj 1, s izmjerenim vrijednostima hrapavosti. Podatak mjerenja, odnosno dobivena vrijednost srednje aritmetičke hrapavosti jest: $\overline{R_z} = 26,7 \mu m$.

5. MATEMATIČKO MODELIRANJE

U ovom dijelu rada pokazano je rješavanje utjecaja elemenata tehnoloških parametara obrade i geometrije alata na hrapavost obrađenih površina i amplitude samouzbudnih vibracija, odnosno modeliranje, a podrazumijeva shematske modele, modeliranje te optimiziranje.

5.1. SHEMA MODELIRANJA

Matematičko modeliranje stohastičkog procesa se izvodi na temelju pokusnih rezultata dobivenih za odgovarajuće neovisne varijable x_i (slika 5.1).



Slika 5.1. Shema modela

5.2. IZBOR RAZINE PARAMETARA I KODIRANJA

U pokusnom dijelu istraživanja varirani su sljedeći parametri :

- kut prednje površine alata γ , u stupnjevima,
- kut namještanja oštrice alata λ_r , u stupnjevima,
- posmak alata f , u mm po okretu i
- dubina obrade a_p , u mm.

Tablica 5.1. Tablica utjecajnih faktora

UTJECAJNI PARAMETRI		KODIRANE VRIJEDNOSTI				
		X_{j5}	X_{j2}	X_{j3}	X_{j1}	X_{j4}
		-2	-1	0	+1	+2
PRIRODNE VRIJEDNOSTI	$x_1 \equiv \gamma$	0,5	2,0	3,5	5,0	6,5
	$x_2 \equiv \lambda_r$	83,5	85	86,5	88	89,5
	$x_3 \equiv f$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
	$x_4 \equiv a_p$	0,075	0,15	0,225	0,30	0,375

Fizikalne kodirane vrijednosti parametara varirane su u pet razina (tablica 5.1). Kodiranje parametara procesa izvedeno je na slijedeći način:

srednji nivo fizikalne vrijednosti:

$$x_{0i} = \frac{x_{i \max} + x_{i \min}}{2}, \quad (5.1)$$

područje granice fizikalnih vrijednosti:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{2}, \quad (5.2)$$

kodirana vrijednost:

$$X_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}. \quad (5.3)$$

Ukupan broj eksperimenta jest:

$$N = 2^k + n_a + n_o = 2^k + 2k + n_o = 2^4 + 8 + 7 = 31 - \text{nije kompozitni} \quad (5.4)$$

5.3. MATRICA EKSPERIMENTA I POSTUPKA MODELIRANJA

U tablici 5.2 su prikazani geometrijski parametri radnog alata i kinematičke vrijednosti postupka obrade. Prvi dio tablice sadrži kodirane geometrijske i kinematičke vrijednosti. U drugom dijelu su dane eksperimentalne vrijednosti hrapavosti i amplituda, a sasvim desno, prezentirane su iste vrijednosti dobijene na osnovu postupka stohastičkog modeliranja.

Tablica 5.2. Matrica pokusa i postupka modeliranja

BROJ MJERENJA		PRIRODNE VARIJABLE				KODIRANE VARIJABLE					POKUSNE VRIJEDNOSTI		IZRAČUNATI REZULTATI PREMA MODELU	
		γ	χ_r	f	a_p	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	Amplituda, μm	Hrapavost R_z , μm	Jednadžba 8.6 $Y_j^R=Y_j^A$ ampl,	Jednadžba 6.2 $Y_j^R=Y_j^R$ hrap,
		°	°	mm po okretaju	mm									
1	PLAN PRVOG REDA 2 ^k	2	85	0,15	0,15	1	-1	-1	-1	-1	84	18	88,275	18,078
2		5	85	0,15	0,15	1	1	-1	-1	-1	317	48,72	321,255	48,799
3		2	88	0,15	0,15	1	-1	1	-1	-1	68	14,4	63,515	14,478
4		5	88	0,15	0,15	1	1	1	-1	-1	300	45	295,515	45,079
5		2	85	0,25	0,15	1	-1	-1	1	-1	104	22,1	99,515	22,178
6		5	85	0,25	0,15	1	1	-1	1	-1	335	51,4	330,515	51,479
7		2	88	0,25	0,15	1	-1	1	1	-1	88	18,4	92,275	18,478
8		5	88	0,25	0,15	1	1	1	1	-1	320	48,2	324,255	48,279
9		2	85	0,15	0,3	1	-1	-1	-1	1	108	23,9	112,265	23,977
10		5	85	0,15	0,3	1	1	-1	-1	1	347	54,3	351,245	54,377
11		2	88	0,15	0,3	1	-1	1	-1	1	123	24,98	118,505	25,057
12		5	88	0,15	0,3	1	1	1	-1	1	336	50,7	331,505	50,777
13		2	85	0,25	0,3	1	-1	-1	1	1	142	29,2	137,505	29,277
14		5	85	0,25	0,3	1	1	-1	1	1	356	51,5	351,505	51,578
15		2	88	0,25	0,3	1	-1	1	1	1	135	30,4	139,265	30,476
16		5	88	0,25	0,3	1	1	1	1	1	363	54,1	367,245	54,177
17	NULTE TOČKE PLANA $n_0 = 7$	3,5	86,5	0,225	0,262	1	0	0	0	0	220	36,85	220,26	36,659
18		3,5	86,5	0,225	0,262	1	0	0	0	0	216	36,2	220,26	36,659
19		3,5	86,5	0,225	0,262	1	0	0	0	0	224	37,5	220,26	36,659
20		3,5	86,5	0,225	0,262	1	0	0	0	0	223	37,3	220,26	36,659
21		3,5	86,5	0,225	0,262	1	0	0	0	0	217	36,35	220,26	36,659
22		3,5	86,5	0,225	0,262	1	0	0	0	0	226	37,85	220,26	36,659
23		3,5	86,5	0,225	0,262	1	0	0	0	0	214	35,8	220,26	36,659
24	SKUP TOČAKA NA SREDNJIM OSAMA $n_{\alpha}=2\alpha=8$	0,5	86,5	0,2	0,225	1	-2	0	0	0	79,3	16	74,80	22,75
25		6,5	86,5	0,2	0,225	1	2	0	0	0	512	79,4	448,00	64,47
26		3,5	83,5	0,2	0,225	1	0	-2	0	0	197,5	35	227,76	38,27
27		3,5	89,5	0,2	0,225	1	0	2	0	0	185,6	32	212,76	35,04
28		3,5	86,5	0,1	0,225	1	0	0	-2	0	129	23	200,26	33,49
29		3,5	86,5	0,3	0,225	1	0	0	2	0	198	31,1	240,26	39,82
30		3,5	86,5	0,2	0,075	1	0	0	0	-2	82	17	183,52	30,05
31		3,5	86,5	0,2	0,375	1	0	0	0	2	231	41,4	257,00	43,26

5.4. IZBOR POLAZNOG MATEMATIČKOG MODELA

U postupku modeliranja primijenjen je model drugog reda u obliku kvadratne forme:

$$\hat{Y} = b_0 X_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i,j=1}^4 b_{i,j} X_i X_j \quad (i,j=1,\dots,4) \quad (5.5)$$

Ili u vektorskom obliku:

$$\hat{Y} = b_0 X_0 + \overset{\rightarrow T}{b} \vec{X} + \overset{\rightarrow T}{X} \vec{B} \vec{X}$$

Matematički model, dat izrazom (5.5), definira se na temelju izvršenog broja pokusa $N = 2^k + n_o = 2^4 + 7 = 23$. Ponavljanje pokusa izvršeno je u centralnoj točki plana (pokusi $17 \div 23$).

gdje su:

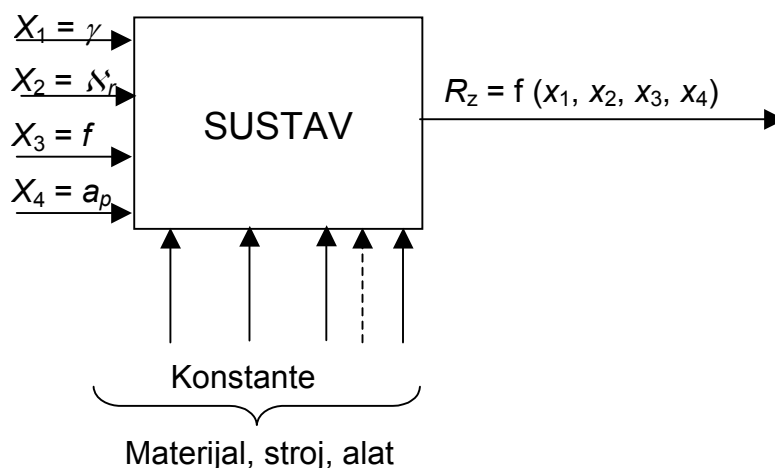
n_o	–	broj ponavljanja pokusa u centralnoj točki plana,
$N = 2^k + n_o$	–	ukupan broj pokusa,

6. MODELIRANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE OBRADKA

Modeliranje hrapavosti obrađene površine ima za cilj da se na osnovu izmjerenih veličina, matematičkom metodom, dođe do optimalnih (minimalnih) vrijednosti za hrapavosti obrađenih površina.

6.1. SHEMA MODELIRANJA HRAPAVOSTI POVRŠINE

Stohastičko modeliranje hrapavosti površine se izvodi na temelju dobivenih pokusnih rezultata za odgovarajuće neovisne varijable x_i (slika 6.1).



Slika 6.1. Shema modela hrapavosti površina

6.2. IZBOR NIVOVA PARAMETARA I KODIRANJA

U pokusnom dijelu istraživanja hrapavosti površina varirani su sljedeći parametri:

- kut prednje površine alata γ ,
- kut namještanja oštrice alata S_r ,
- posmak alata f , mm po okretaju,
- dubina obrade a_p , mm.

Fizikalne kodirane vrijednosti parametara varirane su u pet razina (tablica 5.1). Kodiranje parametara procesa izvedeno je na sljedeći način:

- srednji nivo fizikalne vrijednosti po jednađbi (5.1),
- područje granice fizikalnih vrijednosti po jednađbi (5.2),

- kodirana vrijednost po jednadžbi (5.3).

Ukupan broj pokusa hrapavosti jest:

$$N = 2^k + n_\alpha + n_o = 2^k + 2k + n_o = 2^4 + 8 + 7 = 31.$$

6.2.1. Matrica pokusa i postupka modeliranja

Za modeliranje hrapavosti površina koristi se tablica 5.2. U tablici su prikazani geometrijski parametri radnog alata i tehnološki parametri obrade. Prvi dio tablice sadrži kodirane geometrijske i tehnološke vrijednosti. U drugom dijelu se nalaze pokusne vrijednosti hrapavosti površina, a sasvim desno, su date vrijednosti hrapavosti dobijene na osnovu postupka stohastičkog modeliranja.

6.3. IZBOR POLAZNOG MATEMATIČKOG MODELA

Primijenjeni model drugog reda u postupku modeliranja hrapavosti površina dat je jednadžbom (5.5), a definira se na temelju izvršenog broja pokusa $N = 2^k + n_o = 2^4 + 7 = 23$. Ponavljanje pokusa izvršeno je u centralnoj točki plana (pokusi $17 \div 23$).

Ovdje su:

n_o – broj ponavljanja pokusa u centralnoj točki plana,
 $N = 2^k + n_o$ – ukupan broj pokusa,

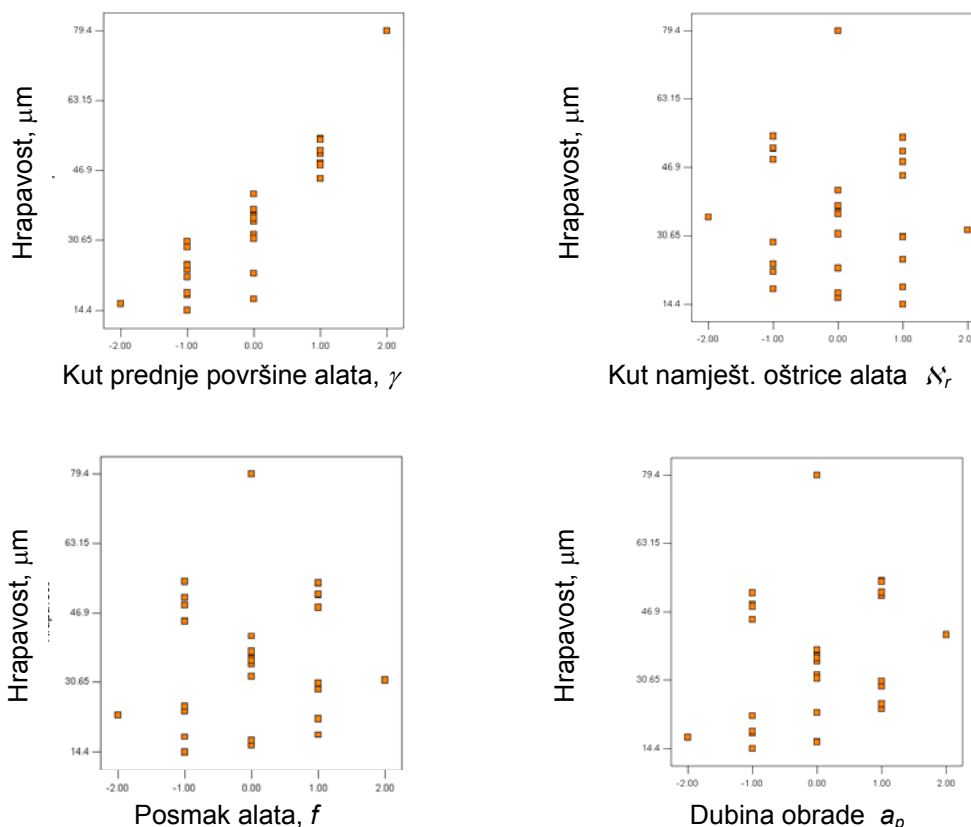
6.4. MATEMATIČKI MODEL HRAPAVOSTI DRUGOG REDA - ANALIZA POKUSNIH PODATAKA

U ovoj točki rada su prezentirani rezultati matematičkog modeliranja hrapavosti koji su dobijeni primjenom softwareskog alata Design-Expert.

Kao odgovarajući model za hrapavost predložen je model drugog reda (5.5), koji ima oblik:

$$Y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2. \quad (6.1)$$

Grafici utjecajnih, geometrijskih i tehnoloških parametara, prije provođenja analize, ukazuju na njihov značajan utjecaj na hrapavost. Dijagrami koji to prikazuju prikazani su na slici 6.2.



Slika 6.2 Utjecajni parametri na hrapavost površine

Analizom mjernih točaka može se donijeti preliminarni zaključak o utjecaju pojedinih geometrijskih i tehnoloških parametara. Tako je najutjecajniji kut prednje površine alata γ (0,900), dubina obrade a_p (0,262), posmak alata f (0,107) i na kraju kut namještanja oštrice alata R_r (-0,049).

