

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

OPTIMIZACIJA PROCESA TOKARENJA

Rijeka, rujan 2016.

Tomislav Bazina

0035177436

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

OPTIMIZACIJA PROCESA TOKARENJA

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Zoran Jurković

Rijeka, rujan 2016.

Tomislav Bazina

0035177436

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI RADA

Ja, Tomislav Bazina, pod punom materijalnom, kaznenom i moralnom odgovornošću, izjavljujem da sam jedini autor završnog rada pod naslovom „Optimizacija procesa tokarenja“, te da u navedenom radu nisu, bez pravilnog referenciranja, korišteni dijelovi tuđih radova.

Tomislav Bazina

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Zoranu Jurkoviću na svoj pruženoj pomoći, korisnim savjetima, te preporučenoj literaturi pri izradi ovog rada. Isto tako zahvaljujem asist. Gracieli Šterpin na odvojenom vremenu, te poduzeću Hidraulika Kutina d.d. na omogućenom korištenju proizvodnih kapaciteta i ostalih resursa. Također, zahvaljujem obitelji na pruženoj podršci i Virni, bez koje ovaj rad ne bi bio moguć.

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	MODELI PROCESA TOKARENJA.....	3
2.1.	Opis procesa uzdužnog tokarenja	3
2.2.	Funkcija cilja jediničnog vremena izrade	5
2.2.1.	Vremena vezana za manipulaciju obratkom i alatom	6
2.2.2.	Glavno strojno vrijeme.....	7
2.2.3.	Model postojanosti alata.....	8
2.3.	Funkcija cilja jediničnog troška izrade	10
2.3.1.	Trošak obrade vezan za glavno strojno vrijeme.....	11
2.3.2.	Trošak vezan za skidanje i stezanje obratka i namještanje alata	11
2.3.3.	Trošak radi zamjene alata.....	12
2.3.4.	Trošak vezan za cijenu alata.....	12
2.3.5.	Konačan izgled funkcije cilja	12
2.4.	Funkcija cilja koja zadovoljava kriterij produktivnosti i ekonomičnosti	12
3.	OGRANIČENJA I GRANICE MATEMATIČKOG MODELA	14
3.1.	Granice modela pri gruboj obradi	14
3.2.	Granice modela pri finoj obradi	16
3.3.	Ograničenja pri gruboj i finoj obradi	18
3.4.	Ograničenja zbog dozvoljene sile i snage stroja.....	19
4.	IZRADA OPTIMIZACIJSKOG PROGRAMSKOG RJEŠENJA	21
4.1.	Globalna optimizacija Basin-hopping algoritmom.....	21
4.2.	Lokalna optimizacija SQP metodom	22
4.3.	Grafičko korisničko sučelje programskog rješenja	23
5.	VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA	30
5.1.	Verifikacija pomoću literature	30
5.2.	Verifikacija konkretnim slučajem u praksi	35
5.2.1.	Određivanje jednadžbe postojanosti alata	36

5.2.2.	Mjerenje vremena potrebnih za optimizaciju	43
5.2.3.	Optimizacija procesa tokarenja za konkretni slučaj	45
5.2.4.	Izrada i kontrola uzorka pomoću dobivenih parametara obrade	52
6.	ZAKLJUČAK	59
7.	LITERATURA	60
8.	POPIS OZNAKA I KRATICA	65
9.	SAŽETAK	68
10.	PRILOZI	69
10.1.	Dodatak A: Svojstva materijala prema DIN / ISO 513 i VDI 3323 Standardu [30] ...	69
10.2.	Dodatak B: Granice parametara obrade proizvođača alata [30]	69

1. UVOD

Optimizaciji procesa proizvodnje se u današnje vrijeme posvećuje velika važnost. Težnja je na što većoj iskoristivosti proizvodnih kapaciteta, radne snage, alata, te uloženog materijala i energije kako bi se postigla što veća iskoristivost proizvodnog sustava i učinkovitost ukupnog poslovnog sustava koji ostvaruje optimalne rezultate. Većina proizvodnih procesa ne iskorištavaju svoj maksimalni potencijal, stoga postoji veliko područje primjene za matematičke i numeričke metode kojima se njihova ukupna iskoristivost može znatno povećati.

Cilj ovog rada je predstaviti metodu optimizacije procesa tokarenja u više prolaza. Optimizacija se može vršiti po kriteriju minimalnog vremena izrade (tzv. kriterij produktivnosti), kriteriju minimalnog troška izrade (tzv. kriterij ekonomičnosti), kriteriju maksimalnog profita i težinskom kombinacijom nekoliko različitih kriterija. Radom su obuhvaćena prva dva kriterija, te su izrađena dva modela optimizacije procesa tokarenja sa dvije različite funkcije cilja i zajedničkim funkcijama ograničenja i granicama modela.

Optimizacija procesa tokarenja je bila tema mnogih prethodnih istraživanja. Prvotni problem, kojim su se bavili, bio je optimizacija procesa tokarenja u jednom prolazu [1, 2, 3]. Nakon toga je istražen kompleksniji model optimizacije procesa tokarenja u više prolaza [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Upotrebljene su mnoge metode i različiti algoritmi pri određivanju optimalnih parametara obrade poput geometrijskog programiranja [11, 12, 13], dinamičkog programiranja [7], cjelobrojnog programiranja [14], sekvencijalnog kvadratnog programiranja [15], Taguchi metode [16], simuliranog žarenja [17, 18], genetskog algoritma [19, 8, 20] i algoritma kolonije mrava [21]. Također, rješavanju problema se pristupilo raznim kombinacijama prethodno navedenih metoda, poput kombinacije genetskog algoritma i sekvencijalnog kvadratnog programiranja [9], te višekriterijskim optimizacijama pomoću genetskog algoritma [22].

U ovom radu obrađen je pristup optimizaciji problema pomoću Basin-Hopping (BH) algoritma i metode sekvencijalnog kvadratnog programiranja (SQP). BH algoritam za globalnu optimizaciju je korišten pri pretraživanju polja mogućih rješenja i odabiru početne točke za lokalnu optimizaciju, a SQP metoda za traženje lokalnog minimuma funkcije cilja.

Rad je strukturiran na način da je prvo objašnjen proces uzdužnog tokarenja, zatim razrađen model optimizacije i opisane dvije funkcije cilja po kriterijima produktivnosti i ekonomičnosti. Nakon toga su opisana ograničenja i granice modela pri finoj i gruboj obradi i programsko rješenje izrađeno u svrhu optimizacije. Rad završava sa verifikacijom programskog rješenja pomoću

UVOD

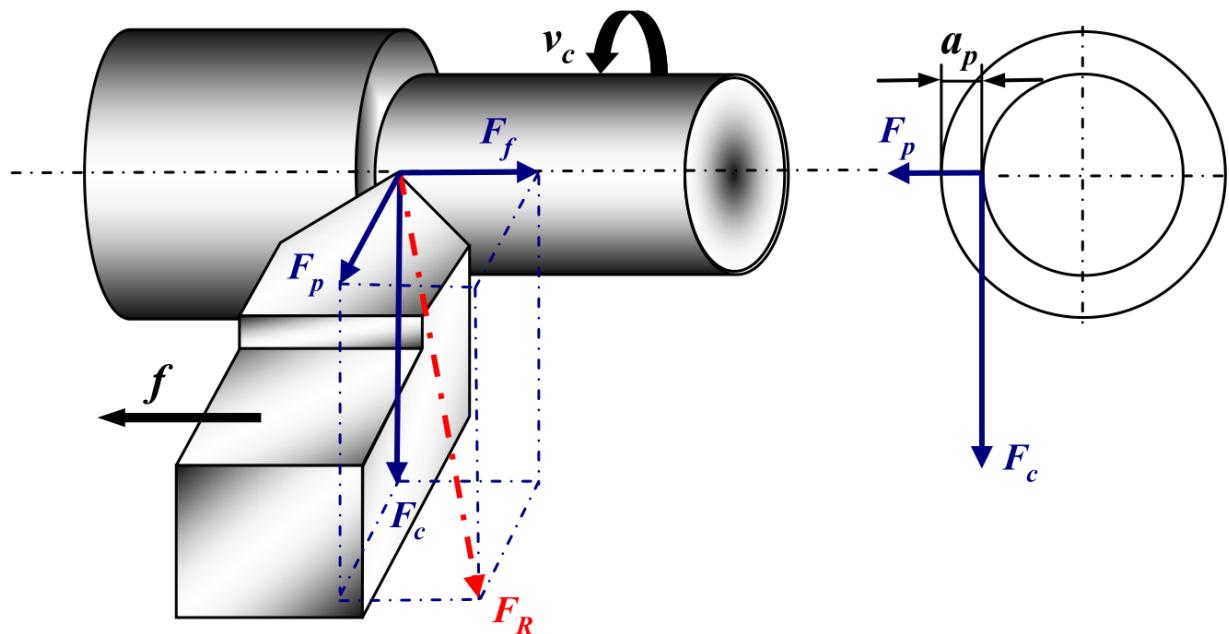
ulaznih podataka korištenih u znanstvenim radovima nevedenim u literaturi i verifikacijom pomoću konkretnog uzorka izrađenog upravo u tu svrhu. U posljednjem poglavlju je također opisana jedna od mogućih metoda dobivanja jednadžbe postojanosti alata.

2. MODELI PROCESA TOKARENJA

Pri konstrukciji modela za optimizaciju procesa tokarenja u obzir je uzeto sedam varijabli, odnosno parametara obrade: broj prolaza pri grubom tokarenju m , brzina rezanja pri grubom tokarenju v_R , posmak pri grubom tokarenju f_R , dubina rezanja pri grubom tokarenju a_R , brzina rezanja pri finom tokarenju v_F , posmak pri finom tokarenju f_F i dubina rezanja pri finom tokarenju a_F . U naredna dva potpoglavlja opisane su funkcije cilja jediničnog vremena i jediničnog troška izrade.

2.1. Opis procesa uzdužnog tokarenja

Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica čiji rezultat je obradak cilindričnog oblika. Strojevi na kojima se odvija postupak tokarenja nazivaju se tokarilice. Glavno gibanje pri obradi vrši obradak okretanjem oko svoje osi, a pomoćno gibanje alat, kako prikazuje Slika 2.1.



Slika 2.1. Proces uzdužnog tokarenja [23]

gdje je:

- v_c [m/min] Brzina rezanja, nadalje označena sa v
- f [mm/okr] Posmak po okretaju
- a_p [mm] Dubina rezanja, nadalje označena sa a
- F_c [N] Glavna sila rezanja, nadalje označena sa F
- F_f [N] Posmična sila
- F_p [N] Sila prodiranja

MODELI PROCESA TOKARENJA

F_R [N] Rezultantna sila rezanja

Rezultantna sila rezanja F_R se računa prema izrazu (2.1):

$$F_R = \sqrt{F + F_f + F_p} \quad (2.1)$$

Najutjecajnija sila je glavna sila rezanja F , te će se stoga samo ona uzimati u obzir u dalnjem proračunu.

Brzina rezanja v je put u jedinici vremena koji prijeđe alat tijekom gibanja kroz određeni materijal.

Posmak f je put koji prijeđe alat za jedan okretaj obratka. Smjer posmaka je okomit na brzinu rezanja v .

Dubina rezanja a je razlika u polumjeru obratka prije i nakon obrade. Ona je mjera gibanja alata u materijalu. Okomita je i na posmak f i brzinu rezanja v .

Model procesa tokarenja u više prolaza je definiran na način da se prvo odvija gruba obrada u nekoliko prolaza sa parametrima obrade:

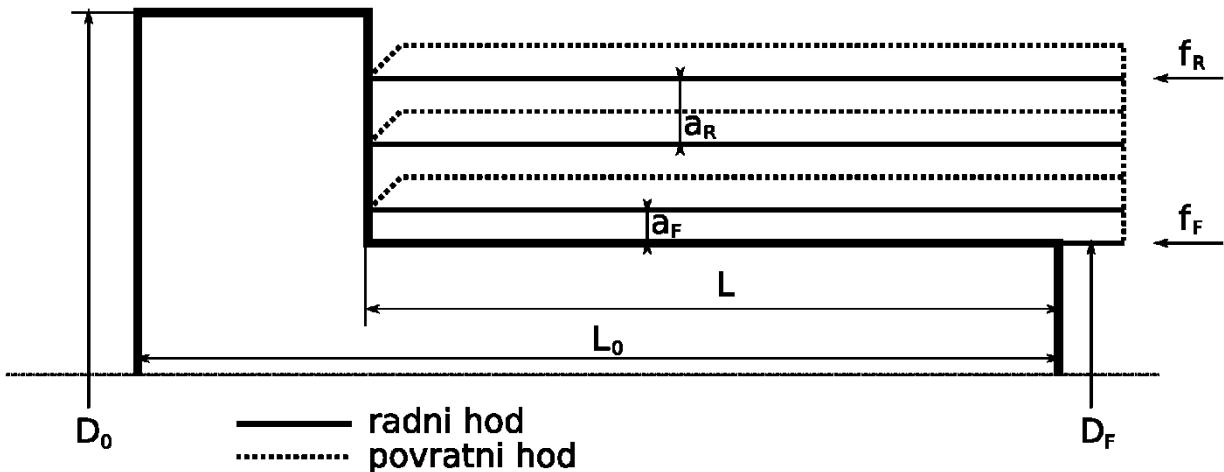
- Brzinom rezanja pri gruboj obradi v_R
- Posmakom po okretaju pri gruboj obradi f_R
- Dubinom rezanja pri gruboj obradi a_R
- Brojem prolaza pri gruboj obradi m

Nakon grube obrade slijedi fina obrada koja se odvija u jednom prolazu sa parametrima obrade:

- Brzinom rezanja pri finoj obradi v_F
- Posmakom po okretaju pri finoj obradi f_F
- Dubinom rezanja pri finoj obradi a_F

Slika 2.2. daje grafički prikaz gore navedenog modela procesa tokarenja. Obradak početnog promjera D_0 i duljine L_0 se obrađuje na završni promjer D_F u m grubih i jednom finom prolazu. Ukupna duljina svakog prolaza, odnosno duljina rezanja označena je sa L . Nakon svakog prolaza alat izlazi iz zahvata i povratnim hodom ga je potrebno dovesti u početni položaj za sljedeći prolaz.

MODELI PROCESA TOKARENJA



Slika 2.2. Model procesa tokarenja u više prolaza

gdje je:

D_0 [mm]	Početni promjer obratka
L_0 [mm]	Početna duljina obratka
D_F [mm]	Završni promjer obratka
L [mm]	Duljina svakog prolaza
f_R [mm/okr]	Posmak pri gruboj obradi
a_R [mm]	Dubina rezanja pri gruboj obradi
f_F [mm/okr]	Posmak pri finoj obradi
a_F [mm]	Dubina rezanja pri finoj obradi

Za definirani model će u poglavljima 2.2. i 2.3. biti određene funkcije cilja optimizacije prema kriterijima produktivnosti i ekonomičnosti.

2.2. Funkcija cilja jediničnog vremena izrade

Jedinično vrijeme izrade, t_p definirano je prema izrazu (2.2) [24, 25]:

$$t_p = t_L + t_{ts} + t_R + t_F + t_c \left(\frac{t_R + t_F}{T_L} \right) \quad (2.2)$$

gdje je:

t_p [min]	Jedinično vrijeme izrade
t_L [min]	Vrijeme potrebno za stezanje i skidanje obratka
t_{ts} [min]	Vrijeme potrebno za namještanje alata

MODELI PROCESA TOKARENJA

- t_R [min] Glavno strojno vrijeme pri gruboj obradi
 t_F [min] Glavno strojno vrijeme pri finoj obradi
 t_c [min] Vrijeme potrebno za promjenu alata
 T_L [min] Postojanost alata

Izraz (2.2) je tzv. funkcija cilja pri optimizaciji procesa tokarenja prema kriteriju maksimalne produktivnosti, tj. funkcija kojoj je potrebno pronaći minimum i na taj način odrediti parametre obrade $m, v_R, f_R, a_R, v_F, f_F$ i a_F prema izrazu (2.3) [7]:

$$t_p(m, v_R, f_R, a_R, v_F, f_F, a_F) \Rightarrow \min \quad (2.3)$$

2.2.1. Vremena vezana za manipulaciju obratkom i alatom

Vrijeme potrebno za stezanje i skidanje obratka t_L je vrijeme potrebno operateru na CNC tokarilici da ukloni dovršeni obradak i da na njegovo mjesto postavi novi i osigura sve uvjete potrebne za obradu [24, 25].

Vrijeme potrebno za namještanje alata t_{ts} je suma svih vremena potrebnih da se alat nakon svakog prolaza odmakne na sigurnu udaljenost od obratka i povratnim hodom pozicionira do ulaza u novi zahvat. Vrijeme t_{ts} određeno je izrazom (2.4):

$$t_{ts} = \sum_{i=1}^{m+1} t_{s_i} \quad (2.4)$$

gdje je:

- t_{s_i} [min] Vrijeme potrebno za namještanje alata po prolazu
 m [/] Broj uzdužnih prolaza pri grubom tokarenju

Ukoliko je duljina povratnog hoda pri svakom prolazu jednaka, vrijeme potrebno za namještanje alata po prolazu je jednako prema izrazu (2.5):

$$t_{s_1} = t_{s_2} = t_{s_3} = \dots = t_{s_{m+1}} = t_s \quad (2.5)$$

Uvrštavajući izraz (2.5) u izraz (2.4), te naknadnim sređivanje dobiva se konačan izraz (2.6) za vrijeme t_{ts} [24]:

$$t_{ts} = (m + 1)t_s \quad (2.6)$$

MODELI PROCESA TOKARENJA

Vrijeme potrebno za namještanje alata po prolazu t_s se može izraziti kao funkcija brzine i puta povratnog hoda [25] ili kao funkcija ukupne duljine prolaza L pri tokarenju prema izrazu (2.7) [7]:

$$t_s = h_1 L + h_2 \quad (2.7)$$

gdje je:

h_1 [min/mm] Konstanta vezana za namještanje alata

h_2 [min] Konstanta vezana za namještanje alata

L [mm] Ukupna duljina prolaza pri tokarenju

Isto tako, vrijeme t_s moguće je izmjeriti u radnim uvjetima za točno određeni slučaj odmicanja.

Vrijeme potrebno za promjenu alata t_c je vrijeme potrebno operateru da fizički promijeni alat na alatnom stroju (npr. okreće novi vrh rezne pločice). Vrijeme t_c potrebno je izmjeriti.

2.2.2. Glavno strojno vrijeme

Glavno strojno vrijeme pri gruboj obradi t_R jednako je sumi vremena potrebnih za svaki prolaz prema izrazu (2.8):

$$t_R = \sum_{i=1}^m \frac{\pi L D_{i-1}}{1000 v_{R_i} f_{R_i}} \quad (2.8)$$

gdje je:

D_{i-1} [mm] Promjer obratka na početku $i -$ tog grubog prolaza

v_{R_i} [m/min] Brzina rezanja $i -$ tog grubog prolaza

f_{R_i} [mm/okr] Posmak po okretaju $i -$ tog grubog prolaza

Prema početnim postavkama modela optimizacije, dubina rezanja a_R je jednaka za svaki grubi prolaz, te se koristi ista brzina rezanja v_R i posmak f_R pri svakom grubom prolazu. Iz izraza (2.8) proizlazi izraz (2.9):

$$t_R = \frac{\pi L}{1000 v_R f_R} [m D_0 - 2 a_R (m - 1)] \quad (2.9)$$

MODELI PROCESA TOKARENJA

gdje je:

D_0 [mm]	Početni promjer obratka pri tokarenju
a_R [mm]	Dubina rezanja pri svakom grubom prolazu
v_R [m/min]	Brzina rezanja pri svakom grubom prolazu
f_R [mm/okr]	Posmak po okretaju pri svakom grubom prolazu

Fina obrada sastoji se od jednog prolaza dubine rezanja a_F sa brzinom rezanja v_F i posmakom f_F .

Glavno strojno vrijeme pri finoj obradi t_F određeno je izrazom (2.10):

$$t_F = \frac{\pi L(D_F + 2 a_F)}{1000 v_F f_F} \quad (2.10)$$

gdje je:

D_F [mm]	Završni promjer pri tokarenju
a_F [mm]	Dubina rezanja pri finoj obradi
v_F [m/min]	Brzina rezanja pri finoj obradi
f_F [mm/okr]	Posmak po okretaju pri finoj obradi

2.2.3. Model postojanosti alata

Za određivanje postojanosti alata odabrana je često korištena *proširena Taylorova jednadžba*.

Pomoću nje su uspostavljane ovisnosti između postojanosti alata T i parametara obrade, tj. brzine rezanja v , posmaka po okretaju f i dubine rezanja a prema izrazu (2.11) [26]:

$$T = \frac{C_T}{v^{k_v} f^{k_f} a^{k_a}} \quad (2.11)$$

gdje je:

T [min]	Postojanost alata
C_T [min]	Konstanta koja ima vrijednost postojanosti alata pri $(v, f, a) = 1$
v [m/min]	Brzina rezanja
f [mm/okr]	Posmak po okretaju
a [mm]	Dubina rezanja
k_v [/]	Eksponent brzine rezanja
k_f [/]	Eksponent posmaka
k_a [/]	Eksponent dubine rezanja

MODELI PROCESA TOKARENJA

Konstanta C_T i eksponenti k_v , k_f , i k_a određuju se nizom pokusa i primjenom višedimenzijske regresijske analize [25].

Radi praktičnijeg unosa podataka i određivanja konstante C_T iskorištena je sljedeća matematička manipulacija (2.12):

$$C_T = C^{k_v} \quad (2.12)$$

gdje je:

C [/] Modificirana konstanta postojanosti alata

Uvrštavanjem izraza (2.12) u izraz (2.11) dobiva se konačan oblik jednadžbe postojanosti alata (2.13):

$$T = \frac{C^{k_v}}{v^{k_v} f^{k_f} a^{k_a}} \quad (2.13)$$

Prema postavkama modela optimizacije, isti alat je korišten pri gruboj i finoj obradi. Stoga su konstante i eksponenti potrebni za računanje postojanosti alata pri gruboj obradi T_R i finoj obradi T_F jednaki. Postojanost alata pri gruboj obradi T_R određena je izrazom (2.14):

$$T_R = \frac{C^{k_v}}{v_R^{k_v} f_R^{k_f} a_R^{k_a}} \quad (2.14)$$

gdje je:

T_R [min] Postojanost alata pri gruboj obradi

Postojanost alata pri finoj obradi T_F računa se prema izrazu (2.15):

$$T_F = \frac{C^{k_v}}{v_F^{k_v} f_F^{k_f} a_F^{k_a}} \quad (2.15)$$

gdje je:

T_F [min] Postojanost alata pri finoj obradi

Obrada se vrši u različitim uvjetima, te se brzina trošenja alata uglavnom razlikuje pri gruboj i finoj obradi. Iz navedenih razloga je potrebno modificirati postojanost alata pomoću težinskog faktora w , te u nju uključiti i postojanost pri gruboj obradi T_R i postojanost pri finoj obradi T_F prema izrazu (2.16) [7]:

MODELI PROCESA TOKARENJA

$$T_L = w T_R + (1 - w) T_F \quad (2.16)$$

gdje je:

T_L [min] Ukupna postojanost alata pri gruboj i finoj obradi

w [/] Težinski faktor postojanosti alata

Težinski faktor postojanosti alata leži u granicama:

$$0 \leq w \leq 1 \quad (2.17)$$

Kako bi se izbjegla uporaba težinskog faktora w u ovom modelu postojanosti alata, pretpostavljena je linearne veza između istrošenja alata i glavnog strojnog vremena pri gruboj obradi t_R i finoj obradi t_F , koji su opisani u poglavljju 2.2.2, prema izazu (2.18) [27]:

$$\frac{t_R}{T_R} + \frac{t_F}{T_F} = \frac{t_R + t_F}{T_L} \quad (2.18)$$

Nakon sređivanja izraza (2.18) slijedi konačan izraz (2.19) za ukupnu postojanost alata pri gruboj i finoj obradi T_L :

$$T_L = \frac{\frac{t_R + t_F}{t_R}}{\frac{t_R}{T_R} + \frac{t_F}{T_F}} \quad (2.19)$$

2.3. Funkcija cilja jediničnog troška izrade

Jedinični trošak izrade C_p u modelu procesa tokarenja u više prolaza sastoji se od četiri komponente prema izazu (2.20) [7]:

$$C_p = C_m + C_i + C_r + C_t \quad (2.20)$$

gdje je:

C_p [kn/kom] Jedinični trošak izrade

C_m [kn/kom] Trošak obrade vezan za glavno strojno vrijeme

C_i [kn/kom] Trošak vezan za stezanje i skidanje obratka i namještanje alata

C_r [kn/kom] Trošak radi zamjene alata

C_t [kn/kom] Trošak vezan za cijenu alata

MODELI PROCESA TOKARENJA

Izraz (2.20) je funkcija cilja pri optimizaciji procesa tokarenja prema kriteriju ekonomičnosti, tj. funkcija kojoj je potrebno pronaći minimum i na taj način odrediti parametre obrade $m, v_R, f_R, a_R, v_F, f_F$ i a_F prema izrazu (2.21) [7]:

$$C_p(m, v_R, f_R, a_R, v_F, f_F, a_F) \Rightarrow \min \quad (2.21)$$

2.3.1. Trošak obrade vezan za glavno strojno vrijeme

Trošak obrade vezan za glavno strojno vrijeme C_m računa se prema izrazu (2.22) [7]:

$$C_m = k_o(t_R + t_F) \quad (2.22)$$

gdje je:

- | | |
|----------------|---|
| k_o [kn/min] | Operativni trošak rada alatnog stroja po minuti |
| t_R [min] | Glavno strojno vrijeme pri gruboj obradi |
| t_F [min] | Glavno strojno vrijeme pri finoj obradi |

Operativni trošak rada alatnog stroja k_o obuhvaća troškove amortizacije, rada, održavanja, električne energije i sl. Glavno strojno vrijeme pri gruboj obradi t_R i finoj obradi t_F obrađeno je u poglavlju 2.2.2.

