

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

Uroš PEŠAKOVIĆ

**PARAMETRIČNO MODELIRANJE IN
NUMERIČNA ANALIZA ORODJA ZA
IZSEKOVANJE RONDELIC**

Diplomsko delo
univerzitetnega študijskega programa 1. stopnje
Strojništvo

Maribor, september 2010



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

PARAMETRIČNO MODELIRANJE IN NUMERIČNA ANALIZA ORODJA ZA IZSEKOVANJE RONDELIC

Diplomsko delo

Študent(ka): Uroš PEŠAKOVIĆ
Študijski program: Univerzitetni študijski program 1. stopnje Strojništvo
Smer: Konstrukterstvo

Mentor: doc. dr. Miran Ulbin
Somentor: izr. prof. dr. Ivo Pahole

Maribor, september 2010



FAKULTETA ZA STROJNIŠTVO

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel.: 02 22 07 500

Fax: 02 22 07 990

e-mail: fs@uni-mb.si

http://www.fs.uni-mb.si

Številka: S-B0007

Datum in kraj: 23. april 2010, Maribor

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 1/2010)
izdajam

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

Urošu PEŠAKOVIČU, študentu **univerzitetnega študijskega programa Strojništvo - 1. stopnje**, smer **Konstrukterstvo**, se dovoljuje izdelati diplomsko delo pri predmetu **Računalniško podprto konstruiranje**.

Mentor: doc. dr. Miran ULBIN
Somentor: izr. prof. dr. Ivo PAHOLE

Naslov diplomskega dela: **PARAMETRIČNO MODELIRANJE IN NUMERIČNA ANALIZA ORODJA ZA IZSEKOVANJE RONDELIC**

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku: **PARAMETRIC MODELLING AND NUMERICAL ANALYSIS OF TOOL FOR SHIGS PUNCHING**

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za izdelavo diplomskega dela« in ga oddati v **treh** izvodih ter en izvod elektronske verzije do 23. 4. 2011 v referatu za študentske zadeve članice.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.

Dekan FS:

red. prof. dr. Niko SAMEC

Obvestiti:

- kandidata,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv



I Z J A V A

Podpisani Uroš PEŠAKOVIĆ izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom doc. dr. Mirana Ulbina in somentorstvom izr. prof. dr. Iva Pahole ;
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v Knjižnici tehniških fakultet Univerze v Mariboru.

Maribor, 17. 9. 2010

Podpis: _____

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Miranu ULBINU in somentorju izr. prof. dr. Ivu PAHOLE za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomskega dela. Zahvaljujem se tudi g. Tomažu Godicljju in g. Borutu Zemljiču iz podjetja Talum, d. d.

Posebna zahvala velja staršem, ki so mi omogočili študij.

PARAMETRIČNO MODELIRANJE IN NUMERIČNA ANALIZA ORODJA ZA IZSEKOVANJE RONDELIC

Ključne besede: izsekovalno orodje, parametričen model orodja, numerična analiza

UDK: 621.9.09/.07(043.2)

POVZETEK

Naloga obravnava problematiko izsekovalnega orodja, ki je uporabljeno v podjetju Talum v delovni enoti Rondelice. Poudarek je na raziskovanju vzrokov, ki prispevajo k pojavu napak na izdelkih. V uvodnem delu naloge je predstavljen sam proces izsekovanja in obstoječi problemi. V poglavju Parametrično modeliranje orodja je obrazložen namensko izdelan model orodja, s pomočjo katerega so bile izvedene numerične analize. Po analizi rezultatov različnih variant orodja so podani odgovori na zastavljene teze, dosego ciljev in namena ter predlogi izboljšav orodja.

PARAMETRIC MODELLING AND NUMERICAL ANALYSIS OF TOOL FOR SHIGS PUNCHING

Key words: punching tool, parametric modelling, numerical analysis

UDK: 621.9.09/.07(043.2)

ABSTRACT

The task of punching tools, which is used in the company Talum in a work unit Rondelice, is the object of presented work. Emphasis is placed on exploring the causes that contribute to the occurrence of defects on the products. The process of cutting and existing problems are presented in the introduction part of the thesis. The design of the tool used for numerical analysis is explained in chapter parametric modeling of tool. After numerical analysis of different tool configuration the argument of achieving the goals is given and the objectives achievement and proposals for improvements are discussed.

KAZALO

1	UVOD	- 1 -
1.1	OPIS SPLOŠNEGA PODROČJA DIPLOMSKEGA DELA	- 3 -
1.2	OPREDELITEV DELA	- 7 -
1.3	STRUKTURA DIPLOMSKEGA DELA	- 8 -
2	PREDSTAVITEV IZSEKOVALNIH ORODIJ ZA IZDELAVO RONDELIC	- 9 -
2.1	POSTOPEK IZREZOVANJA RAVNIH PLOSKEV	- 10 -
2.2	ZGORNJA REZILA (PESTIČI)	- 10 -
2.3	REZILNA ORODJA VODENA Z VODILNO PLOŠČO	- 11 -
2.4	REZILNA ORODJA VODENA Z VODILNIMI STEBRI.....	- 12 -
2.5	REZILNA ORODJA Z VODILNIMI STEBRI IN Z VODILNO PLOŠČO	- 13 -
3	PARAMETRIČNO MODELIRANJE ORODJA	- 14 -
3.1	KONSTRUIRANJE POENOSTAVLJENEGA PARAMETRIČNEGA MODELA ORODJA	- 16 -
3.2	GLOBALNI IN LOKALNI PARAMETRI.....	- 19 -
4	NUMERIČNA ANALIZA TRAKU.....	- 21 -
4.1	DOLOČANJE LASTNOSTI MATERIALOV IN ROBNIH POGOJEV.....	- 21 -
4.2	MREŽENJE MODELA ORODJA	- 24 -
4.3	REZULTATI ANALIZ	- 25 -
5	SKLEP	- 29 -
6	LITERATURA IN VIRI	- 30 -

Kazalo slik

Slika 1.1: Panoramski posnetek tovarne TALUM	- 2 -
Slika 1.2: Plinska dvokomorna talilna peč z vstavljenimi aluminijastimi bloki	- 3 -
Slika 1.3: Za izsekovalnim strojem (levo) se rondelice zbirajo v žarilnih posodah	- 5 -
Slika 1.4: Žarilni vozovi s paletami rondelic (spredaj) pred veliko žarilno pečjo (zadaj)	- 5 -
Slika 1.5: Vbočena rondica (welb) (levo) in rondica z ravnim dnom (desno)	- 6 -
Slika 1.6: Rondica $D = 19,7$ mm z napako na robu.....	- 7 -
Slika 2.1: Gornje rezilo.....	- 10 -
Slika 2.3: Rezilno orodje vodeno z vodilno ploščo	- 11 -
Slika 2.2: Oblika pestiča: a) welb (W) in b) bombaža (B)	- 11 -
Slika 2.4: Rezilno orodje vodeno z vodilnimi stebri	- 12 -
Slika 2.5: Izsekovalno orodje z vsemi sestavnimi deli	- 13 -
Slika 3.1: Prikaz razstavljenega (levo) in sestavljenega modela orodja s trakom (desno)..	- 14 -
Slika 3.2: Poenostavljen parametričen model izrezovalnega orodja	- 15 -
Slika 3.3: Vzorec traku z rondicami premera 19,7 mm.....	- 16 -
Slika 3.4: Razporeditev pestičev/lukenj na orodju/traku.....	- 16 -
Slika 3.5: Štirje primeri pestičev	- 19 -
Slika 3.6: Primeri orodij	- 20 -
Slika 4.1: Določanje obremenitve na zgornjo ploskev ohišja	- 22 -
Slika 4.2: Površine, določene s podporami, so vidne na sliki v rdeči barvi	- 22 -
Slika 4.3: Kontaktno površine med pestiči in trakom.....	- 23 -
Slika 4.4: Mreženje vseh treh komponent modela	- 24 -
Slika 4.5: Analiza primerjalnih napetosti po von Mises s faktorjem odreza 0,6734.....	- 25 -
Slika 4.6: Rezultati osmih analiz primerjalnih napetosti po von Mises s faktorji od 0,60 do 0,67	- 26 -
Slika 4.7: Rezultati analiz primerjalnih napetosti po von Mises s faktorjem 0,6734 pri zamiku za: a) 1mm in b) 2 mm	- 28 -

UPORABLJENI SIMBOLI

P	-	pomik
D	-	premer rezila
S_{max}	-	debelina traku
F_r	-	rezná sila
A	-	ploščina preseka
τ_β	-	strižna trdnost materiala
E	-	modul elastičnosti
R_p	-	meja tečenja
R_n	-	natezna trdnost

UPORABLJENE KRATICE

CAD - Computer Aided Design

DIN - standard za predpis dimenzij in lastnosti tehničnih materialov. Označitev za *Deutsch Industrie-Norm* - nemški industrijski standard (DIN).

FS - Fakulteta za strojništvo

MKE - Metoda končnih elementov

STEP - Oblika datoteke za zapis podatkov. Temelji na standardu za izmenjavo podatkov modela izdelka ("STandard for the Exchange of Product model data").

ENCASTRE - izraz, ki opisuje omejitve za strukturo v stiku s temeljem. V podpori niso dovoljene translacije in rotacije.

1 UVOD

Začetek aluminijske industrije v Kidričevem sega v leto 1942, ko se je pričela izgradnja tovarne glinice in aluminija (TGA). Prvi aluminij je bil proizveden leta 1954 na osnovi Söderbergove tehnologije z letno kapaciteto 15.000 ton primarnega aluminija. Danes se uporablja sodobna Pechinejeva tehnologija s predpečeno anodo. Sodobna tehnologija postavlja Talum ob bok naj sodobnejšim proizvajalcem aluminija na svetu.

Dandanes je Talum uspešno podjetje, z visoko dodano vrednostjo v evrih na zaposlenega in spada med 10 največjih izvoznikov v Sloveniji. Pretežni del prodanih proizvodov se izvozi v države Evropske unije. Moderna proizvodnja temelji na pridobivanju primarnega aluminija, proizvodnji livarskih zlitin, drogov, izparilnikov, rondelic in ulitkov, prihodnost pa gradijo tudi na predelavi odpadnega, sekundarnega aluminija. Talum je zrasel skupaj z naseljem Kidričevo, v središču povezav med vzhodno in zahodno Evropo, severom in jugom. Danes zaposlujejo okrog 980 ljudi. Podjetje je osvojilo različne standarde na področju kakovosti, osebne varnosti in varstva okolja. Izvajajo se številni programi za ohranjanje okolja in zdravja zaposlenih, ob tem pa je na prvem mestu prav zadovoljstvo odjemalcev.

Poslanstvo podjetja Talum

Talum je proizvajalec in prodajalec izdelkov iz aluminija in njegovih zlitin za potrebe slovenskega in evropskega trga.

Cilji podjetja Talum

Osnovni cilj je povečati obseg proizvodnje, ki bo dolgoročno zagotavljal učinkovitost in uspešnost proizvodnje. Prav tako spremljanje razmer na trgu z vidika gospodarskega stanja in zagotavljanje podjetju obstoj na sedanjih trgih. Temeljni cilj pa je izboljšati kakovost in s tem doseči zadovoljstvo kupcev.

Vizija razvoja družbe je:

- ohraniti aluminijsko industrijo v Kidričevem in proizvajati aluminij ter proizvode iz aluminija skladno z okoljsko zakonodajo;
- povečevati obseg proizvodnje s pretaljevanjem odpadnega aluminija ob hkratnem zmanjšanju porabe primarne energije;
- nadgrajevati proizvodni program predelave z litjem različnih polproizvodov ter njihovo obdelavo do končnih proizvodov in s tem povečevati dodano vrednost;
- ohranjati visoko kakovost proizvodov in že osvojene domače in EU trge ter si zagotoviti še nove;
- ohranjati vse poslovne funkcije in obstoječi nivo zaposlenih;
- krepiti učinkovitost in konkurenčnost;
- industrijska cona z bogato in s specifično infrastrukturo predstavlja idealno osnovo za nadaljnji razvoj industrije na tem območju in razvoj drugih, z aluminijem nepovezanih dejavnosti.