Ispitivanje modela (u Design-Expert alatu) daje kao rezultat da model drugog reda značajno odgovara stvarnom, obzirom na dobijenu vrijednost Prob>f (Probability). Daljni testovi (Lack of Fit Test koji pokazuje odstupanje mjerenih od podataka dobijenih modelom, te R-Squared koji je mjera varijacije oko sredine objašnjene modelom) pokazuju dobre rezultate za izabrani model.

Alat nije sugerirao potrebu za transformiranjem podataka.

Vrijednost F-value od 67,78 implicira da je model značajan, odnosno adekvatan. Pri ovoj vrijednosti postoji samo 0.01% izgleda da se zbog šuma pojavi veće odstupanje u podacima. Vrijednosti Prob>F manje od 0.0500 indiciraju značajnost pojedinih članova modela. U ovom su slučaju A, C, D, A^2 , C^2 , D^2 značajni članovi modela.

Izračunate vrijednosti koeficijenata modela (6.1) za model hrapavosti dane su u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Podaci o koeficijentima modela hrapavosti

Faktor	Estimirani koeficijent	SS	Standardna Greška	95% CL Donji	95% CL Gornji	VIF
Konstanta- b_0	36,84	1	0,96	34,79	38,88	
A-gama- b_1	14,56	1	0,52	13,45	15,66	1,00
C-posmak- b_3	1,73	1	0,52	0,63	2,83	1,00
D-dubina- b_4	4,24	1	0,52	3,13	5,34	1,00
$A^2-b_1^2$	3,09	1	0,48	2,07	4,10	1,03
$C^2-b_3^2$	-2,08	1	0,48	-3,09	-1,07	1,03
$D^2-b_4^2$	-1,54	1	0,48	-2,55	-0,53	1,03

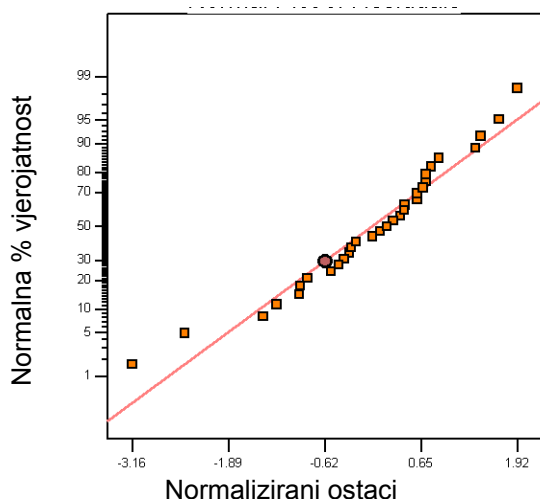
VIF koeficijent (Variance Inflation Factor) koji je u okolini vrijednosti 1 takođe ukazuje na valjanost izabranog modela.

Nakon ispitivanja signifikantnosti koeficijenata modela (6.1) dobiven je model oblika:

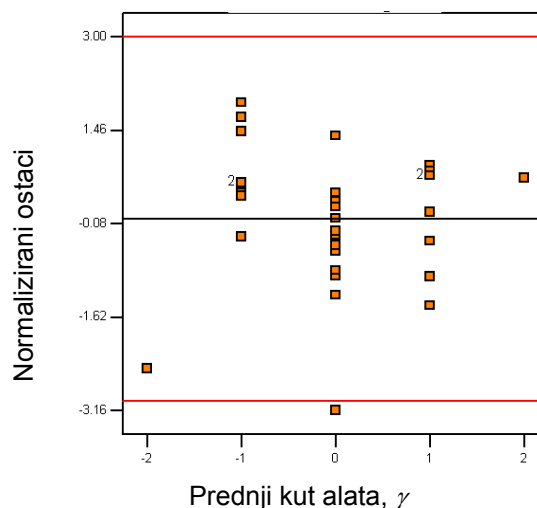
$$Y=R_Z=36,84+14,56x_1+1,73x_3+4,24x_4+3,09x_1^2-2,08x_3^2-1,54x_4^2 \quad 6.2$$

Grafičku prezentaciju modela hrapavosti pokusnih površina u zadanim granicama sa kombinacijama geometrijskih i tehnoloških parametara prikazuju slike od 6.3 do 6.13.

Raspodjela rezultata pokusnih mjerenja u odnosu na normalizirane ostatke (Studentized Residuals) gotovo da slijedi matematički pravac, što ukazuje na normalnu raspodjelu odstupanja mjerenja od usvojenog matematičkog modela.



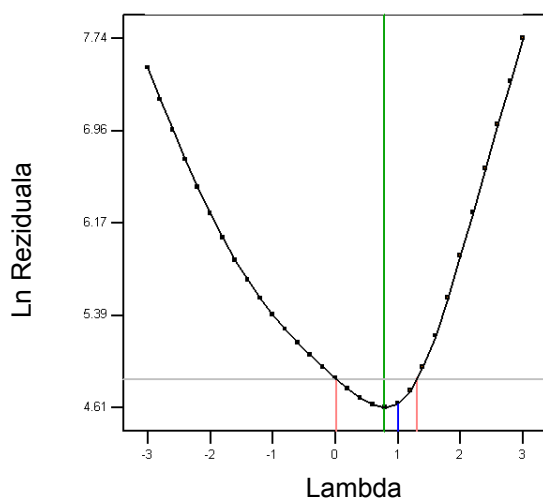
Slika 6.3. Normalni grafik ostataka



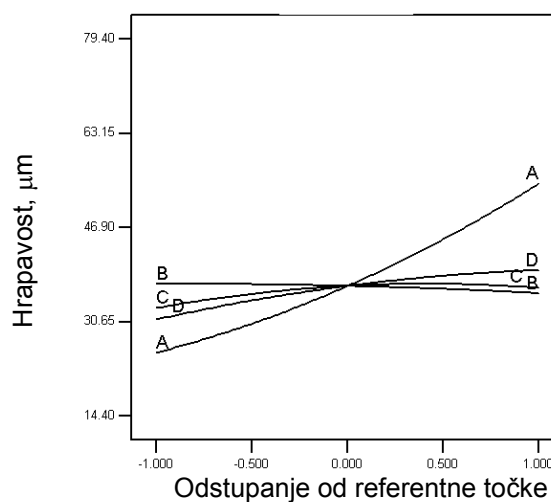
Slika 6.4. Residuali u funkciji prednjeg kuta alata, γ

Utjecaj prednjeg kuta alata γ na raspodjelu mjerenih podataka prikazuje slika 6.4.

Mjerene točke su grupirane u granicama od 3,00 do -3,16. Izvan navedenih granica odstupa mjerna točka broj 23.

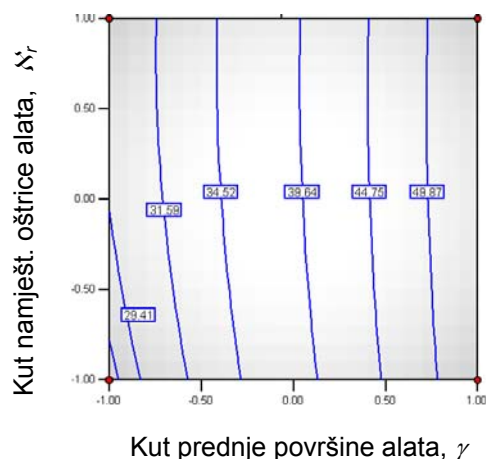


Slika 6.5. Box-Cox grafik provjere potrebe za transformacijom podataka

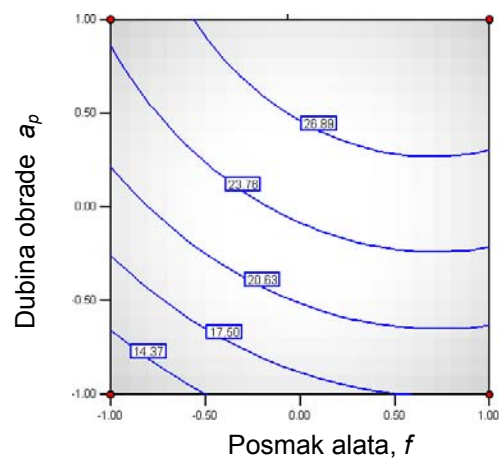


Slika 6.6. Perturbacija u okolini izabrane točke

Slika 6.7 prikazuje linije hrapavosti površina ovisno o kutu namještanja oštice alata λ_r (-1, 1) i kutu prednje površine alata, γ (-1, 1).



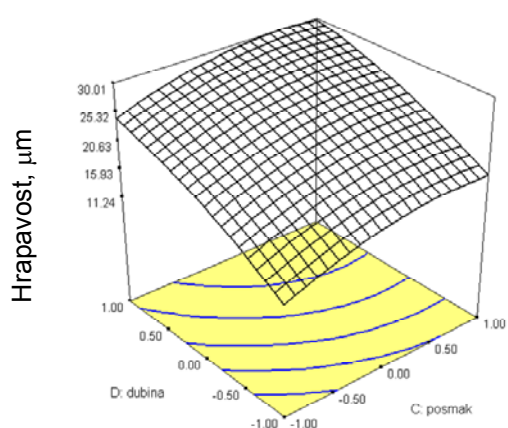
Kut prednje površine alata, γ
Slika 6.7. Hrapavost ovisna o
kutovima γ i λ_r



Posmak alata, f
Slika 6.8. Hrapavost ovisna o
posmaku f i dubini obrade a_p

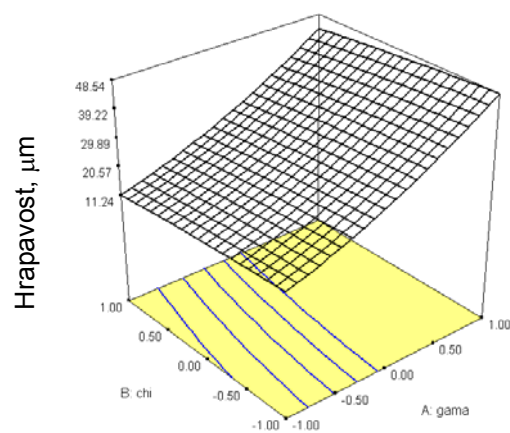
Slika 6.8 prikazuje linije hrapavosti površina ovisno o dubini obrade a_p (-1, 1) i posmaku alata f (-1, 1).

Slika 6.9 prikazuje ovisnost hrapavosti površina od dubine rezanja a_p (-1, 1) i posmaku alata f (-1, 1).



Dubina obrade a_p Posmak alata, f

Slika 6.9. Hrapavost ovisna o
posmaku f i dubini obrade a_p



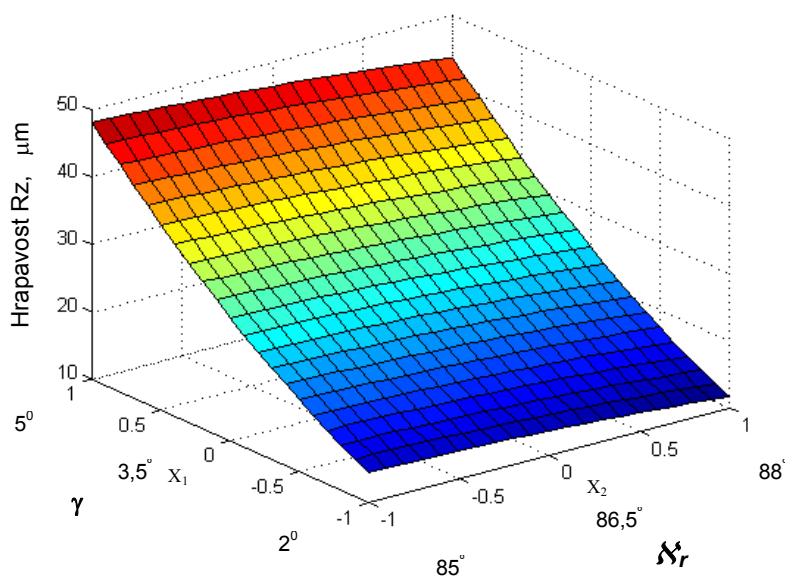
Kut namještanja oštice alata, λ_r Kut prednje površine alata, γ
Slika 6.10. Hrapavost u ovisnosti o
kutovima γ i λ_r

Slika 6.10 prostorni prikaz hrapavosti površina ovisno od kuta namještanja oštice alata λ_r i kuta prednje površine alata, γ .

6.5. OPTIMIZIRANJE HRAPAVOSTI POVRŠINE OBRADAKA

6.5.1. Optimalna hrapavost površine dobivena pokusom

Grafički prikaz optimalnih vrijednosti za X_1 i X_2 iz pokusom dobivenih podataka s prikazom minimuma hrapavosti, predstavlja slika 6.11.



Gdje su:

- X_1 , kodirane vrijednosti kuta prednje površine alata γ , a
- X_2 , kodirane vrijednosti kuta namještanja oštrice alata λ_r .
- X_3 , konstantna kodirana vrijednost posmaka, (dekodirana=0,15mm po okretaju)
- X_4 , konstantna kodirana vrijednost dubine obrade, (dekodirana=0,15mm)

Slika 6.11. Graf hrapavosti površine ovisan o geometrijskim i tehnološkim parametrima dobiven pokusom

gdje su:

- X_1 kodirane vrijednosti kuta prednje površine alata γ ,
- X_2 kodirane vrijednosti kuta namještanja oštrice alata λ_r ,
- X_3 konstantna kodirana vrijednost posmaka, (dekodirana=0,15mm po okr.),
- X_4 konst. kod. vrijednost dubine obrade (dekodirana=0,15mm).

6.5.2. Optimalna hrapavost površine Design-Expert alatom

Vrijednosti ograničenja geometrijskih i tehnoloških parametara predloženih programom (Design-Expert alat) prikazuju tablica 6.2.

Tablica 6.2. Izbor ograničenja

Naziv	Donja granica	Gornja granica
Kut prednje površine alata, γ	-1,0	1,0
Kut namještanja oštrice alata, λ_r	-1,0	1,0
Posmak alata, f	-1,0	1,0
Dubina obrade, a_p	-1,0	1,0

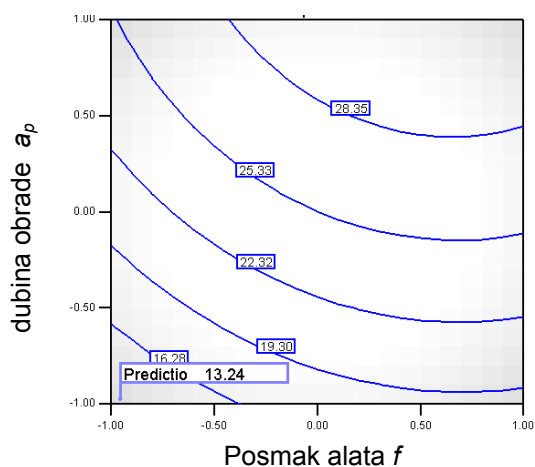
Nakon provedenih deset iteracija traženja optimuma hrapavosti, po navedenom programu, dobijena je tablica 6.3.