2.3.2. Trošak vezan za skidanje i stezanje obratka i namještanje alata

Trošak C_i određen je izrazom (2.23) [7]:

$$C_i = k_o(t_L + t_{ts}) \quad (2.23)$$

gdje je:

- | | |
|----------------|---|
| t_L [min] | Vrijeme potrebno za stezanje i skidanje obratka |
| t_{ts} [min] | Vrijeme potrebno za namještanje alata |

Vrijeme potrebno za stezanje i skidanje obratka t_L i vrijeme potrebno za namještanje alata t_{ts} obrađeni su u poglavlju 2.2.1.

MODELI PROCESA TOKARENJA

2.3.3. Trošak radi zamjene alata

Trošak radi zamjene alata C_r računa se pomoću izraza (2.24) [7]:

$$C_r = k_o \cdot t_c \left(\frac{t_R + t_F}{T_L} \right) \quad (2.24)$$

gdje je:

t_c [min] Vrijeme potrebno za promjenu alata

T_L [min] Postojanost alata

Vrijeme potrebno za promjenu alata t_c definirano je u poglavlju 2.2.1, a postojanost alata T_L u poglavlju 2.2.3

2.3.4. Trošak vezan za cijenu alata

Trošak vezan za cijenu alata C_t određen je izrazom (2.25) [7]:

$$C_t = k_t \left(\frac{t_R + t_F}{T_L} \right) \quad (2.25)$$

gdje je:

k_t [kn/rubu] Cijena reznog ruba pločice

2.3.5. Konačan izgled funkcije cilja

Uvrštavajući izraze (2.22), (2.23), (2.24) i (2.25) u izraz (2.20), te naknadnim sređivanjem dobiva se konačan izgled funkcije cilja modela optimizacije po kriteriju ekonomičnosti. To je prikazano izrazom (2.26) [24]:

$$\frac{C_p}{k_o} = t_L + t_{ts} + t_R + t_F + \left(t_c + \frac{k_t}{k_o} \right) \left(\frac{t_R + t_F}{T_L} \right) \quad (2.26)$$

Izraz (2.26) je strukturiran upravo na ovaj način kako bi bila moguća matematička manipulacija iz sljedećeg poglavlja.

2.4. Funkcija cilja koja zadovoljava kriterij produktivnosti i ekonomičnosti

Iz izraza (2.2) i (2.26) vidljivo je da se može konstruirati funkcija cilja za model optimizacije koja zadovoljava i kriterij maksimalne produktivnosti i kriterij ekonomičnosti [24, 28]. Na taj način se

MODELI PROCESA TOKARENJA

pomoću jednog modela i ovisno o željama korisnika može izvršiti optimizacija procesa tokarenja po proizvoljnem kriteriju.

Zajednička funkcija cilja f_c dana je u izrazu (2.27) [24]:

$$f_c = t_L + t_{ts} + t_R + t_F + t_c^* \left(\frac{t_R + t_F}{T_L} \right) \quad (2.27)$$

gdje je:

$$t_c^* = \begin{cases} t_c & \text{Za optimizaciju po kriteriju maksimalne produktivnosti} \\ t_c + \frac{k_t}{k_o} [\min] & \text{Za optimizaciju po kriteriju ekonomičnosti} \end{cases}$$

Ako je alat jeftin, te je omjer $\frac{k_t}{k_o}$ malen u odnosu na vrijeme potrebno za promjenu alata t_c , optimizacija procesa tokarenja se može vršiti samo po kriteriju maksimalne produktivnosti jer se rezultati optimizacije, tj. parametri obrade m , v_R , f_R , a_R , v_F , f_F i a_F , neće znatno razlikovati. U slučaju skupog alata, omjer $\frac{k_t}{k_o}$ ima znatan utjecaj na rezultate optimizacije [24].

U slučaju optimizacije po kriteriju maksimalne produktivnosti, odnos jediničnog vremena izrade t_p i vrijednosti funkcije cilja f_c dobivene optimizacijom se računa po izrazu (2.28):

$$t_p = f_c \quad (2.28)$$

U slučaju optimizacije po kriteriju ekonomičnosti, odnos jediničnog troška izrade C_p i vrijednosti funkcije cilja f_c dobivene optimizacijom se računa izrazom (2.29):

$$C_p = k_o f_c \quad (2.29)$$

3. OGRANIČENJA I GRANICE MATEMATIČKOG MODELAA

Prilikom određivanja optimalnih parametara obrade potrebno je postaviti granice njihovih potencijalno mogućih vrijednosti i određene funkcijeske zavisnosti koje je potrebno poštovati kako bi se proces odvijao povoljnim tijekom. Granice varijabli i parametara procesa nazivaju se granicama matematičkog modela i izražene su u obliku minimalne i maksimalne vrijednosti koju ta varijabla može poprimiti. Funkcijeske zavisnosti procesa se nazivaju ograničenjima matematičkog modela i odražavaju međusobni odnos nekoliko varijabli i parametara procesa. U narednih nekoliko poglavlja su opisani ti odnosi.

3.1. Granice modela pri gruboj obradi

Pri grubom tokarenju potrebno je definirati nekoliko praktičnih granica unutar kojih se mogu kretati parametri obrade, tj. m , v_R , f_R i a_R .

Granice brzine rezanja v_R pri gruboj obradi prikazane su izrazom (3.1):

$$v_{R\min} \leq v_R \leq v_{R\max} \quad (3.1)$$

gdje je:

- $v_{R\min}$ [m/min] Najniža vrijednost brzine rezanja pri gruboj obradi
 $v_{R\max}$ [m/min] Najviša vrijednost brzine rezanja pri gruboj obradi

Granice brzine rezanja $v_{R\min}$ i $v_{R\max}$ su uglavnom propisane od strane proizvođača alata. Također, prilikom unosa maksimalne brzine rezanja potrebno je uzeti u obzir najveću moguću brzinu vrtnje vretena alatnog stroja prema izrazu (3.2):

$$v_{R\max} \leq \frac{\pi D_F n_{\max}}{1000} \quad (3.2)$$

gdje je:

- D_F [mm] Završni promjer pri tokarenju
 n_{\max} [okr/min] Najveća moguća brzina vrtnje vretena alatnog stroja

OGRANIČENJA I GRANICE MATEMATIČKOG MODELAA

Granice posmaka f_R pri gruboj obradi definirane su izrazom (3.3):

$$f_{R\min} \leq f_R \leq f_{R\max} \quad (3.3)$$

gdje je:

$f_{R\min}$ [mm/okr] Najniža vrijednost posmaka pri gruboj obradi

$f_{R\max}$ [mm/okr] Najviša vrijednost posmaka pri gruboj obradi

Granice posmaka $f_{R\min}$ i $f_{R\max}$ su također propisane od strane proizvođača alata.

Granice dubine rezanja a_R pri gruboj obradi definirane su izrazom (3.4):

$$a_{R\min} \leq a_R \leq a_{R\max} \quad (3.4)$$

gdje je:

$a_{R\min}$ [mm] Najniža vrijednost dubine rezanja pri gruboj obradi

$a_{R\max}$ [mm] Najviša vrijednost dubine rezanja pri gruboj obradi

Proizvođač također ima naviku propisati okvirne granice dubine rezanja $a_{R\min}$ i $a_{R\max}$ za određeni alat.

Broj prolaza pri gruboj obradi m je također potrebno držati u određenim granicama prema izrazu (3.5):

$$m_{\min} \leq m \leq m_{\max} \quad (3.5)$$

gdje je:

m_{\min} [/] Najniža vrijednost broja prolaza pri gruboj obradi

m_{\max} [/] Najviša vrijednost broja prolaza pri gruboj obradi

Broj prolaza pri gruboj obradi m je također određen geometrijom obratka i maksimalnim i minimalnim mogućim dubinama rezanja pri gruboj i finoj obradi preko izraza (3.6):

$$\max\left(m_{\min}, \frac{D_0 - D_F - 2a_{F\max}}{2 a_{R\max}}\right) \leq m \leq \min\left(m_{\max}, \frac{D_0 - D_F - 2a_{F\min}}{2 a_{R\min}}\right) \quad (3.6)$$

gdje je:

D_0 [mm] Početni promjer obratka pri tokarenju

OGRANIČENJA I GRANICE MATEMATIČKOG MODELAA

Isto tako, važno je ograničenje da je broj prolaza pri gruboj obradi m prirodni broj prema izrazu (3.7):

$$m \in \mathbb{N} \quad (3.7)$$

Odnos između dubine rezanja a_R i posmaka f_R pri gruboj obradi mora ležati u određenim granicama kako bi vitkost strugotine bila povoljna [25]. Te granice ovise o obrađivanom materijalu i određene su izrazom (3.6):

$$4 \leq \frac{a_R}{f_R} \leq \xi_{max} \quad (3.8)$$

gdje je:

ξ_{max} [/] Maksimalna dozvoljena vitkost strugotine

Tablica 3.1 prikazuje vrijednosti maksimalne dozvoljene vitkosti strugotine ξ_{max} za različite grupe materijala.

Tablica 3.1. Maksimalna dozvoljena vitkost strugotine [25]

Materijal	ξ_{max}
Nelegirani konstrukcijski čelik	6 – 16
Legirani konstrukcijski čelik	16
Čelični lijev	8 – 12
Sivi lijev	5 – 6

3.2. Granice modela pri finoj obradi

Granice modela pri finom tokarenju su definirane na sličan način kao i pri grubom tokarenju.

Granice brzine rezanja v_F pri finoj obradi prikazane su izrazom (3.9):

$$v_{F_{min}} \leq v_F \leq v_{F_{max}} \quad (3.9)$$

gdje je:

$v_{F_{min}}$ [m/min] Najniža vrijednost brzine rezanja pri finoj obradi

$v_{F_{max}}$ [m/min] Najviša vrijednost brzine rezanja pri finoj obradi

OGRANIČENJA I GRANICE MATEMATIČKOG MODELAA

Najvišu vrijednost brzine rezanja pri finoj obradi $v_{F,max}$ potrebno je ograničiti pomoću najveće moguće brzine vrtnje vretena alatnog stroja n_{max} preko izraza (3.10):

$$v_{F,max} \leq \frac{\pi D_F n_{max}}{1000} \quad (3.10)$$

Granice posmaka f_F pri finoj obradi definirane su izrazom (3.11):

$$f_{F,min} \leq f_F \leq f_{F,max} \quad (3.11)$$

gdje je:

$f_{F,min}$ [mm/okr] Najniža vrijednost posmaka pri finoj obradi

$f_{F,max}$ [mm/okr] Najviša vrijednost posmaka pri finoj obradi

Granice dubine rezanja a_F pri finoj obradi definirane su izrazom (3.12):

$$a_{F,min} \leq a_F \leq a_{F,max} \quad (3.12)$$

gdje je:

$a_{F,min}$ [mm] Najniža vrijednost dubine rezanja pri finoj obradi

$a_{F,max}$ [mm] Najviša vrijednost dubine rezanja pri finoj obradi

Kao i kod grube obrade, kao okvirne vrijednosti $v_{F,min}$, $v_{F,max}$, $f_{F,min}$, $f_{F,max}$, $a_{F,min}$ i $a_{F,max}$ mogu se uzeti vrijednosti koje je propisao proizvođač alata.

Odnos dubine rezanja a_F i posmaka f_F pri finoj obradi određen je na isti način kao i kod grube obrade, kako bi vitkost strugotine bila povoljna [25]. Te granice ovise o obrađivanom materijalu i određene su izrazom (3.13):

$$4 \leq \frac{a_F}{f_F} \leq \xi_{max} \quad (3.13)$$

Tablica 3.1. definira ξ_{max} za različite grupe materijala.

Pri finoj obradi posebnu pozornost potrebno je obratiti zahtjevanoj hrapavosti obrađene površine. Vrijednost posmaka f_F ograničena je preko maksimalne vrijednosti srednjeg odstupanja profila R_a i radijusa zaobljenja vrha pločice r_ϵ izrazom (3.14) [25]:

OGRANIČENJA I GRANICE MATEMATIČKOG MODELAA

$$f_F \leq \sqrt{32 Ra r_\varepsilon} \quad (3.14)$$

gdje je:

Ra [mm] Srednje aritmetičko odstupanje profila

r_ε [mm] Radijus zaobljenja vrha oštice

3.3. Ograničenja pri gruboj i finoj obradi

Potrebno je ograničiti postojanost alata T_L koja se računa prema izrazu (2.19), te ju smjestiti u određene realne granice prema izrazu (3.15):

$$T_{L_{min}} \leq T_L \leq T_{L_{max}} \quad (3.15)$$

gdje je:

$T_{L_{min}}$ [min] Najniža vrijednost ukupne postojanosti alata

$T_{L_{max}}$ [min] Najviša vrijednost ukupne postojanosti alata

Također, potrebno je poštovati određene odnose između parametara obrade pri grubom i finom tokarenju [29]. Posmak f_R i dubina rezanja a_R tijekom grube obrade su uglavnom veći nego posmak f_F i dubina rezanja a_F tijekom fine obrade. No, brzina rezanja tijekom fine obrade v_F uglavnom je veća nego brzina rezanja tijekom grube obrade v_R . Te odnose prikazuju sljedeće relacije (3.16), (3.17) i (3.18):

$$v_F \geq k_1 v_R \quad (3.16)$$

$$f_R \geq k_2 f_F \quad (3.17)$$

$$a_R \geq k_3 a_F \quad (3.18)$$

gdje je:

k_1 [/] Koeficijent odnosa brzine rezanja

k_2 [/] Koeficijent odnosa posmaka

k_3 [/] Koeficijent odnosa dubine rezanja

Sljedeće ograničenje predstavlja odnos između dubine rezanja pri gruboj obradi a_R , dubine rezanja pri finoj obradi a_F , početnog promjera obratka D_0 i završnog promjera obratka D_F , te se naziva se geometrijsko ograničenje.

OGRANIČENJA I GRANICE MATEMATIČKOG MODELAA

Izraz (3.19) određuje geometrijsko ograničenje:

$$D_F = D_0 - 2 m a_R - 2 a_F \quad (3.19)$$

3.4. Ograničenja zbog dozvoljene sile i snage stroja

Sile koje se javljaju tijekom obrade ne smiju prekoračiti određenu vrijednost kako bi se ograničile deformacije alata i obratka.

Glavna sila rezanja F se može izračunati izrazom (3.20) [25]:

$$F = \frac{a f^{1-m_c} Kc}{\sin^{m_c} \kappa_r} \quad (3.20)$$

gdje je:

F [N]	Glavna sila rezanja
Kc [N/mm ²]	Specifična sila rezanja za presjek strugotine od 1mm ²
m_c [/]	Eksponent debljine neodrezane strugotine
κ_r [°]	Prisloni kut glavne oštice alata

Specifična sila rezanja Kc i eksponent debljine neodrezane strugotine m_c ovise o materijalu radnog predmeta. Dodatak A: Svojstva materijala prema DIN / ISO 513 i VDI 3323 Standardu prikazuje njihove vrijednosti za određene grupe materijala.

Glavne sile rezanja pri gruboj, odnosno finoj obradi se računaju, uvrštavanjem parametara obrade za grubu, odnosno za finu obradu u jednadžbu (3.20), prema izrazima (3.21), odnosno (3.22):

$$F_R = \frac{a_R f_R^{1-m_c} Kc}{\sin^{m_c} \kappa_r} \quad (3.21)$$

$$F_F = \frac{a_F f_F^{1-m_c} Kc}{\sin^{m_c} \kappa_r} \quad (3.22)$$

gdje je:

F_R [N]	Glavna sila rezanja pri grubom tokarenju
F_F [N]	Glavna sila rezanja pri finom tokarenju

OGRANIČENJA I GRANICE MATEMATIČKOG MODELAA

Ograničenje glavne sile rezanja prikazano je sljedećim izrazom (3.23) [25]:

$$F_R, F_F \leq F_{max} \quad (3.23)$$

gdje je:

F_{max} [N] Maksimalna dozvoljena sila rezanja

Snaga potrebna za strojnu obradu P ne smije prekoračiti vrijednost snage stroja P_s umanjenu za gubitke u alatnom stroju kako bi se izbjeglo preopterećenje motora glavnog vretena.

Snaga rezanja P računa se prema izrazu (3.24) [25]:

$$P = \frac{F \cdot v}{60 \times 10^3} \quad (3.24)$$

gdje je:

P [kW] Potrebna snaga za obradu skidanjem strugotine

Snage rezanja pri gruboj, odnosno finoj obradi se računaju, uvrštavanjem parametara obrade za grubu, odnosno za finu obradu u jednadžbu (3.24), prema izrazima (3.25), odnosno (3.26):

$$P_R = \frac{F_R \cdot v_R}{60 \times 10^3} \quad (3.25)$$

$$P_F = \frac{F_F \cdot v_F}{60 \times 10^3} \quad (3.26)$$

gdje je:

P_R [kW] Snaga rezanja pri grubom tokarenju

P_F [kW] Snaga rezanja pri finom tokarenju

Funkcije ograničenja snage rezanja potrebne za grubu obradu P_R i finu obradu P_F prikazane su izrazom:

$$P_R, P_F \leq P_s \eta_s \quad (3.27)$$

gdje je:

P_s [kW] Instalirana snaga stroja

η_s [/] Stupanj iskoristivosti alatnog stroja

4. IZRADA OPTIMIZACIJSKOG PROGRAMSKOG RJEŠENJA

U svrhu rješavanja problema korišten je programski jezik *Python*, te paketi *Numpy*, *Scipy*, *Matplotlib* i *Kivy*. Prilikom traženja minimuma funkcije upotrebljeni su moduli *scipy.optimize.basinhopping* i *scipy.optimize.minimize*, te algoritam Basin-hopping i metoda sekvencijalnog kvadratnog programiranja (SQP).

4.1. Globalna optimizacija Basin-hopping algoritmom

Basin-hopping (BH) algoritam je stohastički algoritam koji pokušava pronaći globalni minimum glatke funkcije jedne ili više varijabli [31, 32, 33, 34].

Algoritam je iterativan, te se svaki ciklus traženja globalnog minimuma sastoji od:

1. Nasumična perturbacija koordinata
2. Postupak traženja lokalnog minimuma
3. Prihvaćanje ili odbijanje novih koordinata bazirano na vrijednosti funkcije u lokalnom minimumu

Test za prihvaćanje ili odbijanje novih koordinata je metropolisov kriterij standardnog Monte Carlo algoritma [33]. BH algoritam je pronašao svoju primjenu kod mnogih problema u fizici i kemiji. Posebno je koristan kada funkcije imaju mnogo minimuma na velikim udaljenostima [35].

Parametri koji se koriste u optimizaciji [35]:

<i>niter</i>	Broj iteracija algoritma za svaki mogući broj prolaza pri gruboj obradi m Ukupan broj iteracija je $(m_{max} - m_{min} + 1) niter$
<i>stepsize</i>	Korak koji se koristi za nasumičnu perturbaciju koordinata BH algoritam automatski prilagođava <i>stepsize</i> nakon određenog broja iteracija kako bi pronašao optimalnu vrijednost
<i>T</i>	Temperatura korištena u metropolisovom kriteriju za prihvaćanje koraka [33] Za najbolje rezultate <i>T</i> bi trebao biti reda veličine razlike u vrijednosti funkcije između lokalnih minimuma
<i>interval</i>	Broj iteracija nakon kojih se prilagođava <i>stepsize</i>

Vjerojatnost prihvaćanja koraka p dana je izrazom (4.1) [35]:

$$p = \begin{cases} 1, & f_c(x_{novi}) < f_c(x_{stari}) \\ e^{-\frac{f_c(x_{novi}) - f_c(x_{stari})}{T}}, & f_c(x_{novi}) \geq f_c(x_{stari}) \end{cases} \quad (4.1)$$

gdje je:

- f_c Funkcija cilja optimizacije
- x_{novi} Vrijednosti koordinata (parametara obrade) nakon perturbacije
- x_{stari} Vrijednosti koordinata (parametara obrade) prije perturbacije

Pošto se vrijednosti brzine rezanja v , dubine rezanja a i posmaka f znatno razlikuju, potrebno je prilagoditi rutinu uzimanja koraka. U sljedećem kodu je prikazano da se korak za posmak pri finoj obradi f_F i pri gruboj obradi f_R uzima po uniformnoj raspodjeli u rasponu $(-stepsize, stepsize)$. Za brzine rezanja v_R i v_F se uzima korak po uniformnoj raspodjeli u rasponu $(-500 stepsize, 500 stepsize)$, a za dubine rezanja a_R i a_F po uniformnoj raspodjeli u rasponu $(-15 stepsize, 15 stepsize)$.

```
class MyStep(object):
    def __init__(self, stepsize=1e-1):
        self.stepsize = stepsize

    def __call__(self, x):
        s = self.stepsize
        x[::3] += np.random.uniform(-500.*s, 500.*s, x[::3].shape)
        x[1::3] += np.random.uniform(-s, s, x[1::3].shape)
        x[2::3] += np.random.uniform(-15.*s, 15.*s, x[2::3].shape)
        return x
```

4.2. Lokalna optimizacija SQP metodom

U svakoj iteraciji globalne optimizacije BH algoritmom uklopljeno je traženje lokalnog minimuma metodom sekvencijalnog kvadratnog programiranja (SQP). Metoda se koristi za traženje minimuma funkcije nekoliko varijabli sa bilo kojom kombinacijom granica i funkcijskih ograničenja [36].