Slika 1.1: Panoramski posnetek tovarne TALUM (Pridobljeno dne 15. 5. 2010 iz

[http:// www.talum.si](http://www.talum.si))

1.1 Opis splošnega področja diplomskega dela

V podjetju Talum d. d., ki še vedno temelji na proizvodnji primarnega aluminija, izdelujejo določene polizdelke. V delovni enoti (DE) Rondelice proizvajajo dve vrsti izdelkov:

- **rondice** so polizdelek, namenjen protismernemu iztiskovanju, uporabljajo se za izdelavo tub in doz v farmacevtski, prehrambni in kozmetični industriji. Izdelane so okrogle rondice, z luknjo ali brez, površinsko obdelane z vibriranjem ali s peskanjem, mehko žarjene, bombirane ali ravne ter različnih debelin.
- **rondele** so diski premera od 80 mm do 225 mm in debelin od 2 mm do 10 mm, ki se vgrajujejo v dna nerjaveče posode za kuhanje.

Proizvodnja je razdeljena na **dva dela**:

METALURŠKI DEL

Kupljeni aluminij in procesni odpad od izsekovanja (cca. 40 % vhodne surovine za talilno peč) pretopimo v plinski dvokomorni talilni peči. Tekoči aluminij se prelije v dvizni, livni peči, ki omogočata kontinuirani dotok tekočega aluminija na livni stroj tipa »rotary« (livno kolo z utorom). Liti trak kontinuirano valjamo na topli in hladni valjarni na končno zahtevano debelino (območje od 3 do 10 mm).



Slika 1.2: Plinska dvokomorna talilna peč z vstavljenimi aluminijastimi bloki

(Talum, d. d)

PREDELOVALNI DEL

Osnovni material za proizvodnjo rondelic je liti aluminijasti trak. Predelovalni del proizvodnje poteka v štirih operacijah:

- izsekovanje,
- žarjenje,
- površinska obdelava,
- pakiranje in skladiščenje.

Po odlitju aluminijastega traku in obeh postopkih valjanja je trak navit na kolute. Ti so nato premeščeni na odvijalnik, ki je na začetku linije za izsekovanje. Trak potuje čez ravnalnik, kjer je izravnán, nato nadaljuje pot preko premostitvene mize in valjev v izsekovalni avtomat. V njem je vstavljeno ustrezno orodje, s katerim se izsekuje želena oblika. V uporabi so štirje izsekovalni avtomati moči 80, 110, 125 in 160 ton. Izsekovalni avtomati omogočajo od 60 do 625 udarcev na minuto. Vsi stroji so opremljeni s protihrupnimi kabinami. Površina rondic mora biti gladka brez izrazitih raztrganin. Čas avtomatskega režima izsekovanja je odvisen od hitrosti traku, kajti zunanje dimenzije traku (razen debeline) so vedno enake. Postopek izsekovanja se prekine ob potrební zamenjavi koluta. Hitrost je pogojena s pomikom traku. Pomik je določen s tremi spremenljivkami in se izračuna s pomočjo enačbe 1.1:

$$P = D + faktor\ odreza \cdot S_{max} \quad (1.1)$$

P [mm] – pomik

D [mm] – premer rezila

S_{max} [mm] – debelina traku

$faktor\ odreza$ [/] – brezdimenzijski faktor v območju 0.6 do 0.7

Izsekane rondelice popadajo na transportni trak pod izsekovalnim avtomatom. Od tod se vodijo preko vibratorjev in sejalnikov v žarilne posode. Vsaka posoda vsebuje približno 60 kg rondelic. Žarilna paleta obsega okrog 72 posod v skupni teži 4.5–5 t rondelic. Tako pripravljene se naloži na žarilni voz, s katerim so odpeljane v žarilno peč.



Slika 1.3: Za izsekovalnim strojem (levo) se rondelice zbirajo v žarilnih posodah, ki so s pomočjo robota naložene na žarilne palete (desno) (Talum, d. d)

Rondelice so nato na žarilnem vozu odpeljane v žarilno peč, kjer so rekristalizacijsko žarjene na 500°C , z namenom, da se znižajo mehanske lastnosti, in da izsekovalno olje izhlapi. Po žarjenju rondelice ohladimo na sobno temperaturo.



Slika 1.4: Žarilni vozovi s paletami rondelic (spredaj) pred veliko žarilno pečjo (zadaj) (Talum, d. d)

Sledi površinska obdelava (peskanje ali vibriranje, odvisno od zahtev kupca), da se poveča hrapavost rondic, ki omogoča večjo in enakomernejšo oprijemljivost premazov, kateri so potrebni za protismerno iztiskovanje pri nadaljnji predelavi v tube ali doze.



Slika 1.5: Vbočena rondica (welb) (levo) in rondica z ravnim dnom (desno) po površinski obdelavi

Zadnja operacija proizvodnega procesa je pakiranje in skladiščenje rondelic/rondic. Pakiranje teče na sodobni pakirni liniji. Rondice se polnijo v kartonske škatle po približno 25 kg, ki jih nato zložijo na palete. Polnitev je odvisna od dimenzij rondic. Napolnjene škatle z rondicami so prekrite s polietilensko (PE) folijo in ovite z elastično folijo. Rondele so pakirane ročno. Zloži se jih na paleto v stolpiče, ki so višine približno 165 mm. Število stolpičev je omejeno z dimenzijo palete, v odvisnosti od premera rondele. Dno, vrh in zunanje stene palete so zaščitene s kartonsko oblogo, paleta je povezana in zaščitena z elastično folijo.

Skladiščenje poteka v sodobnem regalnem skladišču, kjer je na razpolago 1.240 mest. Zapakirane in označene palete so dostavljene na posebno mesto, kjer se preko senzorjev podatki o paleti in naročilu prenesejo v informacijski sistem. Ta samodejno določi odlagalna mesta za posamezne palete. Ob odpremi se jih z viličarjem dvigne, naloži na tovornjak in dostavi kupcem. Polnjenje in praznjenje tega sodobnega skladišča poteka s pomočjo visoko regalnega viličarja, ki omogoča dvig palete na višini 8,2 metra. Viličar je voden preko induktivne zanke, ki je vgrajena v tla skladišča.

1.2 Opredelitev dela

Problem, ki je predmet raziskovanja, so napake, ki se pojavljajo proizvodnji rondic debeline 10 mm in premera 19,7 mm. Rondice, ki so polizdelki, se uporabljajo za izdelavo embalaž (npr. za ovitek, v katerem je cigara). Željeno obliko pridobimo s protismernim iztiskovanjem. Pri tem postopku je pomembno, da so stene gladke in brez napak. Vsaka nepravilnost se pri postopku protismernega iztiskovanja izraža kot hrapava, mat površina. Tega ne želi noben odjemalec, zato so takšne rondice neuporabne za nadaljno prodajo. Vsak izmet pa pomeni manjšo učinkovitost proizvodnega procesa in slabšo ekonomičnost. Seveda je želja vodilnih mož v delovni enoti, da se najde pot k zmanjšanju števila izdelkov z napako ali v najboljšem primeru, da takih izdelkov sploh ne bi bilo.



Slika 1.6: Rondica $D = 19,7$ mm z napako na robu

Po predvidevanju strokonjakov v podjetju rondice z napako nastanejo na robu traku. Domnevo so potrdili praktični preizkusi z odstranitvijo zunanjih pestičev iz orodja (v vrstici s 5 pestiči so tako ostali samo trije). Tako je

prišlo do odločitve, da bo najbolje analizirati samo vrstico s petimi pestiči, ki je najbolj problematična. Po tem navodilu je bil nato skonstruiran CAD model v programu Catia.

Cilji diplomskega dela so:

- izdelati parametričen model aluminijastega traku in orodja za izsekovanje v CAD programu,
- parametričen CAD model bo osnova za numerične preračune, v katerih bodo opazovane razporeditve napetosti v aluminijastem traku,
- opazovan bo vpliv razdalje med posameznimi rondicami ter vpliv razdalje med izsekano rondico in robom traku.

Cilj je bil izdelati parametričen model orodja, ki bo dovoljeval naknadno spreminjanje mer orodja na enostaven in hiter način. Parametrično modeliranje pomeni, da s spreminjanjem določenega parametra, primer parametra premera D in izbočitve W , je tako možno poljubno spreminjati premer in izbočitev vseh pestičev naenkrat. Prav tako je možno s posebnim parametrom določiti število pestičev v prvi in drugi vrstici. Faktor odreza je faktor, ki določa

razdaljo med pestiči. Vrednost znaša med 0.6 in 0.7. Točno vrednost pa je potrebno določiti z analizami. Sinteza vseh danih navodil in podatkov o orodju je pripeljala do izdelave poenostavljenega modela orodja z eno vrstico pestičev.

Analiza po metodi končnih elementov ima prednosti v primerjavi z laboratorijskimi meritvami ter izdelavo poskusnih orodij v ceni in času, ki je potreben za pridobitev rezultatov. V diplomskem delu so tako predstavljeni vsi rezultati pridobljeni po metodi končnih elementov. Analize so bile narejene s pomočjo programov Catia in Abaqus.

Teze, ki jih bomo skušali dokazati:

- uporabljen parametričen model omogoča hitre spremembe konstrukcije (sprememba premera izsekovalnih orodij, razdalje med pestiči ipd.),
- vpliv razdalje med robom in izdelkom (manjša razdalja – večja verjetnost napak),
- računalniška simulacija omogoča analizo orodja z manj potrebnega eksperimentalnega dela,
- računalniška simulacija je časovno ugodnejša, saj nam podaja rezultate v fazi konstruiranja.

1.3 Struktura diplomskega dela

Na podlagi predpostavljenih ciljev in tez v poglavju 1.2 je bila diplomska naloga zasnovana tako, da bo problem čim bolj obrazložen in jasen. V poglavju 2 bodo obrazloženi postopki izsekovanja, kot so izrezovanje in luknjanje. Orodje in njegova zgradba je predstavljena v nadaljnjih podpoglavjih 2.3, 2.4 in 2.5.

Sledi poglavje 3, kjer je obrazložen in pojasnjen parametričen model orodja. V teh poglavjih bo dan odgovor na tezo o omogočanju hitrih sprememb konstrukcije. V podpoglavju 3.1 je bolj podrobno predstavljeno konstruiranje parametrov, ki določa obliko in velikost orodja. Zadnje podpoglavje 3.2 pa obravnava prednosti uporabe nekaterih parametrov, ki so uporabljeni na modelu orodja.

S pomočjo parametričnega modela so bile narejene numerične analize, predstavljene v poglavju 4. Potrebno je bilo določiti robne pogoje ter lastnosti materialov na orodju, kar je predstavljeno v podpoglavjih 4.1 in 4.2. V poglavju 4.3 pa so predstavljeni in komentirani rezultati analiz. Za tem sledi še sklep v poglavju 5.

2 PREDSTAVITEV IZSEKOVALNIH ORODIJ ZA IZDELAVO RONDELIC

V serijski proizvodnji oblikovanja pločevine nastopajo rezilna orodja v delovnem postopku rezanja in služijo za popolno ločitev materiala. Tehnika rezanja ima veliko vlogo v obdelavi materiala brez odzemanja ostružkov ter jo uvrščamo k postopkom plastičnega preoblikovanja. Glede na način reza ločimo rezanje na škarjah, kjer govorimo o odprtem rezu med rezalnimi robovi dveh nožev ter rezanje ali prebijanje s specialnimi rezilnimi orodji, kjer imamo zaprti rez (Pahole, 2009, str. 2).

IZREZOVANJE je popolna ločitev materiala po celotni dolžini oboda poljubnih oblik. To lahko izvedemo z vsemi vrstami rezilnih orodij, kakor tudi s krožnimi ali krivuljnimi škarjami.

LUKNJANJE je podobno kot izrezovanje tj. popolna ločitev materiala po celotnem obodu oblike. Razlika je samo v tem, da je pri luknjanju odrezani kos odpadek, medtem ko je pri izrezovanju to izdelek.

Da lahko pravilno izdelujemo orodja, ki naj ustrezajo vsem zahtevam rezilne dejavnosti proizvodnje, je potrebno poznati ves potek dogajanja med rezanjem in ga pri izvedbi orodja tudi upoštevati.