Tablica 6.3. Optimalna vrijednost hrapavosti

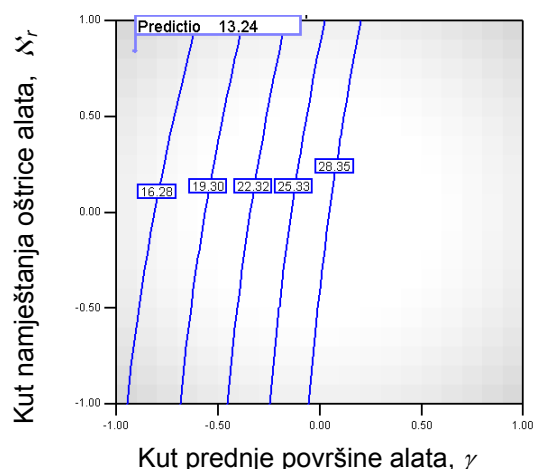
Broj	γ	λ_r	posmak	dubina	hrapavost	Desirability
1	-0,87	0,82	-0,92	-0,93	14,38	1,00
2	-1,0	0,99	-0,98	-0,69	14,25	1,00
3	-0,83	0,99	-0,81	-1,0	14,35	1,00
4	-0,91	0,84	-0,95	-0,97	13,24	1,00
5	-1,0	-0,77	-1,0	-1,0	14,97	0,991
6	-1,0	-0,22	-0,38	-1,0	17,51	0,952
7	-1,0	1,0	0,72	-1,0	17,55	0,951
8	-1,0	-0,34	0,92	-1,0	19,48	0,922
9	-0,74	-1,0	-1,0	1,0	26,69	0,811
10	-1,0	-1,0	1,0	0,53	27,33	0,801

Analizirajući vrijednosti iz tablice 6.3 uočava se optimalna hrapavost dobijena mjerenjem broj četiri (4), tablica 6.3. Geometrijski i tehnološki parametri tog mjerenja jesu: kut prednje površine alata $\gamma = -0,91$, kut namještanja oštrice alata $\lambda_r = 0,84$, posmak alata $f = -0,95$ i dubina obrade $a_p = -0,97$, pri čemu hrapavost iznosi $13,24 \mu\text{m}$.

Optimalne vrijednosti geometrijskih i tehnoloških parametara prikazuju slike 6.12 do 6.16. Slika 6.12 predstavlja traženje optimalne linije hrapavosti ovisno o dubini obrade a_p (-1, 1) i posmaku alata f (-1, 1).



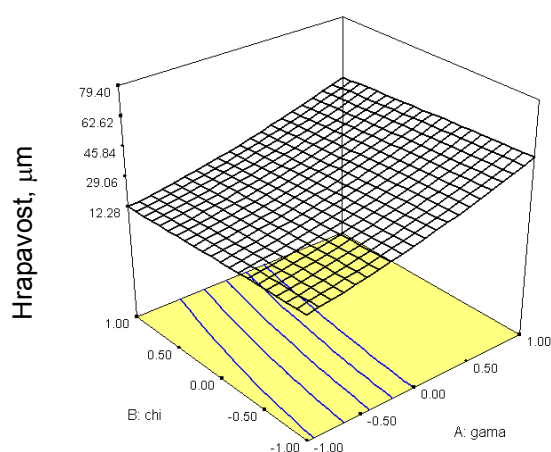
Slika 6.12. Dijagram hrapavosti ovisan od posmaka i dubne obrade



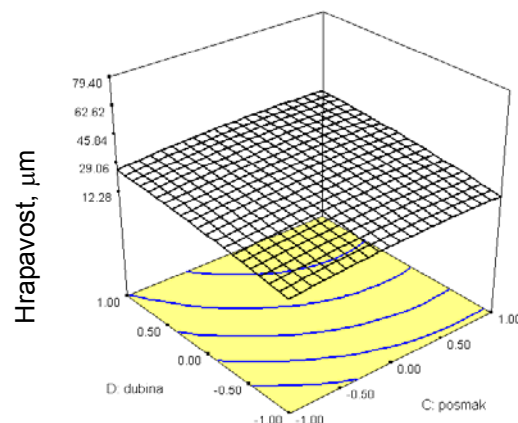
Slika 6.13. Dijagram hrapavosti ovisno o kutovima γ i λ_r

Slika 6.13 prikazuje položaj konstantnih linija hrapavosti površina ovisno od kuta namještanja oštice alata λ_r (-1, 1) i kut prednje površine alata γ .

Slika 6.14 prikazuje hrapavost površine u ovisnosti od kuta namještanja oštice alata λ_r (-1, 1) i kut prednje površine alata γ (-1, 1)



Kut namještanja oštice alata, λ_r
Kut prednje površine alata, γ
Slika 6.14. Dijagram hrapavosti ovisan o kutovima γ i λ_r

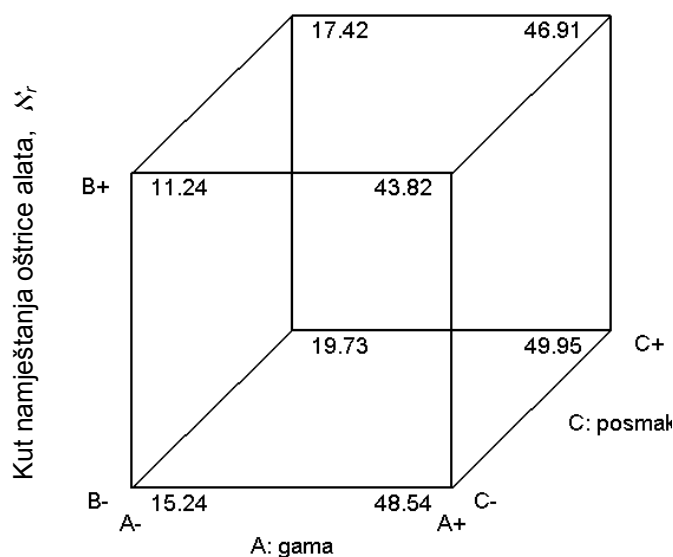


Dubina obrade a_p Posmak alata, f

Slika 6.15. Dijagram hrapavosti ovisan o posmaku i dubini obrade

Slika 6.15 je prikaz hrapavosti u ovisnosti od dubine obrade a_p (-1, 1) i posmaku alata, f (-1, 1)

Prostorni prikaz utjecaja, posmaka f , kut prednje površine alata γ i kuta namještanja oštice alata λ_r na hrapavost, odnosno optimalne vrijednosti geometrijskih i tehnoloških parametara, prikazuje slika 6.16.



Kut prednje površine alata, γ Posmak alata, f

Slika 6.16. Prostorni dijagram hrapavosti ovisan o posmaku i kutovima γ i λ_r

7. REZULTATI POKUSNIH ISTRAŽIVANJA AMPLITUDA SAMOUZBUDNIH VIBRACIJA

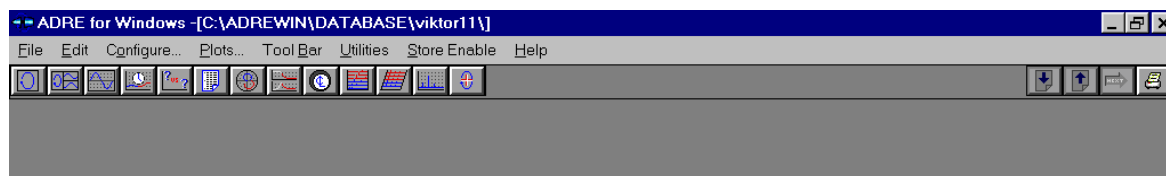
Rezultati su prezentirani na osnovu snimanja pokusom dobivenih amplituda vibracija. Snimljeni podaci su u obliku dijagrama. Korisnički program za akviziciju podataka je: Bently Nevada, Adre for Windows Version 3.1.

Prije početka pokusa obavljeno je mjerenje amplituda vibracija CNC tokarilice u stanju mirovanja (radi provjere stanja utjecaja vibracija okoline). Amplitude tog mjerenja su reda od 0 do 5 μm po ProxV. Podatak se vidi na dijagramu u prilogu 4, dijagram 4.1 i vremenu 14:31:45.

Podaci su analizirani sa sedam od trinaest ponuđenih oblika navedenog programa. Tih sedam, za samouzbudne vibracije odabranih programa iz spektra ponuđenih, omogućavaju jasan uvid u veličinu amplituda vibracija, ti odabrani oblici jesu:

- **Orbit plot, OTB, Timebase, Trend, Polar, Waterfall i Spectrum.**

Ili izgled na displeju:



Snimljeni materijal pokusa je pohranjen u 57 datoteka. Postoje probne i radne datoteke. Probne datoteke su izostavljene u radu, a služile su za centriranje obratka prije svakog pojedinačnog mjerenja, a radne datoteke su prikazane tablicama od 7.1 do 7.4. Prve dvije tablice se odnose na obratke $\varnothing 20$, a druge dvije na obratke $\varnothing 40$. Primjeri navedenih oblika dijagrama nalaze se u prilogu 3 rada (ukupno 37 stranica). Jedan primjer je urađen za obradak $\varnothing 20$, alat broj 2 i trenutak početka operacije u 18:21:03. Vrijeme je jedan od važnih faktora u analizi dobivenih dijagrama. Sve pojave su se dešavale u veoma malim vremenskim intervalima, a taj dio obrade podataka se bazirao na uočavanju, sortiranju i analizi pohranjenih mjerenja.

Tablica 7.1. Popis radnih postupaka, V-15

V-3 / V-5 / V-7 / V-9 / V-11 / V-13 / V-15 $\equiv \varnothing 20$

alat 1	alat 2	alat 3	alat 4
1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400

Tablica 7.2. Popis radnih postupaka, V-29

V-17 / V-19 / V-21 / V-23 / V-25 / V-27 / V-29 $\equiv \varnothing 20$

alat 5	alat 6	Alat 7	alat 8
1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400

Tablica 7.3. Popis radnih postupaka, V - 43

V-31 / V-33 / V-35 / V-37 / V-39 / V-41 / V-43 $\equiv \varnothing 40$

alat 1	alat 2	Alat 3	alat 4
1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400

Tablica 7.4. Popis radnih postupaka, V-57

V- 45 / V- 47 / V-49 / V-51 / V-53 / V-55 / V-57 $\equiv \varnothing 40$

alat 5	alat 6	alat 7	alat 8
1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400	1100/1200/1300/1400

Od približno 15000 dijagrama dobivenih tim pokusom, za analizu je uzeto oko 1500 karakterističnih dijagrama. Ta mjerenja su sistematizirana i prikazana tablicama, a jedan karakterističan broj dijagrama kao što su: mjerenje stanja mirovanja CNC tokarilice, mjerenja koja su dala male vibracije, mjerenja koja su dala velike vibracije, dati su u prilogu 4 (strane 4.1 do 4.8).

U tim mjerenjima obuhvaćena su mjerenja u vertikalnom (y) i horizontalnom (x) pravcu te vertikalni i horizontalni pomak nosača mjernih osjetila.

7.1. SISTEMATIZIRANJE REZULTATA MJERENJA AMPLITUDA SAMOUZBUDNIH VIBRACIJA OBRADAKA $\varnothing 20$ MM I $\varnothing 40$ MM

Provedena analiza pohranjenih rezultata mjerenja vršena je korak po korak. Ovdje korak po korak znači da je mjerenje svake datoteke odnosno operacije na obratku moralo se analizirati po vremenski zapisanim podacima. Tako na primjer, alat br.1 je vršio operaciju koja je trajala u razdoblju od 12 sekundi. To vremensko razdoblje zatim je, ovisno koje mjerenje je vršeno, bilo podijeljeno na segmente, točkasto ili pak kontinuirano mjerenje.

Sve ovako analizirane datoteke amplituda (od 1 do 57) obrađene su i prikazane tablicama 7.5 i 7.6 za obradke $\varnothing 20$, i tablicama 7.7 i 7.8 za obradke $\varnothing 40$. Podaci su radi lakšeg pregleda prikazani i dijagramski, slike 7.1 i 7.2, za $\varnothing 20$, (sa po dva dijagrama - dvije vrste amplituda, prvi sa vibracijskom brzinom mm po sekundi, a drugi sa vibracijskim pomakom μm) . Druga dva dijagrama, slike 7.3 i 7.4, su podaci za obradak $\varnothing 40$.

Osjetila označena u tablicama brojevima 1 i 2 su mjerila vibracijsku brzinu (mm po sekundi), a osjetila označena brojevima 3 i 4 vibracijski pomak (μm) (prilog broj 6, slike 4 i 6).

Tablica 7.5. Prosječne mjerene vrijednosti amplituda samouzbudnih vibracija, obradaka $\varnothing 20$

alat mjerenje	ALAT 1					ALAT 2					ALAT 3					ALAT 4				
Orbit, mm po sek	osj 1 4,2	osj 2 6,5				osj 1 4,7	osj 2 5,5				osj 1 5	osj 2 8				osj 1 4,6	osj 2 6,3			
OTB, mm po s, μm	1 5,7	2 8,2	1 3	2 6		1 8,2	2 11	1 4,5	2 5		1 5,7	2 7,7	1 3,2	2 6,5		1 5,6	2 7,6	1 5	2 6	
Timbase, mm po s, μm	1 4,7	2 8	V 57	H 50	vibn 13	1 4,0	2 4,5	V 27,5	H 24	vibn 10	1 4,2	2 7,2	V 55	H 48	vibn 16	1 4,6	2 6	V 46	H 42	vibn 13
Trend, mm po s, μm	1 4,3	2 7,3	V 167	H 99	vibn 31	1 5,9	2 6,7	V 84	H 66	vibn 26,8	1 5,3	2 7,8	V 123	H 102	vibn 36	1 5,5	2 8,2	V 129	H 101	vibn 33
Polar, mm po s, μm	1 1,1		V 21			1 1,2		V 20			1 1,1		V 20			1 1,1		V 20		
Waterfal, mm po s, μm	1 2,8	2 3,2	V 25,5	H 18,6	vibn 13	1 2,9	2 3,4	V 23	H 17	vibn 11,6	1 2,6	2 2,8	V 27	H 20	vibn 13	1 2,7	2 3	V 24	H 17	vibn 12
Spectrum, mm po s, μm	1 3,3	2 3,7	V 30	H 21,6	vibn 15	1 3	2 3,5	V 28	H 20	vibn 14	1 3,1	2 3,6	V 28	H 21	vibn 11	1 2,7	2 3	V 24,6	H 17,6	vibn 11,8

Tablica 7.6. Prosječne mjerene vrijednosti amplituda samouzbudnih vibracija, obradaka $\varnothing 20$