Algoritam se koristi za traženje minimuma problema oblika (4.2) [37]:

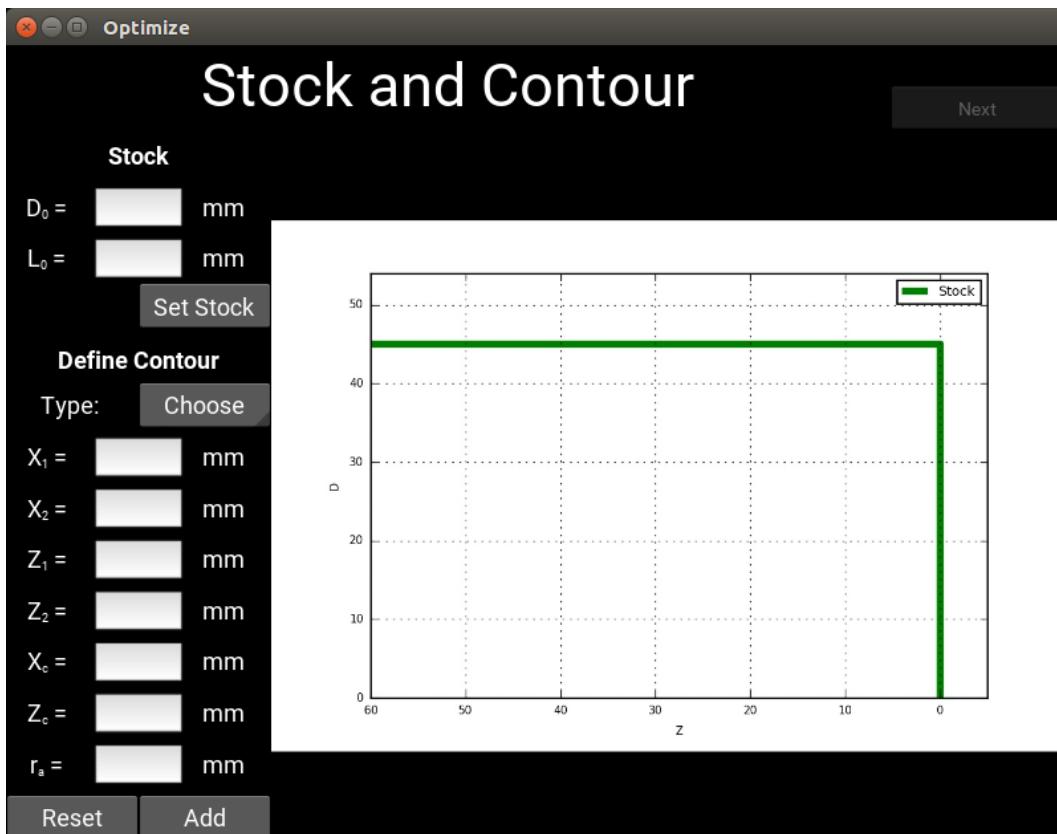
$$\begin{aligned}
 & \min f_c(x) \\
 & \text{Podložno } C_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, MEQ \\
 & \quad C_j(x) \geq 0, \quad j = MEQ + 1, \dots, M \\
 & \quad XL \leq x \leq XU, \quad I = 1, \dots, N
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Parametri koji se koriste u optimizaciji [38]:

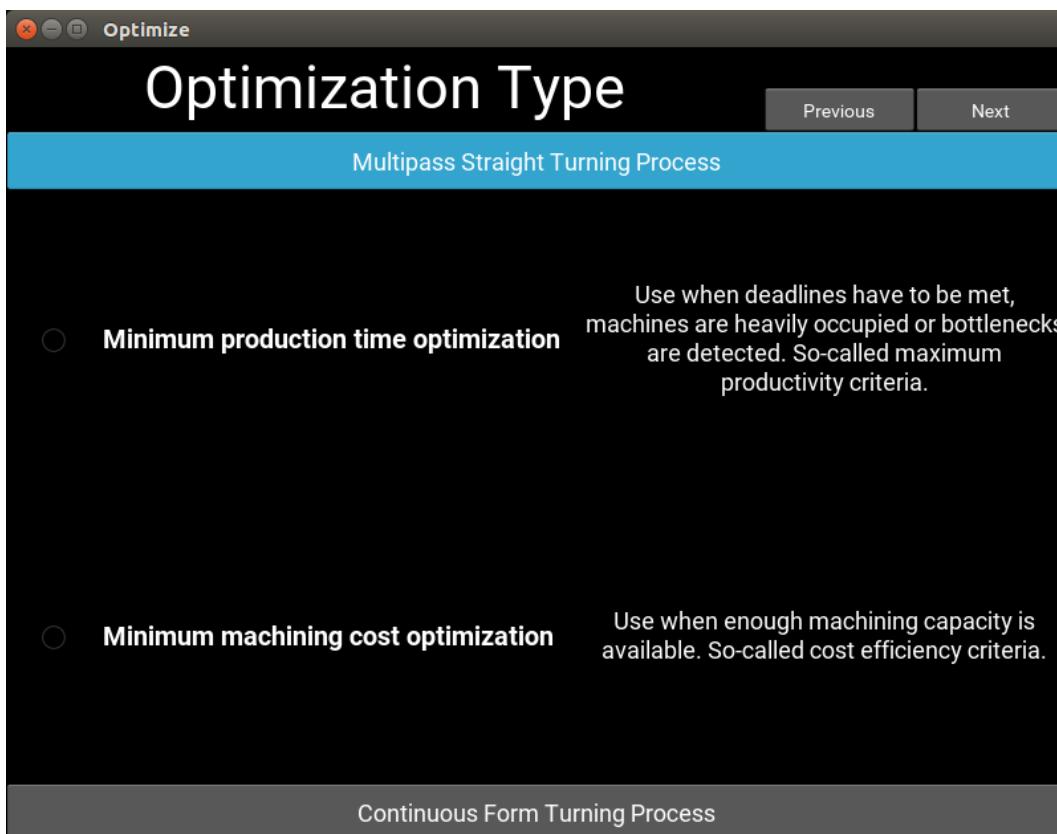
<i>ftol</i>	Preciznost u vrijednosti funkcije za kriterij zaustavljanja
<i>maxiter</i>	Maksimalni dozvoljeni broj iteracija

4.3. Grafičko korisničko sučelje programskog rješenja

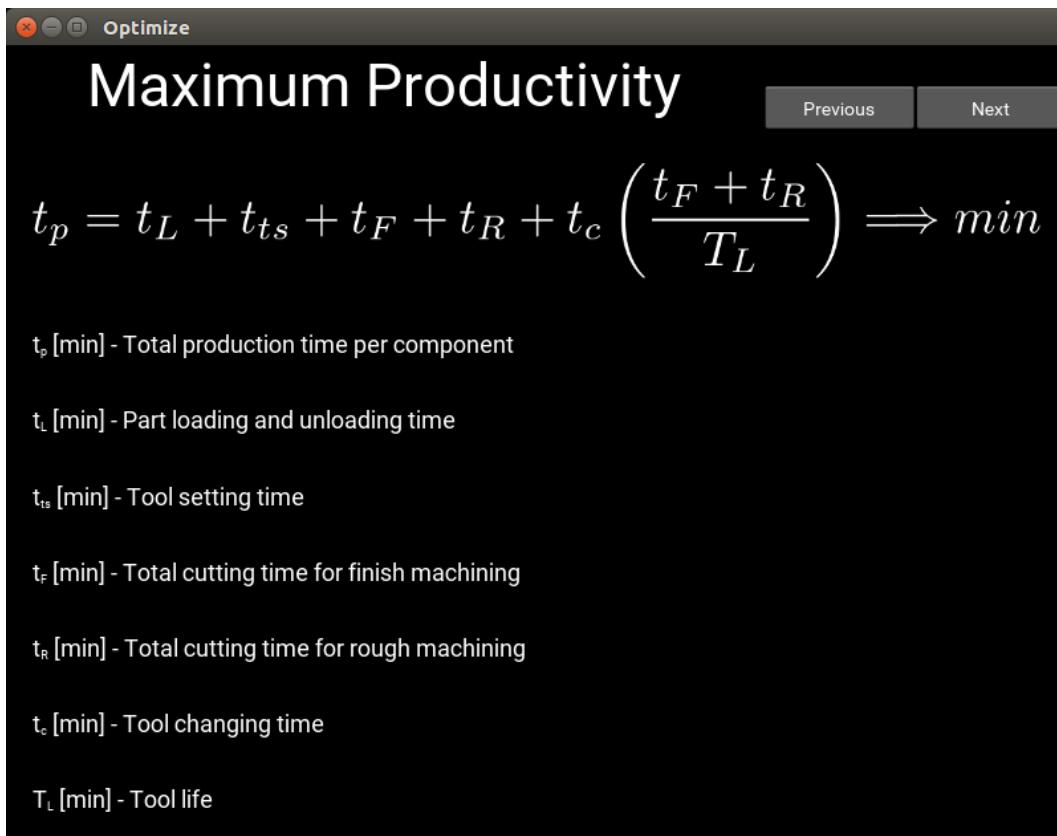
Pri izradi grafičkog korisničkog sučelja korišten je *kivy* [39], programski paket za izradu grafičkog sučelja. Sve oznake korištene u programskom rješenju se podudaraju s onima u prethodnim poglavljima, gdje je problem detaljnije razrađen. Slika 4.1. prikazuje početni ekran programskog rješenja. Na početnom ekranu je potrebno unijeti promjer D_0 i duljinu L_0 ulaznog materijala i definirati konturu koju je potrebno obraditi. Slika 4.2. prikazuje drugi ekran programskog rješenja. Na drugom ekranu je potrebno odabrati tip optimizacije, odnosno optimizaciju po kriteriju minimalnog jediničnog vremena izrade ili po kriteriju minimalnog jediničnog troška izrade. Slika 4.3., odnosno Slika 4.4. prikazuje treći ekran programskog rješenja u ovisnosti o odabranom kriteriju optimizacije. Na trećem ekranu je ukratko objašnjena funkcija cilja prema poglavlјima 2.2., odnosno 2.3. Slika 4.5. prikazuje četvrti ekran programskog rješenja, na kojem je potrebno unijeti vrijeme potrebno za skidanje i stezanje obratka t_L , vrijeme namještanja alata po prolazu t_s i vrijeme potreno za zamjenu alata t_c , prema poglavlju 2.2.1. Slika 4.6. prikazuje peti ekran optimizacijskog programskog rješenja, na kojem je potrebno unijeti konstante jednadžbe postojanosti alata, prema poglavlju 2.2.3. Slika 4.7. prikazuje šesti ekran programskog rješenja, na kojem je potrebno unijeti granice matematičkog modela prema poglavlјima 3.1., 3.2. i 3.3. Slika 4.8. prikazuje sedmi ekran programskog rješenja, na kojem je potrebno unijeti relacije parametara obrade, dozvoljenu površinsku hrapavost i podatke o ulazu i izlazu alata, prema poglavlјima 3.2 i 3.3.



Slika 4.1. Dimenzije ulaznog materijala i kontura



Slika 4.2. Odabir tipa optimizacije



Maximum Productivity

Previous Next

$$t_p = t_L + t_{ts} + t_F + t_R + t_c \left(\frac{t_F + t_R}{T_L} \right) \Rightarrow \min$$

t_p [min] - Total production time per component

t_L [min] - Part loading and unloading time

t_{ts} [min] - Tool setting time

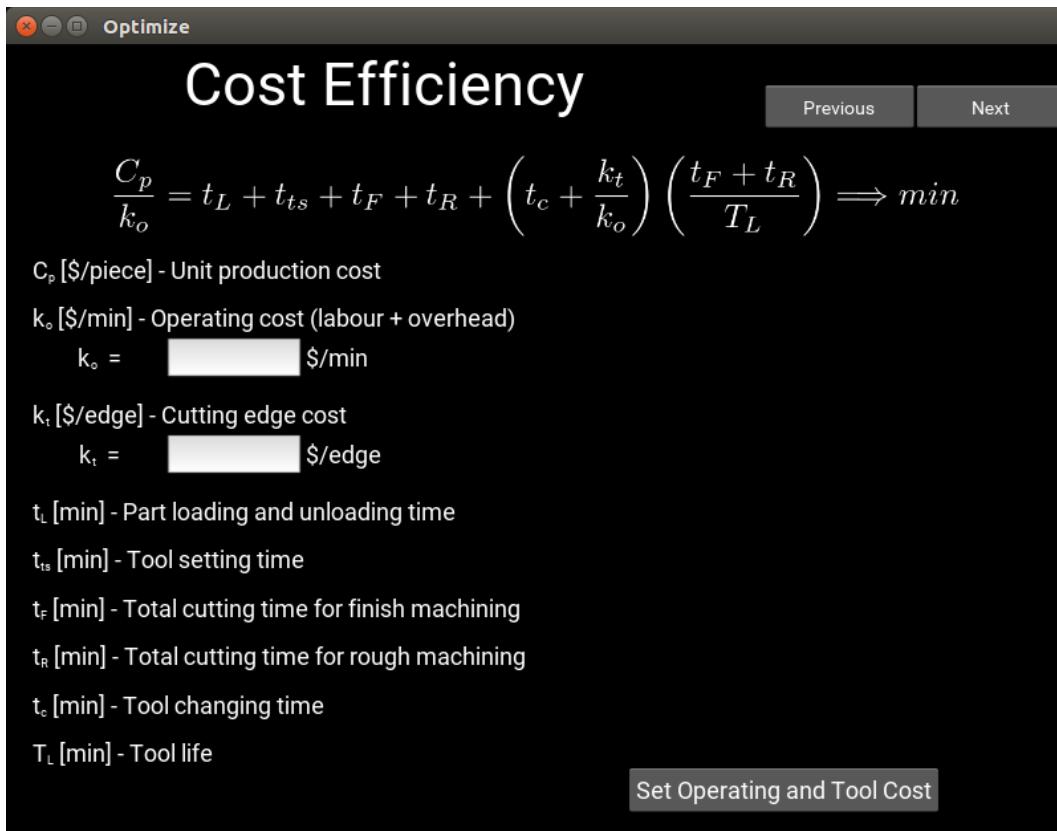
t_F [min] - Total cutting time for finish machining

t_R [min] - Total cutting time for rough machining

t_c [min] - Tool changing time

T_L [min] - Tool life

Slika 4.3. Opis modela po kriteriju maksimalne produktivnosti



Cost Efficiency

Previous Next

$$\frac{C_p}{k_o} = t_L + t_{ts} + t_F + t_R + \left(t_c + \frac{k_t}{k_o} \right) \left(\frac{t_F + t_R}{T_L} \right) \Rightarrow \min$$

C_p [\$/piece] - Unit production cost

k_o [\$/min] - Operating cost (labour + overhead)

$k_o =$ \$/min

k_t [\$/edge] - Cutting edge cost

$k_t =$ \$/edge

t_L [min] - Part loading and unloading time

t_{ts} [min] - Tool setting time

t_F [min] - Total cutting time for finish machining

t_R [min] - Total cutting time for rough machining

t_c [min] - Tool changing time

T_L [min] - Tool life

Set Operating and Tool Cost

Slika 4.4. Opis modela po kriteriju ekonomičnosti

Time Input

Previous Next

Loading and unloading time	Total cutting time for rough machining
$t_L =$ <input type="text"/> min	$t_R = \sum_{i=1}^m \frac{\pi L D_{i-1}}{1000 v_R f_R}$
Tool setting time	
$t_s =$ <input type="text"/> min	Total cutting time for finish machining
Tool changing time	
$t_c =$ <input type="text"/> min	$t_F = \frac{\pi L (D_F + 2a_F)}{1000 v_F f_F}$
Set Times	
$t_s = t_s (m + 1)$ t_s [min] - Setting time for each pass m [/] - Number of roughing passes	
L [mm] - Cutting length D [mm] - Diameter v [m/min] - Cutting speed f [mm/rev] - Feed a [mm] - Depth of cut	

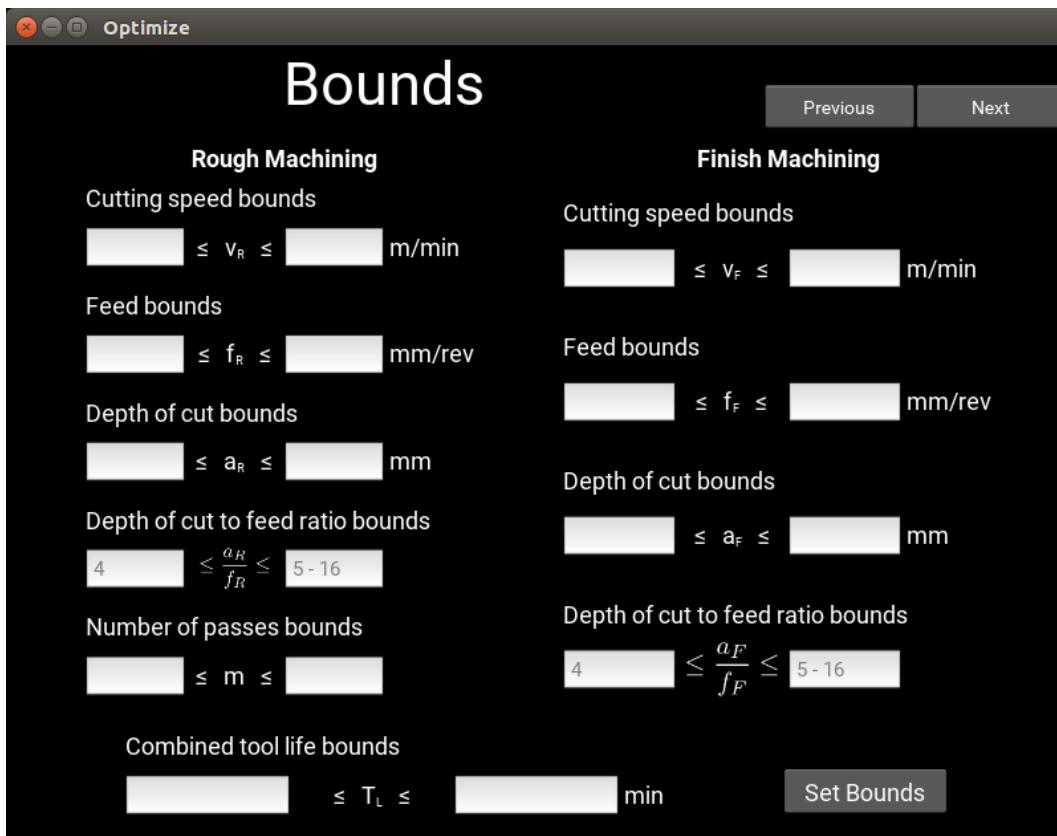
Slika 4.5. Unos vremena potrebnih za optimizaciju

Tool Life

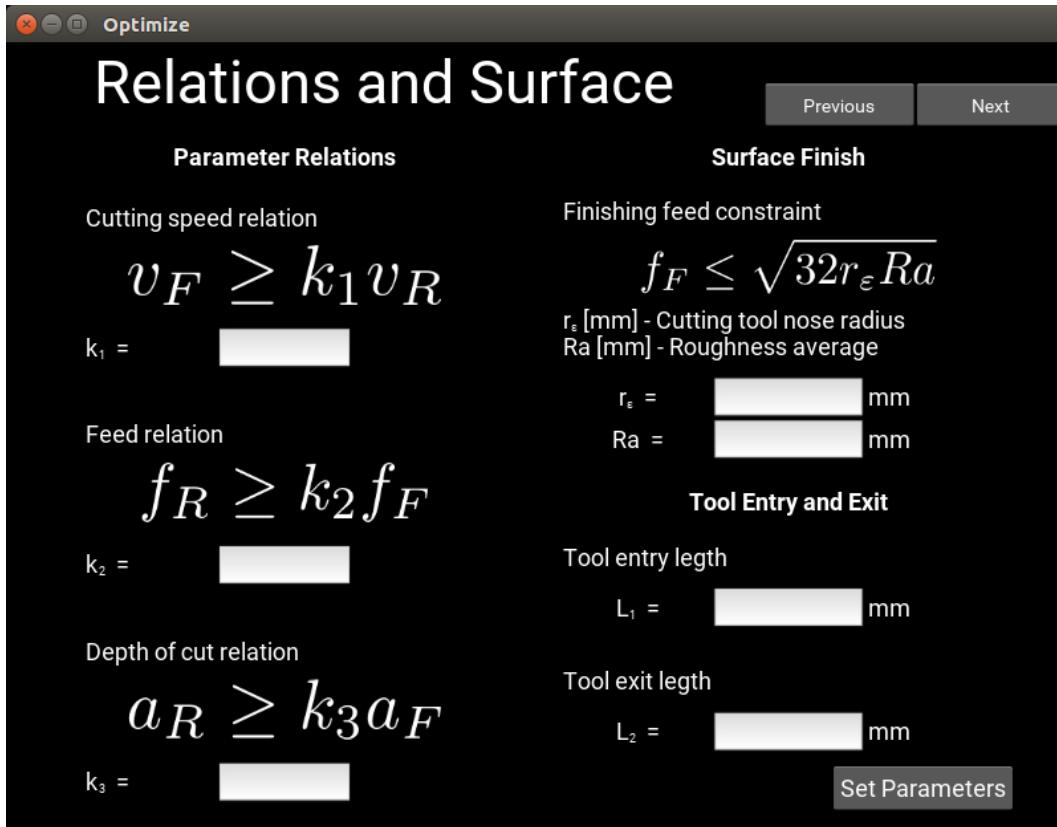
Previous Next

Taylor's tool life equation	Tool life for roughing and finishing
$T = \frac{C_T}{v^{k_v} f^{k_f} a^{k_a}}$	$T_L = w T_R + (1 - w) T_F$
$C_T = C^{k_v}$	$T_L = \frac{t_R + t_F}{\frac{t_R}{T_R} + \frac{t_F}{T_F}}$
a_p [mm] - Depth of cut	$T_R = \frac{C_T}{v_R^{k_v} f_R^{k_f} a_R^{k_a}}$
C_T, C [/] - Taylor's constant	$T_F = \frac{C_T}{v_F^{k_v} f_F^{k_f} a_F^{k_a}}$
$C =$ <input type="text"/>	T_L [min] - Combined tool life
k_v [/] - Cutting speed exponent	T_R [min] - Tool life for rough machining
$k_v =$ <input type="text"/>	T_F [min] - Tool life for finish machining
k_f [/] - Feed exponent	w [/] - Weight factor
$k_f =$ <input type="text"/>	
k_a [/] - Depth of cut exponent	
$k_a =$ <input type="text"/>	
Set Constants	