Osnovni način je ta, da rezili režeta celotno debelino materiala (S) do končne ločitve, kar lahko vidimo med delovanjem pri vseh ročnih in strojnih škarjah. Vsako rezanje, čigar delovanje je škarjam enako, imenujemo odprte poteke rezanja, nasprotno pa zaključene poteke. K odprtim potekom spada odrezovanje, vrezovanje in obrezovanje. K zaključenim potekom rezanja pa izrezovanje, luknjanje in obrezovanje. Slednje nastopa vedno tam, kjer rezanje materiala poteka naenkrat, po celotnem obodu oblike izdelka. V pravem smislu besede rezanje, pri zaključenem poteku, dela le takrat, če so rezila škarjasto delujoče izvedena. Nasprotno se material več ali manj izbija, odrez je sunkovit, kar pa zelo slabo vpliva na orodje in stiskalnico. Sunkovito delovanje, pri ravnih izvedbah rezil, lahko omilimo s pravilno zračnostjo med rezili ter s primerno ostrino rezil. Če želimo sunkovito delovanje popolnoma odpraviti, je potrebno rezilne ploskve izvesti škarjasto delujoče. To lahko izdelamo na zgornjem ali spodnjem rezilu. V tem primeru ni izrezana celotna oblika odtiska naenkrat, ampak postopoma, potek rezanja pa je enak kot pri škarjah (Pahole, 2009, str. 3).

2.1 Postopek izrezovanja ravnih ploskev

Ravnih ploskev rezilnih robov se ne uporablja za izrezovanje velikih oblik iz debele pločevine, ker je odrez sunkovit. Postopek je uporabljen samo v primerih, kjer ne nastopa velika sila rezanja, torej v vseh vrstah rezilnih orodij, za izrezovanje manjših oblik iz tanjše pločevine. Izsekani izdelki so ravni. Silo rezanja, ki nastopi pri rezanju z orodji z ravnimi ploskvami rezilnih robov, določimo z enačbo (Pahole, 2009, str. 4):

$$F_r = A \cdot \tau_\beta \quad (2.1)$$

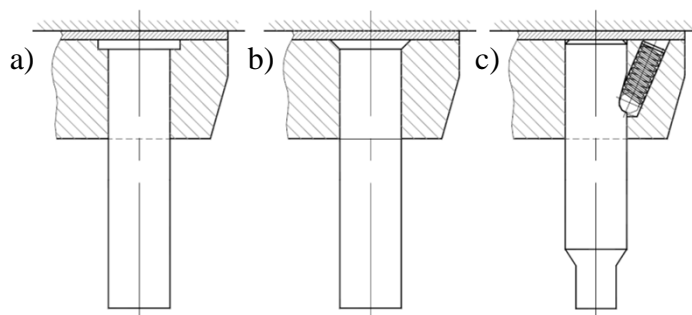
F_r [N] – rezna sila

A [mm²] – ploščina preseka

τ_β [N/mm²] – strižna trdnost materiala

2.2 Zgornja rezila (pestiči)

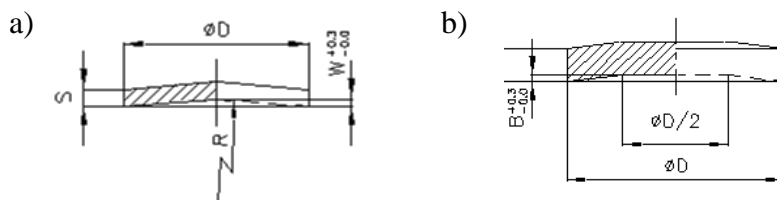
Rezila oziroma pestiči sta izraza, ki poimenujeta isto stvar. Uporaba teh dveh izrazov variira, če gre za postopek izrezovanja ali iztiskovanja. Za izdelavo se večinoma uporablja visoko legirano jeklo. Novejše izvedbe so iz karbidnih trdnin (velikoserijska proizvodnja), pri čemer se majhna rezila izdelujejo v celoti iz enega kosa, večja pa iz sestavljenih vložkov. Zgornja rezila so trdno vstavljena v držajno ploščo in so zavarovana proti izvlačanju. Slaba vgradnja zgornjega rezila v držajno ploščo lahko povzroči med delovanjem orodja rahljanje rezil, kar privede do nasedanja rezila na rezilo. Posledica tega je prehitra obraba, lahko pa tudi lom rezil, kar krajša življenjsko dobo orodja. Rahljanje lahko povzroči tudi prevelik površinski pritisk naležne ploskve rezila na vpenjalno ploščo, kar pogosto nastopa pri izrezovanju debelejših pločevine (Pahole, 2009, str. 29).



Slika 2.1: Gornje rezilo: a) s cilindrično glavo, b) z glavo v obliki prisekanega stožca in c) za vpenjanje s pomočjo krogle (Pahole, 2009, str. 30)

Cilindrična rezila so standardizirana z DIN standardi. DIN 9837 opisuje rezila s cilindrično glavo, DIN 9840 rezila z glavo v obliki prisekanega stožca, ter DIN 9843, ki opisuje cilindrična rezila za vpenjanje s pomočjo krogle (slika 2.3) (Pahole, 2009, str. 30).

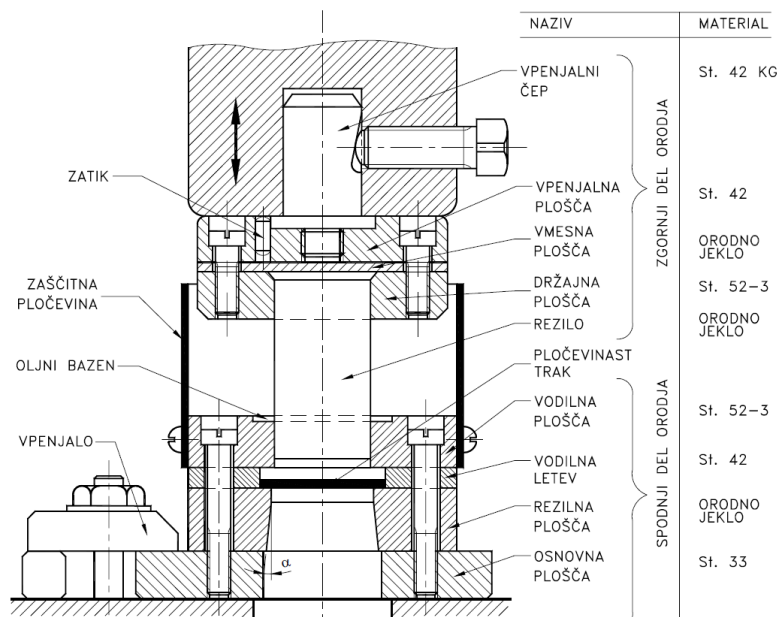
Poznamo različne oblike rezil ali pestičev. V prejšnjih primerih so bila predstavljena rezila z ravnimi ploskvami. V podjetju Talum so uporabljene še oblike t. i. welb (oznaka W) in bombaža (oznaka B). Pri welb gre za navadno zaokrožitev z neko višino, pri bombaži pa je del zaokrožen, sam vrh pa uravnan.



Slika 2.2: Oblika pestiča: a) welb (W) in b) bombaža (B) (Talum, d. d)

2.3 Rezilna orodja vodena z vodilno ploščo

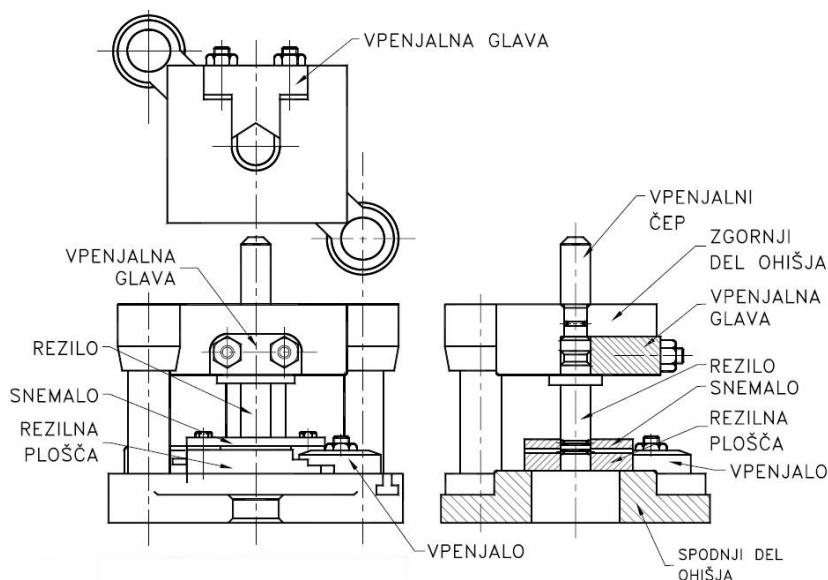
Enostavno rezilno orodje, vodeno z vodilno ploščo, predstavlja napredek glede na prosta rezilna orodja. Nasprotno, kot pri prostih orodjih, je med delovanjem gornje rezilo vodeno s celotno obodno ploskvijo v vodilni plošči. S tem je onemogočena možnost nasedanja zgornjega rezila ob rezilno ploščo. Vodilna plošča služi tudi kot snemalo. Rezilna orodja vodena z vodilno ploščo uporabljamo zlasti za izdelavo večjega števila kosov, kar pa s prostimi orodji zaradi hitre obrabe rezil ni ekonomsko upravičeno (Pahole, 2009, str. 18).



Slika 2.3: Rezilno orodje vodeno z vodilno ploščo (Pahole, 2009, str. 18)

2.4 Rezilna orodja vodena z vodilnimi stebri

V primerih, kjer je potrebno izrezati odtisek velike točnosti, so uporabljena rezilna orodja vodena z rezilnimi stebri. Ker je od vodenja rezil odvisno kvalitetno delovanje orodja, se s pomočjo vodilnih stebrov doseže najpreciznejši odrez. Če so rezila dovolj ostra in je vmesni zrak pravilno naravnana, niha dosegljiva točnost izreza med $\pm 0,02$ mm (Pahole, 2009, str. 21).



Slika 2.4: Rezilno orodje vodeno z vodilnimi stebri (Pahole, 2009, str. 21)

Uporabnost teh orodij je večstranska. Tako lahko na njih, zraven vseh vrst rezanja, izvajamo tudi zvijanje, upogibanje in do neke mere vlečenje. V primeru z ostalimi vrstami rezalnih orodij, so orodja vodena z vodilnimi stebri, razmeroma lažje izvedljiva in v obratovanju veliko naprednejša (Pahole, 2009, str. 21).