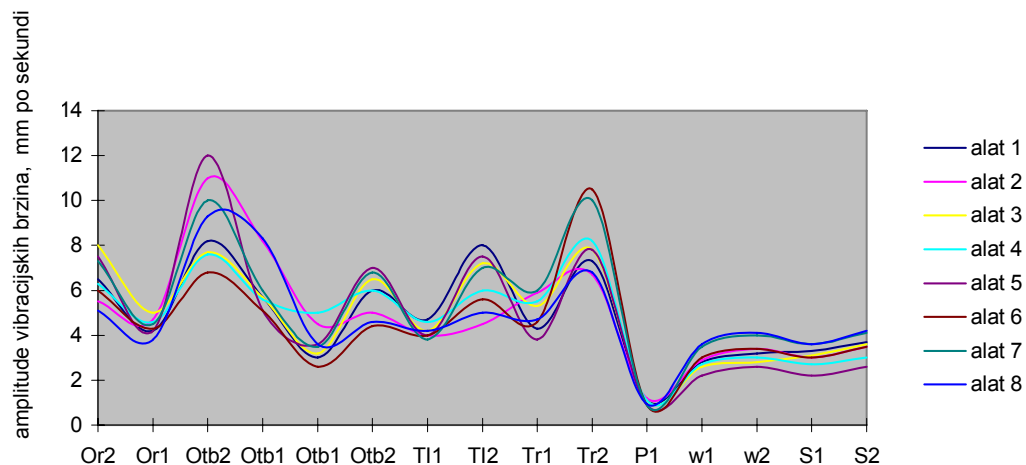
alat mjerenje	ALAT 5					ALAT 6					ALAT 7					ALAT 8				
Orbit, mm po sek.	osj 1 4,2	osj 2 7,5				osj 1 4,3	osj 2 6				osj 1 4,5	osj 2 7,3				osj 1 3,8	osj 2 5,1			
OTB, mm po s, μm	1 5,1	2 12	1 3,6	2 7		1 5,1	2 6,8	1 2,6	2 4,4		1 6	2 10	1 3,5	2 6,8		1 8,3	2 9,3	1 3,6	2 4,6	
Timbase, mm po s, μm	1 4	2 7,5	V 106	H 80	vibn 12,5	1 4	2 5,6	V 91	H 63	vibn 10	1 3,8	2 7	V 144	H 61	vibn 13	1 4,2	2 5	V 61	H 55	vibn 12
Trend, mm po s, μm	1 3,8	2 7,8	V 205	H 155	vibn 22,5	1 4,6	2 10,5	V 317	H 186	vibn 29	1 6	2 10	V 306	H 173	vibn 38	1 4,7	2 6,8	V 277	H 150	vibn 37
Polar, mm po s, μm	1 0,9		V 70			1 0,9		V 71			1 0,9		V 74			1 0,95		V 73		
Waterfall, mm po s, μm	1 2,2	2 2,6	V 24	H 17,6	vibn 9,6	1 3	2 3,4	V 27	H 22	vibn 14	1 3,5	2 4	V 32	H 24	vibn 16	1 3,6	2 4,1	V 32	H 26	vibn 17
Spectrum mm po s, μm	1 2,2	2 2,6	V 20,5	H 14,5	vibn 9,7	1 3	2 3,5	V 28	H 20	vibn 12,5	1 3,6	2 4,1	V 34	H 24	vibn 17	1 3,6	2 4,2	V 32	H 24	vibn 17

Tablica 7.7. Prosječne mjerene vrijednosti amplituda samouzbudnih vibracija, obradaka Ø40

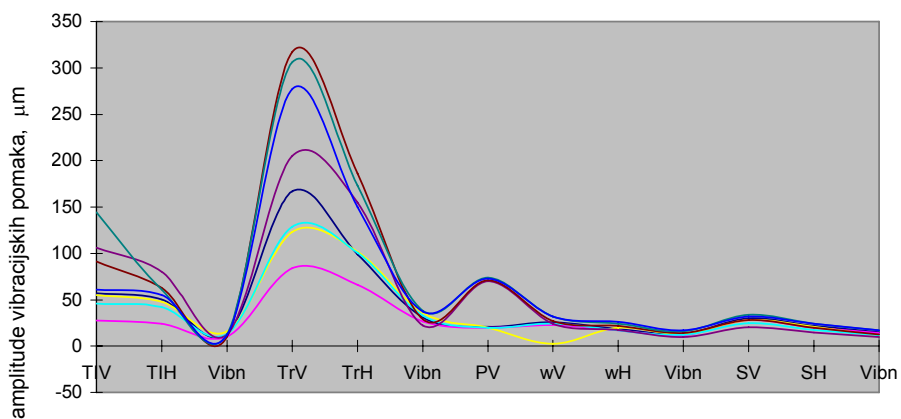
alat mjerjenje	ALAT 1					ALAT 2					ALAT 3					ALAT 4				
Orbit, mm po sek	1 3,5	2 4,5				1 3,5	2 4,3				1 3,6	2 4,5				1 4,8	2 5			
OTB, mm po s, µm	1 3,6	2 5,1	1 3,6	2 4,5		1 3,8	2 4,8	1 3,6	2 4		1 4,6	2 5,6	1 4	2 4,8		1 4,8	2 5,3	1 4,6	2 4,8	
Timbase, mm po s, µm	1 3	2 4,5	V 56	H 50	vib n 16	1 3,5	2 3,6	V 60	H 46	vib n 10	1 4	2 4,6	V 54	H 50	vib n 11	1 4,3	2 4,6	V 58	H 50	vibn 13
Trend, mm po s, µm	1 3,6	2 5,3	V 125	H 117	vib 30	1 3,6	2 4,7	V 120	H 106	vib 22	1 4,4	2 5,5	V 121	H 110	vib 28	1 4,1	2 5	V 122	H 109	vibn 25
Polar, mm po s, µm	1 1,6		V 23			1 1,1		V 23			1 1,1		V 23			1 1,2		V 23		
Waterfall, mm po s, µm	1 2,3	2 2,6	V 20	H 14	vib n 11	1 3,2	2 3,5	V 26	H 19,5	vib n 15,5	1 3,1	2 3,5	V 27	H 19	vib n 16	1 2,7	2 3,1	V 23,6	H 14,5	vibn 13,2
Spectrum mm po s, µm	1 2,3	2 2,6	V 20	H 13	vib n 11	1 3,8	2 4,3	V 34	H 25	vib n 20	1 3,3	2 3,6	V 31	H 21	vib n 16	1 2,8	2 3,1	V 24	H 18	vibn 13,6

Tablica 7.8 Prosječne mjerene vrijednosti amplituda samouzbudnih vibracija, obradaka Ø40

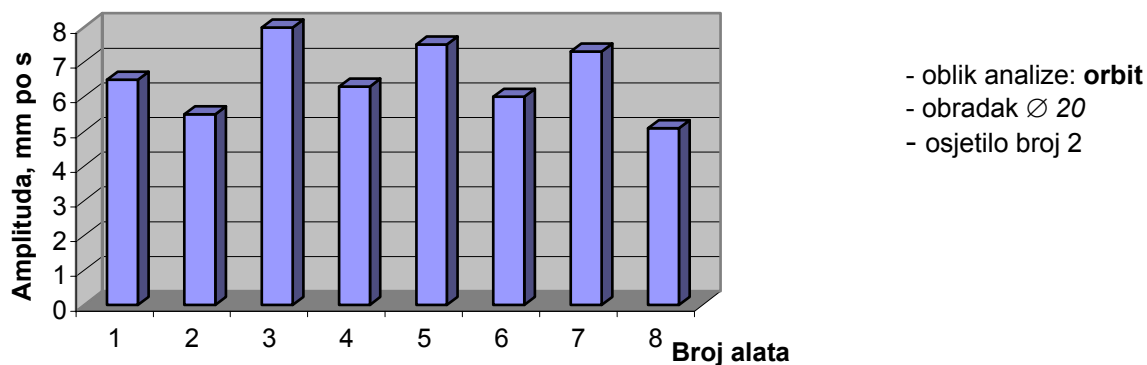
alat mjerjenje	ALAT 5					ALAT 6					ALAT 7					ALAT 8				
Orbit, mm po sek.	1 4	2 5,3				1 3,8	2 4,6				1 4,2	2 4,6				1 5	2 5,3			
OTB, mm po s, µm	1 3,8	2 6	1 3,8	2 5,3		1 4,1	2 5,6	1 3,6	2 4,6		1 4,5	2 5,3	1 4,2	2 4,3		1 5,1	2 6	1 4,6	2 5,3	
Timbase, mm po s, µm	1 5,6	2 5,3	V 53	H 45	vibn 12,3	1 3,6	2 4,8	V 61	H 60	vibn 11	1 4	2 4,5	V 47,5	H 46	vibn 12	1 4,5	2 4,9	V 50	H 46	vibn 12
Trend, mm po s, µm	1 3,6	2 5,4	V 110	H 101	vibn 23	1 3,8	2 5,3	V 110	H 102	vibn 24,3	1 4,2	2 5	V 108	H 100	vibn 25	1 3,3	2 4,5	V 70	H 62	vibn 24
Polar mm po s, µm	1 1,2		V 21			1 1,5		V 20			1 1,1		V 21			1 1,1		V 21		
Waterfall, mm po s, µm	1 2,1	2 4	V 16,6	H 12,5	vibn 9,8	1 3	2 3,3	V 26	H 19,2	vibn 14,6	1 3,1	2 3,5	V 28	H 21	vibn 16	1 2,2	2 2,5	V 18	H 14	vibn 11
Spectrum mm po s, µm	1 2,1	2 2,3	V 16,2	H 13,1	vibn 9,4	1 3,3	2 3,6	V 27	H 22	vibn 16	1 3,4	2 3,8	V 31	H 21	vibn 17	1 2,1	2 2,4	V 19	H 14	vibn 10



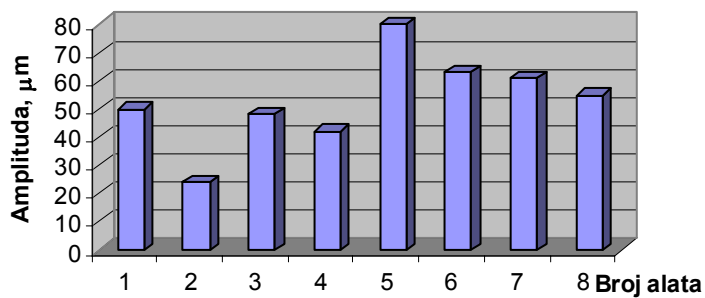
Slika 7.1. Vrijednosti vibracijskih brzina, **obradka Ø20**



Slika 7.2. Vrijednosti vibracijskih pomaka, **obradka Ø20**

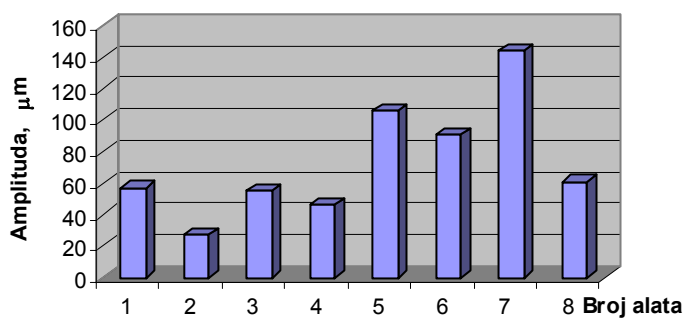


Slika 7.3. Dijagram vibracijskih brzina, obradka Ø 20 - oblika analize- **Orbit**



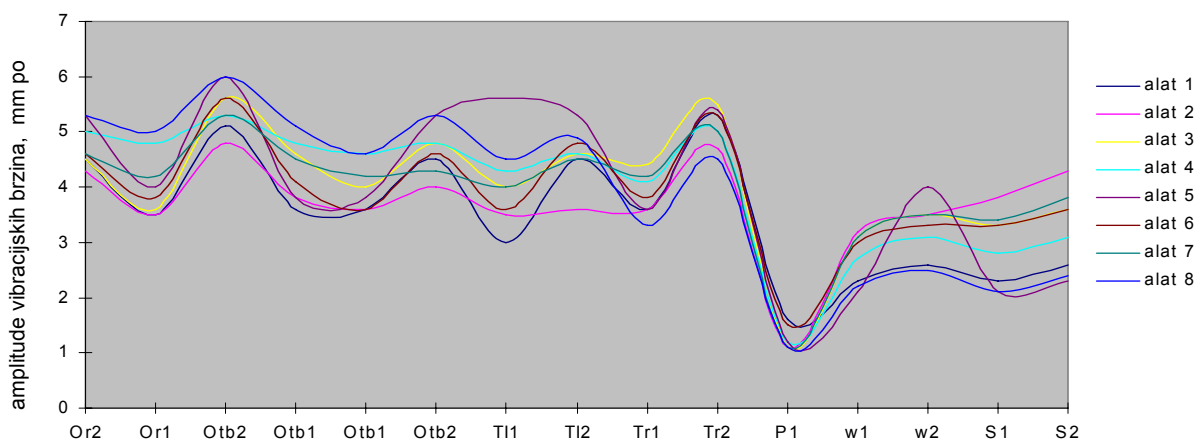
- Oblik analize: **Timbase**
- Obradak: $\varnothing 20$
- Vrstaosjetila: horizontalno(H), (prilog 6)

Slika 7.4. Dijagram horizontalnih (H) vibracijskih pomaka, obradka $\varnothing 20$ - oblik analize-**Timbase**

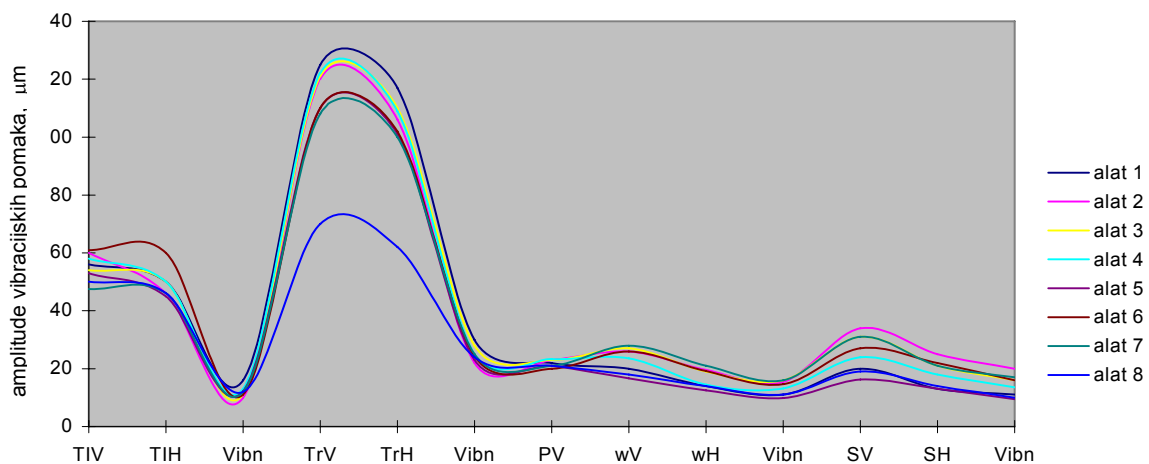


- Oblik analize: **Timbase**
- Obradak: $\varnothing 20$
- Vrstaosjetila: vertikalno(V), (prilog 6)