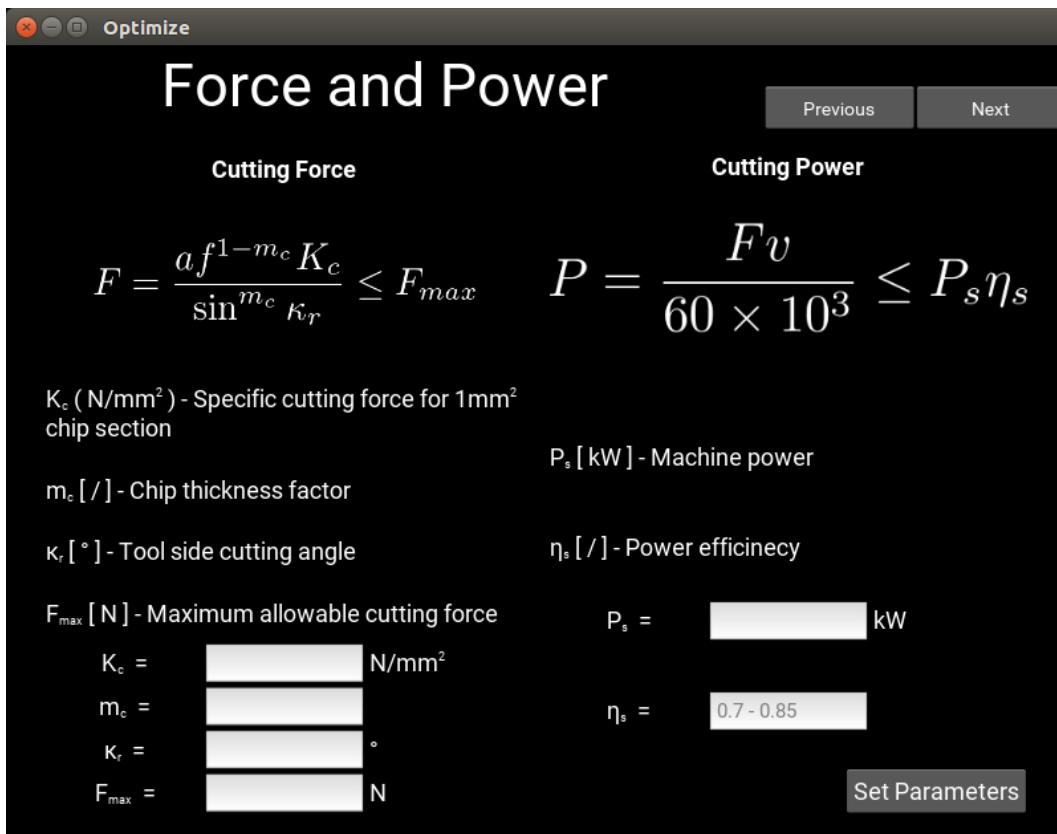
Slika 4.6. Vijek trajanja alata



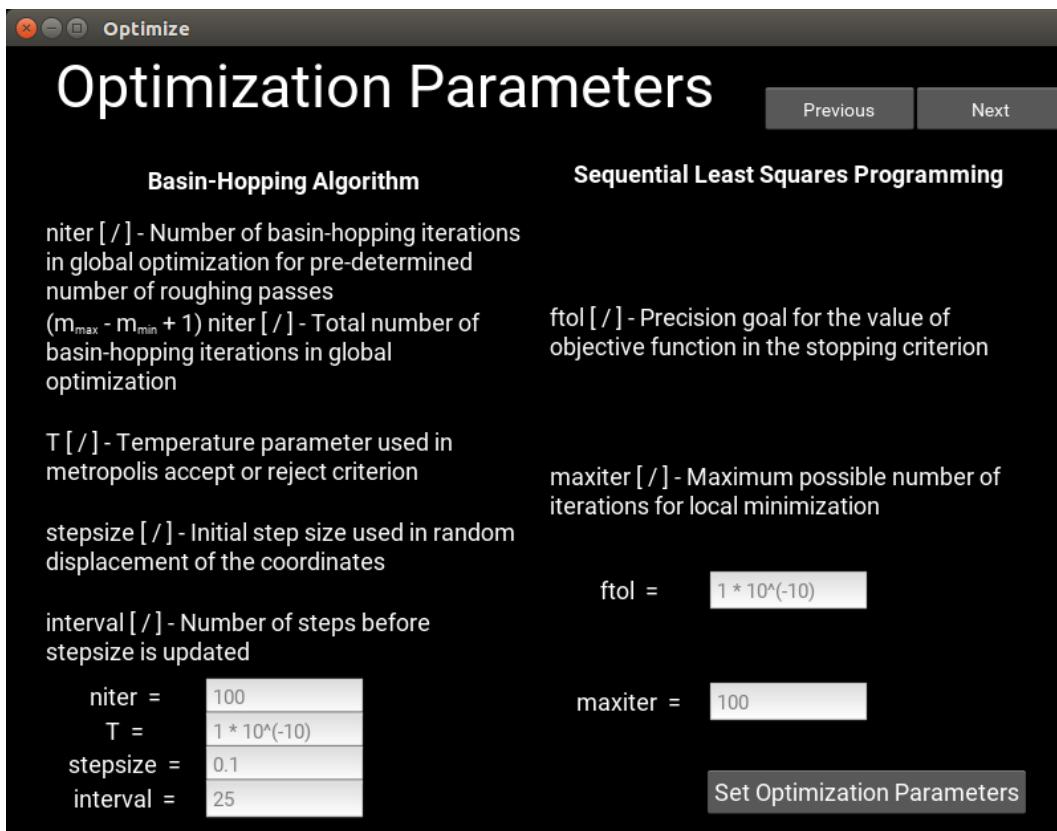
Slika 4.7. Granice matematičkog modela



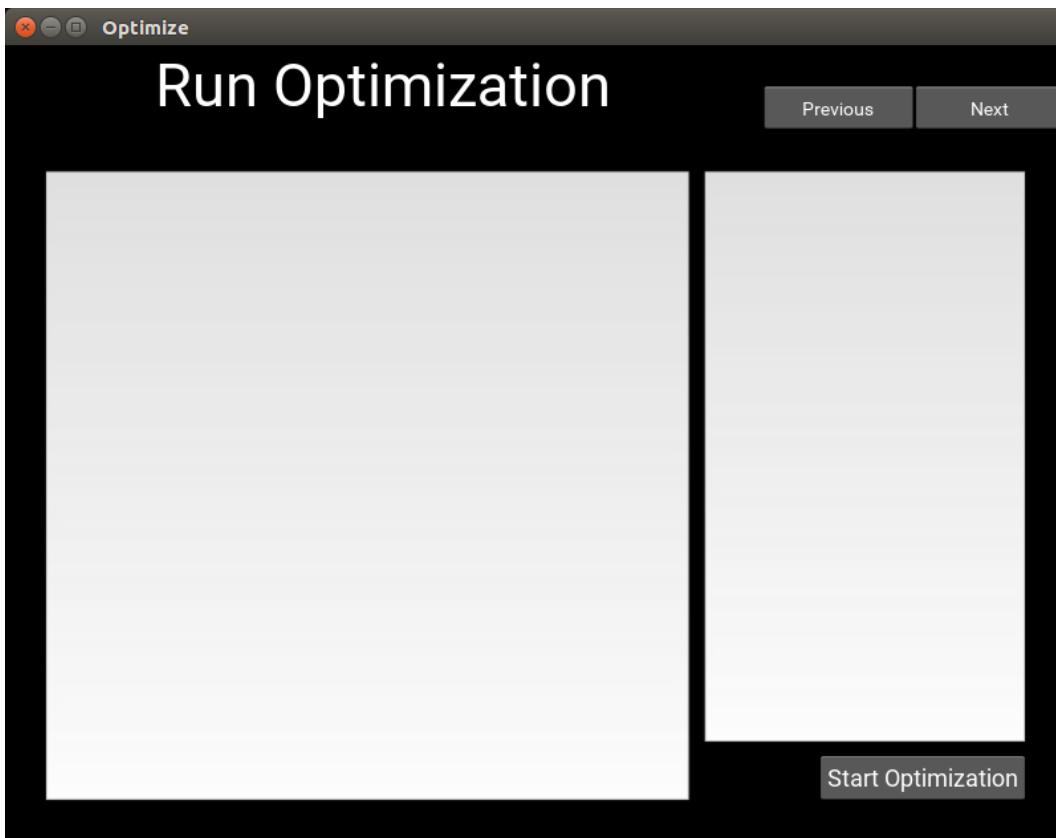
Slika 4.8. Odnosi parametara obrade i površinska hrapavost



Slika 4.9. Model sile rezanja i snage



Slika 4.10. Parametri optimizacije



Slika 4.11. Pokretanje optimizacije i ispis rezultata

Slika 4.9. prikazuje osmi ekran programskog rješenja, na kojem je potrebno unijeti sve parametre potrebne za računanje sile i snage potrebne za obradu, prema poglavlju 3.4. Slika 4.10. prikazuje deveti ekran optimizacije, na kojem je potrebno unijeti parametre optimizacije pri metodama traženja globalnog i lokalnog minimuma funkcije cilja, prema poglavljima 4.1. i 4.2. Slika 4.11. predstavlja završni ekran optimizacijskog programskega rješenja. Na završnom ekranu se optimizacija pokreće, daje se detaljan ispis svakog koraka optimizacije i posebno se izdvaja promađeni globalni minimum. Parametri obrade m , v_R , f_R , a_R , v_F , f_F i a_F se ispisuju u za to posebno predviđeno mjesto, uz poruke o uspješno, odnosno neuspješno izvršenoj optimizaciji. Također, na završnom ekranu se ispisuju i podaci o potrebnom broju iteracija metode i vrednovanja funkcije cilja u svrhu pronađaska globalnog optimuma.

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

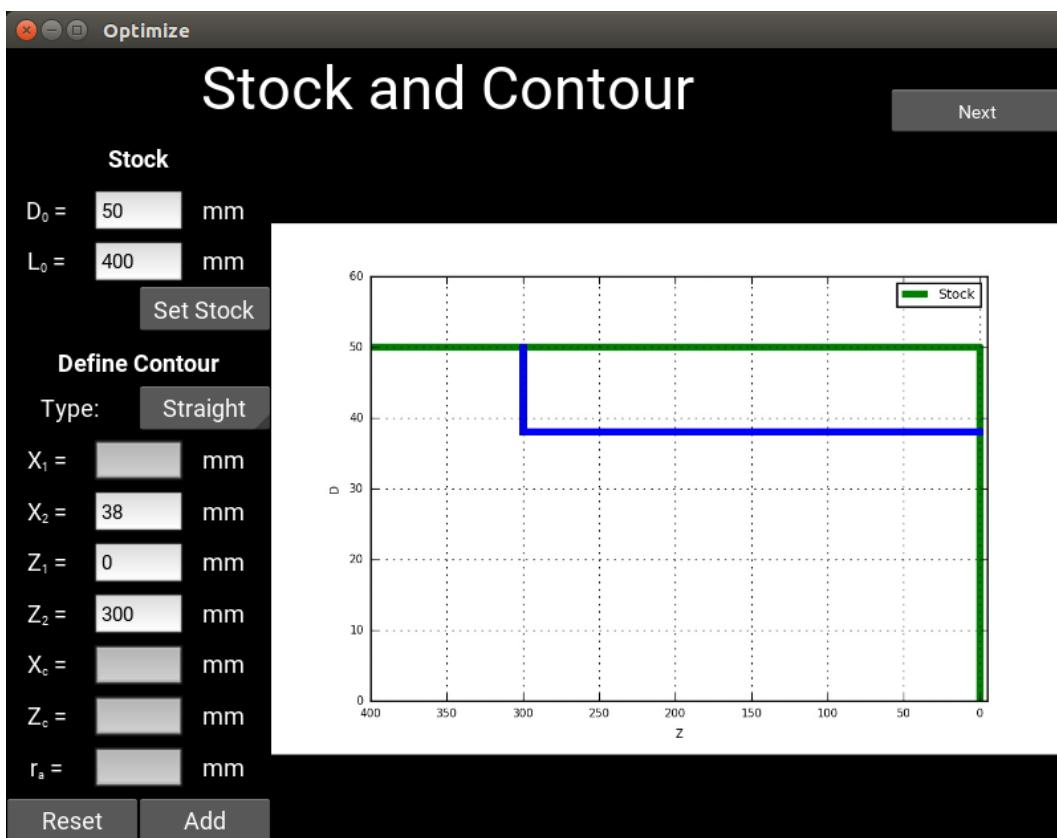
5. VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Verifikacija optimizacijskog programskog rješenja provedena je na dva načina. Prvi način obuhvaća verifikaciju unosom podataka korištenih u prethodnim istraživanjima prema literaturi [8, 9, 18]. Nakon toga se uspoređuju dobiveni rezultati i provjerava ispravnost modela.

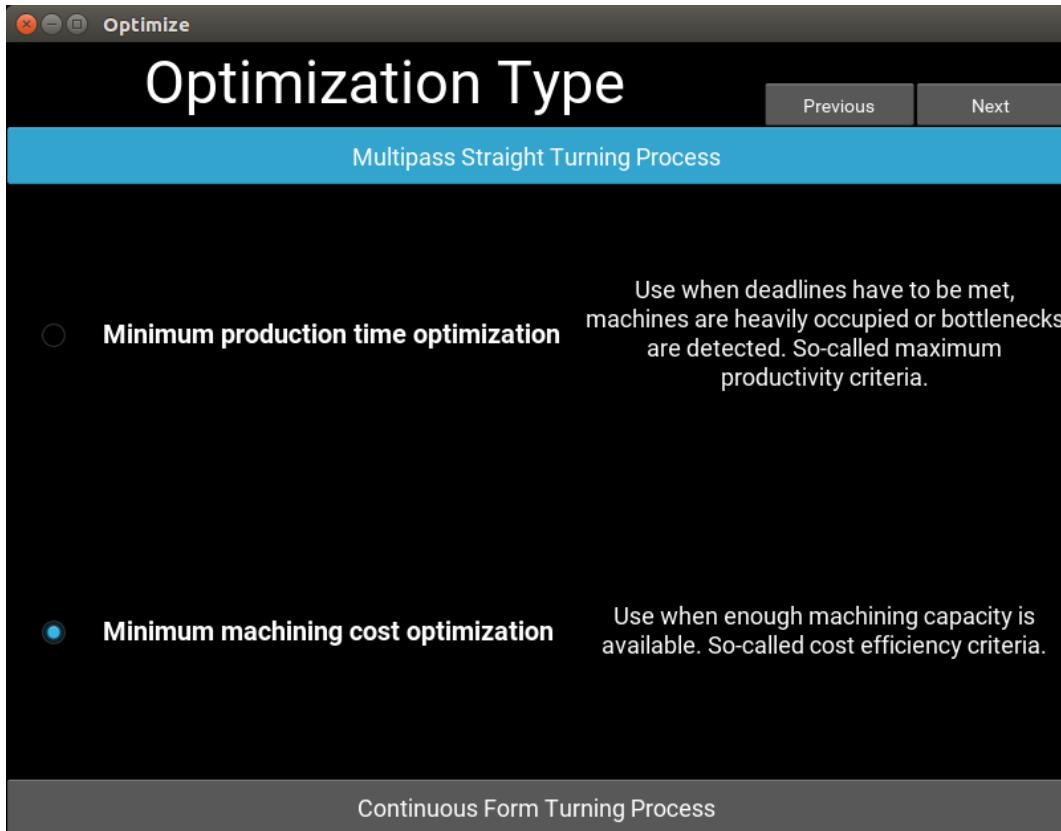
Drugi način predstavlja verifikaciju pomoću konkretnog slučaja u praksi. U svrhu verifikacije određene su konstante jednadžbe postojanosti alata za određenu kombinaciju alata i materijala obratka, izmjerena sva potrebna vremena i određeni ostali ulazni podaci u model. Nakon toga izvedena su mjerena potrebna za verifikaciju modela.

5.1. Verifikacija pomoću literature

U svrhu verifikacije programskog rješenja uneseni su parametri korišteni u znastvenim radovima pri optimizaciji procesa tokarenja u više prolaza [8, 9, 18]. U narednim slikama programskog rješenja su upisani svi parametri korišteni za optimizaciju.



Slika 5.1. Verifikacija - dimenzije ulaznog materijala i kontura



Slika 5.2. Verifikacija - odabir tipa optimizacije

$$\frac{C_p}{k_o} = t_L + t_{ts} + t_F + t_R + \left(t_c + \frac{k_t}{k_o} \right) \left(\frac{t_F + t_R}{T_L} \right) \Rightarrow \min$$

C_p [\$/piece] - Unit production cost

k_o [\$/min] - Operating cost (labour + overhead)

$k_o = 0.5$ \$/min

k_t [\$/edge] - Cutting edge cost

$k_t = 2.5$ \$/edge

t_L [min] - Part loading and unloading time

t_{ts} [min] - Tool setting time

t_F [min] - Total cutting time for finish machining

t_R [min] - Total cutting time for rough machining

t_c [min] - Tool changing time

T_L [min] - Tool life

Set Operating and Tool Cost

Slika 5.3. Verifikacija - unos troškova

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Optimize

Time Input

Previous Next

<p>Loading and unloading time</p> $t_L = \boxed{0.75} \text{ min}$ <p>Tool setting time</p> $t_s = \boxed{0.51} \text{ min}$ <p>Tool changing time</p> $t_c = \boxed{1.5} \text{ min}$	<p>Total cutting time for rough machining</p> $t_R = \sum_{i=1}^m \frac{\pi L D_{i-1}}{1000 v_R f_R}$ <p>Total cutting time for finish machining</p> $t_F = \frac{\pi L (D_F + 2a_F)}{1000 v_F f_F}$ <p>L [mm] - Cutting length D [mm] - Diameter v [m/min] - Cutting speed f [mm/rev] - Feed a [mm] - Depth of cut</p>
<input type="button" value="Set Times"/>	

Slika 5.4. Verifikacija - unos vremena

Optimize

Tool Life

Previous Next

<p>Taylor's tool life equation</p> $T = \frac{C_T}{v^{k_v} f^{k_f} a^{k_a}}$ $C_T = C^{k_v}$ <p>a_p [mm] - Depth of cut C_T, C [/] - Taylor's constant $C = \boxed{226.7933155}$</p> <p>k_v [/] - Cutting speed exponent $k_v = \boxed{5}$</p> <p>k_f [/] - Feed exponent $k_f = \boxed{1.75}$</p> <p>k_a [/] - Depth of cut exponent $k_a = \boxed{0.75}$</p>	<p>Tool life for roughing and finishing</p> $T_L = w T_R + (1 - w) T_F$ $T_L = \frac{t_R + t_F}{\frac{t_R}{T_R} + \frac{t_F}{T_F}}$ $T_R = \frac{C_T}{v_R^{k_v} f_R^{k_f} a_R^{k_a}}$ $T_F = \frac{C_T}{v_F^{k_v} f_F^{k_f} a_F^{k_a}}$ <p>T_L [min] - Combined tool life T_R [min] - Tool life for rough machining T_F [min] - Tool life for finish machining w [/] - Weight factor</p>
<input type="button" value="Set Constants"/>	

Slika 5.5. Verifikacija - Unos konstanti postojanosti alata

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Optimize

Bounds

Previous Next

<p>Rough Machining</p> <p>Cutting speed bounds</p> $50 \leq v_R \leq 500 \text{ m/min}$ <p>Feed bounds</p> $0.1 \leq f_R \leq 0.9 \text{ mm/rev}$ <p>Depth of cut bounds</p> $0.999 \leq a_R \leq 3.001 \text{ mm}$ <p>Depth of cut to feed ratio bounds</p> $2 \leq \frac{a_R}{f_R} \leq 20$ <p>Number of passes bounds</p> $1 \leq m \leq 5$ <p>Combined tool life bounds</p> $25 \leq T_L \leq 45 \text{ min}$	<p>Finish Machining</p> <p>Cutting speed bounds</p> $50 \leq v_F \leq 500 \text{ m/min}$ <p>Feed bounds</p> $0.1 \leq f_F \leq 0.9 \text{ mm/rev}$ <p>Depth of cut bounds</p> $0.999 \leq a_F \leq 3.001 \text{ mm}$ <p>Depth of cut to feed ratio bounds</p> $2 \leq \frac{a_F}{f_F} \leq 20$
--	---

Set Bounds

Slika 5.6. Verifikacija - unos granica modela

Optimize

Relations and Surface

Previous Next

<p>Parameter Relations</p> <p>Cutting speed relation</p> $v_F \geq k_1 v_R$ <p>$k_1 =$ <input type="text" value="1"/></p> <p>Feed relation</p> $f_R \geq k_2 f_F$ <p>$k_2 =$ <input type="text" value="2.5"/></p> <p>Depth of cut relation</p> $a_R \geq k_3 a_F$ <p>$k_3 =$ <input type="text" value="1"/></p>	<p>Surface Finish</p> <p>Finishing feed constraint</p> $f_F \leq \sqrt{32r_\varepsilon Ra}$ <p>r_ε [mm] - Cutting tool nose radius Ra [mm] - Roughness average</p> <p>$r_\varepsilon =$ <input type="text" value="1.2"/> mm</p> <p>$Ra =$ <input type="text" value="0.0025"/> mm</p> <p>Tool Entry and Exit</p> <p>Tool entry length</p> $L_1 =$ <input type="text" value="0"/> mm <p>Tool exit length</p> $L_2 =$ <input type="text" value="0"/> mm
---	---

Set Parameters

Slika 5.7. Verifikacija - unos koeficijenata relacije i površinske hrapavosti

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Optimize

Force and Power

Previous Next

Cutting Force $F = \frac{af^{1-m_c} K_c}{\sin^{m_c} \kappa_r} \leq F_{max}$ <p>K_c (N/mm²) - Specific cutting force for 1mm² chip section</p> <p>m_c [/] - Chip thickness factor</p> <p>κ_r [°] - Tool side cutting angle</p> <p>F_{max} [N] - Maximum allowable cutting force</p> <table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">K_c =</td> <td style="width: 15%;"><input type="text" value="1050"/></td> <td>N/mm²</td> </tr> <tr> <td>m_c =</td> <td><input type="text" value="0.1"/></td> <td></td> </tr> <tr> <td>K_r =</td> <td><input type="text" value="93"/></td> <td>°</td> </tr> <tr> <td>F_{max} =</td> <td><input type="text" value="2000"/></td> <td>N</td> </tr> </table>	K _c =	<input type="text" value="1050"/>	N/mm ²	m _c =	<input type="text" value="0.1"/>		K _r =	<input type="text" value="93"/>	°	F _{max} =	<input type="text" value="2000"/>	N	Cutting Power $P = \frac{Fv}{60 \times 10^3} \leq P_s \eta_s$ <p>P_s [kW] - Machine power</p> <p>η_s [/] - Power efficinency</p> <p>P_s = <input type="text" value="5"/> kW</p> <p>η_s = <input type="text" value="0.85"/></p> <p>Set Parameters</p>
K _c =	<input type="text" value="1050"/>	N/mm ²											
m _c =	<input type="text" value="0.1"/>												
K _r =	<input type="text" value="93"/>	°											
F _{max} =	<input type="text" value="2000"/>	N											

Slika 5.8. Verifikacija - unos parametara za računanje sile i snage stroja

Optimize

Optimization Parameters

Previous Next

Basin-Hopping Algorithm <p>niter [/] - Number of basin-hopping iterations in global optimization for pre-determined number of roughing passes</p> <p>(m_{max} - m_{min} + 1) niter [/] - Total number of basin-hopping iterations in global optimization</p> <p>T [/] - Temperature parameter used in metropolis accept or reject criterion</p> <p>stepsize [/] - Initial step size used in random displacement of the coordinates</p> <p>interval [/] - Number of steps before stepsize is updated</p> <table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">niter =</td> <td style="width: 15%;"><input type="text" value="50"/></td> </tr> <tr> <td>T =</td> <td><input type="text" value="0.01"/></td> </tr> <tr> <td>stepsize =</td> <td><input type="text" value="0.3"/></td> </tr> <tr> <td>interval =</td> <td><input type="text" value="25"/></td> </tr> </table>	niter =	<input type="text" value="50"/>	T =	<input type="text" value="0.01"/>	stepsize =	<input type="text" value="0.3"/>	interval =	<input type="text" value="25"/>	Sequential Least Squares Programming <p>ftol [/] - Precision goal for the value of objective function in the stopping criterion</p> <p>maxiter [/] - Maximum possible number of iterations for local minimization</p> <p>ftol = <input type="text" value="0.0000000001"/></p> <p>maxiter = <input type="text" value="100"/></p> <p>Set Optimization Parameters</p>
niter =	<input type="text" value="50"/>								
T =	<input type="text" value="0.01"/>								
stepsize =	<input type="text" value="0.3"/>								
interval =	<input type="text" value="25"/>								

Slika 5.9. Verifikacija - unos parametara nužnih za optimizaciju

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

The screenshot shows a software interface for optimization. The title bar says 'Optimize' and the main window title is 'Run Optimization'. There are 'Previous' and 'Next' buttons at the top right. The left panel displays a log of optimization steps:

```
0/640286e+02
2.00040000e-01 9.99000000e-01], f=8.72875672916, accept=True
236: x=[ 2.07013644e+02 5.08826080e-01 2.82754856e+00 2.
65648439e+02
2.18300345e-02 1.96553595e+00], f=18.4611602369, accept=False
237: x=[ 1.50644431e+02 5.00100000e-01 1.00020000e+00 2.
07639215e+02
2.00040000e-01 9.99000000e-01], f=8.72875672915, accept=True
238: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
239: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
240: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
241: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
242: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
243: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
244: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
245: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
246: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
247: x=[ 1.50644421e+02 5.00100000e-01 1.00020000e+00 2.
07639148e+02
2.00040000e-01 9.99000000e-01], f=8.72875672915, accept=True
248: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
249: x=[ 189.70624153 0.43288088 4.96385892 331.15879358 0.
44706402
4.82481819], f=21.8763301518, accept=False
250: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
```

The right panel contains summary statistics:

Optimization terminated successfully.
requested number of basinhopping iterations completed successfully
Function value: 3.88826346352
Function evaluations: 31261
Jacobian evaluations: 2029
Iterations: 50

Roughing:
m = 1.0 passes
vr = 119.621918111 m/min
fr = 0.603577723603 mm/rev
ar = 3.0 mm

Finishing:
vf = 164.850297433 m/min
ff = 0.241431089441 mm/rev
af = 3.0 mm

At the bottom right is a button: Optimization finished (Rerun)

Slika 5.10. Verifikacija - ispis rezultata optimizacije

Slika 5.10. prikazuje rezultate optmizacije. Vrijednost jediničnog troška izrade je prema izrazu (2.29):

$$C_p = 0.5 \times 3.888 = 1.944 \$$$

Slične vrijednosti su dobivene i u drugim izvorima za slične ulazne podatke [8, 9, 18]. Male razlike u parametrima obrade su uzrokovane razlikama u funkcijskim ograničenjima modela, zahtjevanoj točnosti modela i pristpu procesu optimizacije, odnosno korištenim algoritmima za traženje minimuma funkcije.

5.2. Verifikacija konkretnim slučajem u praksi

Za verifikaciju modela u praksi potrebno je imati pouzdanu jednadžbu postojanosti alata opisanu u poglavlju 2.2.3. U sljedećem potpoglavlju predložen je način određivanja ovisnosti postojanosti alata o parametrima obrade [40]. Nakon toga su prezentirani razultati mjerena vremena potrebnih

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

za optimizaciju, provedena je sama optimizacija procesa, te izrađen uzorak sa dobivenim parametrima obrade.

5.2.1. Određivanje jednadžbe postojanosti alata

Problemu određivanja jednadžbe postojanosti alata pristupljeno je na način predstavljen u literaturi [40]. Brzina rezanja v , posmak f i dubina rezanja a varirani su tijekom samog procesa obrade kako bi se uštedilo na utrošenom materijalu i vremenu eksperimenta.