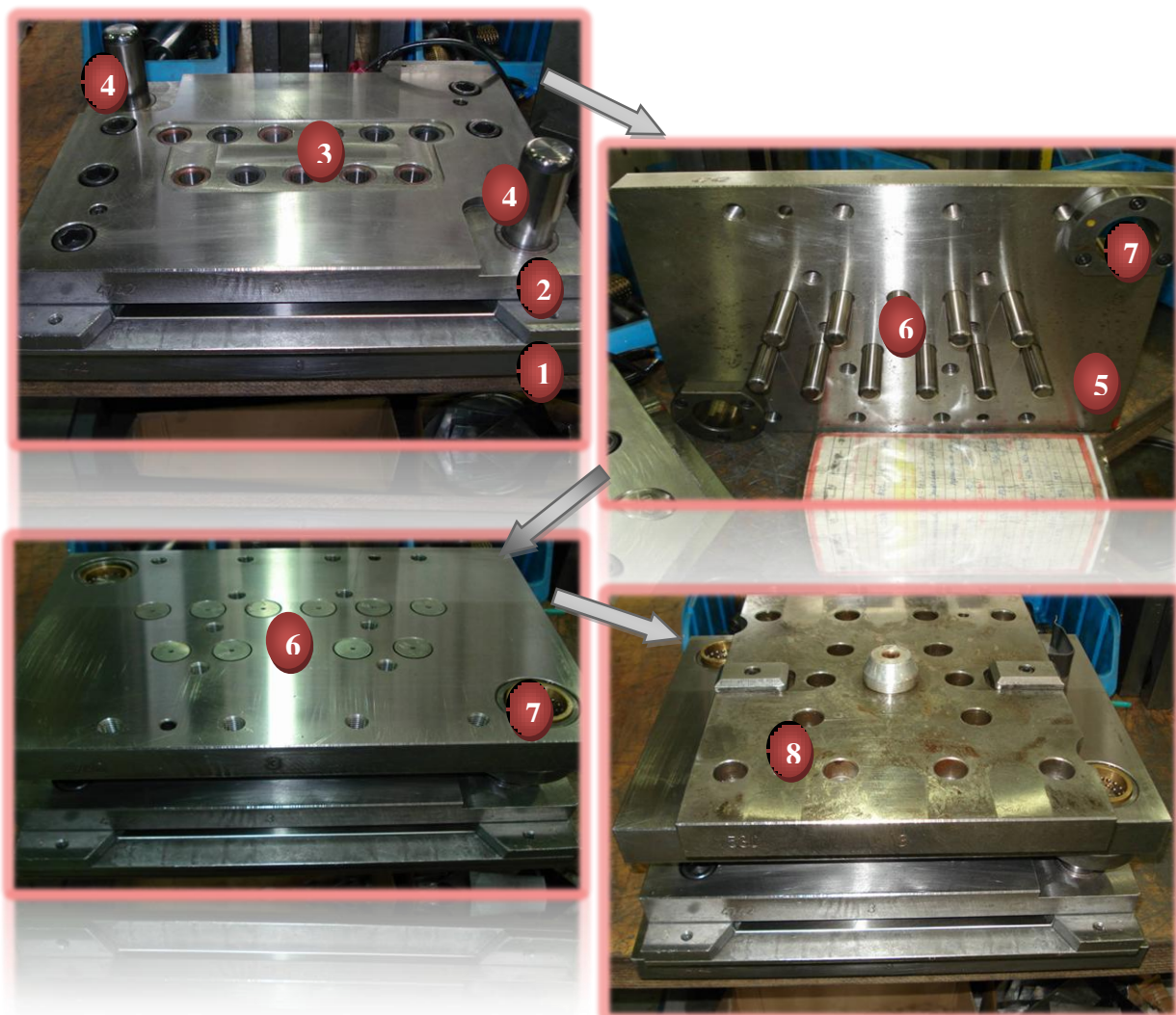
Na delovanje orodja netočnost vodenja paha stiskalnice ne vpliva. Vsa točnost vodenja, zgornjega s spodnjim delom ohišja, je popolnoma odvisna od natančnosti izdelave vodilnih stebrov. Ti se med obratovanjem minimalno obrabljajo, s čimer se večja življenjska doba ter ekonomičnost orodja. Izdelava je relativno hitra, ker niso potrebni elementi, kot je npr. težko izvedljiva vodilna plošča. Prihrani se orodno jeklo, kar znižuje ceno orodja. Ohišja vodena z vodilnimi stebri, so danes standardizirani deli orodij in omogočajo, da lahko brez posebnih sprememb v enem ohišju menjamo različna orodja (Pahole, 2009, str. 22).

Ohišja z vodilnimi stebri sestavljajo naslednji deli (Prav tam.):

- **vodilni stebri** (izdelani iz cementiranega jekla, mazani preko oljnih kanalov),
- **spodnji in zgornji del ohišja** (izdelana iz sive litine ali iz konstrukcijskega jekla).

2.5 Rezilna orodja z vodilnimi stebri in z vodilno ploščo

V podjetju Talum uporabljajo orodja, ki združujejo dobre lastnosti obeh načinov vodenja. Na slikah je prikazano orodje, zelo podobno orodju, ki je tema obravnave v diplomski nalogi. Razlikuje se v rezilih, ki so tukaj bombirana (izbočena glava z uravnanim vrhnjim delom), v obravnavanem primeru pa so oblike welb (izbočena glava brez uravnane vrhnjega dela). Drugačno je tudi pri postavitvi in številu rezil, ki jih je tukaj 11. V dveh vrstah so razdeljeni po šest v eni in po pet v drugi vrsti. Obravnavano orodje pa ima samo 9 rezil, 5 v eni in 4 v drugi vrsti. Ostale lastnosti orodja so enake in se ne razlikujejo od orodja, ki je prav tako izdelano v kombinaciji vodilne plošče in vodilnih stebrov.



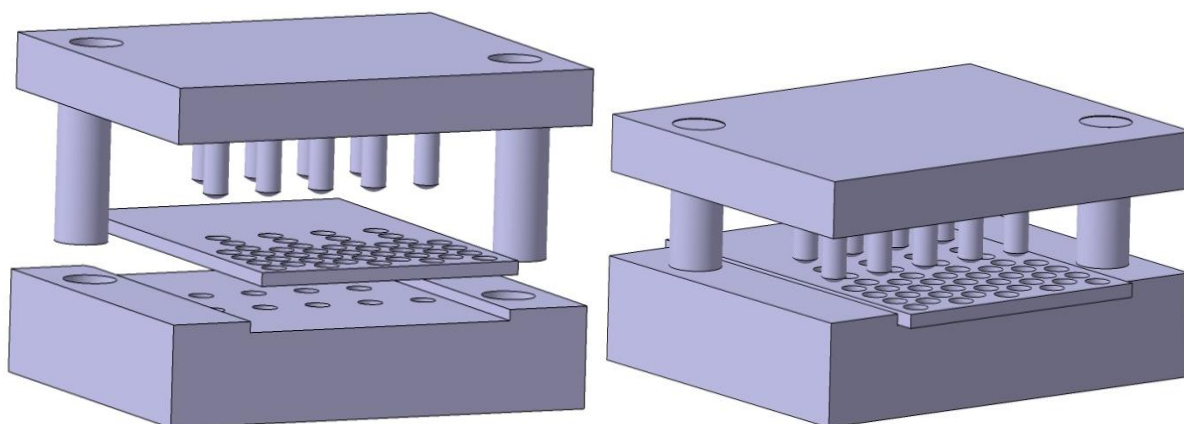
Slika 2.5: Izsekovalno orodje z vsemi sestavnimi deli: 1 - rezilna plošča z vodilno letvijo, 2 - vodilna plošča, 3 - vodilne luknje z mazalnim kanalom, 4 - vodilna stebra, 5 - držalna plošča, 6 - rezila oziroma pestiči, 7 - vodilna puša in 8 - vpenjalna glava (Talum, d. d.)

3 PARAMETRIČNO MODELIRANJE ORODJA

V diplomski nalogi so bili postavljeni cilji. Potrebno je bilo izdelati parametričen CAD model aluminijastega traku in orodja za izsekovanje v programu Catia. Model orodja s trakom je bil osnova za numerične preračune, v katerih bodo opazovane razporeditve napetosti v aluminijastem traku. S tem bi podprli tezo, da uporabljen parametričen model omogoča hitre spremembe konstrukcije. Z določenimi parametri je mogoče spremeniti premer pestičev kot tudi razdalje med njimi v eni vrsti.

Nastala je ideja o orodju, ki je sestavljeno iz treh komponent. Prva komponenta je zgornji del ohišja z vpenjalno glavo, kamor se namestijo pestiči na določeno mesto. Pestiči so postavljeni v dveh vrstah. V prvi vrsti so štirje pestiči, v drugi pa jih je pet. Razmik med vrsticami je okrog 60 mm. To omogoča lažjo izdelavo in vgradnjo pestičev v orodje. Druga komponenta je spodnje ohišje z vodilno letvijo in rezilno ploščo. Vodilna letev ima nalogo usmerjati in voditi trak pod pestiči, ki nato na korektnem mestu izvedejo izrez. Tretji komponenti pa sta vodilna stebra, ki omogočata kontrolirano pomikanje zgornjega dela ohišja s pestiči v smeri proti spodnjemu delu ohišja (smer izsekovanja). Dodan je še trak z izrezanimi luknjami, ki so posledica prej izrezanih rondic. Zaradi onemogočanja pogleda na pestiče, vodilna plošča ni bila vključena.

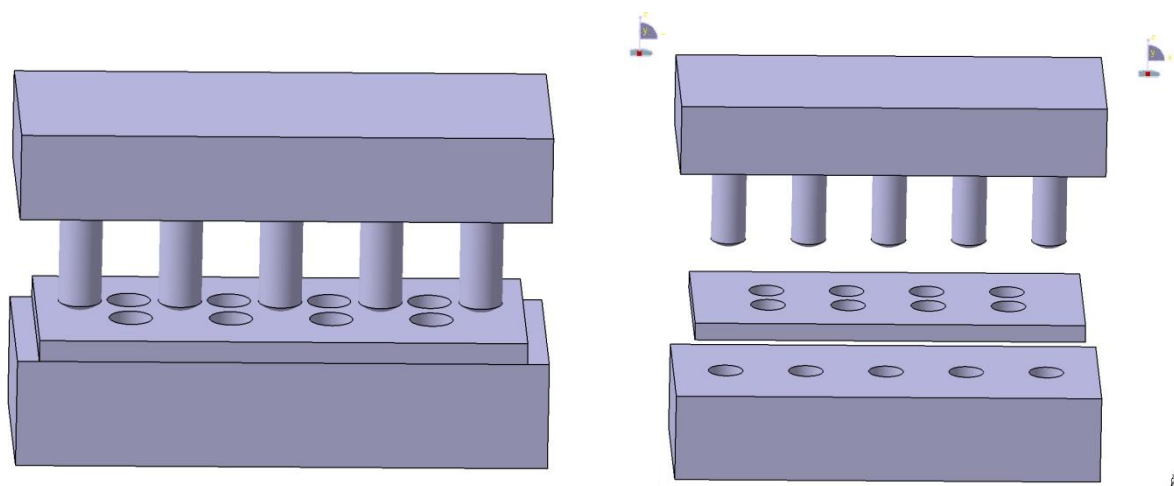
Na sliki 3.1 je viden model orodja, ki je bil prvotno mišljen. Vseboval je vse omenjene komponente. Oblika modela je bila zelo enostavna, kakor je tudi oblika pravega orodja. Konstruiranje podrobnosti, kot so vijaki, navoji in ležaji ni bilo smiselno, saj namen te diplomske naloge ni bil skonstruirati 3D model pravega orodja, temveč orodje, ki je po velikosti primerljivo pravemu.



Slika 3.1: Prikaz razstavljenega (levo) in sestavljenega modela orodja s trakom (desno)

Kljub temu v programu Catia ni bilo izdelano celotno orodje, saj ne bi imelo pomena pri kasnejšem numeričnem preračunu in analizi. Večje in kompleksnejše orodje pomeni več dela s pripravo orodja za numerično analizo (določanje robnih pogojev, obremenitev). Tudi zaradi večjega števila elementov v računski mreži modela je posledično daljši računski čas. Zato je bilo potrebno 3D model čim bolj poenostavit, da bi se lahko osredotočil na tisto, kar je bistvenega pomena. Najbolj problematična je bila vrstica s petimi pestiči (2. vrstica), ker vsebuje pestiča, pri katerih nastajajo rondice z napakami. Te anomalije so izražene kot površinske razpoke.

Sinteza vseh danih navodil in podatkov o orodju je pripeljala do izdelave poenostavljenega modela orodja z eno vrstico pestičev. Na traku pa so simulirane izrezane luknje 1. vrstice pestičev. Viden je na sliki 3.2.



Slika 3.2: Poenostavljen parametričen model izrezovalnega orodja

Poenostavljen parametričen model zajema tri sestavne dele: vpenjalno glavo s pestiči, trak z luknjami in matrico s prav tako izdelanimi luknjami, skozi katere padejo rondice v posebne zaboje. Trak je debeline 10 mm, pestiči pa so premera 19,7 mm. Pestiči imajo na koncu izbočitev oziroma t. i. welb, ki je velika 4 mm. Zgornji del ohišja z vpenjalno glavo in spodnji del ohišja z vodilno letvijo sta izdelana iz orodnega jekla.