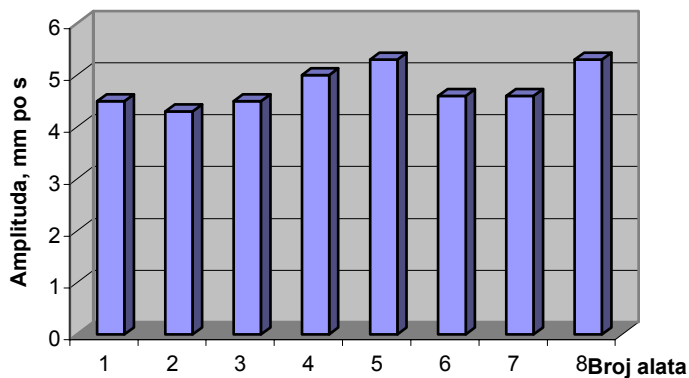
Slika 7.5. Dijagram vertikalnih (V) vibracijskih pomaka, obradka $\varnothing 20$ - oblik analize-**Timbase**



Slika 7.3. Vrijednosti brzinskih amplituda, obradka $\varnothing 40$

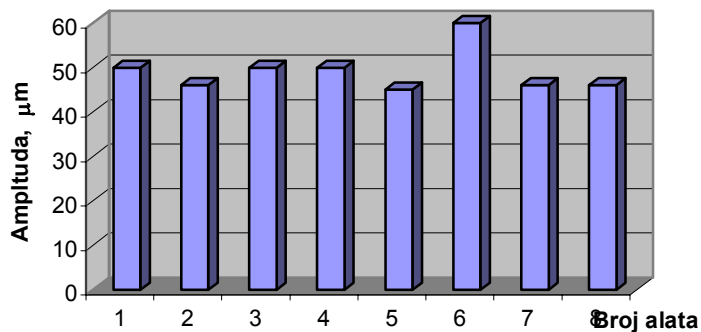


Slika 7.4. Vrijednosti dužinskih amplituda, obradka $\varnothing 40$



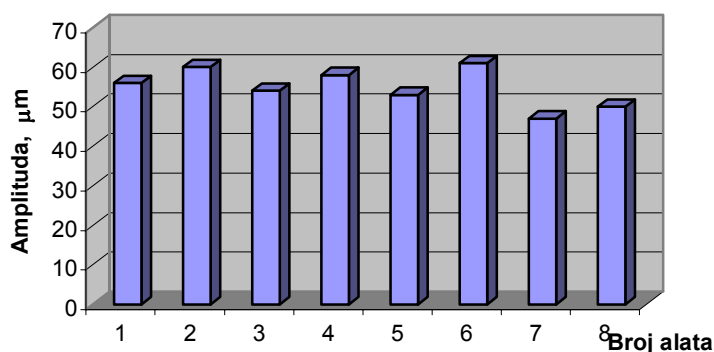
- Oblik analize: **orbit**
- Obradak $\varnothing 40$
- Osjetilo broj 2, (prilog 6)

Slika 7.5. Dijagram vibracijskih brzina, obradaka $\varnothing 40$ - oblik analize- **Orbit**



- oblik analize: **Timbase**
- obradak $\varnothing 40$
- osjetilo horizontalno (H), (prilog 6)

Slika 7.6. Dijagram horizontalnih (H) vibracijskih pomaka, obradaka $\varnothing 40$ - oblik analize- **Timbase**



- oblik analize: **Timbase**
- obradak $\varnothing 40$
- osjetilo vertikalno (V),
(prilog 6)

Slika 7.7. Dijagram vertikalnih (V) vibracijskih pomaka, obradaka $\varnothing 40$ - oblik analize-**Timbase**

7.2. ANALIZA REZULTATA MJERENJA AMPLITUDA VIBRACIJA OBRADAKA

Analizom rezultata u tablicama od 7.5 do 7.8, navedenih oblika analize: **Orbite, OTB, Timebase, Trenda, Polara, Waterfall i Spectrum** uočava se razlika ovisna o alatu u dobivenim mjerenim vrijednostima.

Analizi obrade obradaka $\varnothing 20$, po navedenom programu, prethodilo je formiranje osam tablica, za svaki alat po jedna tablica. Isti taj postupak slijedio je i za obratke $\varnothing 40$. Izračunavanjem aritmetičke sredine za navedena mjerenja urađene su već navedene tablice od 7.5 do 7.8.

Tablica 7.5 sadrži mjerne rezultate proizašle obradom alatima 1,2,3 i 4 obradaka $\varnothing 20$. Tablica 7.6 sadrži mjerene rezultate proizašle obradom alatima 5,6,7 i 8 obradaka $\varnothing 20$. Tablica 7.7, sadrži mjerene rezultate proizašle obradom alatima 1,2,3 i 4 obradaka $\varnothing 40$, a tablica 7.8 sadrži mjerene rezultate proizašle obradom alatima 5,6,7 i 8 obradaka $\varnothing 40$. Zajedničke oznake u svim tablicama su: 1,2,V,H i Vbn, a predstavljaju podatke s mjernih mjesta na obradnom centru (prikazano slikama od 4 do 6 u čestom dijelu priloga). Analiza podataka u tablicama daje slijedeći rezultat:

Analiza rezultata prikazanih u tablicama 7.5. i 7.6, dala je kao rezultat, da je alat broj 2 polučio, pri pokusu na obratku $\varnothing 20$, najmanje amplitude samouzbudnih vibracija.

Analiza rezultata prikazanih u tablicama 7.7. i 7.8, dala je kao rezultat, da je alat broj 2 polučio, pri eksperimentu na obratku $\varnothing 40$, takođe najmanje amplitude samouzbudnih vibracija.

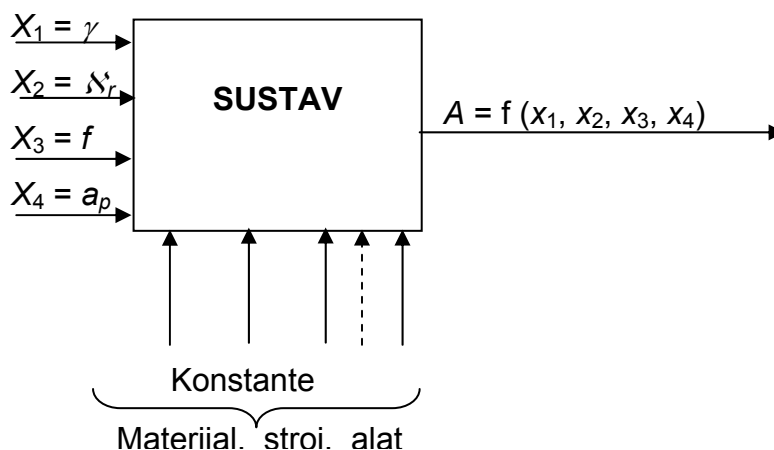
Nakon provedene analize vibracija vidi se da optimalne vrijednosti amplituda daje alat broj 2, sa svojim parametrima. To vrijedi za obradak $\varnothing 20$, te isto i za obradak $\varnothing 40$. Da bi se imala i vizuelna predodžba o tim vrijednostima priloženi su dijagrami-datoteke V-15, proba 1, proba 2, Prox V, Prox H i Prox vibnos u vremenu 15:36:54. Iz dijagrama se u usporedbi s ostalim, može uočiti razlika koja je navedena u predhodnoj analizi. Primjer tih mjerenja priložen je u obliku dijagrama u prilogu 5, gdje se jasno vidi razlika u amplitudama alata broj 2 u odnosu na ostale alate, u provedenim pokusima.

8. MODELIRANJE AMPLITUDE SAMOUBUDNIH VIBRACIJA

Modeliranje amplituda samouzbudnih vibracija ima za cilj da se na osnovu mjerenih veličina stohastičkom metodom dođe do optimalnih (minimalnih) vrijednosti za amplitude samouzbudnih vibracija.

8.1 SHEMA MODELIRANJA AMPLITUDA

Stohastičko modeliranje amplituda se izvodi na temelju pokusnih rezultata dobivenih za odgovarajuće neovisno promjenljive varijable x_i (slika 8.1). Postupak dobijanja matematičkog modela amplituda samouzbudnih vibracija prikazan je globalnim dijagramom na slici 5.2.



Slika 8.1. Shema modela amplituda

8.2. IZBOR NIVOVA PARAMETARA I KODIRANJA

U pokusnom dijelu istraživanja samouzbudnih vibracija varirani su parametri :

- kut prednje površine alata γ , °
- kut namještanja oštrice alata N_r , °
- posmak alata f , mm po okretu,
- dubina obrade a_p , mm.

Tablica 8.1. Tablica utjecajnih faktora

UTJECAJNI FAKTORI		KODIRANE VRIJEDNOSTI				
		X_{i5}	X_{i2}	X_{i3}	X_{i1}	X_{i4}
		-2	-1	0	+1	+2
PRIRODNE VRIJEDNOSTI	$x_1 \equiv \gamma$	0,5	2,0	3,5	5,0	6,5
	$x_2 \equiv N_r$	83,5	85	86,5	88	89,5
	$x_3 \equiv f$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
	$x_4 \equiv a_p$	0,075	0,15	0,225	0,30	0,375

Fizikalne kodirane vrijednosti parametara varirane su u pet razina (tablica 8.1).

Kodiranje parametara procesa izvedeno je kako slijedi:

Srednji nivo fizikalne vrijednosti:

$$x_{0i} = \frac{x_{i\max} + x_{i\min}}{2}, \quad (8.1)$$

Područje granice fizikalnih vrijednosti:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}, \quad (8.2)$$

Kodirana vrijednost:

$$X_i = \frac{x_i - x_{oi}}{\Delta x_i}. \quad (8.3)$$

Ukupan broj pokusa je:

$$N = 2^k + n_a + n_o = 2^k + 2k + n_o = 2^4 + 8 + 7 = 31 \quad (8.4)$$

8.2.1. Matrica eksperimenta i postupka modeliranja

U tablici 5.2, prikazane su geometrijske vrijednosti radnog alata i kinematičke vrijednosti postupka obrade. Prvi dio tablice sadrži kodirane geometrijske i kinematičke vrijednosti. U drugom dijelu nalaze se pokusom dobvene vrijednosti amplituda samouzbudnih vibracija, a sasvim desno, u drugom dijelu, su iste te vrijednosti dobivene na osnovu postupka stohastičkog modeliranja.

8.3. IZBOR POLAZNOG MATEMATIČKOG MODELA

U postupku modeliranja primijenjen je model drugog reda. Matematički model, u postupku modeliranja amplituda je jednadžba (5.5), a definira se na temelju izvršenog broja pokusa $N = 2^k + n_o = 2^4 + 7 = 23$. Ponavljanje pokusa izvršeno je u centralnoj točki plana (pokusi $17 \div 23$, tablica 5.2).

Izračunavanje koeficijenata modela (5.5) dobiveno je primjenom navedenog programa.

gdje su:

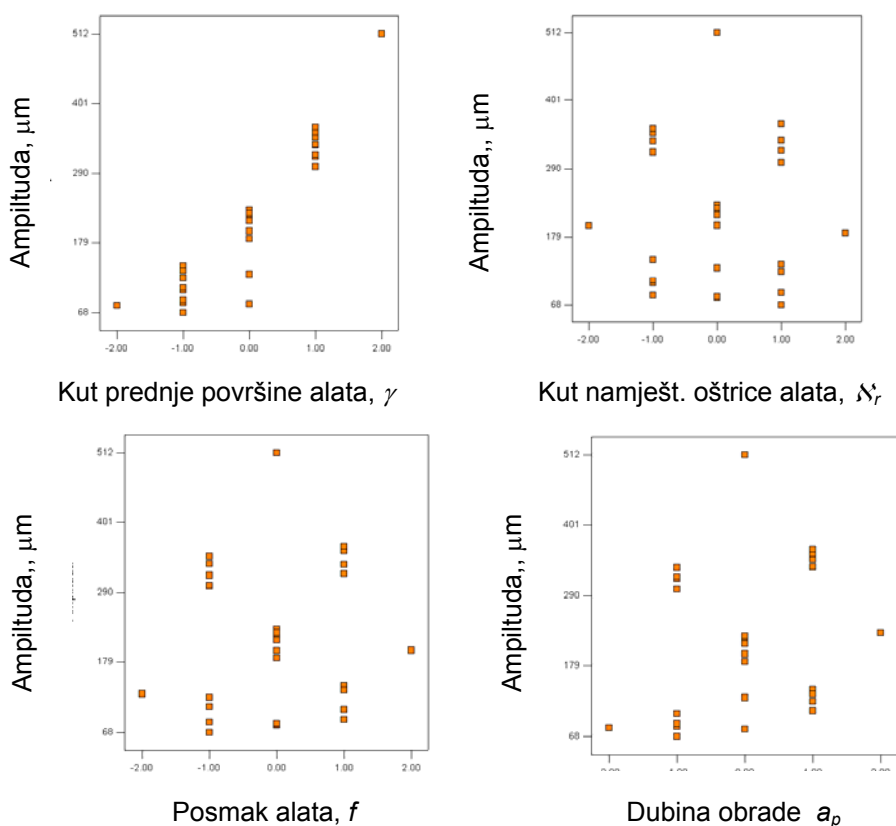
n_0 – broj ponavljanja pokusa u centralnoj točki plana,
 $N = 2^k + n_0$ – ukupan broj pokusa.

8.4. MATEMATIČKI MODEL AMPLITUDA

Matematički model amplituda drugog reda (5.5) ima oblik:

$$Y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2. \quad (8.5)$$

Grafici utjecajnih geometrijskih i tehnoloških parametara na amplitude prije provođenja analize, mogu ukazati na značajne utjecaje, slika 8.2.



Slika 8.2 Utjecajni parametri na amplitude

Analizom slike, može se donijeti zaključak o utjecaju pojedinih geometrijskih i tehnoloških parametara na obrađene površine. Tako je najutjecajniji kut prednje površine alata γ (0,928), dubina odvajanja čestica a_p (0,204), posmak alata f (0,103) i na kraju kut namještanja oštrice alata λ_r (-0,029).

Ispitivanje modela (u Design-Expert alatu) daje kao rezultat da model drugog reda amplituda, značajno odgovara stvarnom, obzirom na dobivenu vrijednost Prob>f (Brobability). Daljni testovi (Lack of Fit Test koji pokazuje odsupanje mjerenih od podataka dobijenih modelom, te R-Squared koji je

mjera varijacije oko sredine objašnjene modelom) pokazuju dobre rezultate za izabrani model.

Alat nije sugerirao potrebu za transformiranjem podataka amplituda.

Vrijednost F-value od 86,93 implicira da je model značajan, odnosno adekvatan. Pri ovoj vrijednosti postoji samo 0.01% izgleda da se zbog šuma pojavi veće odstupanje u podacima.

Vrijednosti Prob>F manje od 0.0500 indiciraju značajnost pojedinih članova modela. U ovom su slučaju A, C, D, A^2 , C^2 , D^2 značajni članovi modela amplituda.