Prepostavi li se da alat provede u zahvatu vrijeme t_1 pri postojanosti alata T_1 kod parametara obrade v_1 , f_1 i a_1 i vrijeme t_2 pri postojanosti T_2 kod parametara obrade v_2 , f_2 i a_2 , te da nakon obrade nastupa potpuno istrošenje alata. Također, prepostavi li se linearna ovisnost između istrošenja alata i vremena provedenog u zahvatu, dobiva se sljedeći izraz (5.1) [24]:

$$\frac{t_1}{T_1} + \frac{t_2}{T_2} = 1 \quad (5.1)$$

gdje je:

- t_1 [min] Vrijeme koje alat provede u zahvatu pri parametrima obrade v_1 , f_1 i a_1
- t_2 [min] Vrijeme koje alat provede u zahvatu pri parametrima obrade v_2 , f_2 i a_2
- T_1 [min] Postojanost alata pri parametrima obrade v_1 , f_1 i a_1
- T_2 [min] Postojanost alata pri parametrima obrade v_2 , f_2 i a_2

Iz izraza (5.1), za svaki j – ti upotrebljeni alat vrijedi izraz (5.2) [24]:

$$\sum_{i=1}^{n^j} \frac{t_i^j}{T_i^j} = 1 \quad (5.2)$$

gdje je:

- j [/] Broj alata
- n^j [/] Broj različitih parametara obrade pri kojima j – ti alat radi

Ako u obzir uzmemmo broj alata k koji su upotrebljeni u eksperimentu, te oblikovanjem izraza (5.2), dobivamo funkciju cilja prema izrazu (5.3) za određivanje jednadžbe postojanosti alata [24]:

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

$$f_{Tc} = \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^{n^j} \frac{t_i^j}{T_i^j} - 1 \right)^2 \quad (5.3)$$

gdje je:

k [/] Ukupan broj alata korištenih u eksperimentu

Kao model jednadžbe postojanosti alata T primjenjena je *proširena Taylorova jednadžba* obrađena u poglavlju 2.2.3. Metoda primjenjena za traženje minimuma funkcije f_{Tc} je diferencijalna evolucija [41]. Pri implementaciji algoritma diferencijalne evolucije korišten je programski jezik *Python* i modul *scipy.optimize.differential_evolution*. Diferencijalna evolucija je stohastički evolucijski algoritam koji se koristi pri traženju globalnog minimuma funkcije [42]. Koraci algoritma [41]:

1. Generiranje populacije koja bi trebala pokriti cijelo parametarsko područje omeđeno granicama
2. Mutacija kandidata sa ostalim kandidatima u svrhu stvaranja probnih kandidata
3. Rekombinacija („crossover“) probnih kandidata sa ostalim ciljanim kandidatima
4. Selekcija boljeg kandidata koji prelazi u sljedeći korak

Parametri koji se koriste u optimizaciji [42]:

<i>popsize</i>	Veličina populacije korištena za svaku varijablu koju treba optimizirati
<i>maxiter</i>	Maksimalan broj generacija preko kojih populacija evoluira
<i>tol</i>	Kriterij zaustavljanja procesa optimizacije
<i>mutation</i>	Konstanta mutacije, odnosno diferencijalni težinski faktor. Zadaje se u granicama ($mutation_{min}, mutation_{max}$), te se nasumično odabire pri svakoj generaciji populacije. Povećavanjem težinskog faktora se proširuje područje pretrage, ali i smanjuje konvergencija metode.
<i>recombination</i>	Konstanta rekombinacije, odnosno vjerojatnost križanja

Tablica 5.1. prikazuje podatke, sakupljene pri radu obradnih strojeva u realnim uvjetima, koji su potrebni za određivanje konstanti postojanosti alata C , k_v , k_f i k_a obrađenih u poglavlju 2.2.3.

Podaci su sortirani prema nazivu stroja, materijalu obratka i tipu pločice.

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Tablica 5.1. Eksperimentalni podaci potrebni za određivanje jednadžbe postojanosti alata

TS - 20C									
Materijal obratka	Tip pločice	Broj alata	Komada obrađeno	Broj različitih režima	Vrijeme po komadu [min]	v [m/min]	f [okr/min]	a [mm]	t [min]
Č.4320	DNMG 130504 MT TT5100	1	293	1	0,02666667	105,6	0,1	0,3	7,81333333
				2	0,00583333	104,5	0,1	2,455	1,70916667
				3	0,00218333	110,9	0,1	0,1	0,63971667
				4	0,016	116,9	0,1	1,8	4,688
TS - 62									
Materijal obratka	Tip pločice	Broj alata	Komada obrađeno	Broj različitih režima	Vrijeme po komadu [min]	v [m/min]	f [okr/min]	a [mm]	t [min]
Č.3990	DNMG 130504 MT TT5100	1	700	1	0,02604167	100,5	0,24	1	18,2291667
				2	0,02604167	89,8	0,24	0,85	18,2291667
				3	0,01111111	94,0381069	0,18	0,2	7,77777778
VDF Boehringer									
Materijal obratka	Tip pločice	Broj alata	Komada obrađeno	Broj različitih režima	Vrijeme po komadu [min]	v [m/min]	f [okr/min]	a [mm]	t [min]
Č.3990	DNMG 130504 MT TT5100	1	138	1	0,12028729	138,610809	0,2	0,4	16,5996464
				2	0,05119225	160	0,25	1,6	7,06453082
				3	0,04466952	160	0,2	0,4	6,16439383
				4	0,05	160	0,22	0,625	6,9
				5	0,17107526	150	0,15	0,3	23,6083859
				6	0,01111138	160	0,25	0,15	1,53364699
				7	0,02419026	160	0,25	1	3,33825635
		2	110	1	0,12028729	138,610809	0,2	0,4	13,2316022
				2	0,04740023	160	0,27	1,6	5,2140257
				3	0,04060866	160	0,22	0,4	4,46695205
				4	0,05	160	0,22	0,625	5,5
				5	0,11664222	150	0,22	0,3	12,8306445
				6	0,01029017	160	0,27	0,15	1,13191874
				7	0,02239839	160	0,27	1	2,46382313
HiCell									
Materijal obratka	Tip pločice	Broj alata	Komada obrađeno	Broj različitih režima	Vrijeme po komadu [min]	v [m/min]	f [okr/min]	a [mm]	t [min]
Č.4732	DNMG 130504 MT TT5100	1	67	1	0,07916813	100	0,2	0,815	5,30426504
				2	0,13194689	100	0,2	1	8,84044173
				3	0,00731206	100	0,1	0,35	0,48990781
				4	0,044	94,2	0,1	1	2,948
				5	0,04412659	78,8	0,1	0,9175	2,95648127
				6	0,04432286	75,9	0,1	0,25	2,96963138
				7	0,05284812	100	0,1	0,52	3,54082424
				8	0,014	96,6	0,1	0,5	0,938
				9	0,04299668	85,4	0,1	0,3	2,88077788
				10	0,00862667	100	0,1	0,25	0,57798656
		2	67	1	0,07916813	100	0,2	0,815	5,30426504
				2	0,13194689	100	0,2	1	8,84044173
				3	0,00731206	100	0,1	0,35	0,48990781
				4	0,044	94,2	0,1	1	2,948
				5	0,04412659	78,8	0,1	0,9175	2,95648127
				6	0,04432286	75,9	0,1	0,25	2,96963138
				7	0,05284812	100	0,1	0,52	3,54082424
				8	0,014	96,6	0,1	0,5	0,938
				9	0,04299668	85,4	0,1	0,3	2,88077788
				10	0,00862667	100	0,1	0,25	0,57798656

Slika 5.11. prikazuje primjer potpune istrošenosti rezne pločice. Detaljniji opis rezne pločice, radnog materijala i alatnog stroja biti će pružen u narednim poglavljima.



Slika 5.11. Potpuno istrošena rezna pločica tipa DNMG 130504 MT TT5100

Primjenom gore navedene metode i funkcije cilja po izrazu (5.3) za CNC tokarilicu VDF Boehringer provedena je optimizacija sa sljedećim parametrima:

<i>popsize</i>	40
<i>maxiter</i>	1000
<i>tol</i>	10^{-12}
<i>mutation</i>	$(mutation_{min} = 0,5, mutation_{max} = 1)$
<i>recombination</i>	0,6

Problem ima više mogućih rješenja [24], te je stoga proces optimizacije proveden više puta i na temelju pažljivog proučavanja rješenja i saznanja o okvirnim vrijednostima konstanti i eksponenata u jednadžbi postojanosti alata odabранo je optimalno rješenje. Ispod je prikazan rezultat optimizacije:

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

```
nfev: 11445
success: True
fun: 2.350988701644575e-38
x: array([ 105.32005408,      5.38788359,      3.64186859,
          0.97571631])
message: 'Optimization terminated successfully.'
nit: 142
```

gdje je:

- nfev* Broj poziva funkcije cilja f_{Tc}
- success* *True* – minimum pronađen, *False* – minimum nije pronađen
- fun* Vrijednost funkcije cilja f_{Tc} u pronađenom minimumu
- x* Vrijednosti traženih varijabli u minimumu funkcije. Varijable su poredane sljedećim redoslijedom (C, k_v, k_f, k_a) i definirane u poglavlju 2.2.3.
- message* Poruka vezana za uspjeh optimizacije ili pronađene greške
- nit* Broj iteracija, odnosno generacija populacije

Vrijednosti konstante i eksponenata postojanosti alata su sljedeće:

$$\begin{aligned} C &= 105,32005408 \\ k_v &= 5,38788359 \\ k_f &= 3,64186859 \\ k_a &= 0,97571631 \end{aligned}$$

Jednadžba (5.4) postojanosti alata korištena u optimizaciji procesa tokarenja u više prolaza je, prema izrazu (2.13), sljedeća:

$$T = \frac{105,32005408^{5,38788359}}{v^{5,38788359} f^{3,64186859} a^{0,97571631}} \quad (5.4)$$

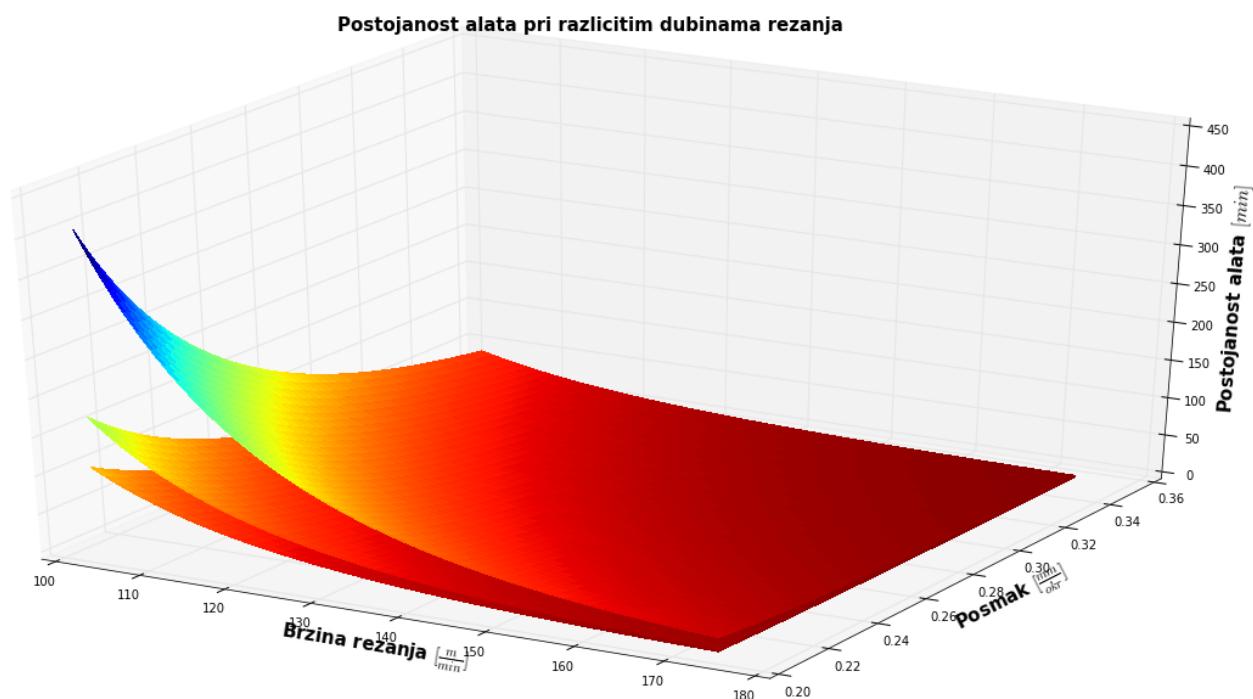
gdje je:

- v [m/min] Brzina rezanja
- f [mm/okr] Posmak po okretaju
- a [mm] Dubina rezanja

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

T [min] Postojanost alata

Slika 5.12. prikazuje graf ovisnosti postojanosti alata T o parametrima obrade v, f i a . Granice u kojima je izведен graf odgovaraju granicama unutar kojih se nalaze parametri obrade v_R, f_R, a_R, v_F, f_F i a_F dobiveni optimizacijom. Najniža ploha predstavlja ovisnost postojanosti alata o brzini rezanja i posmaku pri dubinama rezanja od $a = 3,5$ mm, što približno odgovara dubini rezanja pri gruboj obradi a_R dobivenoj u poglavlju 5.2.3. Srednja ploha predstavlja navedenu ovisnost pri dubini rezanja od $a = 2,15$ mm, a najviše ploha pri $a = 0,8$ mm, što približno odgovara dobivenoj dubini rezanja pri finoj obradi a_F .

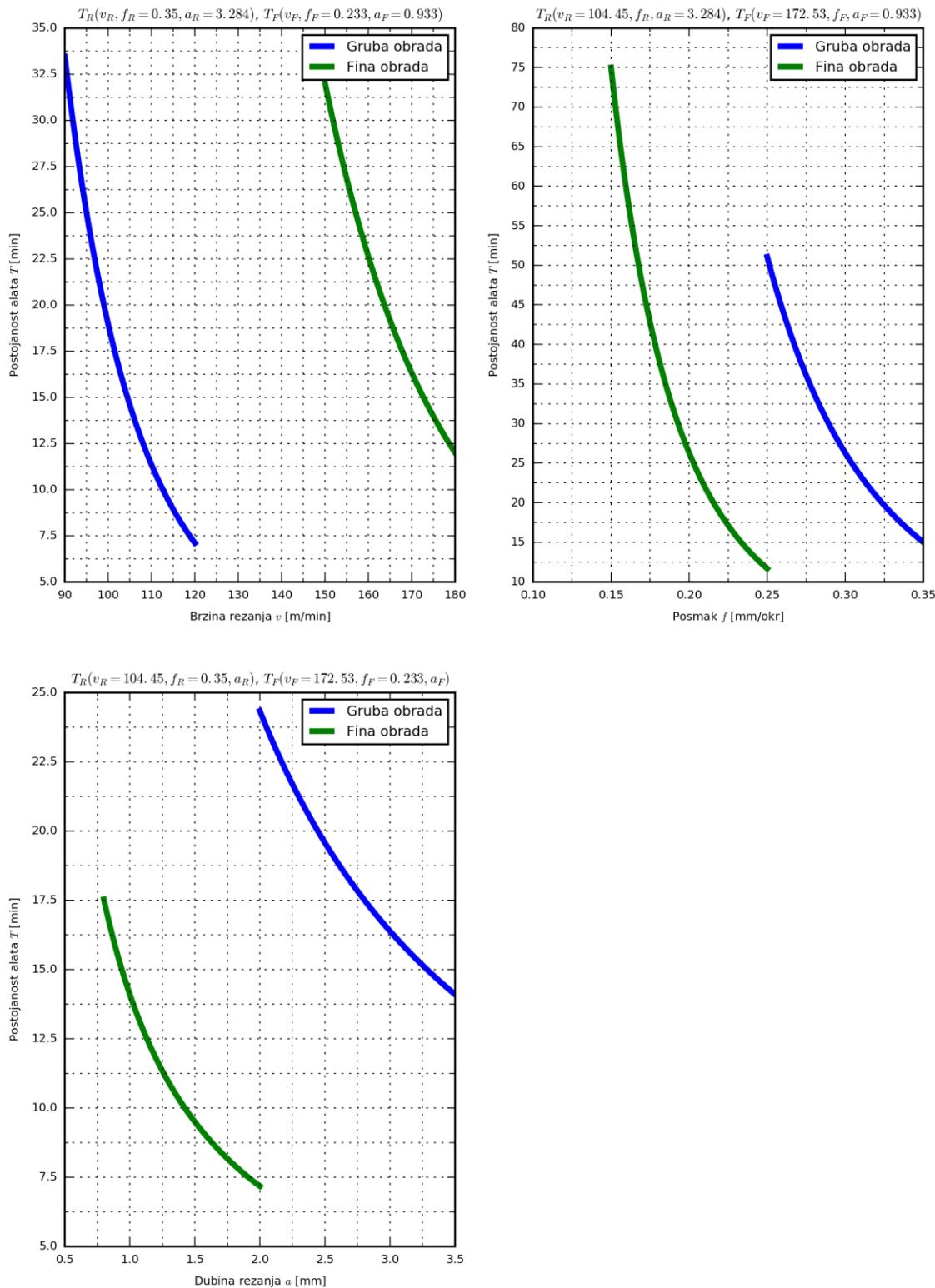


Slika 5.12. Ovisnost postojanosti alata o parametrima obrade u 3D prikazu

Slika 5.13. prikazuje razvijeni dijagram ovisnosti postojanosti alata pri gruboj T_R i finoj obradi T_F o parametrima obrade. U svakom grafu su dvije od tri vrijednosti parametara obrade (v, f, a) fiksirane i po iznosu su jednake onim dobivenima u poglavlju 5.2.3., a postojanost alata je prikazana u ovisnosti o trećoj vrijednosti parametra obrade. Također, lijepo su vidljivi odnosi između parametara obrade pri gruboj (v_R, f_R, a_R) i finoj obradi (v_F, f_F, a_F), te njihovi utjecaji na postojanost alata.

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Postojanost alata u ovisnosti o parametrima obrade



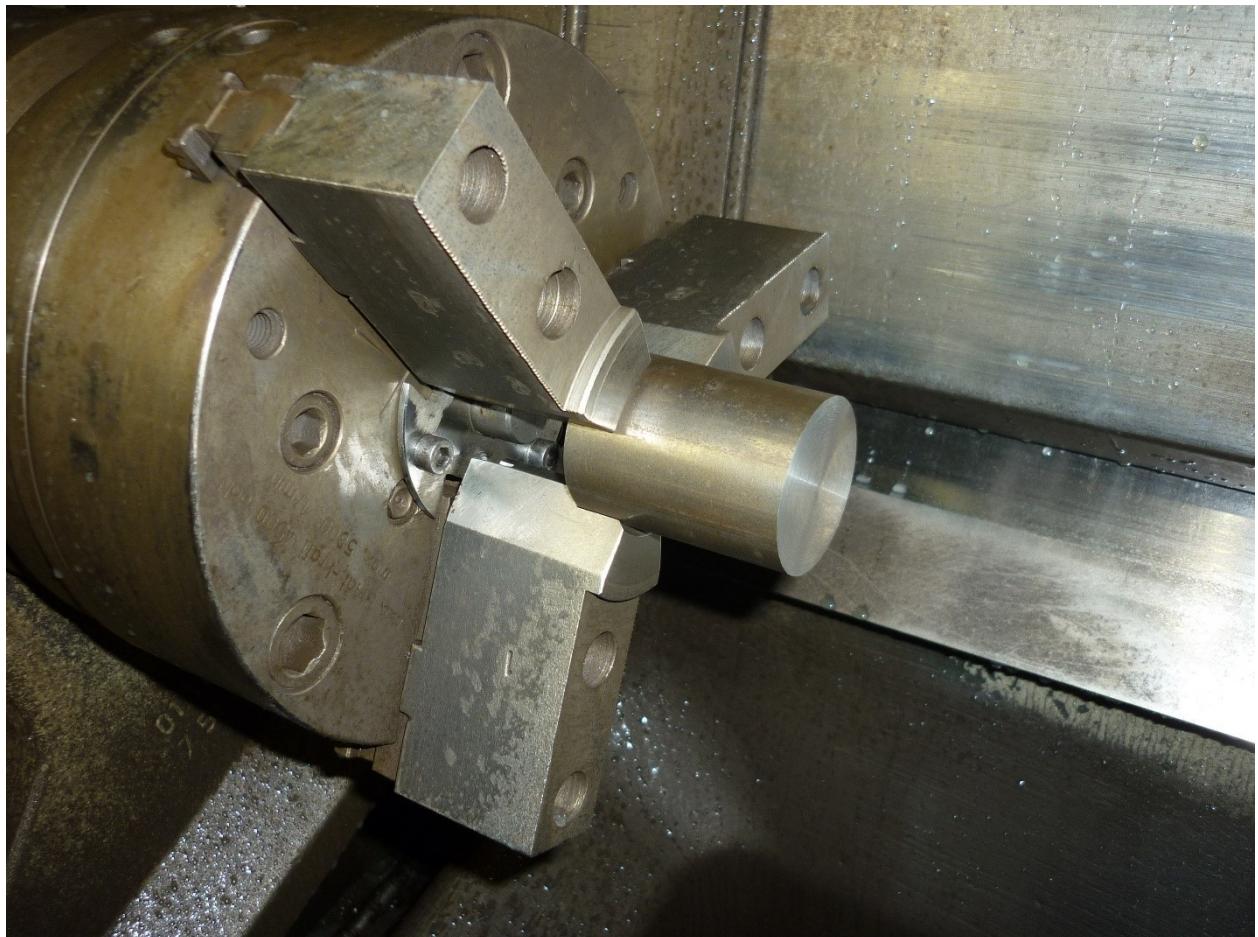
Slika 5.13. Razvijeni dijagram ovisnosti postojanosti alata o parametrima obrade pri gruboj i finoj obradi

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

5.2.2. Mjerenje vremena potrebnih za optimizaciju

Jednu skupinu ulaznih podataka u model optimizacije procesa tokarenja u više prolaza čine vrijeme potrebno za skidanje i stezanje obratka t_L , vrijeme potrebno za namještanje alata po prolazu t_s i vrijeme potrebno za promjenu alata t_c .

Vrijeme potrebno za skidanje i stezanje obratka t_L izmjereno je pomoću štoperice za obradak definiran u sljedećim poglavljima. Obradak je stegnut u stezne čeljusti, pri čemu se posebna pažnja обратила на pravilno pozicioniranje obratka i čistoću steznih čeljusti. Slika 5.14. prikazuje pravilno stegnut obradak.



Slika 5.14. Stezanje obratka u stezne čeljusti prije obrade

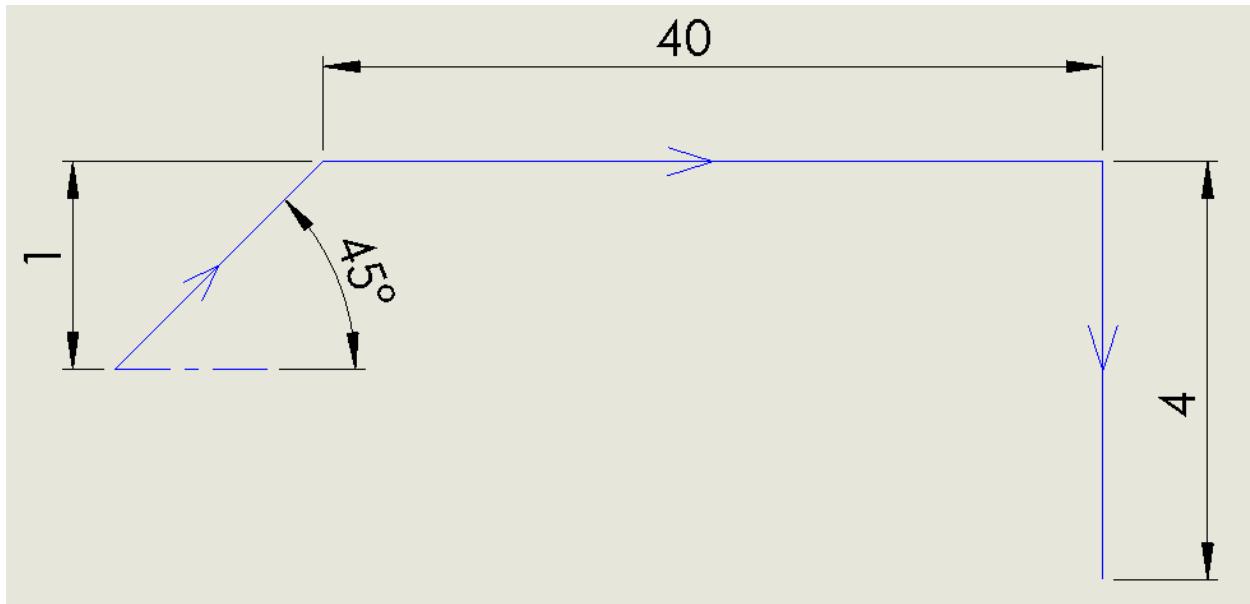
Izmjerena vrijednost potrebnog vremena za skidanje i stezanje obratka t_L je sljedeća:

$$t_L = 00:46,27 \text{ s} = 0,7711\dot{6} \text{ min}$$

Mjerenje vrijednosti vremena potrebnog za namještanje alata po prolazu t_s izvršeno je na način da je određeno odgovarajuće odmicanje alata od obratka prema obratku definiranom u poglavlju

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

5.2.3., zatim je napisan kratak NC program za PHILIPS upravljačku jedinicu alatnog stroja pomoću kojeg se upravo to odmicanje izvršava brzim hodom, te je program puštan nekoliko puta uz mjerjenje vremena potrebnog za izvršenje. Na kraju je uzeta prosječna vrijednost izmjerениh vremena i proglašena vremenom potrebnim za namještanje alata po prolazu t_s . Slika 5.15. prikazuje namještanje alata po svakom prolazu.