3.1 Konstruiranje poenostavljenega parametričnega modela orodja

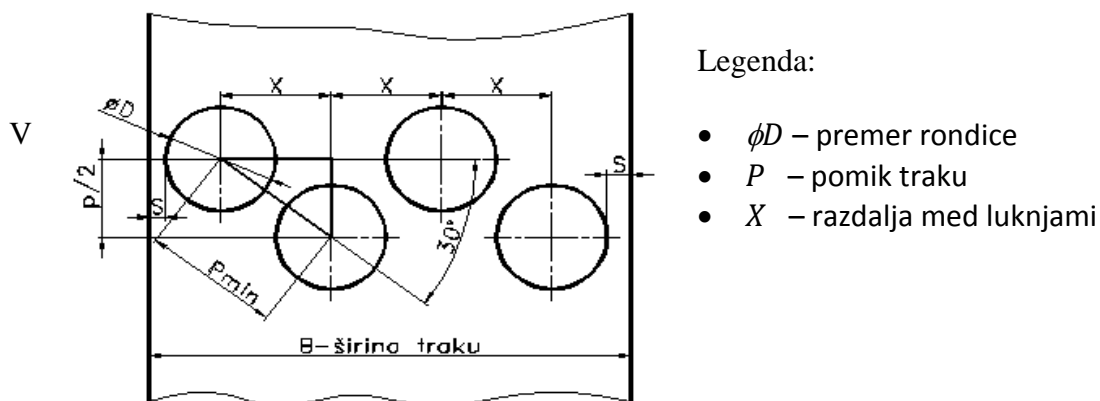
Dejanskega razstavljenega orodja sprva ni bilo mogoče videti, zato je bilo potrebno ustvariti model orodja na podlagi vzorca traku, ki je viden na sliki 3.3. Vzorec je bil poslan na Fakulteto za strojništvo ravno z namenom raziskave problema. Odsekan trak je bil poslikan in nato izmerjen. Zraven že znanih podatkov o premeru rondic (pestičev), ki znaša $D = 19,7 \text{ mm}$, so bile pridobljene naslednje informacije:

- debelina traku znaša $S_{max} = 10 \text{ mm}$,
- razdalja od roba znaša $t = 10 \text{ mm}$ (naknadne informacije so za razdaljo od roba določale $t = 10,08 \text{ mm}$),
- lukenj je v eni vrsti 4, v drugi pa 5.



Slika 3.3: Vzorec traku z rondicami premera 19,7 mm

Ti Osnovni podatki dajo predstavbo, koliko približno je veliko orodje in koliko pestičev vsebuje. Za poenostavljeno orodje z eno vrsto pestičev je bila privzeta širina orodja 243 mm. To pomeni, da je orodje v primerjavi s trakom širše na vsaki strani za 10 mm. Ta razdalja je označena s konstanto »Rob«. Meritve razdalj med luknjami na traku so bile nenatančne in izmerjene dimenzije so bile le približek dejanskim, zato je bilo težko določiti pravo razporeditev pestičev. Pri tem problemu je bila v veliko pomoč shema (slika 3.4), na kateri so prikazane pomembne razdalje med luknjami na traku.



Slika 3.4: Razporeditev pestičev/lukenj na orodju/traku (vir: Talum, d. d.)

V poenostavljenem modelu orodja in traku je obravnavana ena vrstica petih pestičev, ki so vpeti v zgornji del ohišja, 2 vrstici po 4 lukenj na traku in ena vrstica petih lukenj v spodnjem delu ohišja. Pri določanju razdalj na podlagi sheme (slika 3.4) je potrebno poudariti, da spremenljivke P in P_{min} (obe se izračunata po formuli 1.1) ter X ne določajo samo razdalj med luknjami, temveč, v primeru poenostavljenega orodja s trakom, razdalje med luknjami v traku na eni strani in pestiči na drugi. Ista zgodba se ponovi pri določanju razdalj med luknjami v traku in luknjami v spodnjem delu ohišja. Tako je na poenostavljenem modelu traka razdalja med dvema vrsticama lukenj enaka P , razdalja med pestičem, ki je na orodju in luknjo v traku pa je $P/2$. Slednja razdalja določa distanco v vertikalni smeri, v diagonalni smeri pa razdaljo določa P_{min} . Skupaj z razdaljo X tvorijo obliko pravokotnega trikotnika, v ogliščih pa sta središči pestiča in luknje. Tako lahko prvi kateti tega pravokotnega trikotnika pripišemo oznako $P/2$, hipotenuzo pa označimo s P_{min} . Iskana vrednost je tako druga kateta, ki jo označimo z X . Kot, ki ga objemata kateta X in hipotenuza P_{min} znaša 30° .

Predpostavimo, da zgornjo vrstico nožev predstavljajo pestiči. Razdalja med pestiči je določena z dvakratnikom števila X . Razdalja X se izračuna po formuli 3.1:

$$X = P_{min} \cdot \cos 30^\circ \quad (3.1)$$

Tako je z enačbo 3.1 izpolnjena zahteva po natančnem izračunu razdalj med pestiči na orodju. Razdalje med pestiči so pogojene z določitvijo oddaljenosti prvega pestiča od roba. Večja kot bo oddaljenost od roba, manjša bo razdalja med pestiči in obratno. Vse to je uravnavano s t. i. faktorjem odreza, ki je bil vpeljan v enačbo 3.1. Za določitev oddaljenosti od roba t uporabimo naslednjo enačbo 3.2:

$$t = (B - ((\text{Število pestičev} - 1) \cdot 2 \cdot X) - D)/2 \quad (3.2)$$

Enačba 3.2 je sestavljena iz več parametrov. Od širine traku B so odštete razdalje med pestiči. Ker je razmikov med pestiči vedno za ena manj, kot je pestičev samih, je v enačbi upoštevano " $\text{Število pestičev} - 1$ ". Število razmikov med pestiči je pomnoženo z dvakratno dolžino X . Odšteta je še polovica premera pestiča na vsaki strani. Celotna enačba je deljena s številom 2, da dobimo oddaljenost od roba na eni strani. Postavitev prvega pestiča je določena z enačbo 3.3:

$$\text{oddaljenost od roba traku} = t + D/2 \quad (3.3)$$

Pri konstruiranju pestičev na zgornjem delu ohišja, kjer so vpeti, pa je bilo potrebno upoštevati še dodatnih 10 mm, ki so prišteti pod oznako parametra »Rob«. Ta razdalja nima vpliva na analize, ki temu sledijo in je le estetskega pomena. Tako določa postavitev prvega noža glede na zgornji del ohišja naslednja enačba 3.4:

$$\text{oddaljenost od roba zg. dela ohiš.} = t_{\text{popr}} + \frac{D}{2} = \text{Rob} + t + \frac{D}{2} \quad (3.4)$$

Vredno je še pojasniti enačbo, ki določa dolžino orodja (smer pomika traku). Enačba je izdelana glede na luknje na traku. Te zavzemajo širše območje kot pestiči, zato je bilo potrebno izdelati tako dolg trak in orodje, da je preprečeno širjenje napetosti v neželene smeri (če bi bil rob preblizu lukenj, bi nastal efekt roba na napačnem mestu). To je pripeljalo do naslednje enačbe 3.5:

$$\text{dolžina orodja} = 2 * y + D + P \quad (3.5)$$

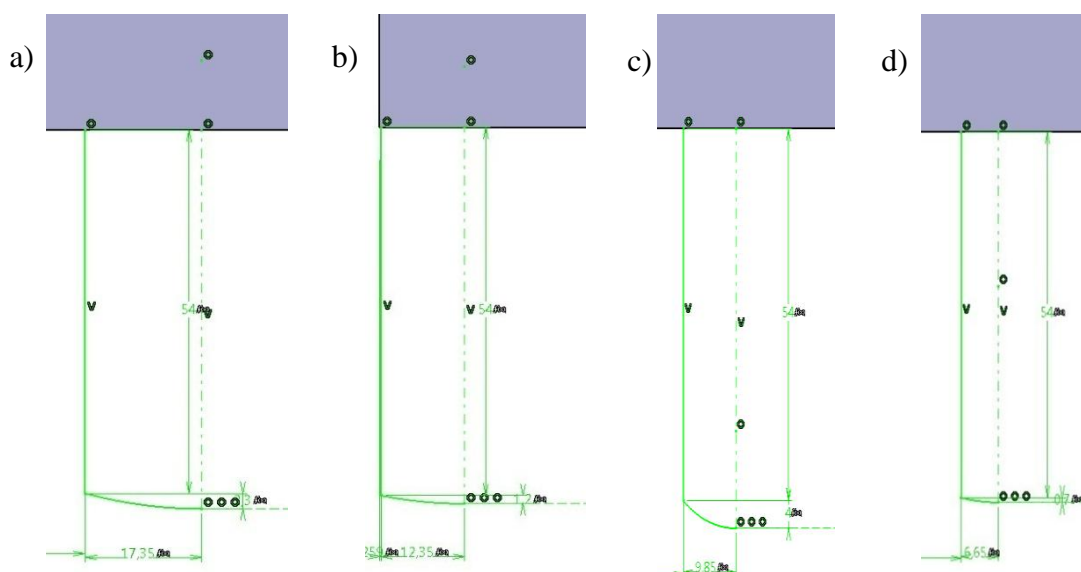
Enačba 3.5 je sestavljena iz treh komponent oziroma parametrov. D in P sta nastopala že v prejšnjih enačbah in zanj je znano, da je D premer luknje, P pa parameter pomika, ki se izračuna po enačbi 1.1. P je razdalja med luknjama na traku v smeri pomika, polovici premera na vsaki strani lukenj pa dodata k skupni razdalji od enega zunanjega roba do drugega zunanjega roba. Zadnji parameter v enačbi, parameter y , pa določa razdaljo od zunanjega roba luknje do roba traku. Ker se na drugi strani stvar še enkrat ponovi pri drugi luknji, je parameter y pomnožen z 2. Vrednost tega parametra je 25 mm. Načeloma navzgor ni omejitve, zmanjševanje vrednosti tega parametra oziroma zmanjševanje razdalje od roba traku pa bi lahko privedlo do pojava »efekt roba«. Ker je ta efekt smiselno opazovati le v okolici pestičev v smeri x koordinate, se temu izognemo tako, da povečamo parameter y na tako vrednost in preprečimo pojav efekta roba okrog lukenj v smeri y koordinate.

3.2 Globalni in lokalni parametri

V prejšnjem poglavju so bili omenjeni že nekateri parametri, ki določajo velikost in obliko orodja, postavitev in razporeditev pestičev ter lukenj. V nadaljevanju bodo predstavljeni še parametri, ki vplivajo na obliko in število pestičev.

Globalni in lokalni parametri nam omogočajo, da se lahko na parametričnem modelu izvedejo hitre spremembe konstrukcije. S tem se stvari poenostavijo, saj je za spremembo določenih dimenzij potrebna samo sprememba enega parametra. Prav tako je potrebno za naknadne popravke manj časa, kar omogoča navsezadnje konkurenčnost na trgu, ki je dandanes zelo agresiven in se drži načela »just in time«.