Izračunate vrijednosti koeficijenata modela (8.5) za model amplituda iznose, tablica 8.2:

Tablica 8.2. Podaci o koeficijentima modela vibracija

Factor	Estimirani koeficijent	DF	Standard greška	95%CL donji	95% CL gornji	VIF
Konstanta	220,00	1	6,36	206,51	233,49	
A-gama	111,97	1	3,44	104,69	119,26	1,00
C-posmak	12,42	1	3,44	5,13	19,70	1,00
D-dubina	24,67	1	3,44	17,38	31,95	1,00
A^2	22,01	1	3,15	15,33	28,68	1,03
C^2	-11,03	1	3,15	-17,70	-4,36	1,03
D^2	-12,78	1	3,15	-19,45	-6,11	1,03

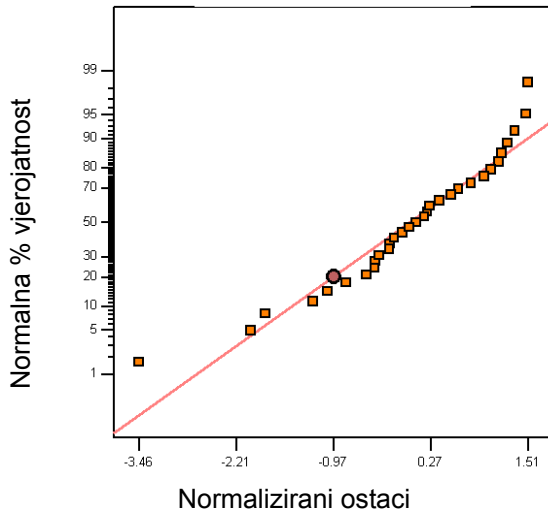
VIF koeficijent (Variance Inflation Factor) koji je u okolini vrijednosti 1 takođe ukazuje na valjanost izabranog modela.

Nakon ispitivanja signifikantnosti koeficijenata modela (8.5) dobiven je model u obliku:

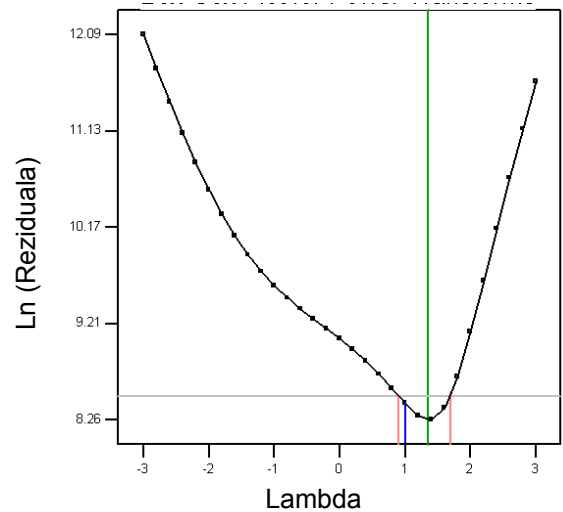
$$Y=A=220,0+119,99x_1+12,42x_3+24,67x_4+22,01x_1^2-11,03x_3^2-12,78x_4^2 \quad (8.6)$$

Grafičku prezentaciju modela amplituda u zadanim granicama sa kombiniranjima geometrijskih i tehnoloških parametara prikazuju slike od 8.3 do 8.14.

Raspodjela rezultata pokusnih mjerenja u odnosu na normalizirane ostatke (Studentized Residuals) gotovo da slijede matematički pravac, što ukazuje na normalnu raspodjelu odstupanja mjerenja od usvojenog matematičkog modela slika 8.3. Na slici 8.4. prikazana je potreba za transformacijom podataka, odnosno da to nije potrebno jer su podaci unutar graničnog područja (ograničeno crvenim linijama).

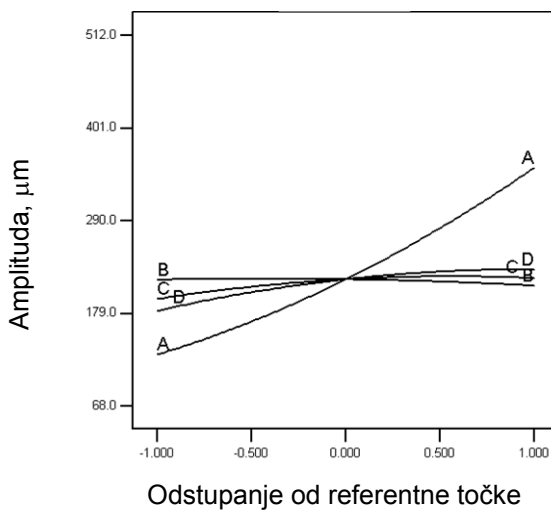


Slika 8.3 Normalni grafik ostataka

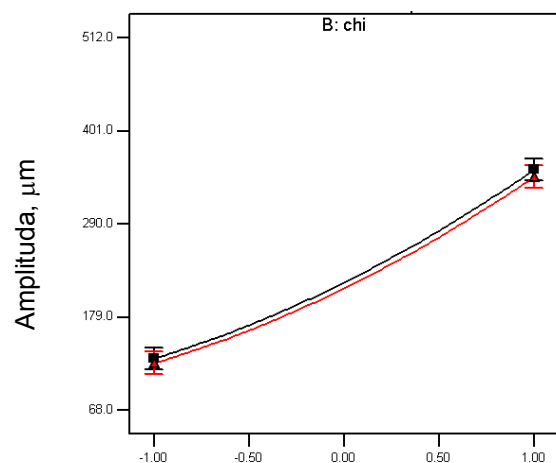


Slika 8.4. Box-Cox grafik provjere potrebe za transformacijom podataka

Slika 8.5. je prikaz utjecajnih parametara A, B, C i D , (najutjecajniji: A -kut prednje površine alata, γ). Na slici 8.6 prikazan je utjecaj kuteva γ i λ_r na amplitudu.



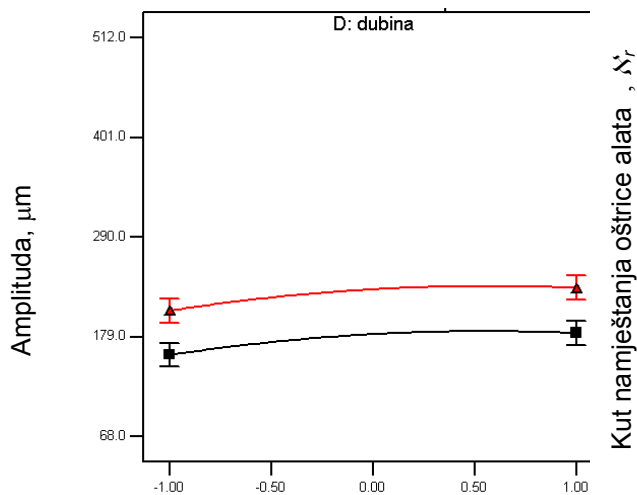
Slika 8.5. Perturbacija u okolini izabrane točke



Gore (crna linija): Kut namješt. oštrice alata, λ_r
Dolje (crvena linija): Kut prednje površine alata, γ

Slika 8.6. One Factor Plot- kut namješt. Oštrice alata λ_r , kut prednje površine alata, γ

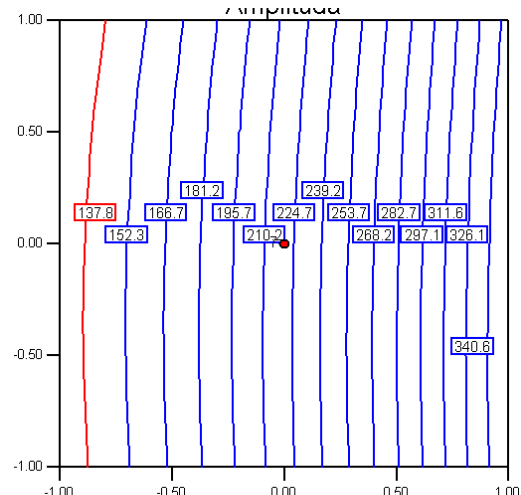
Na slici 8.7 prikazan je utjecaj tehnoloških parametara na amplitudu vibracija alata, a slika 8.8 promjenu amplitude vibracija ovisno o kutevima λ_r i γ . Slike 8.9 i 8.10 prikazuju utjecaj kuta namještanja oštrice alata λ_r i kuta prednje površine alata, γ te dubine obrade a_p i posmaka alata f na amplitudu.



Gore: Dub. obrade a_p Dolje: Pos. alata f

Par.: kut prednje površine alata, $\gamma = 0,00$,
kut namješt. oštrice alata, $\kappa_r = 0,00$

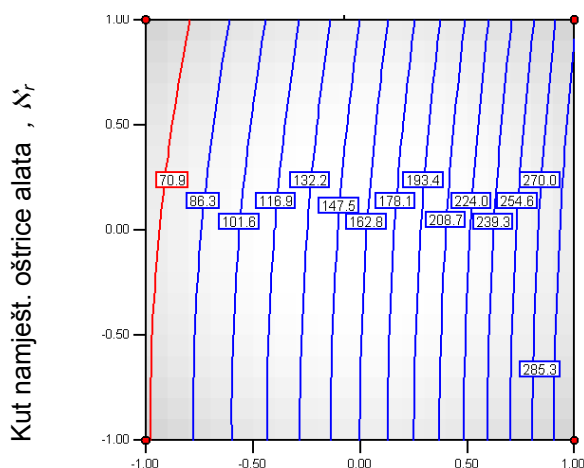
Slika 8.7. Promjena amplitude u ovisnosti od dubine obrade i posmaka



Kut prednje površine alata, γ

Parametri: posmak alata $f=0,00$,
dubina obrade $a_p=0,00$

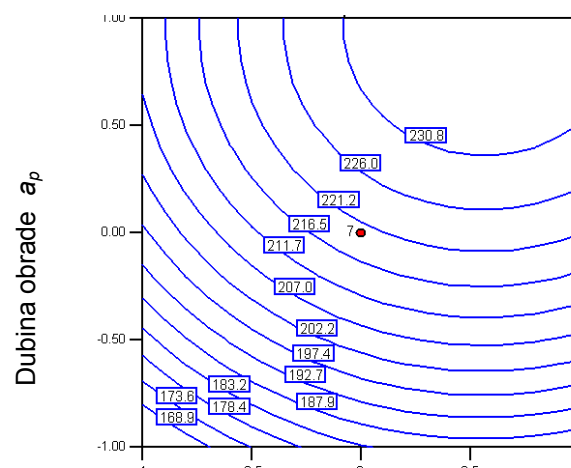
Slika 8.8. Amplituda ovisna od kutova γ i κ_r



Kut prednje površine alata, γ

Parametri: posmak alata $f=-1,00$,
dubina obrade $a_p=-1,00$

Slika 8.9. Amplituda ovisna od kutova γ i κ_r



Posmak alata f

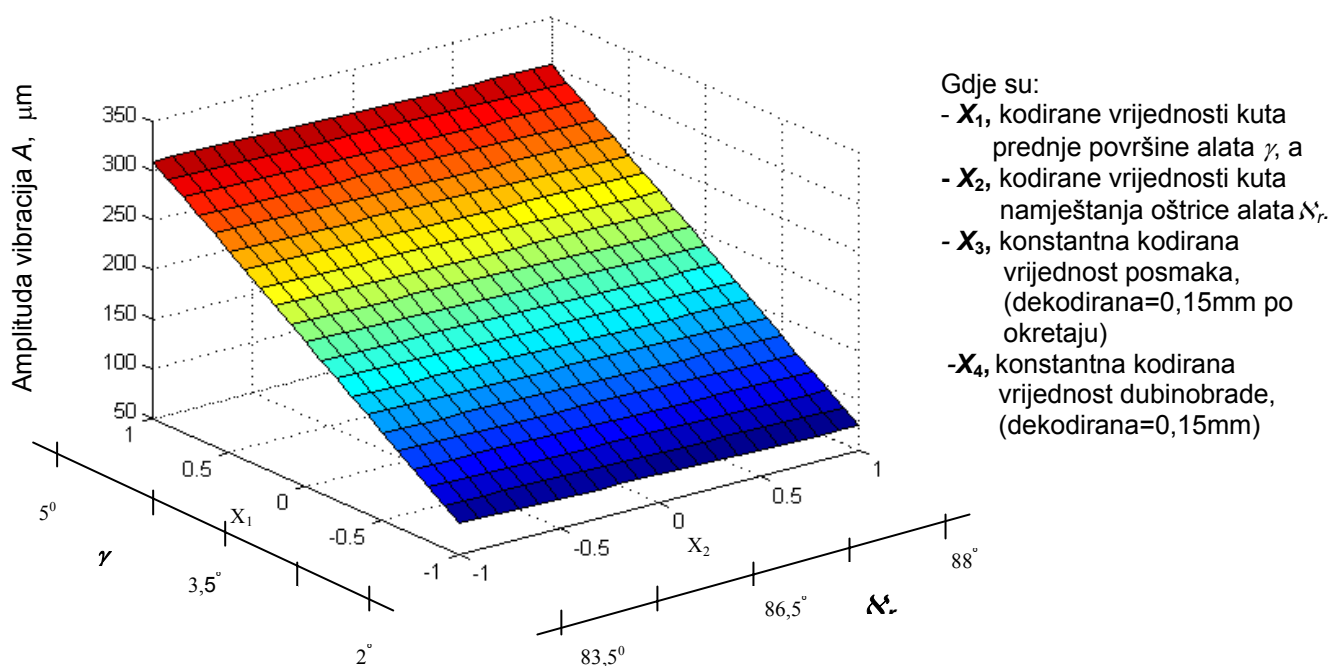
Parametri: kut prednje površine alata, $\gamma = 0,00$,
kut namješt. oštrice alata, $\kappa_r = 0,00$

Slika 8.10. Amplituda ovisna o dubini obrade i posmaku

8.5. OPTIMIZIRANJE AMPLITUDE SAMOUZBUDNIH VIBRACIJA

8.5.1. Grafički prikaz optimalne amplitude samouzbudnih vibracija pokusom dobivenih podataka

Grafički prikaz optimalnih vrijednosti amplituda dobijenih pokusom s prikazom minimuma, predstavljen je na slici 8.11. Optimalne vrijednosti obrade dobivaju se za vrijednosti geometrijskih i tehnoloških parametara koje ima alat broj dva u pokusima.



Slika 8.11. Graf amplituda samouzbudnih vibracija ovisno o geometrijskim i tehnološkim parametarima dobiven pokusom

8.5.2. Optimalna amplituda vibracija Design-Expert alatom

Vrijednosti ograničenja geometrijskih i tehnoloških parametara predloženih programom (Design-Expert alat) prikazuje tablica 8.3.

Tablica 8.3. Izbor ograničenja

Naziv	Donja granica	Gornja granica
Kut prednje površine alata, γ	-1,0	1,0
Kut namještanja oštrice alata, λ_r	-1,0	1,0
Posmak, f	-1,0	1,0
Dubina obrade, a_p	-1,0	1,0

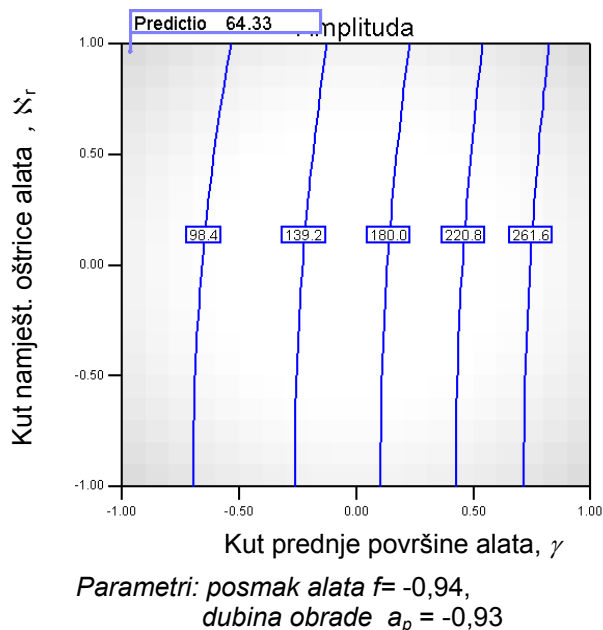
Nakon provedenih pet popokusa traženja optimuma amplitude vibracija, dobivena je tablica 8.4.