Slika 5.15. Namještanje alata po prolazu

Korišteni NC program se sastoji od naziva programa, odabira nul-točke programa, područja rada vretena, odabira alata, pozicioniranja u nul-točku i izvršenja gibanja brzim hodom prema prethodnoj slici. Izgled programa:

```
N9600  
N10 G55 M40  
N20 T1013  
N30 G0 X0 Z0  
N40 U1 W1  
N50 W40  
N60 U-4  
N70 M30
```

Tablica 5.2. prikazuje izmjerena vremena, te njihovu srednju vrijednost, odnosno vrijeme namještanja alata po prolazu t_s .

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

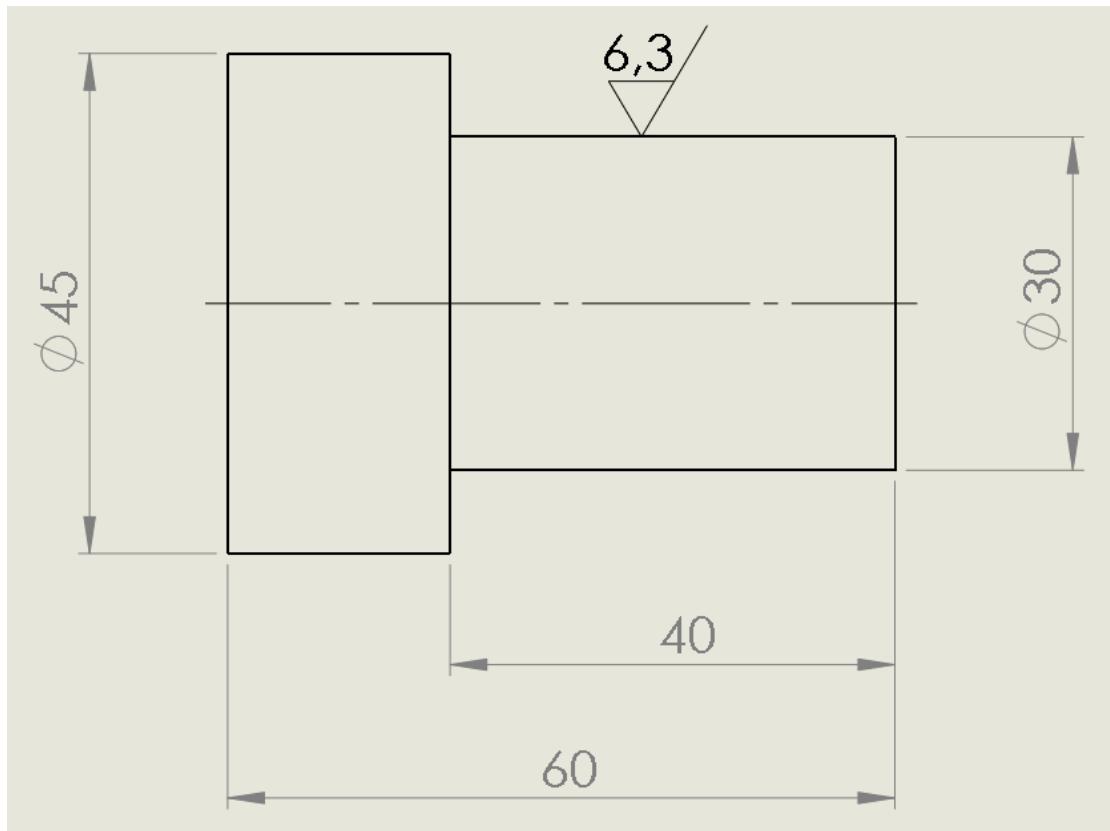
Tablica 5.2. Određivanje vremena namještanja alata po prolazu

Izmjerena vremena [s]	Srednja vrijednost, Vrijeme namještanja alata po prolazu
00: 00,91	$t_s = 0,9375 \text{ s} = 0,015625 \text{ min}$
00: 00,92	
00: 00,93	
00: 00,99	

Vrijeme potrebno za promjenu alata t_c isto je dobiveno mjeranjem. Mjerilo se vrijeme potrebno za skidanje rezne pločice, odabir novog reznog vrha i ponovno pritezanje pločice na držač. Također, posebna pažnja se posvetila pravilnom umetanju rezne pločice i čistoći držača. Izmjerena vrijednost vremena potrebnog za promjenu alata t_c je sljedeća:

$$t_c = 03: 07,54 \text{ s} = 3,1256 \text{ min}$$

5.2.3. Optimizacija procesa tokarenja za konkretni slučaj

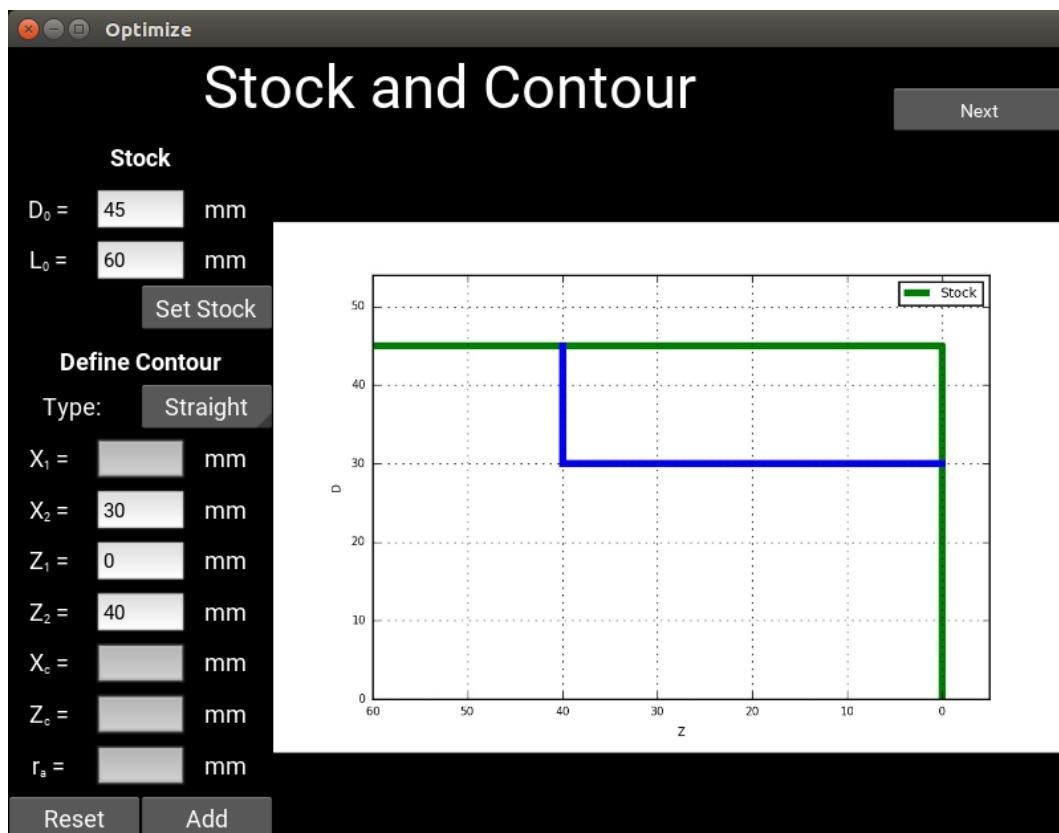


Slika 5.16. Obradak pomoću kojeg se vrši verifikacija modela

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

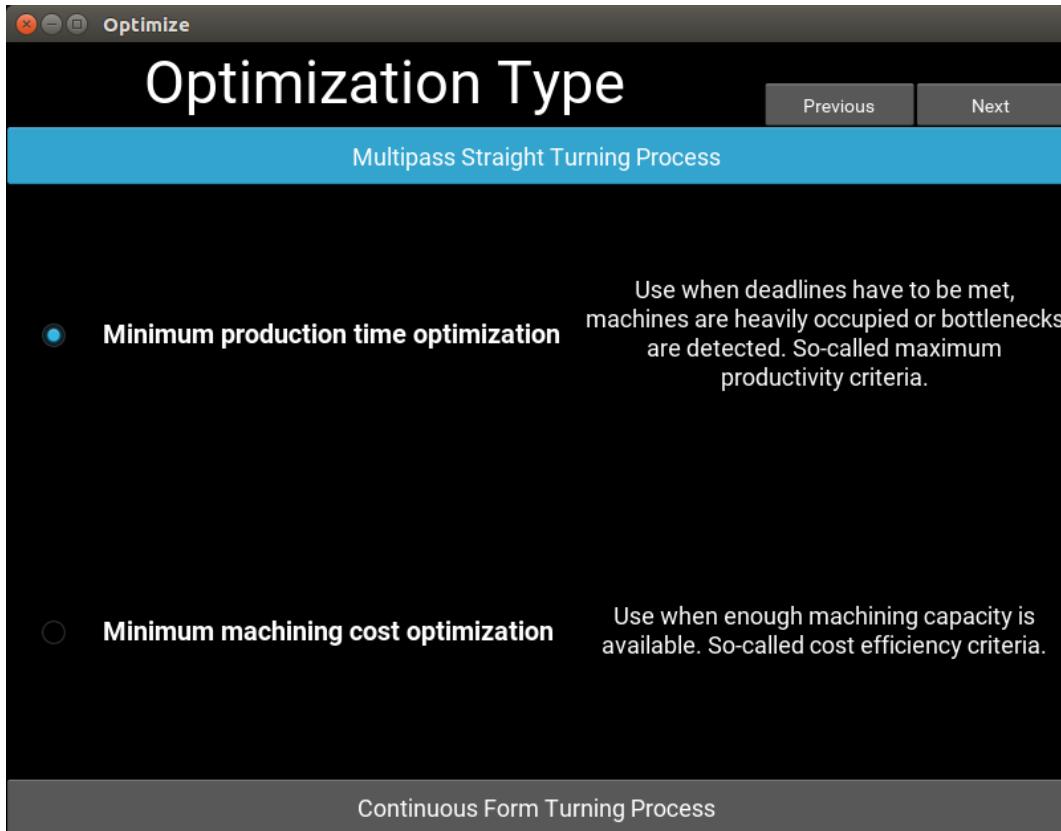
Slika 5.16. prikazuje obradak, čija je svrha verifikacija programskog rješenja za optimizaciju procesa tokarenja u više prolaza.

U narednim slikama je prikazano programsko rješenje sa ulaznim podacima i, na kraju, rezultat optimizacije, odnosno dobivene vrijednosti parametara obrade za zadani slučaj. Vremena upotrebljena u modelu su ona izmjerena u poglavlju 5.2.2. Pri unosu konstanti postojanosti alata, unesene su vrijednosti dobivene u poglavlju 5.2.1. Kod određivanja granica parametara obrade pri gruboj i finoj obradi, u obzir su uzete granice primjenjivosti jednadžbe postojanosti alata u poglavlju 5.2.1 i granice preporučene od proizvođača alata. Dodatak B: Granice parametara obrade proizvođača alata [30] definira preporučene granice parametara obrade ovisno o tipu pločice i obrađivanom materijalu. Tablica 3.1. određuje granice zbog vitkosti strugotine ovisne o materijalu obratka. Granice broja prolaza pri grubom tokarenju m , postojanosti alata T_L i koeficijenata odnosa parametara obrade k_1 , k_2 i k_3 određene su na temelju iskustvenih saznanja. Parametri potrebni za računanje snage rezanja određeni su prema postupku u poglavlju 3.4, a karakteristike stroja su navedene u poglavlju 5.2.4.

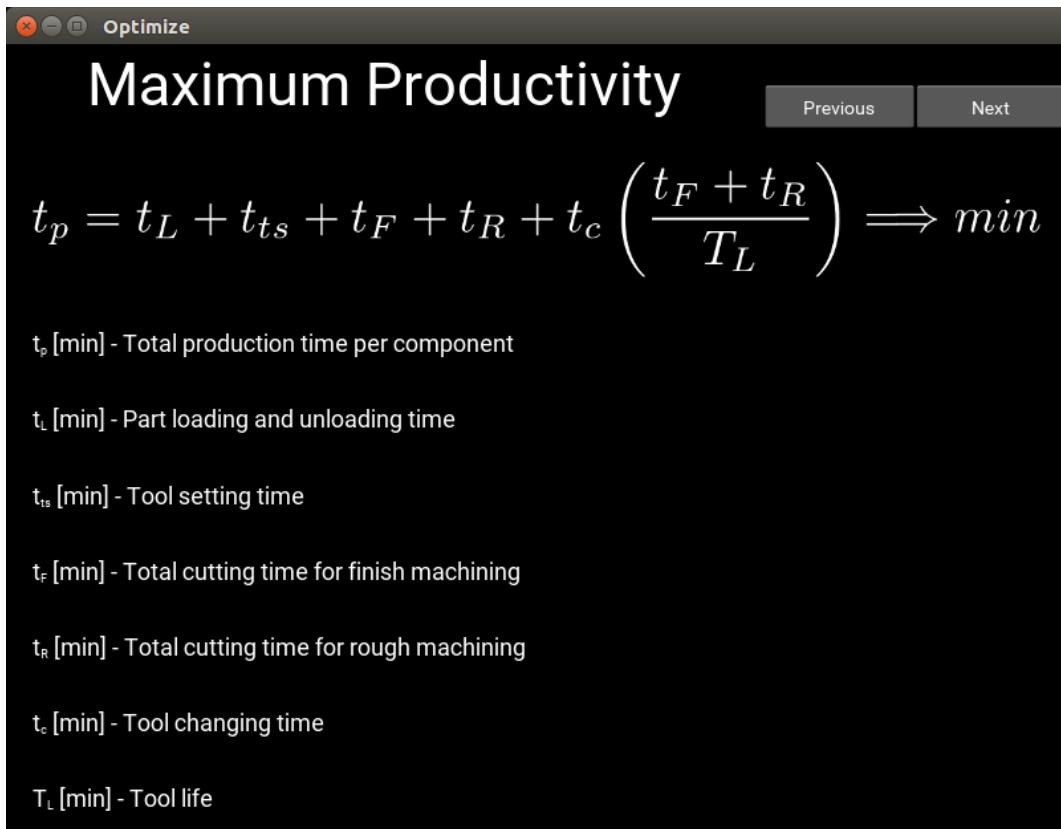


Slika 5.17. Verifikacija ekperimentom - dimenzije ulaznog materijala i kontura

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA



Slika 5.18. Verifikacija eksperimentom - odabir tipa optimizacije



Slika 5.19. Verifikacija eksperimentom - opis modela po kriteriju produktivnosti

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Optimize

Time Input

Previous Next

Loading and unloading time $t_L = \boxed{0.77116666}$ min Tool setting time $t_s = \boxed{0.015625}$ min Tool changing time $t_c = \boxed{3.125666666}$ min	Total cutting time for rough machining $t_R = \sum_{i=1}^m \frac{\pi L D_{i-1}}{1000 v_R f_R}$ Total cutting time for finish machining $t_F = \frac{\pi L (D_F + 2a_F)}{1000 v_F f_F}$ L [mm] - Cutting length D [mm] - Diameter v [m/min] - Cutting speed f [mm/rev] - Feed a [mm] - Depth of cut
<input type="button" value="Set Times"/>	

Slika 5.20. Verifikacija eksperimentom - unos vremena

Optimize

Tool Life

Previous Next

Taylor's tool life equation $T = \frac{C_T}{v^{k_v} f^{k_f} a^{k_a}}$ $C_T = C^{k_v}$ a _p [mm] - Depth of cut C _T , C [/] - Taylor's constant $C = \boxed{105.32005408}$ k _v [/] - Cutting speed exponent $k_v = \boxed{5.38788359}$ k _f [/] - Feed exponent $k_f = \boxed{3.64186859}$ k _a [/] - Depth of cut exponent $k_a = \boxed{0.97571631}$	Tool life for roughing and finishing $T_L = w T_R + (1-w) T_F$ $T_L = \frac{t_R + t_F}{T_R + T_F}$ $T_R = \frac{C_T}{v_R^{k_v} f_R^{k_f} a_R^{k_a}}$ $T_F = \frac{C_T}{v_F^{k_v} f_F^{k_f} a_F^{k_a}}$ T _L [min] - Combined tool life T _R [min] - Tool life for rough machining T _F [min] - Tool life for finish machining w [/] - Weight factor
<input type="button" value="Set Constants"/>	

Slika 5.21. Verifikacija eksperimentom - unos konstanti postojanosti alata

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Optimize

Bounds

Rough Machining

Cutting speed bounds

$$90 \leq v_R \leq 180 \text{ m/min}$$

Feed bounds

$$0.1 \leq f_R \leq 0.35 \text{ mm/rev}$$

Depth of cut bounds

$$0.8 \leq a_R \leq 3.5 \text{ mm}$$

Depth of cut to feed ratio bounds

$$4 \leq \frac{a_R}{f_R} \leq 16$$

Number of passes bounds

$$2 \leq m \leq 5$$

Combined tool life bounds

$$15 \leq T_L \leq 90 \text{ min}$$

Finish Machining

Cutting speed bounds

$$90 \leq v_F \leq 180 \text{ m/min}$$

Feed bounds

$$0.1 \leq f_F \leq 0.35 \text{ mm/rev}$$

Depth of cut bounds

$$0.8 \leq a_F \leq 3.5 \text{ mm}$$

Depth of cut to feed ratio bounds

$$4 \leq \frac{a_F}{f_F} \leq 16$$

Set Bounds

Slika 5.22. Verifikacija eksperimentom - unos granica modela

Optimize

Relations and Surface

Parameter Relations

Cutting speed relation

$$v_F \geq k_1 v_R$$

$k_1 =$

Feed relation

$$f_R \geq k_2 f_F$$

$k_2 =$

Depth of cut relation

$$a_R \geq k_3 a_F$$

$k_3 =$

Surface Finish

Finishing feed constraint

$$f_F \leq \sqrt{32r_\varepsilon Ra}$$

r_ε [mm] - Cutting tool nose radius
 Ra [mm] - Roughness average

$r_\varepsilon =$ mm

$Ra =$ mm

Tool Entry and Exit

Tool entry length

$$L_1 =$$
 mm

Tool exit length

$$L_2 =$$
 mm

Set Parameters

Slika 5.23. Verifikacija eksperimentom - unos koeficijenata odnosa i hrapavosti površine

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Optimize

Force and Power

Cutting Force

$$F = \frac{af^{1-m_c} K_c}{\sin^{m_c} \kappa_r} \leq F_{max}$$

K_c (N/mm²) - Specific cutting force for 1mm² chip section

m_c [/] - Chip thickness factor

κ_r [°] - Tool side cutting angle

F_{max} [N] - Maximum allowable cutting force

K_c =	1350	N/mm ²
m_c =	0.21	
κ_r =	93	°
F_{max} =	2000	N

Cutting Power

$$P = \frac{Fv}{60 \times 10^3} \leq P_s \eta_s$$

P_s [kW] - Machine power

η_s [/] - Power efficinacy

P_s = kW

η_s =

Set Parameters

Slika 5.24. Verifikacija eksperimentom - unos parametara za računanje sile i snage stroja

Optimize

Optimization Parameters

Basin-Hopping Algorithm

n_{iter} [/] - Number of basin-hopping iterations in global optimization for pre-determined number of roughing passes

$(m_{max} - m_{min} + 1) n_{iter}$ [/] - Total number of basin-hopping iterations in global optimization

T [/] - Temperature parameter used in metropolis accept or reject criterion

$stepsize$ [/] - Initial step size used in random displacement of the coordinates

$interval$ [/] - Number of steps before stepsize is updated

n_{iter} =	50
T =	0.01
$stepsize$ =	0.15
$interval$ =	25

Sequential Least Squares Programming

$ftol$ [/] - Precision goal for the value of objective function in the stopping criterion

$maxiter$ [/] - Maximum possible number of iterations for local minimization

$ftol$ =

$maxiter$ =

Set Optimization Parameters

Slika 5.25. Verifikacija eksperimentom - unos parametara optimizacije

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

The screenshot shows a software interface for optimization. The title bar says 'Optimize' and the main window title is 'Run Optimization'. There are 'Previous' and 'Next' buttons at the top right. The left panel displays a log of optimization steps:

```
0.22099501], t=2.09453290105, accept=False
188: x=[ 122.37789022  0.35      1.46345456 180.      0.20014648
     0.8      ], f=1.77650849629, accept=True
189: x=[ 120.40953709  0.35      1.6      180.      0.2      0.8
     ], f=1.78525192995, accept=True
190: x=[ 120.21861249  0.35      1.6      180.      0.20388824
     0.8      ], f=1.78388350166, accept=True
191: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
192: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
193: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
194: x=[ 120.40834217  0.35      1.6      180.      0.2      0.8
     ], f=1.7852520879, accept=False
195: x=[ 124.13017557  0.34752636  1.39010248 180.      0.
20000001
     0.8      ], f=1.77322347217, accept=True
196: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
197: x=[ nan nan nan nan nan nan], f=nan, accept=False
198: x=[ 121.28233155  0.34777027  1.39131782 159.11292538  0.
21894992
     0.8      ], f=1.77429732221, accept=True
199: x=[ 9.18113340e+01  3.10791602e-01  1.08968300e+00  2.
21592305e+02
     2.68140569e-01  1.37264588e-01], f=1.9427832476, accept=False
200: x=[ 120.593157  0.35      1.6      180.      0.2      0.8      ], f=1.
7852316861, accept=False
```

The right panel contains optimization statistics:

```
Optimization terminated successfully.
requested number of
basinhopping iterations
completed successfully
Function value: 1.29647257271
Function evaluations: 31805
Jacobian evaluations: 2327
Iterations: 50

Roughing:
m = 2.0 passes
vr = 104.449394057 m/min
fr = 0.35 mm/rev
ar = 3.28333333333 mm

Finishing:
vf = 172.528408275 m/min
ff = 0.233333333333 mm/rev
af = 0.933333333333 mm
```

At the bottom right is a button labeled 'Optimization finished (Rerun)'.

Slika 5.26. Verifikacija eksperimentom - rezultati optimizacije

U narednom tekstu dan je pregled rezultata optimizacije u svrhu verifikacije modela.