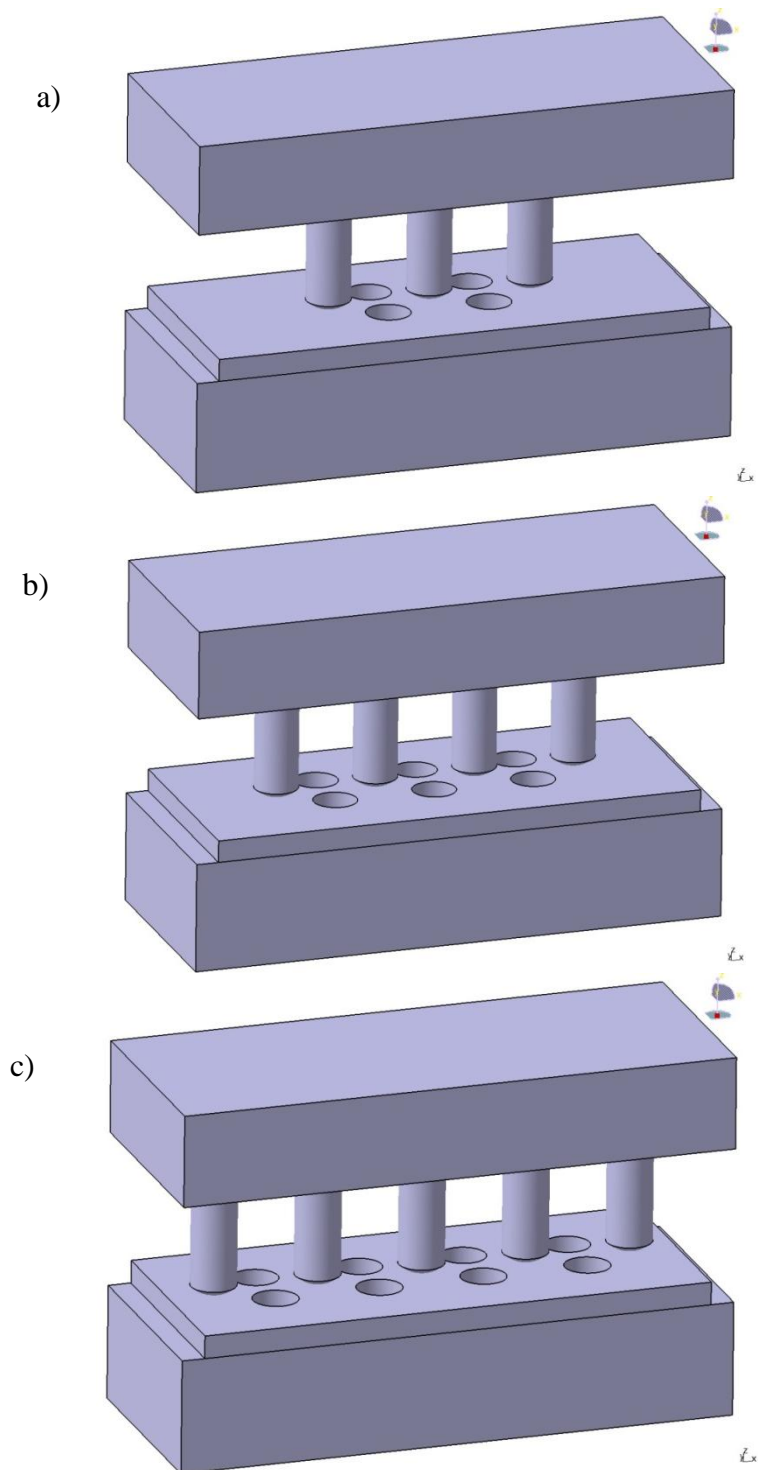
Odvisno od želja naročnikov je potrebno proizvesti rondelice ali rondice določenih oblik in velikosti. Tako je potrebno izdelati orodje s primernimi pestiči. Parametri omogočajo enostavno in hitro spreminjanje velikosti ter obliko pestičev. Naslednji primer prikazuje primer s spreminjanjem dveh parametrov: D , ki je premer orodja in W , ki določa izbočitev pestiča.



Slika 3.5: Štirje primeri pestičev: a) $D = 34,7 \text{ mm}$, $W = 2,3 \text{ mm}$; b) $D = 24,7 \text{ mm}$, $W = 1,2 \text{ mm}$; c) $D = 19,7 \text{ mm}$, $W = 4,0 \text{ mm}$; d) $D = 13,3 \text{ mm}$, $W = 0,7 \text{ mm}$.

Iz slike 3.5 je lepo razvidno, kako lahko s klikom ali dvema zelo spremenimo pestič. Parametre lahko spreminjamo na globalni kot tudi na lokalni ravni ohišja. Podoben princip velja pri spreminjanju vrednosti parametra, ki določa število pestičev. Parametra sta poimenovana »Število pestičev (1)« in »Število pestičev (2)«. Slednji je od prvega vedno

manjši za 1! Razlog za to izhaja iz postavitve dejanskih pestičev na orodju, saj ima vedno eno vrsto manj pestičev od druge. Tako je parameter »Število pestičev (1)« pripisan na pestiče, parameter »Število pestičev (2)« pa na luknje v traku. Skratka, s spreminjanjem glavnega, globalnega parametra »Število pestičev (1)« spreminjamo tudi njemu odvisen parameter »Število pestičev (2)«.



Slika 3.6: Primeri orodij: a) s tremi, b) s štirimi in c) s petimi pestiči.

4 NUMERIČNA ANALIZA TRAKU

Model, ki je bil izdelan v programu Catia (slika 3.2), je bil nato v formatu STEP uvožen v program Abaqus. Pričela se je priprava orodja za numerično analizo. Določeni so bili materiali in njihove lastnosti, te pa so se predpisale določenemu delu orodja. Pred zaključnim mreženjem in analizo orodja so bili določeni še preostali robni pogoji.

Bistvenega pomena je bilo s pomočjo analiz raziskati območja povečanih koncentracij napetosti okrog pestičev in preveriti kakšen vpliv ima rob traka. Potrebno je bilo spoznati, kakšne napetosti so se pojavljale ob dejanskih, uporabljenih dimenzijah orodja. Velikega pomena je tukaj »efekt roba«. Pričakovati je bilo, da, bližje kot bo pestič robu traku, večje koncentracije napetosti se bodo pojavile.

Oddaljenost pestičev od roba traku pa je bilo možno določati s faktorjem odreza. Tako je bilo s pomočjo analiz potrebno poiskati primeren faktor odreza, ki bi najbolj ustrezal pestičem premera 19,7 mm. Kot je bilo že pojasnjeno v poglavju 3.1, faktor odreza vpliva na razdaljo med pestiči in je v območju od 0,6 do 0,7. V primeru, da se poveča faktor odreza, se temu sorazmerno poveča razdalja med pestiči. Tedaj se zunanja pestiča približujeta robu traka. Obratno velja, ko se faktor odreza zmanjšuje. Takrat pa pride do povečanih koncentracij napetosti med pestiči, zato te napetosti pri tem faktorju odreza zanemarimo.

4.1 Določanje lastnosti materialov in robnih pogojev

Orodje in trak sta izdelana iz različnih materialov, katerih lastnosti so zelo pomembne za numerične analize. V programu Abaqus je možno določiti mehanske lastnosti materialov. Tako so bile jeklu in aluminiju pripisane naslednje lastnosti:

Jeklo: - elastični modul: $E = 210000 \text{ Mpa}$

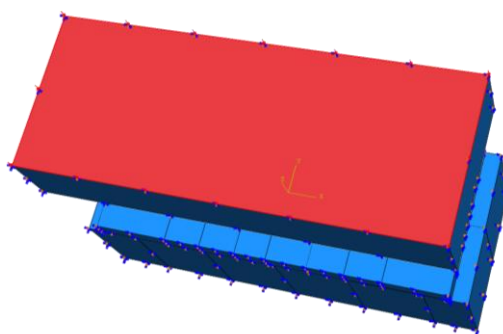
- Poisonovo število: $\mu = 0.3$

Aluminij: - elastični modul: $E = 71000 \text{ Mpa}$

- Poisonov število: $\mu = 0.3$

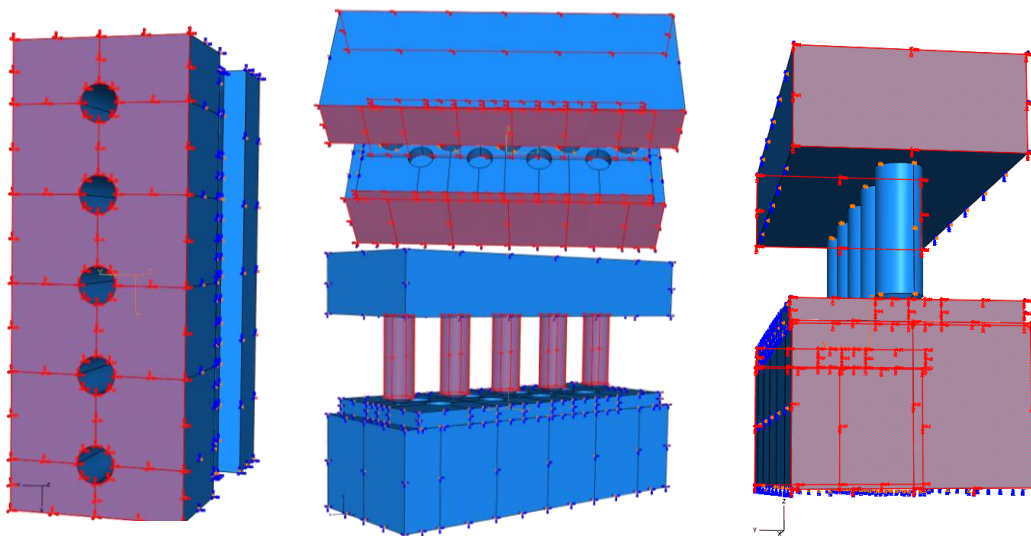
Te lastnosti materialov se nanašajo na elastično območje, kjer po razbremenitvi napetosti ne pride do trajnih deformacij in material povrne v prvotno stanje. Čeprav dejansko pride do plastičnih deformacij in do izseka rondice iz traku, pri rezultatih ne pride do razlik, če se upošteva samo elastično območje.

Po določanju mehanskih lastnosti materialov je sledil korak določanja obremenitev in podpor. Velikost obremenitve je bila pridobljena na podlagi prejšnjih analiz, ki so bile izvedene na Fakulteti za strojništvo v sodelovanju s podjetjem Talum. Viri so navajali, da je sila ob končni obremenitvi stiskalnice znašala 380 kN. Ta se porazdeli na devet pestičev. Ker pa ima poenostavljeno orodje samo pet pestičev, je potrebno delujočo silo na en pestič pomnožiti s 5. Tako je posredna obremenitev 211111 kN. Ker v programu Abaqus poteka določevanje obremenitve v obliki tlaka (v enotah MPa), je bilo potrebno silo v N deliti s površino v mm^2 . Velikost površine na zgornjem delu ohišja je 23361 mm^2 . Tako dobimo obremenitev reda velikosti 9 Mpa. Tlak je razporejen proporcionalno po celotni površini, tako da vsi pestiči delujejo z enako silo na trak.



Slika 4.1: Določanje obremenitve na zgornjo ploskev ohišja

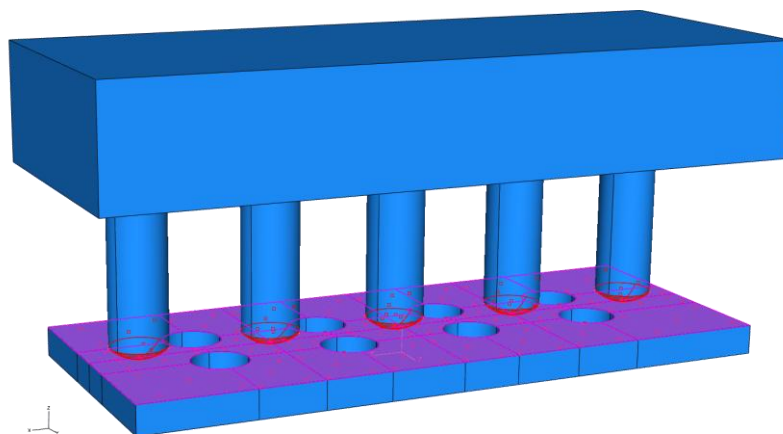
Večja pozornost je bila posvečena podporam, ki so zelo pomembne in od njihove pravilne postavitve je odvisno, ali se bo numeričen preračun sploh izvedel. Zato je potrebno pri podporah predvideti pomike določenih delov orodja in jih omejiti tako, da bo procesor računalnika imel, kar se da, čim manj dela. Na tem modelu so bile postavljene štiri vrste podpor (slika 4.2).



Slika 4.2: Površine, določene s podporami, so vidne na sliki v rdeči barvi

Podpore so bile določene z namenom fiksiranja določenih delov orodja v določenih smereh. Tako podpore na spodnji površini orodja fiksirajo celotno orodje in s predpisom ENCASTRE ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$) onemogočajo pomike v vse smeri. Večje površine (na sprednji strani modela) so bile določene s predpisom YSYMM ($U_2=UR_1=UR_3=0$), kar onemogoča pomike v smeri y koordinate. S tem predpisom so bile določene površine vseh treh komponent modela: zgornji in spodnji del ohišja ter trak. Podobno velja za stranske stranice modela, kjer so bili s predpisom XSYMM ($U_1=UR_2=UR_3=0$) prepovedani pomiki v smeri x koordinate. Zadnja vrsta podpore je bila določena na pestičih. Pri njih so bili nezaželeni pomiki ali rotacije v smeri x in y koordinate. Ker sila manifestira samo v smeri z koordinate, je bilo zato smiselno dovoliti pomike v tej smeri. Podpora na pestičih je bila nadomestek vodilne plošče, ki ima vlogo vodenja pestičev s celotno obodno ploskvijo. Tako se izognemo nepotrebnemu konstruiranju vodilne plošče in vpeljevanju le-te v sam model numerične analize. Z določitvijo teh podpor pa je učinek pri numerični analizi enak, kot če bi uporabili vodilno ploščo.