Tablica 8.4. Optimalna vrijednost amplitude vibracija

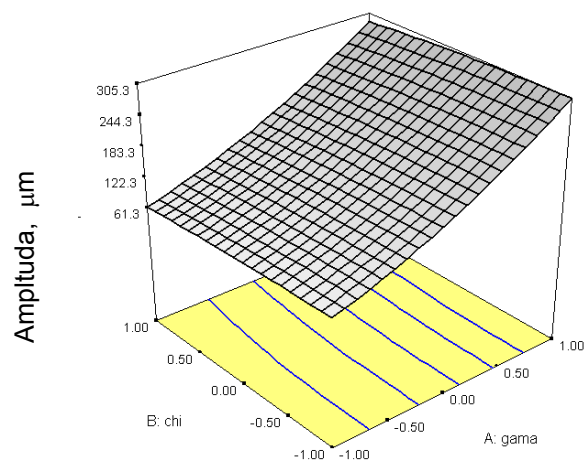
Broj	γ	λ_r	Posmak	Dubina	Amplituda	Desirability
1	-0,96	0,97	-0,94	-0,93	64,3	1,00
2	-1,0	-0,70	-1,0	-0,97	70,9	0,993
3	-1,0	-0,70	0,98	-1,0	95,6	0,938
4	-1,0	1,0	-1,00	-0,14	101,2	0,925
5	-1,0	1,00	1,00	0,08	127,6	0,866

Optimalna veličina amplitude vibracija je dobivena mjerenjem broj jedan (1), tablica 8.4. Tehnološki i geometrijski parametri tog mjerenja jesu: kut prednje površine alata $\gamma = -0,96$, kut namještanja oštrice alata $\lambda_r = 0,97$, posmak alata $f = -0,94$ i dubina obrade $a_p = -0,93$, Tako dobivene vibracije imaju amplitudu $64,3 \mu\text{m}$.

Slika 8.12 prikazuje utjecaj promjene geometrijskih parametara na amplitudu, a slika 8.13 prostorni prikaz utjecaja geometrijskih i tehnoloških parametara na amplitudu. Slika 8.14 je prostorni prikaz utjecaja tehnoloških parametara na amplitudu, a slika 8.15, promjenu amplitude ovisno od geometrijskih i tehnoloških parametara (γ , λ_r i f) obrade na tokarilici.

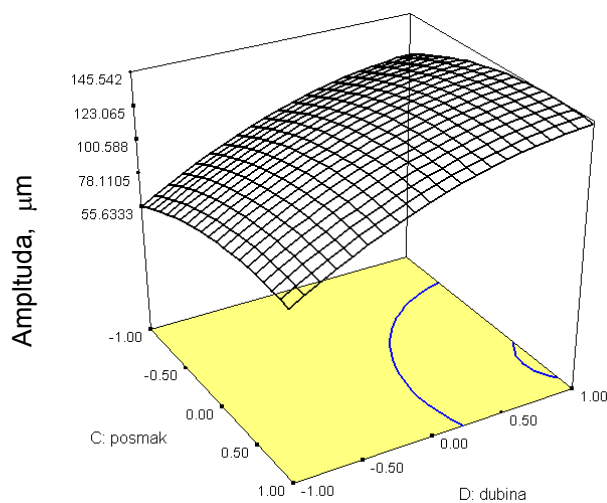


Slika 8.12. Dijagram amplituda vibracija ovisan o kutovima γ i κ



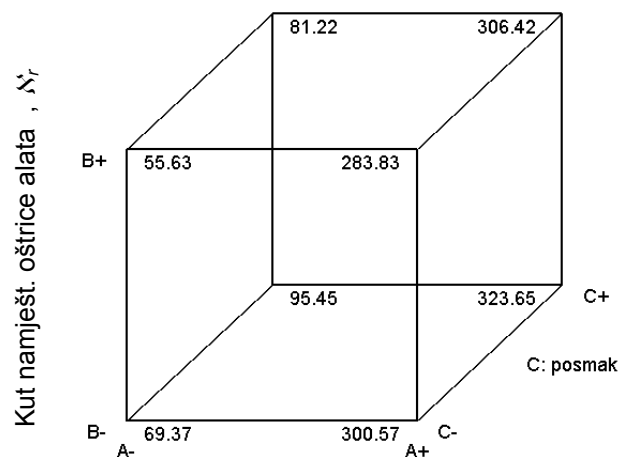
Kut nam. oštrice al., κ_r Kut pred. povr. alata, γ
parametri: posmak alata $f = -0,94$,
dubina obrade $a_p = -0,93$

Slika 8.13. Dijagram amplituda vibracija ovisan o kutovima γ i κ



Posmak alata, f Dubina odv. Čestica, a_p
Parametri: kut prednje površ. alata, $\gamma = -1,00$,
kut namješt. oštrice alata, $\kappa_r = 1,00$

Slika 8.14. Dijagram amplituda vibracija ovisan o posmaku i dubini obrade



Kut prednje površine alata, γ Posmak alata, f
Parametar: dubina obrade $a_p = -1,00$

Slika 8.15. Dijagram amplituda vibracija ovisan o kutovima γ i κ , posmaku i hrapavosti

9. OPTIMALNE VRIJEDNOSTI

Traženi optimumi hrapavosti i amplituda samouzbudnih vibracija dali su vrijednosti (po Design-Expert alat) tehnoloških i geometrijskih parametara.

Optimalne vrijednosti tehnoloških i geometrijskih parametara dobivenih navedenim programom, iznose: $\gamma = 2^0$, $\kappa_r = 85^0$, $f = 0,15\text{mm po okretaju}$ i $a_p = 0,15\text{mm}$.

Dobivene optimalne vrijednosti tehnoloških i geometrijskih parametara poklapaju se s vrijednostima koje su dobivene pokusom. Dekodiranje optimalnih vrijednosti tehnoloških i geometrijskih parametara po slikama 6.11 do 6.16 i 8.11 do 8.15 vrši se jednadžbama:

$$X_1 = \frac{\gamma - 3,5}{1,5}, \quad (9.1)$$

$$X_2 = \frac{\kappa_r - 86,5}{1,5}, \quad (9.2)$$

$$X_3 = \frac{f - 0,20}{0,05}, \quad (9.3)$$

$$X_4 = \frac{a_p - 0,225}{0,075}, \quad (9.4)$$

Razvijanjem jednadžbi 9.1 do 9.4 dobivaju se nepoznanice geometrijskih i tehnoloških parametara γ , κ_r , f i a_p .

Optimalna vrijednost kuta prednje površine alata γ (X_1) po jednadžbi 9.1, a sa slika od 6.11 do 6.16 i 8.11 do 8.15 je, $X_1 = -1$, pa jest:

$$\gamma = 1,5X_1 + 3,5 = 1,5(-1) + 3,5 = 2^0. \quad (9.5)$$

Optimalna vrijednost kuta namještanja oštrice alata κ_r (X_2) po jednadžbi 9.2 sa slika 6.11 do 6.16 i 8.11 do 8.15 je, $X_2 = 1$, pa jest:

$$\kappa_r = 1,5X_2 + 86,5 = 1,5(1) + 86,5 = 88^0. \quad (9.6)$$

Optimalna vrijednost posmaka f po jednadžbi 9.3 iznosi:

$$f = 0,05X_3 + 0,20 = 0,05(-1) + 0,2 = 0,15 \text{ mm po okretaju}. \quad (9.7)$$

Optimalne vrijednosti dubine obrade a_p po jednadžbi 9.4 iznosi:

$$a_p = 0,075X_4 + 0,225 = 0,075(-1) + 0,225 = 0,15 \text{ mm}. \quad (9.8)$$

10. VERIFIKACIJA POSTVLJENE HIPOTEZE

Postavljena hipoteza da je veličina amplitude vibracija u funkcionalnoj ovisnosti od geometrije, te da se minimiziranje funkcije, kojom se opisuje ovisnost amplitude o geometrijskim parametrima oštice alata i parametrima obrade, optimiraju upravo ti parametri oštice alata i tehnološki parametri obrade. Tehnološki parametri obrade i geometrije oštice alata, pri kojima amplituda vibracija imaju minimalne vrijednosti ($A_{\min}$), osiguravaju i minimalne vrijednosti parametara kvalitete obrade ($R_{z\min}$).

Ovisnost veličine amplitude vibracija i uvjeta obrade može se opisati jednačinom: $A=A(c, f, a_p, \alpha_r \text{ i } \gamma)$, a parametri hrapavosti R_z jednačinom: $R_z=R_z(c, f, a_p, \alpha_r \text{ i } \gamma)$.

Matematički model kojima su adekvatno opisani rezultati pokusa (dati u točkama 6 i 8), a odnosi se na mjerenje veličine (A) amplitude vibracija i (R_z) parametara hrapavosti glasi:

$$\hat{Y} = b_0 X_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{i,j=1}^4 b_{i,j} X_i X_j \quad (i,j=1,\dots,4)$$

Matematičkom obradom podataka dobivenih pokusom i utvrđivanje signifikantnosti koeficijenata dobiveni su modeli u obliku:

$$R_z = 36,84 + 14,56x_1 + 1,73x_3 + 4,24x_4 + 3,09x_1^2 - 2,08x_3^2 - 1,54x_4^2 \text{ i}$$

$$A = 220,0 + 119,99x_1 + 12,42x_3 + 24,67x_4 + 22,01x_1^2 - 11,03x_3^2 - 12,78x_4^2$$

Modeli s koeficijentima F-value od 86,93 i 67,78 kazuju da su obadva značajna, odnosno adekvatna.

Metodom "Design-Expert" izvršena je optimizacija promjenljivih parametara ($f, a_p, \alpha_r \text{ i } \gamma$).

Minimum funkcije A daje optimalne vrijednosti promjenljivih po kriteriju minimalne vrijednosti amplituda vibracija i to: $\alpha_r = 88^\circ$, $\gamma = 2^\circ$, $f = 0,15 \text{ mm}$ po okretaju i $a_p = 0,15 \text{ mm}$.

Minimum funkcije R_z daje optimalne vrijednosti promjenljivih po kriteriju (minimalne vrijednosti parametara kvalitete obrade $\equiv$ maksimalni kvalitet) i to: $\alpha_r = 88^\circ$, $\gamma = 2^\circ$, $f = 0,15 \text{ mm}$ po okretaju i $a_p = 0,15 \text{ mm}$.

Optimalni parametri obrade i optimalna geometrija oštice alata moraju se definirati putem jednačine amplituda vibracija uzimajući za kriterij da je $A = A_{\min}$.

11. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Analizom istraživanja i dobivenih rezultata, može se zaključiti slijedeće:

- Proces obrade metala odvajanjem čestica je složen, a ta se složenost očituje u prisustvu visokih temperatura i visokih specifičnih pritisaka u zoni odvajanja čestica. Poseban problem su popratne pojave kao što je trošenje alata koji neminovno dovodi do promjene oblika reznog klina, a time i do promjena uvjeta obrade. Tijekom procesa obrade mijenja se intenzitet otpora pri obradi odvajanjem čestica, a time i vibracije.
- Za sveobuhvatno istraživanje neophodno je poznavati stanje u zoni odvajanja čestica u tijeku procesa obrade. U tom cilju neophodno je imati određene osjetnike koji će davati dovoljno informacija o stanju u zoni odvajanja čestica. Složenost procesa odvajanja čestica, te želja za konkurentnosti na tržištu opravdavaju razvoj modela i načina pomoću kojih se mogu opisati cjelokupno stanje tijekom eksploatacije sa što manje aproksimacija.
- Korištenjem razvijene opreme za mjerenje vibracija, kad proces obrade odvajanjem čestica omogućava identifikaciju promjene u zoni obrade putem vibracija, osigurava podloge za prognozu otkaza tijekom eksploatacije te optimiziranje parametara obrade i geometrije reznog klina.
- Rezultati ispitivanja geometrije reznog klina su pokazali da parametri obrade i geometrije alata imaju visok utjecaj na amplitudu vibracija (A), kao i na kvalitet obrade (parametar R_z).
- Uzimanje kriterija optimalnosti ($A=A|_{\min}$) da amplituda vibracija bude minimalna došlo se do optimalnih vrijednosti parametara obrade (f – posmak i a_p – dubina odvajanja čestica),

$$f_{\text{opt}}=0,15 \text{ mm po okretaju}, a_{p \text{ opt}}=0,15 \text{ mm},$$

odnosno optimalne vrijednosti geometrije oštrice alata (α_r – kut namještanja oštrice alata, γ – kut prednje površine alata),

$$\alpha_{r \text{ opt}} = 88^\circ, \gamma_{\text{opt}} = 2^\circ.$$

Uzimajući kriterij optimiranja ($R_z=R_z|_{\min}$) da kvaliteta obrađene površine bude maksimalna došlo se do optimalnih vrijednosti parametara obrade (f i a_p),

$$f_{\text{opt}}=0,15 \text{ mm}, a_{p \text{ opt}}=0,15 \text{ mm po okretaju},$$

odnosno optimalne vrijednosti geometrije oštrice alata (α_r, γ),

$$\alpha_{r \text{ opt}} = 88^\circ, \gamma_{\text{opt}} = 2^\circ.$$

- Rezultati tih ispitivanja su primjenjivani u procesu obrade obradaka iz konstrukcijskih čelika Č.4730 i Č.1530. Na osnovu rezultata istraživanja

u ovom radu došlo je do povećanja postojanosti alata i povećanja kvalitete obrade.

- Optimizacija parametara obrade (f i a_p) i geometrije oštrice (λ_r i γ) mjerenjem amplitude vibriranja bila je bazirana na metodi višefaktorskog plana pokusa, koji u osnovi predstavlja metodu formiranja matematičkog modela na osnovu jednoznačnosti vrijednosti mjernog parametra. Mjerenje amplitude kao odabranog parametra vibracija se pokazalo kao svrsishodno, što potvrđuju dobiveni rezultati pri ispitivanju. Tehnika mjerenja je dosta jednostavna, a mjerenje traje vrlo kratko, tako da se u relativno kratkom razdoblju može učiniti veliki broj mjerenja.
- Rezultati koji su pokazani u točkama 4 i 7 upućuju na zaključke da postoje određene veze između rezultata obrade $|R_z|$ i amplitude vibracija $|A|$. To je posebno izraženo u rezultatima optimizacije (parametara obrade f , a_p i geometrije oštrice alata λ_r , γ), prema kriteriju $A=A|_{\min}$ i $R_z=R_z|_{\min}$. Vidljivo je da su $A=A(c, f, a_p, \lambda_r, \gamma)$ i $R_z=R_z(c, f, a_p, \lambda_r, \gamma)$ u ovisnosti o parametrima (f , a_p , λ_r i γ) te su morale biti izražene funkcijom drugog reda. Dobivene optimalne vrijednosti varijabli su podudarne.
- Može se konstatirati da su izvedena istraživanja, ispitivanja i pokusi ispunili postavljeni cilj. Optimizirana je obrada odvajanjem čestica Č.4730 i Č.1530 na CNC tokarilici TIP RE420, izborom obradne geometrije oštrice alata i parametara obrade te tako postignuta značajna poboljšanja pri izradi obradaka. Razvijena je metodologija mjerenja amplitude vibracija, a dobiveni rezultati mjerenja amplituda vibracija i izvedeni zaključci upućuju na potrebu daljnjih istraživanja i ispitivanja vibracija kao i istraživanja mogućnosti primjene metode u proizvodnim uvjetima.