Iznos jediničnog vremena izrade prema izrazu (2.28) je:

$$t_p = 1,296 \text{ min}$$

Parametri obrade pri grubom tokarenju su sljedeći:

$$m = 2 \text{ prolaza}$$

$$v_R = 104,45 \text{ m/min}$$

$$f_R = 0,35 \text{ mm/okr}$$

$$a_R = 3,283 \text{ mm}$$

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Pri finoj obradi dobiveni su parametri:

$$v_F = 172,53 \text{ m/min}$$

$$f_F = 0,2\dot{3} \text{ mm/okr}$$

$$a_F = 0,9\dot{3} \text{ mm}$$

5.2.4. Izrada i kontrola uzorka pomoću dobivenih parametara obrade

Kako bi se programsko rješenje verificiralo, izrađen je uzorak sa parametrima obrade dobivenim u prethodnom poglavlju. Slika 5.27. i Slika 5.28. prikazuju CNC tokarilicu VDF – Boehringer 180C pomoću koje je izrađen uzorak. Karakteristike alatnog stroja su sljedeće:

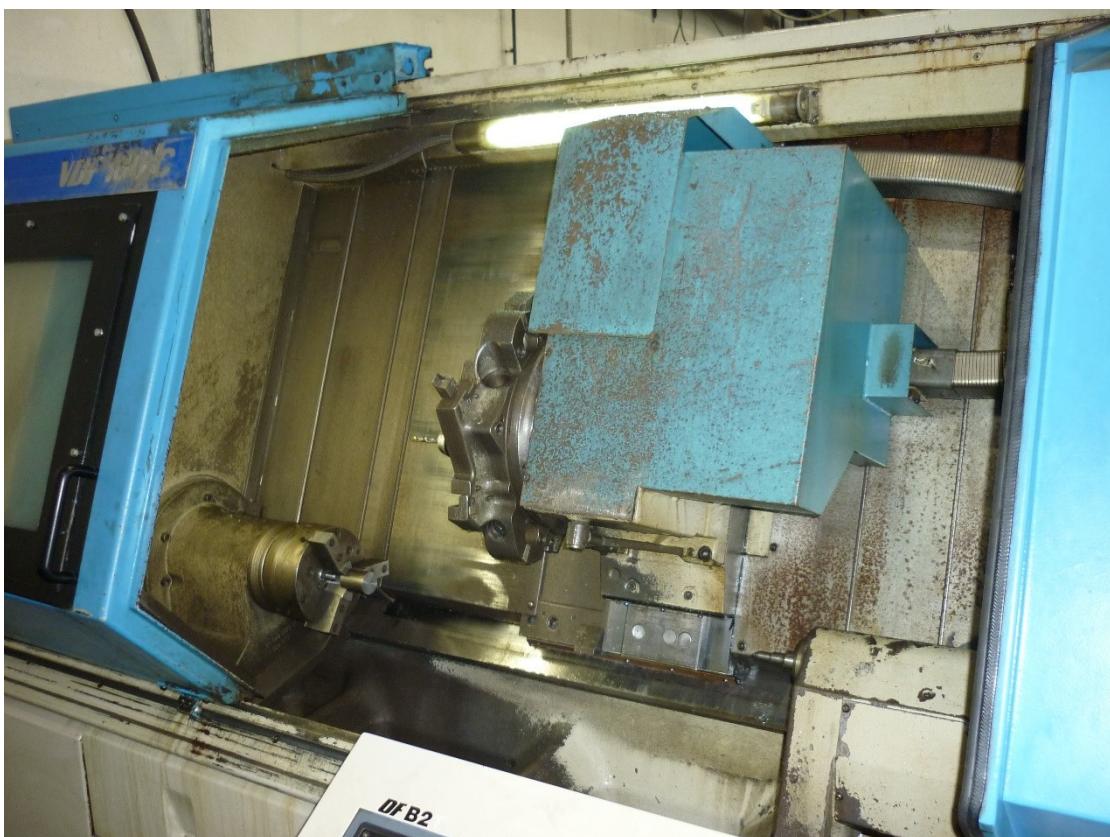
Promjer tokarenja:	250 mm
Duljina tokarenja:	1 000 mm
Upravljačka jedinica:	PHILIPS DF B2
Raspon posmaka:	0 – 10 000 mm/min
Brzi hod:	10 000 mm/min
Broj okretaja vretena:	230 – 2 300 okr/min
Broj alata:	12
Snaga pogonskog elektromotora:	25 kW
Masa:	7 500 kg
Duljina stroja:	4985 mm
Širina stroja:	2062 mm
Visina stroja:	2200 mm
Konjić:	Da
Stupanj iskoristivosti:	0,7 (procjenjeno)

Iako je maksimalna snaga alatnog stroja 25 kW, u modelu se koristilo 5 kW zbog starosti stroja i pojave vibracija.

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA



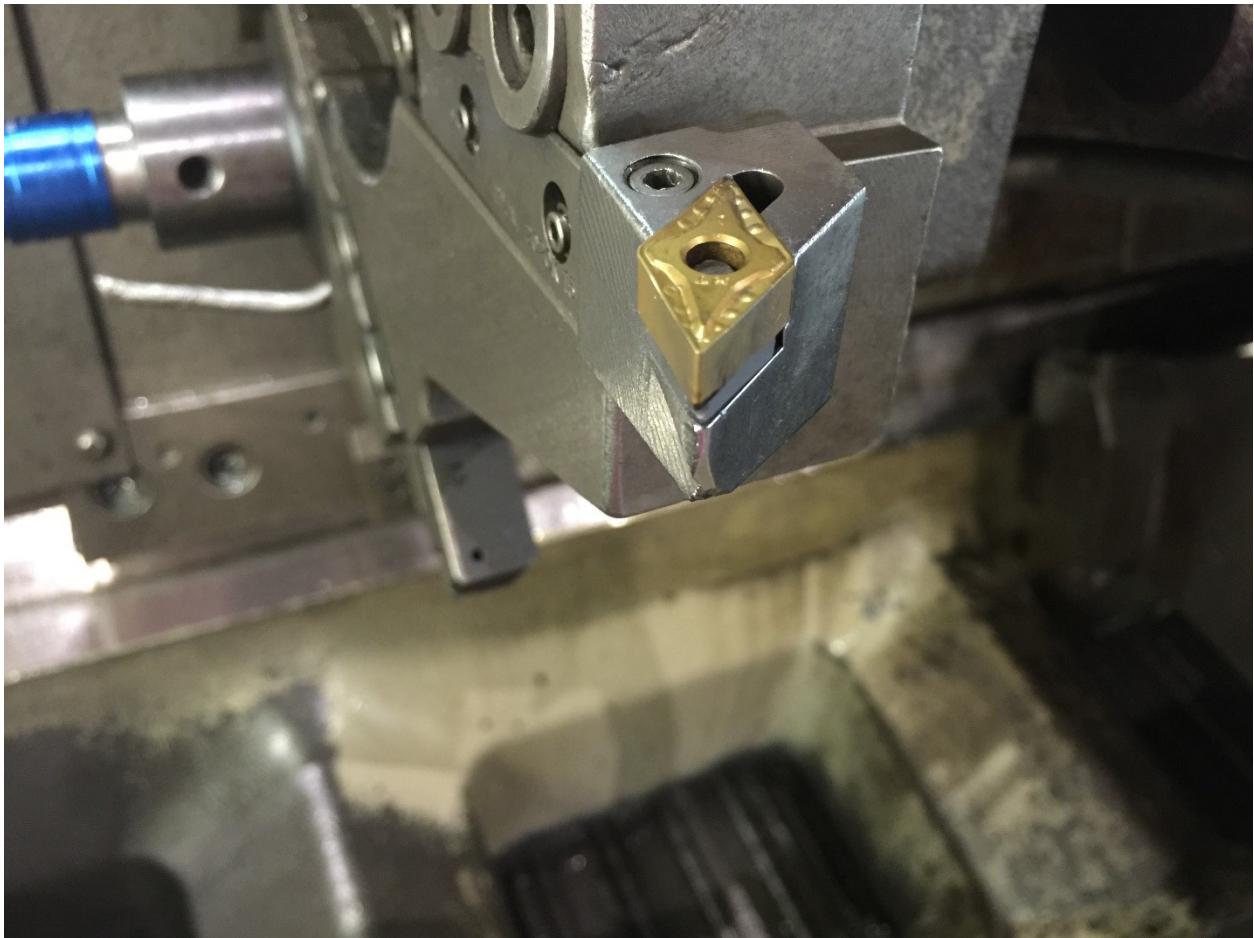
Slika 5.27. CNC tokarljica VDF - Boehringer 180C



Slika 5.28. CNC tokarljica VDF - Boehringer 180C otvorena

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Nadalje, pri izradi uzorka koristio se alat sa prislonim kutom $\kappa_r = 93^\circ$ i rezna pločica proizvođača *TaeguTec* tipa DNMG 130504 MT kvalitete TT5100 sa četiri rezne oštice [30]. Slika 5.29. prikazuje gore navedeni držač i reznu pločicu.



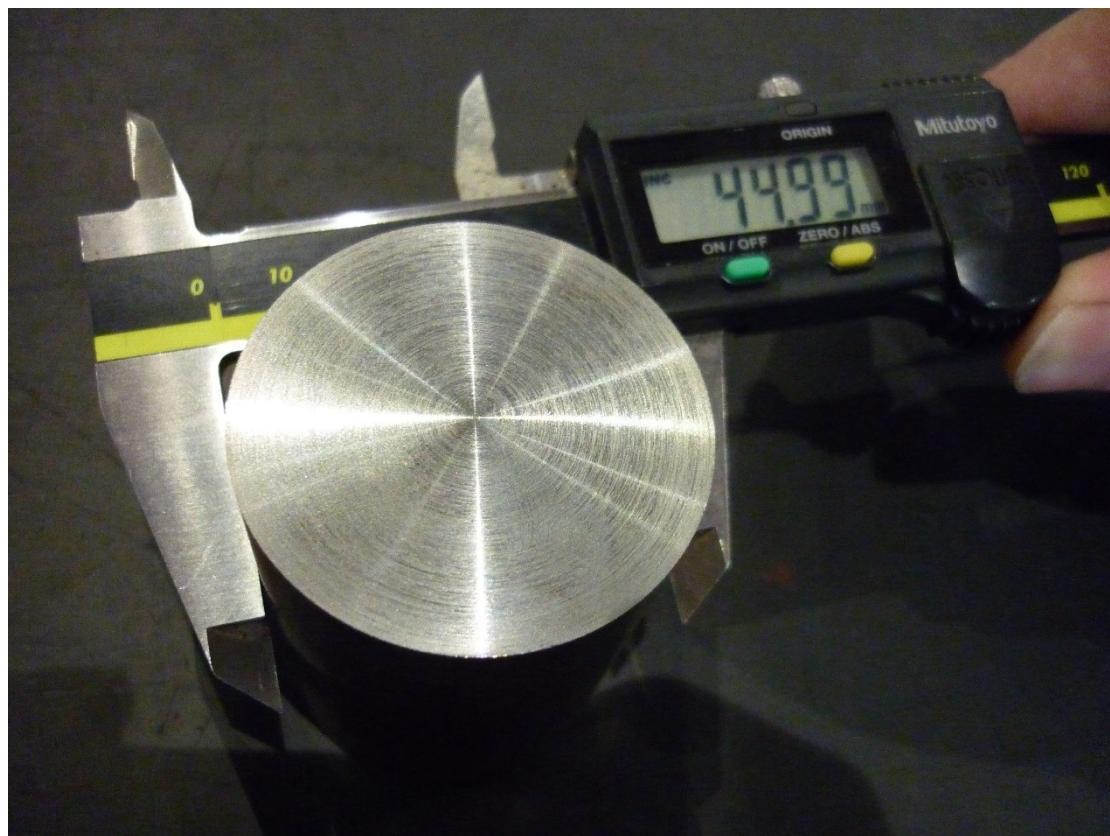
Slika 5.29. Držač i pločica DNMG 130504 MT

Materijal od kojega je uzorak izrađen je čelik 9 SMn 28 prema DIN-u, odnosno Č.3990 prema JUS-u. Ulazni oblik materijala je hladno vučena šipka promjera $D_0 = 45$ mm i duljine $L_0 = 60$ mm. Tablica 5.3 prikazuje sastav i svojstva gore navedenog čelika, a Slika 5.30. i Slika 5.31. pokazuju dimenzije i oblik ulaznog materijala.

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

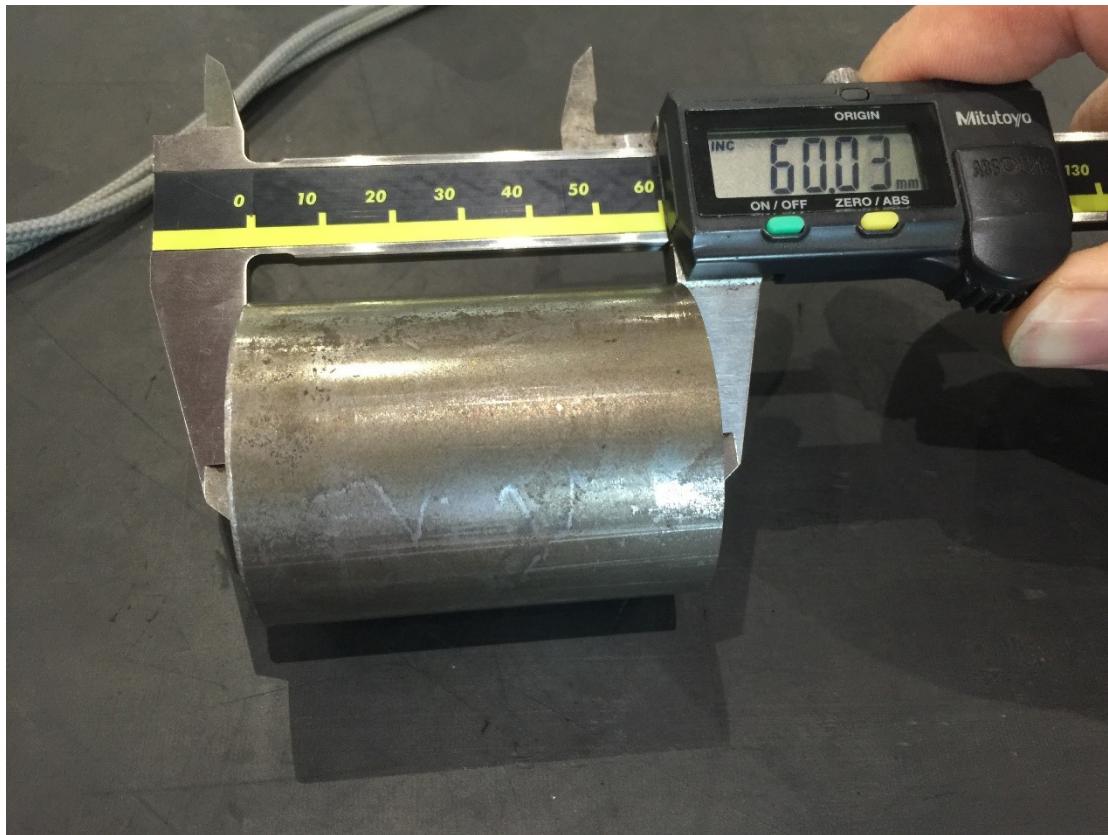
Tablica 5.3. Sastav i svojstva čelika 9 SMn 28 [43]

9 SMn 28				
Sastav [%]				
C	Mn	Si	S	P _{max}
0,10 – 0,15	0,70 – 1,00	do 0,07	0,26 – 0,32	0,12
Mehanička svojstva				
Stanje	Granica plastičnosti [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Specifična sila rezanja za presjek strugotine od 1 mm ² [N/mm ²] [30]	Faktor debljine neodrezane strugotine [30]
hladno vučeno	370	520 – 770	1350	0,21
normalizirano	230	380	1350	0,21



Slika 5.30. Ulagni oblik materijala - promjer

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA



Slika 5.31. Ulazni oblik materijala - duljina

Nakon završene obrade pomoću parametara obrade dobivenim u poglavlju 5.2.3. dobiven je uzorak prikazan na sljedećoj slici.



Slika 5.32. Izrađeni uzorak

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

NC program pomoću kojeg je izrađen uzorak glasi:

```
N9601  
N10 G55 M40  
N20 G96 S104 D2300 M4  
N30 G0 X38.432 Z1 M8  
N40 G1 Z-40 F0.35  
N50 G0 U1 W1  
N60 Z1  
N70 X31.864  
N80 G1 Z-40  
N90 G0 U1 W1  
N100 Z1  
N110 X30  
N120 G96 S172 D2300 M4  
N130 G1 Z-40 F0.233  
N140 G0 U1 W1  
N150 Z1 M9  
N160 M5  
N170 M30
```

U svrhu verifikacije modela izmjereno je glavno strojno vrijeme pri svakom prolazu grube obrade t_{R1} i t_{R2} , te je naknadno sumirano kako bi se dobilo ukupno strojno vrijeme pri gruboj obradi t_R . To strojno vrijeme je uspoređeno s onim strojnim vremenom pri gruboj obradi t_R izračunatim, prema postupku u poglavlju 2.2.2., koristeći parametre obrade dobivene optimizacijom procesa u poglavlju 5.2.3. Kako je fina obrada izvršena u jednom prolazu, u svrhu verifikacije je bilo potrebno izmjeriti strojno vrijeme pri finoj obradi t_F i usporediti ga sa strojnim vremenom pri finoj obradi, izračunatim pomoću parametara obrade dobivenih optimizacijom. Također, izmjereno je ukupno strojno vrijeme zajedno sa vremenom potrebnim za namještanje alata $t_R + t_F + t_{ts}$ i uspoređeno s onim izračunatim.

Kako bi se utvrdilo poštije li model ograničenje vezano za hrapavost površine, provedeno je ispitivanje hrapavosti površine Ra na dva različita mjesta na uzorku. Srednje odstupanje profila Ra na uzorku je uspoređeno sa odstupanjem profila izračunatim pomoću parametara obrade dobivenim optimizacijom i maksimalno dopuštenim odstupanjem profila uzorka. U narednoj tablici prikazana je usporedba određenih pokazatelja ispravnosti optimizacijskog programskog rješenja.

VERIFIKACIJA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

Tablica 5.4. Usporedba izmjerenih i izračunatih veličina sa ograničenjima modela u svrhu verifikacije

Izmjerena veličina	Veličina izračunata modelom	Opis usporedbe
$t_{R1} = 00:06,95 \text{ s}$ $t_{R2} = 00:08,40 \text{ s}$ $t_R = 15,35 \text{ s}$	$t_R = 15,06 \text{ s}$	Izmjereno i izračunato strojno vrijeme pri gruboj obradi je približno jednako. Uzrok razlike je greška u mjerenu.
$t_F = 00:06,08 \text{ s}$	$t_F = 5,76 \text{ s}$	Izmjereno i izračunato strojno vrijeme pri finoj obradi je približno jednako. Uzrok razlike je greška u mjerenu.
$t_R + t_F + t_{ts} = 00:23,38 \text{ s}$	$t_R + t_F + t_{ts} = 23,64 \text{ s}$	Izmjereno i izračunato ukupno strojno vrijeme sa namještanjem alata je približno jednako. Greška mjerena je uzrok razlike.
	$T_L = 15 \text{ min}$	Izračunata ukupna postojanost alata zadovoljava granice modela.
$Ra_1 = 3,155 \mu\text{m}$ $Ra_2 = 3,134 \mu\text{m}$	$Ra = 4,25 \mu\text{m}$	Izmjereno srednje odstupanje profila je čak i niže od onog izračunatog modelom. Obje vrijednosti zadovoljavaju ograničenje modela.
	$F_R = 1935 \text{ N}$ $F_F = 399 \text{ N}$	Izračunata sila rezanja pri gruboj i finoj obradi zadovoljava ograničenje modela.
	$P_R = 3,37 \text{ kW}$ $P_F = 1,15 \text{ kW}$	Izračunata snaga potrebna za rezanja pri gruboj i finoj obradi zadovoljava ograničenje modela.

Uzimajući u obzir usporedbe iz gore navedene tablice, kao i usporedbe iz poglavlja 5.1., dolazi se do zaključka da je ispravnost programskog rješenja pri rješavanju problema optimizacije uzdužnog tokarenja u više prolaza potvrđena. Primjenjeni algoritam je prikladan navedenom problemu, te je problem odgovarajuće opisan i preveden u programski kod. U svrhu proširivanja i upotpunjavanja programskog rješenja, fokus budućih istraživanja mogao bi biti na razradi modela tokarenja obradaka neprekinutog oblika, koji, osim uzdužnog, obuhvaća i poprečno tokarenje, te tokarenje skošenja i zaobljenja. Primjenjivost takvog modela u praksi bila bi znatno veća, ali bi i stupanj složenosti tog problema bio znatno viši.

6. ZAKLJUČAK

Zadani cilj ovog rada je bila razrada modela procesa uzdužnog tokarenja i izrada optimizacijskog programskog rješenje koje bi se, nakon unosa svih potrebnih parametara, trebalo moći nositi sa problemom rješavanja nelinearnog modela koji ima više mogućih rješenja. Od tih mogućih rješenja potrebno je pronaći najbolje moguće, ali samo pod uvjetom da se zadovolje nametnuta ograničenja matematičkog modela. Problem je izrazito složen, te zahtjeva detaljnu razradu, opsežnu pripremu i mnoga saznanja koja je moguće steći jedino principom pokušaja i pogrešaka.

Primjenjujući metode predložene u ovom radu moguće je znatno poboljšati proces uzdužnog tokarenja, a time i ukupan ciklus proizvodnje nekog finalnog proizvoda. Danas postoji sve veća težnja ka maksimalnoj iskoristivosti materijala, radne snage i proizvodnih kapaciteta, što je ujedno i glavna zadaća optimizacije. Sveukupno poslovanje se odvija na višoj razini, a za optimalno vodenje cijelog poslovnog sustava potrebno je optimalno voditi i njegove sastavne dijelove.

Opisano optimizacijsko programsко rješenje kao rezultat daje optimirane parametre obrade pri gruboj i finoj obradi, koji se onda koriste kao ulazni parametri u proces obrade. Programsko rješenje nudi mogućnost optimizacije procesa tokarenja po kriteriju maksimalne produktivnosti ili minimalnog jediničnog troška izrade. Višekriterijske funkcije cilja nisu bile predmet ovog rada, te pružaju mogućnost daljnog proširenja teme optimizacije procesa tokarenja, isto kao i razvoj modela za optimizaciju procesa tokarenja obradaka neprekinutog oblika.

Da bi sama optimizacija bila moguća, u rad su uvedene sljedeće metode:

- Basin-Hopping metoda
- Sekvencijalno kvadratno programiranje
- Diferencijalna evolucija

Primjenom gore navedenih metoda omogućeno je vrlo točno rješavanje problema optimizacije, koje se po učinkovitosti nalazi u razini ostalih metoda obrađenih u literaturi poput simuliranog žarenja i genetičkih algoritama, čija je primjena u procesu optimizacije već ispitana i potvrđena.

Ispravnost programskog rješenja je provjerena na dva načina:

- Usporedbom sa ostalim metodama iz literature preko sličnih ulaznih podataka u proces
- Eksperimentalnim putem preko izrade uzorka i izvršenim mjeranjima

Programsko rješenje je zadovoljilo u svim navedenim metodama verifikacije.

LITERATURA

7. LITERATURA

- [1] D. S. Ermer i M. S. Morris, »A treatment of errors of estimation in determining optimum machining conditions,« *International Journal of Machine Tool Design and Research*, svez. 9, br. 4, pp. 357-362, 1969.
- [2] D. S. Ermer i S. M. Wu, »The Effect of Experimental Error on the Determination of the Optimum Metal-Cutting Conditions,« *Journal of Engineering for Industry*, svez. 89, br. 2, pp. 315-322, 1967.
- [3] K. Iwata, Y. Murotsu, T. Iwatubo i S. Fujii, »A Probabilistic Approach to the Determination of the Optimum Cutting Conditions,« *Journal of Engineering for Industry*, svez. 94, br. 4, pp. 1099-1107, 1972.
- [4] K. Iwata, Y. Murotsu i F. Oba, »Optimization of Cutting Conditions for Multi-Pass Operations Considering Probabilistic Nature in Machining Processes,« *Journal of Engineering for Industry*, svez. 99, br. 1, pp. 210-217, 1977.
- [5] D. S. Ermer i S. Kromodihardjo, »Optimization of Multipass Turning With Constraints,« *Journal of Engineering for Industry*, svez. 103, br. 4, pp. 462-468, 1981.
- [6] N. Alberti, »Optimization of multi-pass turning,« u *14th North American Manufacturing Research Conference*, Minneapolis, 1986.
- [7] Y. C. Shin i Y. S. Joo, »Optimization of machining condition with practical constraints,« *International Journal of Production Research*, svez. 30, br. 12, pp. 2907-2919, 1992.
- [8] G. C. Onwubolu i T. Kumalo, »Optimization of multipass turning operations with genetic algorithms,« *International Journal of Production Research*, svez. 39, br. 16, pp. 3727-3745, 2001.
- [9] A. Belloufi, M. Assas i I. Rezgui, »Optimization of Turning Operations by Using a Hybrid Genetic Algorithm with Sequential Quadratic Programming,« *Journal of Applied Research and Technology*, svez. 11, br. 1, p. 88–94, 2013.