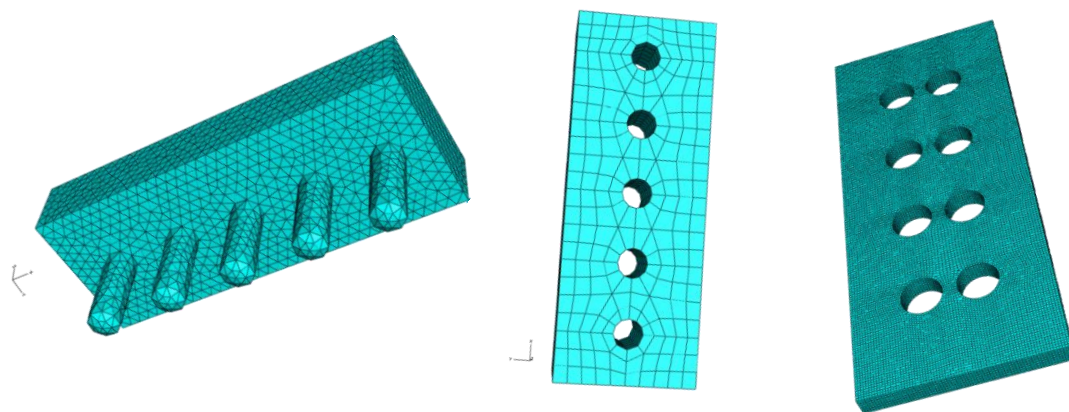
Celoten parametričen model vsebuje že prej omenjene tri komponente: zgornji in spodnji del ohišja ter trak. Da se lahko izvede numerična analiza, je potrebno v programu Abaqus določiti še kontaktne površine ali »interactions« med komponentami. Te so izrednega pomena, kajti rezultati primerjalnih napetosti so posledica sledi stika pestičev na traku. Tri komponente so bile tako med seboj povezane z dvema območjema kontaktnih površin. Ena je bila med pestiči in trakom, druga pa med trakom in spodnjim delom ohišja. Pri tem je vedno ena glavna ploskev ali »master surface«, druga pa podrejena ali »slave surface«. V primeru določanja obeh kontaktnih površin je bil trak vedno določen s »slave surface«, ker nas zanimajo razmere na traku, in ker je tam tudi gostota mreže končnih elementov večja kot na orodju.



Slika 4.3: Kontaktne površine med pestiči in trakom

4.2 Mreženje modela orodja

Zadnji korak je bil postopek mreženja modela z linearnimi elementi. Ti so lahko oblike heksaedrov ali tetraedrov. Priprava modela na mreženje zajema delitev komponente modela orodja na odseke z vstavljanjem delitvenih ravnin. S pravilno delitvijo omogočimo, da mreža postane strukturirana z vsebnostjo linearnih heksaedričnih elementov (primer traku in spodnjega dela ohišja na sliki 4.4). Kadar zaradi nepravilnih oblik z delitvenimi ravninami ni mogoče priti do strukturirane mreže (ali pa bi bilo potrebnih preveč delitvenih ravnin, kar je zamudno), se je potrebno zadovoljiti z linearnimi elementi tetraedričnih oblik (primer zgornjega dela orodja na sliki 4.4). V tem primeru oblika elementov v zgornjem delu orodja nima velikega pomena, kajti bolj pomembno je bilo pravilno mreženje modela traku.

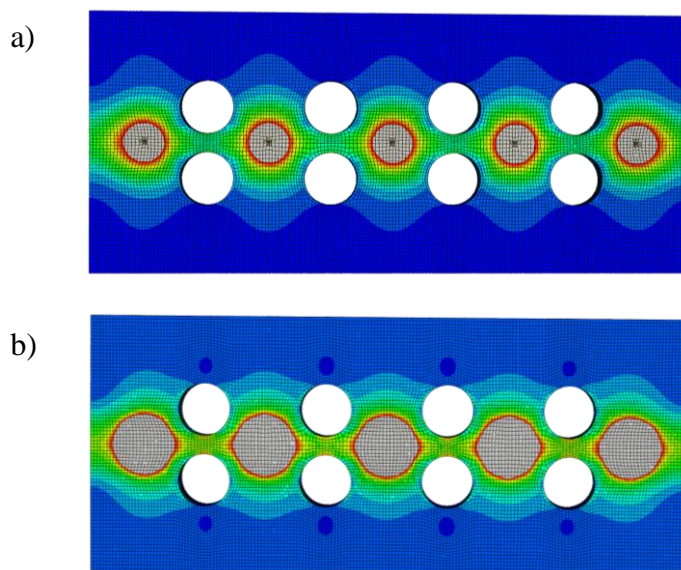


Slika 4.4: Mreženje vseh treh komponent modela

Zraven oblike elementov je pomembna še njihova gostota. Gostoto mreže je v programu Abaqus možno določiti z velikostjo elementa. Večji ko bo element, redkejša bo mreža in obratno. Za komponente modela so bile predpisane naslednje vrednosti: 7 - zgornji del ohišja, 10 - spodnji del ohišja in 1,2 - trak. Vrednosti so izražene v milimetrih. Razlog, zakaj je mreža na traku tako gosta, je očitna, kajti trak je predmet opazovanja. Bolj ko je fina mreža, boljši in kakovostnejši so rezultati. Na orodjih pa ni posebnega poudarka, razen zgornje ohišje je namenoma zamreženo z vrednostjo 7, ker se pri tej vrednosti ustvari dovolj fina mreža za učinkovito oblikovanje pestičev. Vendar je vseeno pri gostoti mreže potrebno narediti kompromis. Ker pri numeričnem preračunu igra pomembno vlogo zmogljivost računalnika (število procesorjev, njihova moč, količina navideznega pomnilnika itd.), je gostota mreže omejena in potrebno je narediti kompenzacijo med finostjo mreže ter računskim časom. Bolj fina je mreža, daljši je računski čas in obratno. Preračuni so trajali v povprečju 20 minut. Mreženje modela je zadnji korak v pripravi na preračun. Sledijo analize numeričnega preračuna.

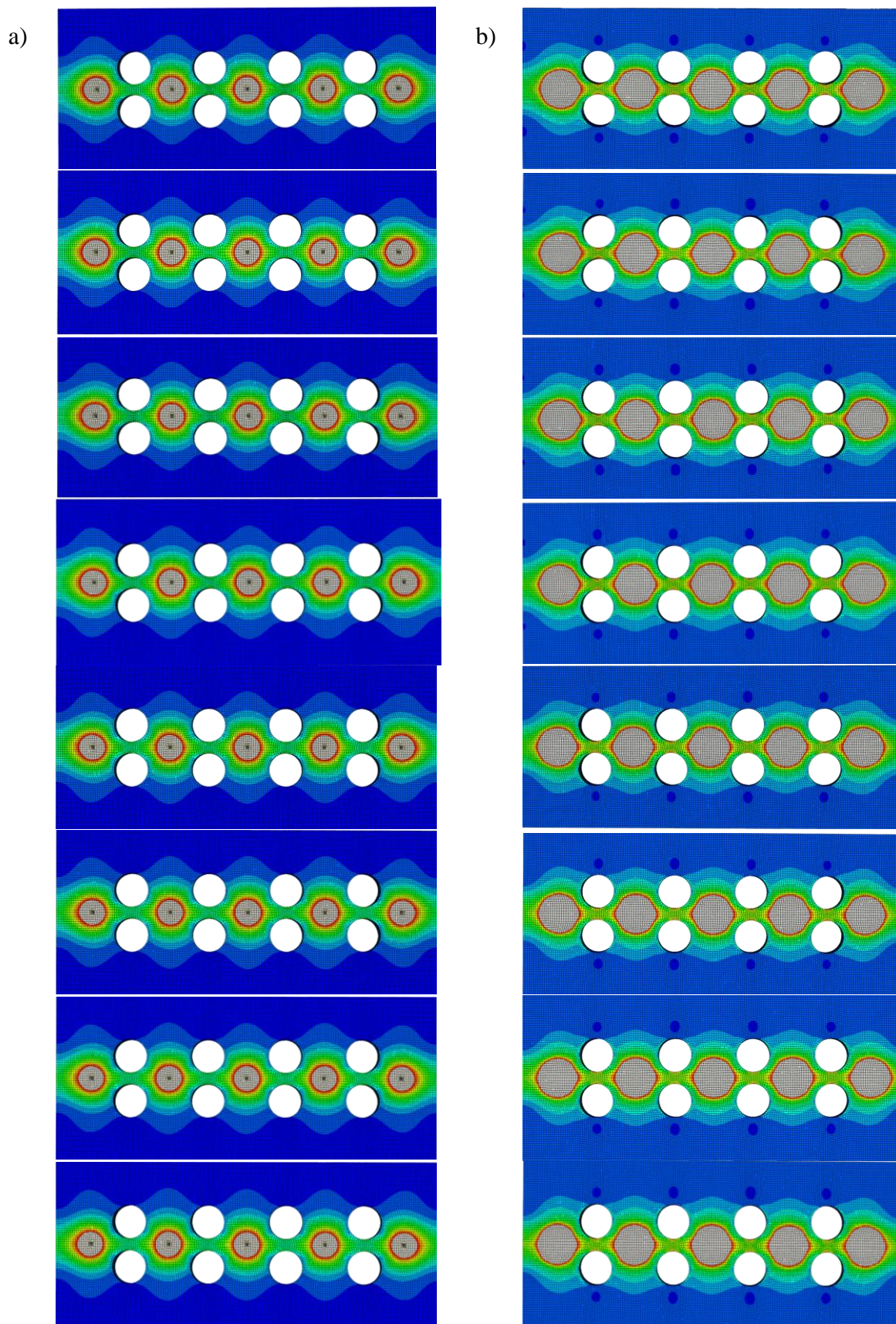
4.3 Rezultati analiz

Na podlagi parametričnega modela, ki je bil kasneje predpisan z vsemi robnimi pogoji in zamrežen, so se izvedle numerične analize. Vsega skupaj je bilo uspešno izvedenih 11 numeričnih analiz. Prva analiza je bila izvedena s postavitvijo pestičev, ki jo trenutno uporabljajo v proizvodnji. Gre za orodje, kjer je razdalja med dvema pestičema določena s faktorjem odreza 0,6734. Tako sta zunanja pestiča oddaljena od roba za 10,08 mm, kakor so tudi navajali viri. Podatek o obremenitvi, ki je bil predpisan v velikosti 9 MPa (slika 4.1), je le približna vrednost, vzeta na podlagi prejšnjih analiz. Podatka o dejanski obremenitvi ni bilo mogoče dobiti. Iz tega razloga je bil primer s faktorjem odreza 0,6734 vzet za kontrolni vzorec, na podlagi katerega se bodo primerjali ostali rezultati preračunov. Podatek, ki je prav tako pomemben, določa, da je minimalna oddaljenost od roba večja ali enaka debelini traku. Privzeti kontrolni vzorec je tako na meji minimalne razdalje. Zato je bilo smiselno izvesti analize, ki imajo razdalje med pestiči določene s faktorjem odreza manjšim od 0,6734. Spreminjanje faktorja odreza s korakom 0,01 je nanese 8 numeričnih analiz v območju od 0,60 do 0,67. Problem, ki se dejansko pojavlja v proizvodnji, je pri vodenju traka skozi orodje z vodilnimi letvami. Te imajo 2 mm zračnosti na vsaki strani, ki preprečuje, da bi se trak zagozdil v orodju. Zračnost ima pa tudi negativne posledice, kajti dopušča, da se trak premika v levo ali desno stran za kar 2 mm. Seveda ob predpostavki, da je trak idealne širine 223 mm. Ob manjši širini traka je tako primerno večja zračnost v vodilni letvi. Zato je bilo smiselno narediti še analize pri faktorju odreza 0,6734 z zamikom traku za 1 in 2 mm.