12. PRAVCI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Spoznanje spoznaje da putem definiranja parametara vibracija (amplitude i frekvencije) omogućava definiranje: funkcionalnog kvaliteta alata, obradivosti i optimiranja cjelokupnog tehnološkog procesa, otvara mogućnosti za istraživanja.

Obzirom da je zahtjev za točnošću podataka i tehnološke banke podataka, povećan s povećanjem stupnja automatizacije sve će više biti izražena potreba za usavršavanjem brzih metoda za identifikaciju popratnih pojava u zoni odvajanja čestica.

Pri visokoučinskim procesima obrade odvajanjem čestica i pri visokobrzinskim obradama odvajanjem čestica utjecaj vibracija na izlazne parametre sve je veći, pa će potreba za identifikacijom vibracija i za vođenje procesa kako parametri vibracija nebi prelazili utvrđene vrijednosti biti sve veća.

U svakom slučaju radit će se na razvoju osjetnika (senzora) i instrumentacije koja bi mjerila veličine vibracija te automatski upravljala procesom obrade.

Signali koji se mogu izdvojiti (koji su ovisni) o vibracijama sigurno će se koristiti u sustavu za adaptivno vođenje robota i fleksibilnih proizvodnih linija.

Inventivnost istraživača i složenost samouzbudnih vibracija su izazov za istraživanja te kontinuirano praćenje znanosti i dostignuća u različitim oblastima strojogradnje.

LITERATURA

- [1] S. A. Tobias *"Schwingungen an werkzeugmaschinen",
Munchen 1961.*
- [2] V. Mečanin *"Tehnološki procesi automatske proizvodnje",
M. Jurković Svjetlost, Sarajevo, 1988.
V. Višekruna*
- [3] DŽ. Tufekčić *"Obrada rezanjem i alatne mašine",
S. Brdarević Tuzla, 1995.*
- [4] D.R. Cox *"Planning of Experiments", Birkbeck College,
University of London 1958.*
- [5] M. Jurković *"Matematičko modeliranje i optimizacija obradnih
procesa", Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet,
Rijeka 1999.*
- [6] DŽ. Tufekčić *"Fleksibilni proizvodni sistemi",
M. Jurković Mašinski fakultet u Tuzil, Tuzla, 1999.*
- [7] A. Voloder *"Određivanje praga stabilnosti pri pojavi
autooscilacija sa aplikacijom na alatne mašine",
Magistarski rad, Sarajevo, 1987.*
- [8] I. Karabegović *"Teorija mehanizama",
R. Halilagić Mašinski fakultet Bihać, Bihać, 1998.
DŽ. Gačo*
- [9] R.H. Myers, *"Response Surface Methodology: Process and
D.C.Montgomery Product Optimization Using Designed
Experiments", New York.*
- [10] R. Zdenković *"Atlas alatnih strojeva",
Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1991.*
- [11] N. G. Bondar *"Nelinearne stacionarne vibracije",
Kijev 1974.*
- [12] W.G. Cochran, *"Experimental Design",
G.M. Cox Wiley International Edition, New York, 1957.*
- [13] D.Vukelja, *"Uticaj mehaničkih i toplotnih opterećenja na
A.Mišković promjenu oblika reznog klina", Savjetovanje
proizvodnog mašinstva Jugoslavije,
Čačak, 1980.*

- [14] M. P. Koster *"Vibrations of CAM mechanisms",
New York, 1975.*
- [15] D. Vukelja *"Obrada metala rezanjem", Savjetovanje
proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Čačak, 1980.*
- [16] M. Stegić *"Teorija vibracija linearnih diskretnih matematičkih
sustava", Sveučilište u Zagrebu, FSB, zagreb
1996.*
- [17] L. Meirovitch *"Analytical methods in vibrations",
Virginia Polytechnic Institute, 1967.*
- [18] R. Starkermann *"Die harmonische linearisierung",
Baden, 1960.*
- [19] S. Bendat
G. Piersol *"Measurement and analysis random data",
New York, 1958.*
- [20] J. C. Snowdon *"Vibration and shock in damped mechanical
systems",
New York, 1965.*
- [21] A. D. Dimarogonas
S. Haddad *"Vibration for Engineers",
Washington University and Stanford University,
New Jersey, USA, 1992.*
- [22] M. Phelan *"Dynamics of machinery",
New York, 1963.*
- [23] E. Shigley *"Simulation of Mechanical System introduction",
New York, 1965.*
- [24] H. Goldner *"Leitfaden der Technischen Mechanik – statik,
Festigkeitlehre – Kinematik – Dynamik",
Darmstadt 1984.*
- [25] S. Ekinović *"Metode statističke analize u Microsoft Excel-u",
Univerzitet u Sarajevu, Mašinski fakultet u Zenici,
Zenica 1997.*
- [26] J. Pavlić *"Statistička teorija i primjena",
Panorama, Zagreb, 1965.*
- [27] S. Timoshenko *"Vibration problems in engineering",
New York, 1966.*
- [28] R. Vierck *"Vibration Analysis",
New York, 1979.*

- [29] R. Singiresu *"Mechanical vibrations", Addison – Wesley 1995.*
- [30] Sachtitel *"Mechanical vibration and shock", Geneve, 1990.*
- [31] W. K. Wilson *"Practical solution of torsional vibration problems", London, 1987.*
- [32] Š. Šavar *"Obrada metala odvajanjem čestica", Svezak 1, Školska knjiga, Zagreb, 1990.*
- [33] V. H. Herr *"Schwingungen und Wellen", Haan – Gruiten 1994.*
- [34] V. Doleček
A. Voloder *"Stabilnost sustava alatne mašine na pojavu samouzbudnih oscilacija", Zbornik radova br. 1, Sarajevo, 1986/87.*
- [35] V. Doleček
A. Voloder *"Dinamička stabilnost alatne mašine pri pojavi autooscilacija", BIAM 88, Zagreb.*
- [36] V. Doleček
A. Voloder *"Jedan način određivanja granice stabilnosti alatnih stroj pri pojavi autooscilacija", JDM, V. Banja, 1988.*
- [37] S. Dolinšek
M. Soković *"Influence of TiN (PVD) coating on the tool on the identification parameters in turning", Materials Processing Technology, 1998.*
- [38] M. Soković
M. Bahor *"On the inter – relationships of some machinability parameters in finish machining with cermet TiN (PVD) coated tools", Materials Processing Technology, 1998.*
- [39] J. Kopač
M. Soković *"Dimensional accuracy and cost optimisation in the finish machining of cold formed parts", Material Procesing Technology, 1999.*
- [40] M. Tomašević
Wang Man–Yuan *"Prilog proučavanju dinamike obradnog sustava na primjeru obimnog glodanja", TEHNIKA, Mašinstvo br. 6, 1984.*
- [41] R. Zdenković *"Obrada skidanjem strugotine", Zagreb, 1996.*
- [42] Bently Nevada *"Machinery Diagnostics reference manuel", Bently Nevada CO. USA, Minden, USA, 1994.*
- [43] I. Majstrovic *"Održavanje prema stanju rotacijskih strojeva*

- primjenom mjerenja i analize vibracijskog stanja i ponašanja strojeva",
Turbomehanika, Kutina, Hrvatska, 1998.*
- [44] J. Petrić
S. Zlobec *"Nelinearno programiranje",
Naučna knjiga, Beograd, 1983.*
- [45] M. S. Bazaraa
H. D. Sherali
C. M. Shetty *"Nonlinear programming", New York, 1993.*
- [46] F. Ditenberger
K. Kolesnikov *"Vibracii v tehniki", Moskva, 1980.*
- [47] D. Bajić *"Doprinos poboljšanju obradivosti kod
kratkohodnog honovanja", Doktorska disertacija,
Zagreb, 2000.*
- [48] U. Naterwalla *"Chatter-Free Milling And Optimized Material
Removal Rates: Analysis Of Chatter In Milling",
"Chatter-Free Milling And Optimized Material
Removal Rates: Chatter Theory Fundamentals"
and "Chatter-Free Milling And Optimized Material
Removal Rates: Guidelines For Eliminating
Chatter",
Ingersoll Cutting Tool Co. (Internet-2000 god.).*
- [49] J. R. Pratt: *"Vibration Control for Chatter Suppression with
Aplication to Boring Bars",
dr. disertacija sa Virginia Polytechnic Institute and
State University, 1997 god*
- [50] J. Kopač
M. Soković
M.Bohar *"Optimizacija parametara završne obrade za
postizanje željene hrapavosti površine obradka
predhodno oblikovanih na hladno",
Časopis "Mašinstvo", Zenica 2000. god.*
- [51] V. Doleček
A. Voloder *"Prilog proučavanju prostornog problema
samouzbudnih oscilacija alatnih strojeva",
Zbornik radova, br.1, Sarajevo, 1988.*
- [52] R.G.Landers,
A.G.Ulsoy *"Chatter analysis of machining systems with
nonlinear force processes",ASME 1996, DSC
vol.58.pp.183-190*
- [53] B. Novaković,
D. Majetić,
M. Široki *"Umjetne neuronske mreže", Fakultet strojarstva i
brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu,Zagreb,1998.*

- [54] Z. Haračić, *"Optimizacija obrade struganjem legure nimonic-C.263", Magistarski rad, Mostar, 1988.*
- [55] A. Mišković, *"Contribution to study of Tribologic Processes on Cutting Tools", 3. Savjetovanje proizvodnoga strojarstva, Zagreb, 1995.*
- [56] N. Šakić, *"Neki aspekti planiranja jednostavnih pokusa za usporedbu uzoraka", Zavarivanje 25 (1982)3, str. 195-199.*
- [57] S. Ekinović *"Obrada rezanjem", Zenica, 2001.god*
- [58] J. Kevelj, *"Optimizacija konstrukcije, parametara alata za proces provlačenja", Doktorska disertacija, Mostar, 2001.god.*
- [59] J. Petrić
S. Zlobec, *"Nelinearno programiranje", Naučna knjiga, Beograd, 1983.god.*
- [60] Y. Altintas, *"Manufacturing Automation : Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design", Cambridge University Press, April, 2000.*
- [61] D. Whitehouse, *"Surfaces and Their Measurements", Taylor & Francis Group, March, 2002.*
- [62] A. Guran,
F. Pfeiffer,
K. Popp *"Dynamics with friction: Modeling, analysis and experiment" (Part II), Institute for Structronics, Canada, Technical University of Munich, Germany and University of Hannover, Germany, Applied Mechanics Reviews, Nov 2002.*
- [63] Z. Zhusubaliyev,
E. Mosekilde, *"Bifurcations and chaos in piecewise-smooth dynamical systems", Kursk State Technical University, Russia and The Technical University of Denmark, Mathematical Reviews, 376pp Pub. date: Jun 2003.*
- [64] A. P. Seyranian,
A. A. Mailybaev *" Multiparameter stability theory wit mechanical applications ", Moscow State Lomonosov University, Russia, 420pp Pub. date: Jan 2004*

KRATKA BIOGRAFIJA

Kandidat mr Viktor Baričak rođen je 6.8.1948. godine u Bukinju, Bosna i Hercegovina. Osnovnu i srednju školu završio je 1963. i 1967. godine u Bukinju i Tuzli. Diplomirao je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu 1980. godine s diplomskim radom: "Projekt diesel motora" kod prof. dr. Dušana Jerasa. Posdiplomski studij je završio, takođe, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na smijeru "Teorija konstrukcija". Magistarsku radnju je radio kod prof. dr. Dražena Bjelovučića na temu: "Kinematička i dinamička analiza uobičajenih izvedaba sistema za upravljanje gusjeničnim vozilima".

Tijekom studija je 1970. godine, posredstvom međunarodne studentske organizacije IAESTE, proveo 45 dana stručne prakse u Čehoslovačkoj u fabrici "Autobrzdi" u Prešovu. Tu je upoznao tehnologiju izrade autokočnica, a aktivno je učestvovao u procesu proizvodnje. Takođe je kao student 1973. godine boravio u Njemačkoj u tvornici "Claas" na proizvodnji dijelova za kombajne. Aktivno govori Ruski jezik. Pasivno poznaje, ali se dobro služi engleskim i njemačkim jezikom. Radio je od 1975. godine do sada u "Livnici čelika" Tuzla, "Đuro Đaković" Slavonski Brod, "Jugoturbina" Karlovac, "TTU" Tuzla, "Dita" Tuzla i to na poslovima konstruiranja i održavanja.

Od školske 1995/96. godine angažiran je i izabran na Fakultetu elektrotehnike i mašinstva u Tuzli u zvanje višeg asistenta na predmetu "Dinamika i vibracije". Školske 1997-98 i 1998-99. godine, uz navedeno, predavao je i držao vježbe iz predmeta "Dinamika mašina". Školske 2002/03. predavao je i "Statiku". Sada je angažiran u Tvornici transportnih uređaja kao Glavni projektant.

SHORT BIOGRAPHY

I was born in Bukinje, BIH in 1948. I finished elementary school in Bukinje in 1963 and secondary school in Tuzla in 1967. I graduated at the "Faculty of naval and machine architecture" in Zagreb in 1980. The theme of the graduate dissertation was: "Project of the Diesel Engine" and my mentor was prof.dr. Dušan Jeras. Post-graduated studies I finished on the department of "Theory of the constructions". Magistracy work I done at prof.dr. Dražen Bjelovučić on the theme: Kinematic and Dynamic analyse of usually embroiders of systems for operating with caterpillar vehicles.

As a student I spent 45 days of expert practice in Chehoslovakia in the "Autobrzdy" factory in Prešov, and that was under organization of student association IASTE. There I introduced the proces of producing of the car brakes, and also I actively take part in the proces of producing. Also as a student I spent two and a half months in the German factory "Claas" on the producing of the construction parts for the combains.

I am fluent in Russian language. I have a passive knowledge of English and German language, but I am able to take good usage of those languages. I have worked in many companyes, becouse my main goal was to introduce as much as possible of the problems of work of the machines.

Since the school year 1995/96 I have been working at the Faculty om electrical and mechanical engineering in Tuzla as a Senio Assistant at the subject "Dynamics and vibrations". Now he is employeed at Eactory of Continuons Transport Equipment in Tuzla as General Constructor for Mechanical Engineering.