LITERATURA

- [10] F. P. Tan i R. C. Creese, »A generalized multi-pass machining model for machining parameter selection in turning,« *International Journal of Production Research*, svez. 33, br. 5, pp. 1467-1487, 1995.
- [11] D. S. Ermer, »Optimization of the Constrained Machining Economics Problem by Geometric Programming,« *Journal of Engineering for Industry*, svez. 93, br. 4, pp. 1067-1072, 1971.
- [12] P. G. Petropoulos, »Optimal selection of machining rate variables by geometric programming,« *International Journal of Production Research*, svez. 11, br. 4, pp. 305-314, 1973.
- [13] B. K. Lambert i A. G. Walvekar, »Optimization of multi-pass machining operations,« *International Journal of Production Research*, svez. 16, br. 4, pp. 259-265, 1978.
- [14] R. Gupta, J. L. Batra i G. K. Lal, »Determination of optimal subdivision of depth of cut in multipass turning with constraints,« *International Journal of Production Research*, svez. 33, br. 9, pp. 2555-2565, 1995.
- [15] S. H. Yeo, »A multipass optimization strategy for CNC lathe operations,« *International Journal of Production Economics*, svez. 40, br. 2-3, pp. 209-218, 1995.
- [16] W. H. Yang i Y. S. Tarn, »Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method,« *Journal of Materials Processing Technology*, svez. 84, br. 1-3, pp. 122-129, 1998.
- [17] A. Baykasoglu i T. Dereli, »Novel algorithmic approach to generate the 'number of passes' and 'depth of cuts' for the optimization routines of multipass machining,« *International Journal of Production Research*, svez. 40, br. 7, pp. 1549-1565, 2002.
- [18] M. C. Chen i D. M. Tsai, »A simulated annealing approach for optimization of multi-pass turning operations,« *International Journal of Production Research*, svez. 34, br. 10, pp. 2803-2825, 1996.
- [19] N. Alberti i G. Perrone, »Multipass machining optimization by using fuzzy possibilistic programming and genetic algorithms,« *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, svez. 213, br. 3, pp. 261-273, 1999.

LITERATURA

- [20] X. Wang, Z. J. Da, A. K. Balaji i I. S. Jawahir, »Performance-based optimal selection of cutting conditions and cutting tools in multipass turning operations using genetic algorithms,« *International Journal of Production Research*, svez. 40, br. 9, pp. 2053-2065, 2002.
- [21] S. Satishkumar, P. Asokan i S. Kumanan, »Optimization of depth of cut in multi-pass turning using nontraditional optimization techniques,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 29, br. 3, pp. 230-238, 2006.
- [22] N. R. Abburi i U. S. Dixit, »Multi-objective optimization of multipass turning processes,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 32, br. 9, pp. 902-910, 2007.
- [23] Z. Jurković, Modeliranje i optimizacija parametara obrade primjenom evolucijskih algoritama kod inteligentnih obradnih sustava: doktorska disertacija, Rijeka, 2007.
- [24] P. M. Dixit i U. S. Dixit, *Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods*, London: Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [25] G. Cukor, Proračuni u obradi skidanjem strugotine, Rijeka: Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2006.
- [26] E. J. A. Armarego i R. H. Brown, *The machining of metals*, New Jersey: Prentice-Hall, 1969.
- [27] W. Heginbotham i P. C. Pandey, »A variable rate machining test for tool life evaluation,« u *Proceedings of the 8th International M.T.D.R. Conference*, Manchester, 1967.
- [28] S. Kiliç, »Use of one-dimensional search method for the optimization of turning operations,« *Modeling, Simulation and Control B*, svez. 14, pp. 39-63, 1985.
- [29] T. Chang, R. Wysk i H. Wang, *Computer-aided Manufacturing*, New Jersey: Prentice-Hall, 1991.
- [30] TaeguTec LTD., »TaeguTec - Cutting Tools Catalogs,« [Mrežno]. Available: <http://www.taegutec.com/section.aspx?CountryId=1&SectionId=1983>. [Pokušaj pristupa 10. 8. 2016].

LITERATURA

- [31] D. J. Wales, Energy Landscapes, Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [32] D. J. Wales i J. P. K. Doye, »Global Optimization by Basin-Hopping and the Lowest Energy Structures of Lennard-Jones Clusters Containing up to 110 Atoms,« *Journal of Physical Chemistry A*, svez. 101, pp. 5111-5116, 1997.
- [33] Z. Li i H. A. Scheraga, »Monte Carlo-minimization approach to the multiple-minima problem in protein folding,« *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, svez. 84, p. 6611–6615, 1987.
- [34] D. J. Wales i H. A. Scheraga, »Global optimization of clusters, crystals, and biomolecules,« *Science*, svez. 285, br. 5432, pp. 1368-1372, 1999.
- [35] The Scipy community, »scipy.optimize.basinhopping - SciPy v0.18.0 Reference Guide,« [Mrežno]. Available: <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.basinhopping.html>. [Pokušaj pristupa 10. 8. 2016].
- [36] D. Kraft, A Software Package for Sequential Quadratic Programming, Koln: Wiss. Berichtswesen d. DFVLR, 1988.
- [37] The Scipy community, »Optimization (scipy.optimize) - SciPy v0.18.0 Reference Guide,« [Mrežno]. Available: <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/optimize.html>. [Pokušaj pristupa 10. 8. 2016].
- [38] The Scipy community, »minimize(method='SLSQP') - SciPy v0.18.0 Reference Guide,« [Mrežno]. Available: <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/optimize.minimize-slsqp.html#optimize-minimize-slsqp>. [Pokušaj pristupa 10. 8. 2016].
- [39] Kivy Organization, »Kivy: Cross-platform Python Framework for NUI Development,« [Mrežno]. Available: <https://kivy.org/>. [Pokušaj pristupa 2. 9. 2016].
- [40] W. B. Heginbotham i P. C. Pandey, »A variable rate machining test for tool life evaluation,« u *8th International M.T.D.R. Conference*, Manchester, 1968.

LITERATURA

- [41] R. Storn i K. Price, »Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces,« *Journal of Global Optimization*, svez. 11, br. 4, p. 341–359, 1997.
- [42] The Scipy community, »scipy.optimize.differential_evolution - SciPy v0.18.0 Reference Guide,« [Mrežno]. Available: http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.differential_evolution.html. [Pokušaj pristupa 2. 9. 2016].
- [43] B. Kraut, Strojarski priručnik, Zagreb: TEHNIČKA KNJIGA, 1982.

POPIS OZNAKA I KRATICA

8. POPIS OZNAKA I KRATICA

$m [/]$	Broj uzdužnih prolaza pri grubom tokarenju
$m_{min} [/]$	Najniža vrijednost broja prolaza pri gruboj obradi
$m_{max} [/]$	Najviša vrijednost broja prolaza pri gruboj obradi
$v_c, v [m/min]$	Brzina rezanja
$v_R [m/min]$	Brzina rezanja pri svakom grubom prolazu
$v_{R_{min}} [m/min]$	Najniža vrijednost brzine rezanja pri gruboj obradi
$v_{R_{max}} [m/min]$	Najviša vrijednost brzine rezanja pri gruboj obradi
$v_F [m/min]$	Brzina rezanja pri finoj obradi
$v_{F_{min}} [m/min]$	Najniža vrijednost brzine rezanja pri finoj obradi
$v_{F_{max}} [m/min]$	Najviša vrijednost brzine rezanja pri finoj obradi
$f_R [mm/okr]$	Posmak pri gruboj obradi
$f_{R_{min}} [mm/okr]$	Najniža vrijednost posmaka pri gruboj obradi
$f_{R_{max}} [mm/okr]$	Najviša vrijednost posmaka pri gruboj obradi
$f_F [mm/okr]$	Posmak pri finoj obradi
$f_{F_{min}} [mm/okr]$	Najniža vrijednost posmaka pri finoj obradi
$f_{F_{max}} [mm/okr]$	Najviša vrijednost posmaka pri finoj obradi
$a_R [mm]$	Dubina rezanja pri gruboj obradi
$a_{R_{min}} [mm]$	Najniža vrijednost dubine rezanja pri gruboj obradi
$a_{R_{max}} [mm]$	Najviša vrijednost dubine rezanja pri gruboj obradi
$a_F [mm]$	Dubina rezanja pri finoj obradi
$a_{F_{min}} [mm]$	Najniža vrijednost dubine rezanja pri finoj obradi
$a_{F_{max}} [mm]$	Najviša vrijednost dubine rezanja pri finoj obradi
$F, F_c [N]$	Glavna sila rezanja
$F_R [N]$	Glavna sila rezanja pri grubom tokarenju
$F_F [N]$	Glavna sila rezanja pri finom tokarenju
$F_{max} [N]$	Maksimalna dozvoljena sila rezanja
$F_p [N]$	Sila prodiranja
$F_R [N]$	Rezultantna sila rezanja
$Kc [N/mm^2]$	Specifična sila rezanja za presjek strugotine od 1mm^2
$m_c [/]$	Eksponent debljine neodrezane strugotine

POPIS OZNAKA I KRATICA

P [kW]	Potrebna snaga za obradu skidanjem strugotine
P_R [kW]	Snaga rezanja pri grubom tokarenju
P_F [kW]	Snaga rezanja pri finom tokarenju
P_s [kW]	Instalirana snaga stroja
η_s [/]	Stupanj iskoristivosti alatnog stroja
t_p [min]	Jedinično vrijeme izrade
t_L [min]	Vrijeme potrebno za stezanje i skidanje obratka
t_{ts} [min]	Vrijeme potrebno za namještanje alata
t_R [min]	Glavno strojno vrijeme pri gruboj obradi
t_F [min]	Glavno strojno vrijeme pri finoj obradi
t_c [min]	Vrijeme potrebno za promjenu alata
t_c^* [min]	Modificirano vrijeme potrebno za promjenu alata
T [min]	Postojanost alata
T_L [min]	Ukupna postojanost alata pri gruboj i finoj obradi
$T_{L_{min}}$ [min]	Najniža vrijednost ukupne postojanosti alata
$T_{L_{max}}$ [min]	Najviša vrijednost ukupne postojanosti alata
T_F [min]	Postojanost alata pri finoj obradi
w [/]	Težinski faktor postojanosti alata
h_1 [min/mm]	Konstanta vezana za namještanje alata
h_2 [min]	Konstanta vezana za namještanje alata
C_T [min]	Konstanta koja ima vrijednost postojanosti alata pri $(v, f, a) = 1$
C [/]	Modificirana konstanta postojanosti alata
k_v [/]	Eksponent brzine rezanja
k_f [/]	Eksponent posmaka
k_a [/]	Eksponent dubine rezanja
k_1 [/]	Koeficijent odnosa brzine rezanja
k_2 [/]	Koeficijent odnosa posmaka
k_3 [/]	Koeficijent odnosa dubine rezanja
C_i [kn/kom]	Trošak vezan za stezanje i skidanje obratka i namještanje alata
C_r [kn/kom]	Trošak radi zamjene alata
C_t [kn/kom]	Trošak vezan za cijenu alata
k_o [kn/min]	Operativni trošak rada alatnog stroja po minuti
k_t [kn/rubu]	Cijena reznog ruba pločice

POPIS OZNAKA I KRATICA

ξ_{max} [/]	Maksimalna dozvoljena vitkost strugotine
R_a [mm]	Srednje aritmetičko odstupanje profila
r_e [mm]	Radius zaobljenja vrha oštice
κ_r [°]	Prisloni kut glavne oštice alata
BH	Basin-Hopping
SQP	Sekvencijalno kvadratno programiranje

SAŽETAK

9. SAŽETAK

U prvom dijelu rada opisan je model optimizacije procesa uzdužnog tokarenja u više prolaza. Model je definiran na način da prvo slijedi gruba obrada u jednom ili više prolaza i fina obrada u jednom prolazu. U tom dijelu je također razjašnjen proces uzdužnog tokarenja, te su definirane dvije funkcije cilja po kriteriju minimalnog jediničnog vremena izrade i minimalnog jediničnog troška izrade. Objasnjena su ograničenja i granice matematičkog modela pri gruboj i finoj obradi.

U drugom dijelu rada izrađeno je optimizacijsko programsко rješenje sa grafičkim korisničkim sučeljem u programskom jeziku Python. Metoda korištena za optimizaciju je kombinacija Basin-Hopping algoritma za pronalaženje globalnog minimuma i sekvencijalnog kvadratnog programiranja za lokalnu optimizaciju. Programsко rješenje je nakon toga verificirano pomoću podataka iz literature i konkretnim primjerom iz prakse.

Ključne riječi: optimizacija, proces tokarenja, uzdužno tokarenje, produktivnost, ekonomičnost, basin hopping, sekvencijalno kvadratno programiranje

SUMMARY

The first section of thesis describes the model for optimization of multi-pass turning process. Machining process defined in the model is divided into rough machining, carried out in one or multiple number of passes, and finish machining, carried out in one finishing pass. Straight turning process is also clarified in this section, and two objective functions, considering maximum productivity and minimum cutting cost criteria, are defined. Model bounds and constraints during roughing and finishing are elaborated.

The optimization software with graphical user interface is compiled, using Python programming language, in the second thesis section. Method applied for optimization is a combination of Basin-Hopping algorithm, used for finding the global minimum, and sequential quadratic programming, used for local optimization. Software is verified with data used in the reference and by practical experiment.

Keywords: optimization, turning process, longitudinal turning, productivity, cost efficiency, basin hopping, sequential quadratic programming

10. PRILOZI

10.1. Dodatak A: Svojstva materijala prema DIN / ISO 513 i VDI 3323 Standardu [30]

10.2. Dodatak B: Granice parametara obrade proizvodača alata [30]

Material Properties

Recommended cutting condition-According to DIN / ISO 513 and VDI 3323 Standard

ISO	Material	Condition	Tensile Strength [N/mm ²]	K _C ⁽¹⁾ [N/mm ²]	m _s ⁽²⁾	Hardness (HB)	Material Group	
P	Non-alloy steel and cast steel, free cutting steel	Annealed < 0.25 %C	420	1350	0.21	125	1	
		Annealed >= 0.25 %C	650	1500	0.22	190	2	
		Quenched and tempered < 0.55 %C	850	1675	0.24	250	3	
		Quenched and tempered >= 0.55 %C	750	1700	0.24	220	4	
	Low alloy steel and cast steel (less than 5% all elements)	Quenched and tempered	1000	1900	0.24	300	5	
		Annealed	600	1775	0.24	200	6	
		Quenched and tempered	930	1675	0.24	275	7	
		Quenched and tempered	1000	1725	0.24	300	8	
	High alloy steel, cast steel, and tool steel	Quenched and tempered	1200	1800	0.24	350	9	
		Annealed	680	2450	0.23	200	10	
		Quenched and tempered	1100	2500	0.23	325	11	
M	Stainless steel and cast steel		Ferritic/martensitic	680	1875	0.21	200	12
			Martensitic	820	1875	0.21	240	13
			Austenitic	600	2150	0.20	180	14
K	Grey cast iron (GG)		Ferritic	-	1150	0.20	180	15
	Cast iron nodular (GGG)		Pearlitic	-	1350	0.28	260	16
			Ferritic	-	1225	0.25	160	17
			Pearlitic	-	1350	0.28	250	18
	Malleable cast iron		Ferritic	-	1225	0.25	130	19
			Pearlitic	-	1420	0.3	230	20
N	Aluminum-wrought alloy		Not curable	-	700	0.25	60	21
	Aluminum-cast, alloyed	Cured	-	800	0.25	100	22	
		Not curable	-	700	0.25	75	23	
	Copper alloys	Cured	-	700	0.25	90	24	
		High temperature	-	750	0.25	130	25	
		Free cutting	-	700	0.27	110	26	
		Brass	-	700	0.27	90	27	
	No-metallic		Electrolytic copper	-	700	0.27	100	28
			Duroplastics, fiber plastics	-			-	29
			Hard rubber	-			-	30
S	Fe based		Annealed	-	2600	0.24	200	31
	High temp. alloys	Cured	-	3100	0.24	280	32	
		Annealed	-	3300	0.24	250	33	
		Cured	-	3300	0.24	350	34	
	Ni or Co based		Cast	-	3300	0.24	320	35
	Titanium and Ti alloys		RM 400	1700	0.23	-	-	36
			Alpha+beta alloys cured	RM 1050	2110	0.22	-	37
H	Hardened steel		Hardened	-	4600		55 HRc	38
			Hardened	-	4700		60 HRc	39
	Chilled cast iron		Cast	-	4600		400	40
	Cast iron nodular(GGG)		Hardened	-	4500		55 HRc	41

Steel Stainess Steel Cast Iron Nonferrous High Temp. Alloys Hardened Steel

⁽¹⁾Specific cutting force for 1 mm² chip section.

⁽²⁾Chip thickness factor.

New Grades

Grades

Chipbreakers

Insert Geometry by Workpiece Shape

Trouble Shooting

TaeguTurn Workpiece Material Group

Insert Selection by Workpiece Material

Stocked Standard Inserts

Grade & Chipbreaker Comparison Table

Material & Hardness Conversion Table

Grades

Coated Carbide, Cermet and Carbide Grades

	Grades	Coating	ISO	Characteristics & Applications
Grades	TT7005 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃	K01 – K15	<ul style="list-style-type: none"> For high speed machining of gray and ductile cast iron Excellent wear resistant coated grade assures optimum performance in high speed continuous machining of cast iron
Chipbreakers	TT7015 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃	K10 – K25	<ul style="list-style-type: none"> For general machining of gray and ductile cast iron For continuous and interrupted machining of gray and ductile cast iron
Insert Geometry by Workpiece Shape	TT7310 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃	K10 – K25	<ul style="list-style-type: none"> For general machining of gray and ductile cast iron
Trouble Shooting	TT8115 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN	P05 – P20	<ul style="list-style-type: none"> For high speed turning continuous cutting on steels Excellent wear resistance and heat-resistance
Workpiece Material	TT9215 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN	S05 – S20 M05 – M20	<ul style="list-style-type: none"> Excellent insert wear resistance For high cutting speed & continuous cutting on stainless steels
Material Group	TT5080 PVD Coated	AlTiN/TiN	S05 – S25 M05 – M25	<ul style="list-style-type: none"> For a wide range of turning of high-temp alloys Very hard submicron substrate
Workpiece Material	TT8125 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN	P15 – P30	<ul style="list-style-type: none"> For a wide range of turning on steels Very good combination of wear resistance and toughness For general use on steels
Workpiece Material	TT5100 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN	P20 – P35	<ul style="list-style-type: none"> For a wide range of turning of mild steel, low carbon steel and low carbon alloy steel Excellent chipping resistance and sticking resistance
Workpiece Material	TT9225 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN	S15 – S30 M15 – M30	<ul style="list-style-type: none"> Excellent combination of insert wear resistance & fracture resistance For general use on stainless steel For continuous and interrupted cutting on stainless steel
Workpiece Material	TT9020 PVD Coated	TiCN	P20 – P40 M20 – M40	<ul style="list-style-type: none"> Submicron substrate with PVD coating For stainless steel
Workpiece Material	TT9080 PVD Coated	AlTiN/TiN	M20 – M40 S20 – S40	<ul style="list-style-type: none"> Very hard submicron substrate with good fracture toughness For turning small components
Workpiece Material	TT8135 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN	P25 – P40	<ul style="list-style-type: none"> Tough carbide substrate For a wide range of medium to roughing applications at low cutting speed on steels For heavy turning
Workpiece Material	TT7100 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN	P30 – P45	<ul style="list-style-type: none"> Very tough carbide substrate base - with a CVD coating This combination provides both excellent toughness and chipping resistance For heavy turning
Workpiece Material	TT9235 CVD Coated	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN	S25 – S40 M25 – M40	<ul style="list-style-type: none"> Excellent combination of insert wear resistance & toughness For low cutting speed & interrupted cutting
Stocked Standard Inserts	TT8020 PVD Coated	TiCN	P30 – P50 M30 – M50 S30 – S50	<ul style="list-style-type: none"> For medium to low speed turning of stainless steel, exotic alloys and low carbon steel Toughest grade in turning grade For interrupted cut on stainless steel and exotic alloys
Grade & Chipbreaker Comparison Table	PV3010 PVD Coated Cermet	TiN	P05 – P20 M05 – M20 K05 – K20	<ul style="list-style-type: none"> For high surface finish turning of steel, stainless steel and cast iron Excellent wear resistance and low coefficient of friction Long tool life
Material & Hardness Conversion Table	CT3000 Uncoated Cermet		P10 – P20 M10 – M20 K10 – K20	<ul style="list-style-type: none"> Excellent surface finish turning on steel, stainless steel and cast iron Excellent wear resistance and low coefficient of friction
	K10 Carbide		K05 – K15 N05 – N15 S05 – S15	<ul style="list-style-type: none"> General turning of cast iron, exotic alloy and non-ferrous materials including aluminum and copper alloy Excellent wear resistant grade

Recommended Cutting Speeds: V=m/min Materials								Grades
Low Carbon Steel	Low Carbon Alloy Steel	Carbon Steel	Alloy Steel	Stainless Steel	High Temp. Alloy	Cast Iron	Aluminum Alloy	
						150 - 450		
						120 - 420		
						120 - 420		
440-800	330-660	170-440	110-380					
				170-250	40-80			
				150-250	30-100			
250-600	150-500	100-350	80-300					
150-500	70-350	70-250	70-220					
				130-220	30-70			
				50-150				
				50-160	20-40			
100-400	70-320	70-250	70-220					
60-350	60-300	70-200	70-180					
				110-170	30-60			
70-300	70-250	70-150	70-130	50-150	20-30			
300-800	150-600	150-400	100-350	200-300		100-300		
250-700	150-550	150-350	100-320	200-270		100-350		
					20-50	80-180	60-1500	

ISO TURN	RHINO+RUSH
	New

DNMG Negative 55° Rhombic inserts

Insert	Designation	Recommended Machining Conditions		Grade									
		feed (mm/rev)	ap (mm)	Cermel	CVD Coated				PVD Coated				
		CT3000	TT7005	TT7015	TT8115	TT8125	TT8135	TT9215	TT9225	TT9235	TT5100	TT5080	TT9080
	DNMG 130504	0.10 - 0.45	0.50 - 4.00	•	•	•							
	DNMG 130508	0.10 - 0.50	0.50 - 4.00	•	•	•							
	DNMG 130512	0.10 - 0.55	0.50 - 4.00	•	•	•							
	DNMG 130504 EA	0.05 - 0.30	0.13 - 1.50						•	•	•	•	•
	DNMG 130508 EA	0.07 - 0.40	0.15 - 1.50						•	•	•	•	•
	DNMG 130508 EM	0.13 - 0.40	0.50 - 4.00						•	•	•	•	•
	DNMG 130512 EM	0.15 - 0.40	0.70 - 4.00						•	•	•	•	•
	DNMG 130504 FG	0.07 - 0.30	0.20 - 2.00			•	•					•	
	DNMG 130508 FG	0.10 - 0.35	0.50 - 2.00			•	•					•	
	DNMG 130512 FG	0.15 - 0.40	0.50 - 2.00			•	•					•	
	DNMG 130504 FM	0.07 - 0.30	0.25 - 2.00	•				•	•	•			•
	DNMG 130508 FM	0.10 - 0.35	0.30 - 2.00	•				•	•	•			•
	DNMG 130512 FM	0.15 - 0.40	0.35 - 2.00	•				•	•	•			•
	DNMG 130504 FT	0.07 - 0.30	0.25 - 3.50					•	•	•			•
	DNMG 130508 FT	0.10 - 0.40	0.30 - 3.50					•	•	•			•
	DNMG 130512 FT	0.15 - 0.50	0.35 - 3.00					•	•	•			•
	DNMG 130504 MM	0.15 - 0.45	0.40 - 4.50					•	•	•	•	•	•
	DNMG 130508 MM	0.20 - 0.50	0.50 - 4.50					•	•	•	•	•	•
	DNMG 130512 MM	0.23 - 0.50	0.70 - 4.50					•	•	•	•	•	•
	DNMG 130504 MT	0.10 - 0.35	0.80 - 4.50					•	•	•			•
	DNMG 130508 MT	0.15 - 0.45	1.00 - 4.50					•	•	•			•
	DNMG 130512 MT	0.20 - 0.55	1.20 - 4.50					•	•	•			•
	DNMG 130504 PC	0.10 - 0.30	0.40 - 4.00					•	•	•			•
	DNMG 130508 PC	0.15 - 0.40	0.50 - 4.00					•	•	•			•
	DNMG 130512 PC	0.18 - 0.50	0.60 - 4.00					•	•	•			•

• Marked: Standard Items



Grades	New Grades
--------	------------

Chipbreakers	Insert Geometry by Workpiece Shape
--------------	------------------------------------

Trouble Shooting	
------------------	--

TaeguTurn Workpiece Material Group	
------------------------------------	--

Insert Selection by Workpiece Material	
--	--

Insert Item List	
------------------	--

Grade & Chipbreaker Comparison Table	
--------------------------------------	--

Material & Hardness Conversion Table	
--------------------------------------	--