Slika 4.5: Analiza primerjalnih napetosti po von Mises s faktorjem odreza 0,6734:

a) spredaj in b) zadaj



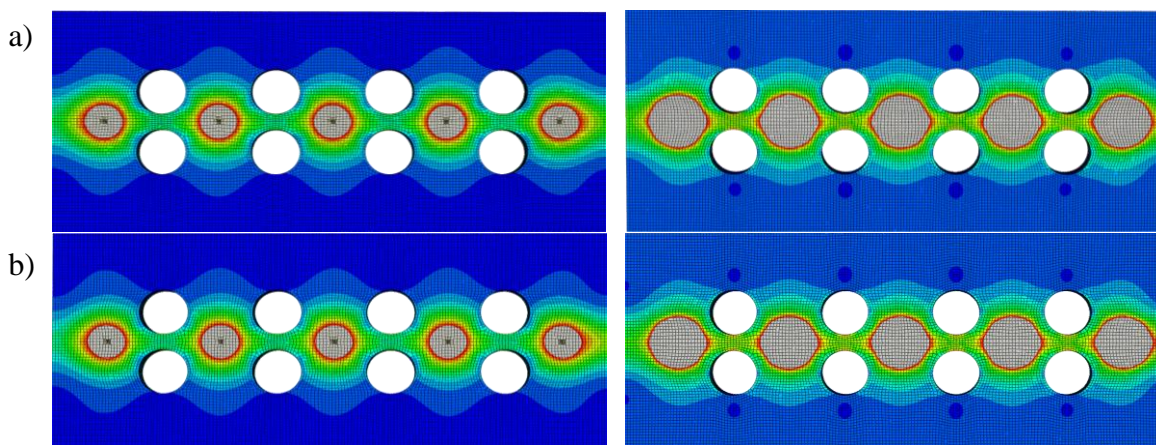
Slika 4.6: Rezultati osmih analiz primerjalnih napetosti po von Mises s faktorji od 0,60 do 0,67: a) spredaj in b) zadaj

Narejenih je bilo osem analiz, s faktorji v območju od 0,60 do 0,67. Rezultati so bili zelo zanimivi. Kot je bilo predvideno, je bil na vseh vzorcih izrazito viden vpliv efekt roba. Opazen je kot območje povečanih koncentracij napetosti ob zunanjem pestiču. Te koncentracije so največje, ko je faktor odreza največji. Takrat je tudi največja možnost nastanka napak na zunanjih izdelkih (rondicah). Nasprotno je ta efekt manjši pri manjšem faktorju odreza, kajti razdalja med pestičem in robom traku je v tem primeru primerno večja. Za lažjo predstavo, razdalja od roba traku do roba pestiča je pri faktorju odreza 0,60 enaka 22,473 mm. Druga skrajnost je razdalja 20,048 mm, ki je ob uporabi faktorja odreza velikosti 0,67. Pomeni, da je razlika v razdalji od roba traku med skrajnima primeroma več kot 2 mm. Drugi pomembne napetosti so na traku med robovi pestičev. Te postanejo bolj izrazite ob zmanjševanju faktorja odreza, kajti takrat se razdalja med pestiči zmanjšuje.

Razlike v napetostih so vidne tudi glede na opazovano stran traku. Površina, ki nalega na zgornjo površino traku, je površina petih pestičev. Zato so največje koncentracije napetosti ravno v točkah, kjer so se pestiči dotaknili traka. V dejanskem proizvodnem procesu pride na teh področjih do postopka izsekovanja in preoblikovanja. Ta področja so obarvana s sivo barvo, torej so presegla mejo plastičnosti, ki je določena za lahke kovine okrog 140 MPa. Ustvarjene so bile plastične deformacije. Rdeča področja so v območju 120–140 MPa in nanje je prav tako potrebno polagati veliko pozornosti, ker so po vrednosti blizu meje plastičnosti. Oranžna, rumena in zelena barva pa označujeta področja, v katerih so napetosti razreda velikosti 47–100 MPa. Te napetosti niso nevarne za plastično preoblikovanje, temveč dajejo smernice širjenja napetosti. Na podlagi teh barv je možno videti efekt roba, ki ima vpliv na zunanja pestiča.

Podobna slika je na spodnji strani traka, ki pa je rahlo svetlejših odtenkov barv. Vzrok za to je večja naležna površina spodnjega ohišja orodja napram pestičem na zgornji strani. Spodnje ohišje orodja deluje s celotno njegovo površino v nasprotni smeri izvajanja obremenitve. Zato je na spodnji površini večje področje plastičnih deformacij in napetosti, ki lahko povzročijo trajno deformacijo. Tako je na spodnji strani bolje razviden efekt roba. Prav tako so ob zmanjšanju faktorja odreza bolj razvidne koncentracije napetosti med pestiči.

Sledila je še druga analiza, ki je obravnavala primera, kadar trak ni v idealnem položaju v orodju. Orodje z vodilnima letvama dopušča pomike traku 2 mm na vsako stran. Zato sta bili narejeni še dve analizi, kjer se je izkazalo, da so rezultati lahko zaskrbljujoči. V nobenem primeru od prejšnjih osmih analiz, ni prišlo do tako velikega porasta napetosti okrog roba traku kot v teh dveh primerih. Oba primera sta bila narejena pri faktorju odreza 0,6734, ki ga trenutno uporabljajo v podjetju (slika 4.7).



Slika 4.7: Rezultati analiz primerjalnih napetosti po von Mises s faktorjem 0,6734 pri zamiku za: a) 1mm in b) 2 mm

Slike prikazujejo zgornjo in spodnjo stran traku, ki sta bili posneti po končani numerični analizi. Zaradi pomika traku za 1 mm oziroma 2 mm na eno stran, so napetosti na desni strani traku večje kot napetosti na levi strani. Povečane koncentracije napetosti je tako mogoče opaziti okrog zunanjega, desnega pestiča. V obeh primerih je področje rdeče barve znatno preoblikovano in napetosti v tem območju so v obliki konice. Ravno te napetosti so najverjetnejši povzročitelj nastanka razpok na rondicah. Na levi strani traku pa teh problemov ni. Napetosti med pestiči pa tukaj niso problematične, kajti uporabljen je enak faktor odreza, kot ga trenutno uporabljajo v proizvodnji. S tem sta bili potrjeni tezi, da računalniška simulacija omogoča analizo orodja z manj potrebnega eksperimentalnega dela, in da je računalniška simulacija časovno ugodnejša, saj nam podaja rezultate v fazi konstruiranja. Seveda bi bilo zmotno trditi, da na podlagi analiz ne more priti do napak na rondicah na sredi traku. Ravno nasprotno. Sodeč po raziskavah, ki so bile narejene na Fakulteti za strojništvo v Mariboru, se mehanske lastnosti po širini traku spreminjajo. To ni nič kaj nenavadnega in je več ali manj prisotno pri vsakem traku, ki je izdelan s postopkom valjanja. Mehanske lastnosti se tako slabšajo od roba proti notranjosti traku. Pri tem sta pomembna pokazatelja napetost tečenja R_p in natezna trdnost R_m . Tako je napetost tečenja R_p na robu razred velikosti 90 MPa in na sredini pa 80 Mpa. Podobne razlike so bile pri merjenju natezne trdnosti R_m . Za lažji numerični preračun so bili predpostavljeni idealni pogoji v traku.

Vendar kljub temu lahko naredim zaključek, da je še vedno največji problem rob traku. Ena možnost je odstranitev pestiča. Je najbolj preprosta, vendar iz ekonomskih vidikov nesprejemljiva. Zato bi bilo potrebno, z dodatnimi praktičnimi poskusi, ugotoviti faktor odreza, ki bi bil ustrezen za to orodje. Z numeričnimi preračuni so bili pridobljeni pomembni podatki, ki nakazujejo na področja, kjer se pojavljajo težave ter neizkoriščene možnosti.

5 SKLEP

Na koncu naloge lahko (na podlagi preverjanja tez) ugotovim, da sem dosegel zastavljene cilje.

V teoretičnem delu naloge sem predstavil izsekovalna orodja za izdelavo rondelic. Podal sem informacije o postopku izrezovanja ter sestavi orodja. Prikazani so bili različni načini vodenja orodja, od vodenja z vodilnimi stebri, z vodilno ploščo do kombiniranega vodenja z vodilno ploščo in vodilnimi stebri. Slednjo varianto uporabljajo trenutno v podjetju. Zgradba ter delovanje orodja je predstavljeno preko slik. Pomemben vidik preučevanja so bili tudi pestiči oziroma rezila. Zato je bilo spisano poglavje, ki pojasni zgradbo in obliko glave ter noge pestičev.

Drugi del naloge predstavlja empiričen del. Ta zajema dve večji poglavji. V prvem poglavju je predstavljeno konstruiranje ter določanje parametrov na modelu orodja, izdelanem v programu Catia. Konstruiranje orodja je sprva temeljilo na meritvah izvedenih na vzorcu traku, kasneje pa je bil v veliko pomoč načrt postavitve pestičev na orodju. Ta načrt je določal razdalje med pestiči v eni vrsti, kot tudi razdaljo med dvema vrsticama pestičev. Natančne vrednosti razdalj med pestiči so omogočile izdelavo celotnega modela orodja, ki ga je sestavljalo zgornje in spodnje ohišje ter trak, vstavljen mednje. V nalogi so bile predstavljene prednosti parametričnega modela s spreminjanjem lokalnih in globalnih parametrov. Tako je bilo možno z lokalnima parametroma w (W) in premerom D na enostaven in hiter način spremeniti obliko ter velikost pestiča. Z globalnimi parametri, ki pa so imeli vpliv na celotno orodje, pa je bila predstavljena možnost spreminjanja števila pestičev na orodju. S spreminjanjem tega parametra, se je prav tako spremenilo število lukenj na traku, kakor tudi število lukenj na spodnjem delu ohišja. S tem je bila dokazana prva teza.

V drugem ter tako zadnjem večjem poglavju pa so sledile numerične analize traku. V uvodnem podpoglavju so bile podane informacije o uporabljenih robnih pogojih ter o določitvi mehanskih lastnosti materialov. Z mreženjem modela orodja se je končala priprava orodja za numeričen preračun. Vse skupaj je bilo izvedenih enajst numeričnih preračunov s faktorji odreza od 0,60 do 0,6734. Slednji faktor odreza je bil uporabljen pri dodatnih dveh analizah, ki sta podali rezultate, kadar trak ni v idealni legi in je zamaknjen za milimeter ali dva v eno stran. Rezultati so potrdili domneve, da rob traku preveč vpliva na zunanje rondice, in da se na tem področju pojavljajo povečane koncentracije napetosti. V teh podpoglavjih so bile potrjene še preostale tri teze.

6 LITERATURA IN VIRI

- [1] ABAQUS 6.9, dokumentacija (na računalniku), Dassault Systèmes, 2009.
- [2] CATIA V5R19, dokumentacija (na računalniku), Dassault Systèmes, 2009.
- [3] Pahole Ivo. *Izsekovalna orodja*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2009.
- [4] Ulbin Miran. *Računalniško podprto konstruiranje*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2009.
- [5] Talum d. d. Kidričevo, Rondelice: Dostopno na WWW:
<http://www.talum.si/si/proizvodi/rondelice.php> [29. 6. 2010].
- [6] Talum d. d. Kidričevo, Rondelice: Dostopno na WWW:
http://www.talum.si/si/proizvodi/rondelice_izsekovanje.php [29. 6. 2010].
- [7] Talum d. d. Kidričevo, Rondelice : Dostopno na WWW:
http://www.talum.si/si/proizvodi/rondelice_pakiranje.php [29. 6. 2010].
- [8] Talum d. d. Kidričevo, Rondelice: Dostopno na WWW:
http://www.talum.si/si/proizvodi/rondelice_zarjenje.php [29. 6. 2010].
- [9] Talum d. d. Kidričevo, Rondelice: Dostopno na WWW:
http://www.talum.si/pdf/home/Talum_prospekt.pdf [15. 5. 2010].